

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENRO DE CIENCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**TADEU MACRYNE LIMA CRUZ**

**ESTRATÉGIA DE MONITORAMENTO E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE**  
**IRRIGAÇÃO UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE COMUNICAÇÃO EM REDES DE**  
**SENSORES SEM FIO**

**FORTALEZA**

**2009**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

C965e Cruz, Tadeu Macryne Lima

Estratégia de monitoramento e automação em sistemas de irrigação utilizando dispositivos de comunicação de redes de sensores sem fio/ Tadeu Macryne Lima Cruz, 2009.

84 f. ;il. color. enc.

Orientador: Prof. PhD. Adunias dos Santos Teixeira

Área de concentração: Irrigação e drenagem

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias. Depto. de Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2009.

1. Irrigação 2. Rádio frequência 3. Redes de comunicação I. Teixeira, Adunias dos Santos (orienta.). II. Universidade Federal do Ceará – Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola III. Título.

CDD 630

**TADEU MACRYNE LIMA CRUZ**

**ESTRATÉGIA DE MONITORAMENTO E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE  
IRRIGAÇÃO UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE COMUNICAÇÃO EM REDES DE  
SENSORES SEM FIO**

Dissertação submetida à Coordenação do  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Agrícola, da Universidade Federal do Ceará,  
como requisito parcial para obtenção do grau  
de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Orientador: Prof. Ph.D. Adunias dos Santos  
Teixeira

**FORTALEZA**

**2009**

**TADEU MACRYNE LIMA CRUZ**

**ESTRATÉGIA DE MONITORAMENTO E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE  
IRRIGAÇÃO UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE COMUNICAÇÃO EM REDES DE  
SENSORES SEM FIO**

Dissertação submetida à Coordenação do  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Agrícola, da Universidade Federal do Ceará,  
como requisito parcial para obtenção do grau  
de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de  
concentração: Irrigação e Drenagem

Aprovada em: 30 de outubro de 2009.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. PhD. Adunias dos Santos Teixeira (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra (Conselheiro)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Dr. – Ing. Sérgio Daher (Conselheiro)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Dr. Carlos Alberto Viliotti (Conselheiro)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

A minha querida Alinne Raulino;  
Aos meus queridos pais Goret e Moreira;  
Aos meus irmãos Tército e Thiago e  
A minha querida avó Maria Malveira

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, Jesus e Nossa Senhora que nos proporcionam forças para vencer os obstáculos e conquistar os objetivos.

A minha querida Alinne Raulino que esteve sempre do meu lado ajudando a vencer as dificuldades, demonstrando carinho e atenção.

A minha família pela ajuda e incentivo nos estudos, acreditando sempre no meu potencial.

Ao professor Adunias dos Santos Teixeira que tive o prazer de ser seu orientado e pelos conhecimentos compartilhados.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNDECI/BNB). Sem o apoio financeiro destas instituições não seria possível realizar os trabalhos.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial aos professores Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra, Dr. Raimundo Nonato Távora Costa, Dra. Eunice Maia de Andrade, Dr. Omar Jesus Pereira, Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda, Dr. Carlos Alberto Vilioti, Dr. Thales Vinicius de Araújo Viana, Dr. Renildo Luis Mion, Dr. José Carlos de Araújo e ao professor Dr. Sérgio Daher do Departamento de Engenharia Elétrica.

Aos colegas do grupo de pesquisa: Clemilson, Firmino, Alípio, Lúcio, Mário, Paulo, Dimas, Clênio, Mauricélio, Odílio, Simeão, Watylla e Rafaela, e ao morador da casa do lote Alex, por toda ajuda e colaboração para o desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

CRUZ, Tadeu Macryne Lima, Universidade Federal do Ceará. Outubro de 2009. **Estratégia de monitoramento e automação em sistemas de irrigação utilizando dispositivos de comunicação em rede de sensores sem fio.** Orientador: Adunias dos Santos Teixeira. Examinadores: Francisco Marcus Lima Bezerra, Sérgio Daher, Carlos Alberto Viliotti.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver estratégias de monitoramento e automação em sistemas de irrigação utilizando sensores capacitivos FDR para coletar dados do conteúdo de água no solo através de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF). Os sensores capacitivos FDR foram desenvolvidos no Departamento de Engenharia Agrícola (DENA) da UFC. Foram utilizados neste trabalho 14 sensores capacitivos FDR e um deles passou por um processo de calibração em laboratório, onde foi sobreposta uma lâmpada de 100 watts na amostra de solo indeformada para acelerar o secamento do solo. Esta calibração derivou uma equação do tipo potencial. A RSSF utilizada é formada por módulos sensores capazes de comunicar-se entre si por rádio frequência, possuindo um ponto de comunicação final (estação base). O sistema de RSSF foi constituído de 7 módulos sensores, 2 módulos multihops e um módulo mestre conectado ao computador. Cada módulo sensor é constituído pelos seguintes elementos: transceptor TRF 2.4 GHz da Laipac (alcance máximo de 150 m), memória, processador, bateria de 12 volts e dois sensores capacitivos FDR. A RSSF foi instalada em um campo cultivado por milho em estádio avançado de produção (30 DAS). Os sensores capacitivos FDR foram instalados em duas profundidades: 10 cm e 25 cm. Os dados dos módulos sensores eram transmitidos ao módulo mestre através dos 2 módulos multihops. As respostas dos sensores capacitivos FDR foram coletadas pelos módulos sensores todos os dias, pelo período da manhã e da tarde, e o tempo de irrigação foi determinado com base na equação de calibração. As leituras foram coletadas antes e depois das irrigações e o experimento durou aproximadamente 15 dias. Foi realizada uma validação da calibração em campo relacionando as respostas dos sensores capacitivos FDR em tempo real com a umidade volumétrica pelo método padrão de estufa. A RSSF possibilitou que os sensores capacitivos FDR registrassem a variação do teor de água durante os eventos de chuva e irrigações. As comunicações dos módulos sensores foram bem sucedidas, apesar da altura das plantas e as ocorrências das chuvas terem impedido em alguns momentos as transmissões. A equação obtida em laboratório subestimou os valores de umidade volumétrica real, obtida pelo método direto, devido à temperatura que a lâmpada incidiu na amostra de solo durante o processo de calibração. A bateria dos módulos sensores foi o fator mais limitante e requer ajuste no protocolo de comunicação da RSSF para otimizar o consumo. A RSSF mostrou-se um sistema dinâmico e preciso e pode, em conjunto com os sensores capacitivos FDR, auxiliar pesquisadores e produtores na tomada de decisão de irrigação.

**Palavras-chave:** Rádio frequência. Comunicação sem fio. Sensores de umidade do solo.

## ABSTRACT

CRUZ, Tadeu Macryne Lima, Federal University of Ceará. October 2009. **Strategy of monitoring and automation in irrigation systems using communication devices in wireless sensor network**. Advisor: Adunias dos Santos Teixeira. Committee members: Francisco Marcus Lima Bezerra, Sérgio Daher, Carlos Alberto Viliotti.

The goal of this study was to develop strategies for monitoring and automated irrigation systems using FDR capacitance sensors to collect data of water content in the soil through Wireless Sensor Network (WSN). The FDR capacitance sensors were developed in the Department of Agricultural Engineering (DENA) pertain UFC. Were used 14 FDR capacitance sensors and one of them went through a calibration process in the laboratory, witch was superimposed a 100-watt bulb in the soil sample undeformed to accelerate the drying soil. At the end of the calibration we obtained an equation potential model. The WSN is formed sensors nodes can communicate with each other by radio frequency having a communication end point (base station). The WSN system consisted of 9 sensors modules and a master module connected to the PC. Each sensor module consists of the following elements: 2.4 GHz transceiver TRF of company Laipac (maximum range 150 m), memory, processor, 12-volt battery and two FDR capacitance sensors. The WSN was installed in a field of maize crop in an advanced stage of production (30 DAS). The FDR capacitance sensors were installed at two depths: 10 cm and 25 cm. The data from the sensor modules were transmitted to the master module through the 2 modules multihops. The responses of the FDR capacitance sensors were collected every day at the morning and afternoon, and the time of irrigation was determined based on the calibration equation. The responses of the FDR capacitance sensors obtained by WSN were collected before and after irrigation and the experiment lasted 15 days. We performed a validation of the field calibration relating the responses of the FDR capacitance sensors in real time with the water content by gravimetric method. The WSN enabled FDR capacitance sensors recorded the variation of water content during the events of rainfall and irrigation. The communications of sensors modules have been successful, despite the height of plants and occurrences of rainfall have impeded some transmissions. The equation obtained in laboratory underestimated the true values water content obtained by the direct method, due to the temperature that the light bulb emitted on the soil sample during the calibration process. The battery of the sensor modules was the most limiting factor and requires adjustment in the communication protocol of WSN to optimize consumption. The WSN was dynamic and accurate and may, in partnership with FDR capacitance sensors, help researchers and producers in decision-making irrigation.

**Keywords:** Radio frequency. Wireless communication. Soil moisture sensors.

## LISTA DE FIGURAS

|                  |                                                                                                                                                                       |           |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>FIGURA 1</b>  | <b>Elementos básicos de um nodo sensor .....</b>                                                                                                                      | <b>28</b> |
| <b>FIGURA 2</b>  | <b>Padrão de radiação de antena omnidirecional.....</b>                                                                                                               | <b>29</b> |
| <b>FIGURA 3</b>  | <b>Sensor capacitivo FDR.....</b>                                                                                                                                     | <b>37</b> |
| <b>FIGURA 4</b>  | <b>Sensores capacitivos FDR revestidos com resina .....</b>                                                                                                           | <b>37</b> |
| <b>FIGURA 5</b>  | <b>Segmento de PVC contendo amostra de solo indeformada (a) e detalhe, interno e externo, de sua parte inferior (b) .....</b>                                         | <b>38</b> |
| <b>FIGURA 6</b>  | <b>Estrutura utilizada para a calibração com os principais componentes: PVC contendo solo e com o sensor capacitivo FDR inserido; balança e célula de carga .....</b> | <b>40</b> |
| <b>FIGURA 7</b>  | <b>Placa de aquisição de dados.....</b>                                                                                                                               | <b>40</b> |
| <b>FIGURA 8</b>  | <b>Balança de calibração com a lâmpada implementada .....</b>                                                                                                         | <b>41</b> |
| <b>FIGURA 9</b>  | <b>Módulo sensor .....</b>                                                                                                                                            | <b>43</b> |
| <b>FIGURA 10</b> | <b>Rádio sensor .....</b>                                                                                                                                             | <b>44</b> |
| <b>FIGURA 11</b> | <b>Rádio transceptor da Laipac, modelo TRF 24 GHz vista de frente (a) e vista do conector (b) .....</b>                                                               | <b>44</b> |
| <b>FIGURA 12</b> | <b>Sistema de comunicação.....</b>                                                                                                                                    | <b>45</b> |
| <b>FIGURA 13</b> | <b>Desenho esquemático da comunicação dos módulos sensores .....</b>                                                                                                  | <b>46</b> |
| <b>FIGURA 14</b> | <b>Fluxograma do programa de comunicação dos módulos sensores.....</b>                                                                                                | <b>47</b> |
| <b>FIGURA 15</b> | <b>Interface de aquisição e controle da comunicação da rede de sensores sem fio.....</b>                                                                              | <b>48</b> |
| <b>FIGURA 16</b> | <b>Formato de aquisição de dados dos módulos sensores.....</b>                                                                                                        | <b>49</b> |
| <b>FIGURA 17</b> | <b>Módulo sensor instalado no campo.....</b>                                                                                                                          | <b>50</b> |
| <b>FIGURA 18</b> | <b>Croqui da área experimental .....</b>                                                                                                                              | <b>51</b> |
| <b>FIGURA 19</b> | <b>Módulo mestre de coleta de dados.....</b>                                                                                                                          | <b>52</b> |
| <b>FIGURA 20</b> | <b>Planilha de cálculo da irrigação.....</b>                                                                                                                          | <b>53</b> |
| <b>FIGURA 21</b> | <b>Dispersão dos dados do teor de água do solo versus respostas do sensor capacitivo FDR .....</b>                                                                    | <b>55</b> |
| <b>FIGURA 22</b> | <b>Dispersão, em tempo real, dos dados do teor de água do solo versus respostas dos sensores capacitivos FDR a 10 cm de profundidade.....</b>                         | <b>57</b> |
| <b>FIGURA 23</b> | <b>Dispersão, em tempo real, dos dados do teor de água do solo versus respostas dos sensores capacitivos FDR a 25 cm de profundidade.....</b>                         | <b>57</b> |
| <b>FIGURA 24</b> | <b>Dispersão dos valores reais e estimados da umidade do solo com a resposta dos sensores capacitivos FDR a 10 cm de profundidade.....</b>                            | <b>59</b> |
| <b>FIGURA 25</b> | <b>Dispersão dos valores reais e estimados da umidade do solo com a resposta dos sensores capacitivos FDR a 25 cm de profundidade.....</b>                            | <b>59</b> |
| <b>FIGURA 26</b> | <b>Sensores capacitivos FDR retirados do solo .....</b>                                                                                                               | <b>61</b> |
| <b>FIGURA 27</b> | <b>Distribuição dos módulos sensores na área de testes preliminares .....</b>                                                                                         | <b>61</b> |
| <b>FIGURA 28</b> | <b>Disposição de um módulo sensor dentro do plantio de milho.....</b>                                                                                                 | <b>62</b> |
| <b>FIGURA 29</b> | <b>Módulo multihop instalado no campo para testes.....</b>                                                                                                            | <b>63</b> |
| <b>FIGURA 30</b> | <b>Módulos sensores instalados na área de milho com 15 DAS.....</b>                                                                                                   | <b>64</b> |
| <b>FIGURA 31</b> | <b>Coleta de dados de umidade em eventos de chuva .....</b>                                                                                                           | <b>65</b> |
| <b>FIGURA 32</b> | <b>Coleta das repostas dos sensores capacitivos FDR durante a chuva.....</b>                                                                                          | <b>67</b> |
| <b>FIGURA 33</b> | <b>Variação da umidade volumétrica do solo pelo módulo 33 durante o manejo .....</b>                                                                                  | <b>68</b> |
| <b>FIGURA 34</b> | <b>Variação da umidade volumétrica do solo pelo módulo 37 durante o manejo .....</b>                                                                                  | <b>68</b> |

|                  |                                                                                      |           |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>FIGURA 35</b> | <b>Variação da umidade volumétrica do solo pelo módulo 38 durante o manejo .....</b> | <b>69</b> |
| <b>FIGURA 36</b> | <b>Módulos multihops instalados acima da plantação de milho.....</b>                 | <b>71</b> |
| <b>FIGURA 37</b> | <b>Elevação do transceptor acima da plantação de milho.....</b>                      | <b>72</b> |
| <b>FIGURA 38</b> | <b>Dados da queda de tensão da bateria do módulo sensor com o tempo.....</b>         | <b>72</b> |

## **LISTA DE TABELAS**

|                 |                                                                              |           |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>TABELA 1</b> | <b>Constante dielétrica relativa dos componentes do solo.....</b>            | <b>20</b> |
| <b>TABELA 2</b> | <b>Consumo de energia .....</b>                                              | <b>30</b> |
| <b>TABELA 3</b> | <b>Análise física do solo para as duas áreas de 0,33 ha.....</b>             | <b>54</b> |
| <b>TABELA 4</b> | <b>Parâmetros avaliados para a curva de calibração no software SPSS.....</b> | <b>55</b> |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|                    |                                                                       |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>Anatel</b>      | <b>Agência Nacional de Telecomunicações</b>                           |
| <b>dB</b>          | <b>Decibel</b>                                                        |
| <b>CAD</b>         | <b>Conversores Analógicos Digitais</b>                                |
| <b>DAS</b>         | <b>Dias Após Semeadura</b>                                            |
| <b>GPS</b>         | <b>Global Positioning System - Sistema de Posicionamento Global</b>   |
| <b>IBM</b>         | <b>International Business Machine</b>                                 |
| <b>IEEE 802.11</b> | <b>Estabelece normas para a criação e para o uso de redes sem fio</b> |
| <b>ISM</b>         | <b>Industrial, Scientific, and Medical</b>                            |
| <b>PC</b>          | <b>Personal Computer – Computador Pessoal</b>                         |
| <b>PIC</b>         | <b>Peripheral Interface Controllers</b>                               |
| <b>PVC</b>         | <b>Policloreto de vinila</b>                                          |
| <b>RAM</b>         | <b>Random Access Memory – memória de acesso aleatório</b>             |
| <b>ROM</b>         | <b>Read Only Memory – memória exclusiva de leitura</b>                |
| <b>SIG</b>         | <b>Sistema de Informação Geográfica</b>                               |
| <b>SMD</b>         | <b>Componentes de Montagem em Superfície</b>                          |
| <b>SPSS</b>        | <b>Statistical Package for Social Sciences</b>                        |

## SUMÁRIO

|             |                                                                         |           |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>    | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                                  | <b>14</b> |
| <b>2</b>    | <b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                                       | <b>16</b> |
| <b>2.1</b>  | <b>O teor de água e os métodos de determinação .....</b>                | <b>16</b> |
| <b>2.2</b>  | <b>Sensor capacitivo FDR.....</b>                                       | <b>18</b> |
| 2.2.1       | Constante dielétrica.....                                               | 18        |
| 2.2.2       | Capacitância. ....                                                      | 21        |
| <b>2.3</b>  | <b>Irrigação de precisão .....</b>                                      | <b>22</b> |
| <b>2.4</b>  | <b>Automação em irrigação.....</b>                                      | <b>22</b> |
| <b>2.5</b>  | <b>Sistema de aquisição de dados.....</b>                               | <b>23</b> |
| <b>2.6</b>  | <b>Manejo da irrigação utilizando sensores.....</b>                     | <b>23</b> |
| <b>2.7</b>  | <b>Posicionamento dos sensores .....</b>                                | <b>24</b> |
| <b>2.8</b>  | <b>Tecnologia na agricultura.....</b>                                   | <b>25</b> |
| 2.8.1       | Sistemas Embarcados.....                                                | 25        |
| 2.8.2       | Microcontrolador. ....                                                  | 26        |
| 2.8.3       | Comunicação sem fio .....                                               | 27        |
| <b>2.9</b>  | <b>Redes de sensores sem fio (RSSF).....</b>                            | <b>28</b> |
| 2.9.1       | Transceptor.....                                                        | 29        |
| 2.9.2       | Bateria .....                                                           | 30        |
| 2.9.3       | Processador, memória e sensor.....                                      | 30        |
| <b>2.10</b> | <b>Monitoramento e comunicação nas RSSF.....</b>                        | <b>31</b> |
| <b>2.11</b> | <b>Aplicações das Redes de sensores sem fio no campo agrícola .....</b> | <b>33</b> |
| <b>2.12</b> | <b>Restrições da RSSF .....</b>                                         | <b>34</b> |
| <b>3</b>    | <b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                                         | <b>36</b> |
| <b>3.1</b>  | <b>Local de experimento.....</b>                                        | <b>36</b> |
| <b>3.2</b>  | <b>Sistema de irrigação.....</b>                                        | <b>36</b> |
| <b>3.3</b>  | <b>Sensor capacitivo FDR.....</b>                                       | <b>36</b> |
| <b>3.4</b>  | <b>Calibração do sensor capacitivo FDR .....</b>                        | <b>37</b> |
| <b>3.5</b>  | <b>Aplicação da Rede de Sensores Sem Fio .....</b>                      | <b>42</b> |
| 3.5.1       | Características do módulo sensor .....                                  | 42        |
| 3.5.2       | Rádio Sensor.....                                                       | 43        |
| 3.5.3       | Topologia de comunicação.....                                           | 45        |
| 3.5.4       | Protocolo de comunicação.....                                           | 46        |
| 3.5.5       | Software .....                                                          | 47        |
| <b>3.6</b>  | <b>Testes preliminares .....</b>                                        | <b>49</b> |
| <b>3.7</b>  | <b>Instalação da Rede de Sensores Sem Fio.....</b>                      | <b>50</b> |
| <b>3.8</b>  | <b>Validação da calibração em campo .....</b>                           | <b>53</b> |
| <b>4</b>    | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                     | <b>54</b> |
| <b>4.1</b>  | <b>Características físicas do solo .....</b>                            | <b>54</b> |
| <b>4.2</b>  | <b>Calibração de laboratório.....</b>                                   | <b>55</b> |
| <b>4.3</b>  | <b>Testes de laboratório.....</b>                                       | <b>56</b> |
| <b>4.4</b>  | <b>Validação da calibração em campo .....</b>                           | <b>56</b> |
| <b>4.5</b>  | <b>Testes preliminares .....</b>                                        | <b>61</b> |
| <b>4.6</b>  | <b>Acompanhamento pluviométrico .....</b>                               | <b>65</b> |
| <b>4.7</b>  | <b>Monitoramento da irrigação.....</b>                                  | <b>67</b> |
| <b>4.8</b>  | <b>Consumo da bateria .....</b>                                         | <b>72</b> |
| <b>5</b>    | <b>CONCLUSÕES.....</b>                                                  | <b>74</b> |
| <b>6</b>    | <b>RECOMENDAÇÕES .....</b>                                              | <b>75</b> |
|             | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                 | <b>76</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A irrigação é um dos tratos culturais que mais influencia a produção agrícola. Entretanto, para o sucesso econômico dessa atividade é necessário identificar quando, quanto e como irrigar. A definição do momento certo de irrigar, além de proporcionar melhor distribuição no uso da água, poderá ter como resultado, um aumento de produtividade das culturas. Dessa forma, deve-se procurar o melhor critério para proporcionar melhor eficiência de aplicação de água para não ocorrer desperdício, pois a eficiência de uso da água é um parâmetro importante na seleção de métodos de aplicação e manejo da água de irrigação e indica qual a combinação que leva à maior produção com o menor consumo. Entretanto, é um parâmetro muito variável (QUEIROZ et al., 2005). Mas, apesar desta importância, muitos dos usuários não utilizam nenhuma estratégia de uso racional da água aplicada na agricultura, necessitando, portanto, planejar melhores sistemas de manejo de irrigação (MARTINS et al., 2007). E existindo a cobrança pelo uso da água, os que usufruem é que devem ter a maior consciência, já que a água passa a influir nos custos, independente se são prestadores de serviços, indústrias ou agricultores, e ao ter um preço, é considerada como algo valioso devendo ser utilizada racionalmente (AMÂNCIO; BOTELHO; AMÂNCIO, 2006). Contudo, é necessário estabelecer uma tática para determinar o conteúdo de água existente no solo para que então seja monitorado o momento oportuno para decidir o tempo de irrigação.

Existem diversos métodos de determinação do teor de água no solo, porém nenhum ainda é considerado universalmente como o melhor sem que haja um processo de verificação (KLAR, 1988), tendo em vista que a escolha do método dependerá dos objetivos desejados pelo pesquisador ou produtor, da instrumentação disponível, do nível de precisão desejada e outros fatores que possam limitar a sua escolha (MIRANDA e PIRES, 2001). Contudo, existe uma tendência em utilizar sensores para realizar o manejo de irrigação devido os mesmos possibilitar determinação instantânea do conteúdo de água tornando-os mais adequados para indicar o início e a duração da irrigação (TAVARES, 2007). No entanto, tais equipamentos, embora bastante disponíveis, não foram apresentados aos produtores de forma compreensível para possibilitar a adoção dessa tecnologia.

No âmbito das pesquisas, muitos trabalhos são designados para descobrir a melhor relação entre o teor de água no solo e as leituras obtidas pelos equipamentos eletrônicos, buscando-se sempre a melhor precisão. Neste contexto a eletrônica tem contribuído bastante, proporcionando condições e métodos possíveis para mensurar a quantidade de água no solo de modo eficaz. Porém, os registros do teor de água no solo são realizados, ainda, em muitos

casos, por processos manuais, recorrendo-se ao papel ou a data loggers. Para estes últimos, as ligações com as unidades de registros (sensores) obrigam-os a sempre utilizar fios, o que torna pouco econômica a sua instalação, principalmente quando o número de sensores é elevado, o que requer a utilização de grande extensão de cabos (TORRE NETO, 1996).

O avanço da tecnologia proporcionou novas técnicas instrumentais para reduzir a imprecisão, oferecendo ferramentas que possibilitam aplicar e realizar adequadamente os conceitos de irrigação de precisão. Um exemplo desta inovação tecnológica são as redes de sensores sem fio, capazes de monitorar um ambiente ou um fenômeno desejável, sendo uma solução mais flexível e simples do que a tradicional ligação de sensores por fios (RUIZ, 2003). As redes de sensores sem fios podem ser aplicadas em diversas áreas de controle e monitoração, como resultado da integração das tecnologias de sensores, circuitos integrados e redes sem fio, constituindo-se uma ferramenta com recursos cada vez mais práticos e possuindo características estruturais compatíveis com o uso no campo agrícola (LOUREIRO et al., 2003)

Com a intenção de propor uma alternativa de monitoramento e manejo de água no solo, este trabalho teve como objetivo utilizar sensores capacitivos para coletar e transmitir dados via rádio frequência para desenvolver estratégias de automação da irrigação e como objetivos específicos:

1. Definir o melhor intervalo de leitura/aquisição de dados pelos sensores de forma a representar bem o processo de umedecimento/secamento do solo.
2. Desenvolvimento de sistemas para o monitoramento e atuação remota em rede de sensores sem fio.
3. Acompanhamento de sistema de irrigação em tempo real.
4. Avaliação em tempo real da necessidade de manutenção (defeito em sensores, correção de lâmina da água aplicada).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 O teor de água e os métodos de determinação

A quantidade de água presente no solo é extremamente variável com o tempo, aumentando com a chuva ou com a irrigação e diminuindo com a drenagem ou com a evapotranspiração (REICHARDT, 1987). Sendo assim, a determinação do conteúdo de água no solo é essencial para estudos relativos à sua disponibilidade e movimento, bem como obter conhecimento sobre a erosão e o manejo da irrigação (BERNARDO, 1989), além de outros fatores como as práticas culturais e manejo do solo, levando-se também em conta o estágio de desenvolvimento das culturas (PALTINEANU; STARR, 1997).

A umidade do solo é o índice, mais básico, de quantificação da água em uma determinada amostra de solo e é definida como a razão entre a massa de água e a massa de solo seco, denominada umidade em peso, ou a razão entre o volume de água e o volume de solo, denominada umidade em volume (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). Com isso, a importância prática de se entender o comportamento físico do solo para orientar a irrigação está associado ao seu uso e manejo apropriado (REINERT; REICHERT, 2006).

O teor de água existente no solo pode ser estimado tanto de forma direta como indireta. O método direto é realizado comumente pelo método gravimétrico, retirando-se amostras de solo e pesando-as antes e depois de colocadas em uma estufa a uma temperatura de 105°C a 110°C. Já no método indireto a determinação da umidade é baseada nas características físicas e químicas do solo. Existem, por exemplo, os métodos da tensiometria, eletrométricos e os da constante dielétrica.

No método da tensiometria utiliza-se o tensiômetro, que determina diretamente a tensão de água no solo e indiretamente a sua porcentagem de água. O seu princípio de funcionamento é baseado na formação do equilíbrio entre a solução do solo e a água contida no interior do tensiômetro. Como o instrumento é vedado, ocorre a formação do vácuo, a leitura desta pressão negativa fornece o potencial do solo. No entanto, a sua capacidade para leituras é restringida a tensões de 0,75 atm e dessa forma ele somente cobre uma parte da água disponível no solo, em torno de 70 % em solos arenosos e 40 % em argilosos (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

O método eletrométrico utiliza um equipamento responsável pela medida da resistência elétrica do solo e é constituído basicamente de dois eletrodos inseridos em um

bloco poroso, que pode ser de gesso, nylon ou fibra de vidro. Dessa forma, a umidade do solo é medida em função da resistência do solo à passagem de uma corrente elétrica, obtendo-se a resistência por intermédio de uma ponte de Wheatstone e a Lei de Ohm. Sendo assim, solos úmidos oferecem menor resistência que solos secos. A vantagem deste método, segundo Miranda e Pires (2001), é a sua praticidade e rapidez na determinação do teor de água, no entanto, apresenta pequena durabilidade no solo devido à solubilidade do gesso, mesmo quando envolvido por camada protetora de nylon.

No método da constante dielétrica existem dois tipos que determinam o conteúdo de água no solo, a reflectometria no domínio de tempo (TDR) e a reflectometria no domínio de frequência (FDR). A medição em ambos dependerá da permissividade do dielétrico (material isolante) situado entre os eletrodos do equipamento.

O TDR tem como princípio de funcionamento a medida do tempo gasto pelas ondas eletromagnéticas, geralmente na frequência de alguns gigahertz (GHz), quando se propagam do início ao fim de duas ou mais guias de sonda, inseridas no solo. Como o comprimento das sondas é fixo, é possível calcular a velocidade de propagação do sinal, a qual é inversamente proporcional à constante dielétrica do solo. Apesar de vantagens interessantes, este modelo tem sua aplicabilidade, no campo, inviabilizada, pois a variação das curvas de calibração é muito grande (CICHOTA; LIER, 2004). Além disso, o método TDR necessita de casadores de impedância (circuito que realiza a cópia da tensão de sua entrada em sua saída) para aumentar a sensibilidade dos medidores, uma vez que, em situação de solo saturado ou quase saturado ocorre uma atenuação maior do sinal (PEREIRA et al., 2006). Já outros autores como Elaiuy, Sato e Souza (2009), qualificaram o TDR como uma alternativa viável para a obtenção da umidade do solo, pois se mostrou adequado para a faixa de água facilmente disponível.

No método FDR se utiliza o sensor capacitivo. Neste dispositivo um campo elétrico é gerado entre os seus eletrodos, onde o solo funciona como o dielétrico (material isolante) do capacitor (RUTH, 1999). A seguir esta técnica será descrita, apresentando os seus conceitos básicos e detalhes do seu funcionamento.

## 2.2 Sensor capacitivo

O funcionamento do sensor capacitivo é baseado na capacitância elétrica. O seu comportamento é eletrostático, similar ao de um capacitor de placas planas. Portanto, um campo elétrico é formado entre as suas placas e ocorre uma perturbação quando qualquer material entra nesse campo, causando uma variação na oscilação, que se mantém enquanto esse material permanecer dentro do campo elétrico. Qualquer material isolante que preenche o espaço entre as placas de um capacitor é denominado de dielétrico e possui um valor específico, que varia de acordo com a sua composição.

Atualmente os sensores capacitivos vêm sendo usados com bastante ênfase em pesquisas, mas o seu desenvolvimento inicial foi inspirado nos trabalhos de Topp et al. (1980), em que propuseram um modelo matemático baseado em um polinômio do terceiro grau para relacionar umidade do solo à constante dielétrica do mesmo. Em trabalhos recentes Silva et al. (2005) também encontrou uma tendência polinomial de terceiro grau ao relacionar a resposta do sensor capacitivo com conteúdo de água no solo. Porém, outros autores, dentre eles Silva et al. (2007), Oliveira (2008) e Cruz et al. (2009), se depararam com modelos matemáticos baseados em curvas potenciais explicando a relação dos teores de água no solo com a resposta de seus sensores capacitivos. O método da capacitância é uma ótima opção, pois é calibrado com facilidade em laboratório e, além disso, é uma técnica menos dispendiosa comparada ao método TDR, que requer mais conhecimento técnico para sua utilização (MIRANDA et al., 2009).

Para o entendimento melhor do funcionamento dos sensores capacitivos, serão descritos, a seguir, a definição de constante dielétrica e capacitância. Estes dois pontos são fundamentais para que se possa entender o princípio de funcionamento de sensores capacitivos.

### 2.2.1 Constante dielétrica

O dielétrico pode ser definido como uma propriedade do material isolante que preenche todo o espaço entre as placas de um capacitor e é uma propriedade fundamental, que independe da geometria do condutor (RESNICK et al., 1992). De uma maneira ou de outra, qualquer material puro ou composto pode ser definido por suas características físicas (massa, volume, temperatura, umidade, etc.). Desta forma, existe uma equação que identifica a

permissividade de um material ( $\varepsilon$ ) como sendo produto da constante dielétrica relativa ( $\varepsilon_r$ ) deste material com a permissividade do vácuo ( $\varepsilon_0$ ), no estado não deformado (Equação 1), isto é, bem abaixo da ressonância mecânica do material. O valor da permissividade do vácuo ( $\varepsilon_0 = 8,854238837 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ ) foi determinado através da Equação 2.

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot K} \quad (2)$$

sendo:

$\varepsilon$  - permissividade do material ( $\text{F m}^{-1}$ );  $\varepsilon_r$  - constante dielétrica relativa do material ( $\text{F m}^{-1}$ );  $\varepsilon_0$  - permissividade do vácuo ( $\text{F m}^{-1}$ ) e  $K$  - constante eletrostática no vácuo ( $8,9875 \cdot 10^9 \text{ F m}^{-1}$ ).

A permissividade relativa do solo, em sua forma complexa, é composta, ainda, pela constante dielétrica real e um componente imaginário, que é o dielétrico equivalente de perda (KRAUS, 1984 apud LEE et al., 2004), e pode ser demonstrada na Equação 3.

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon_r'' \quad (3)$$

Sendo  $\varepsilon'$  a parte real da permissividade;  $\varepsilon_r''$  a parte imaginária da permissividade e  $j$  uma constante representada por  $\sqrt{-1}$ .

A Tabela 1 mostra os valores de constante dielétrica para o comportamento dielétrico dos constituintes do solo. Note que a constante dielétrica da água possui um valor exorbitante quando comparada aos outros materiais que constituem o solo.

**Tabela 1** - Constante dielétrica relativa dos componentes do solo.

| Componentes do solo | $\epsilon_r$ (F m <sup>-1</sup> ) |
|---------------------|-----------------------------------|
| Ar dos poros        | 1                                 |
| Partículas sólidas  | 3 a 5                             |
| Conteúdo de água    | 81                                |

Fonte: Tommaselli (1997 apud TRINTINALHA et al., 2001).

Como já mencionado anteriormente, a grande diferença nos valores de constante dielétrica entre a água e as partículas do solo torna possível um acompanhamento contínuo do teor de água no solo através do sensor capacitivo. Isto é, ele pode monitorar a umidade do solo com base na variação do dielétrico, já que a mudança deste vai resultar na variação do campo elétrico gerado entre os eletrodos do sensor. E pelo simples fato da variação da constante dielétrica ser diretamente proporcional à variação do teor de água (ZAZUETA; XIN, 1994). Portanto, o teor de água no solo será facilmente determinado, pois, a constante dielétrica da água possui uma ordem de magnitude maior que a do solo e, dessa forma, pequenas modificações no conteúdo de água podem ocasionar mudanças significativas nas propriedades dielétricas do solo.

Para ser mais claro, a constante dielétrica é uma propriedade do material isolante utilizada em capacitores. Por isso, sua ação influirá na capacitância total do dispositivo e a partir do seu efeito, pode-se determinar, indiretamente, o teor de água ao medir a capacitância entre dois eletrodos implantados no perfil de um solo. Se a ação do dielétrico influi na capacitância, então, pode-se com isso dizer que, quanto maior o valor de  $\epsilon_r$ , mais fácil o material será detectado (SIEMENS, 2003).

### 2.2.2 Capacitância

Entende-se por capacitância a quantidade de carga que um capacitor pode armazenar em suas placas, ou seja, é a sua capacidade de armazenamento. Contudo, antes de entrar neste assunto, será designado a seguir o que um capacitor.

Um dispositivo que consegue armazenar energia num campo eletrostático é chamado de capacitor. O seu formato é constituído, basicamente, de dois eletrodos ou placas que armazenam cargas opostas formando um campo elétrico. Essas duas placas são condutoras e separadas pelo dielétrico (material isolante), onde as cargas são armazenadas na superfície das placas, distribuídas uniformemente e mantidas pelo campo elétrico. A propriedade que esse dispositivo têm de armazenar energia elétrica sob a forma de um campo elétrico é denominada de capacitância.

Por esta razão, atribuiu-se uma relação da carga ( $Q$ ), que pode ser armazenada no dispositivo, por unidade de tensão ( $V$ ), quando aplicada no mesmo, para verificar numericamente a capacitância ( $C$ ) (RESNICK et al., 1992). Essa relação está na Equação 4.

Cabe esclarecer as características que influenciam a capacitância, abordadas por alguns autores (RENDE, 1999 apud CARMO; BIAGE, 2002; BULL, 2006), e que podem alterar o valor da capacitância, como a permissividade do material dielétrico entre as placas do capacitor, a distância entre as placas e suas dimensões. A alteração de qualquer um destes fatores repercutirá em maiores ou menores valores de capacitância. Por exemplo, quanto maior a área dessas placas e menor a distância entre elas, maior será a capacitância (HOROWITZ; HILL, 1989; REDONDO; LÍBERO, 1996). Deste ponto de vista, a capacitância pode ser representada, também, pela Equação 5, desde que haja uma tensão constante.

$$C = \frac{Q}{V} \therefore \text{unidade} = \left[ \frac{\text{colomb}}{\text{volt}} \right] = [\text{Farad}] \quad (4)$$

$$C = \varepsilon * \frac{A}{d} \quad (5)$$

em que:

$C$  = capacitância (F);  $\varepsilon$  = permissividade do material ( $\text{F m}^{-1}$ );  $A$  = área das placas ( $\text{m}^2$ );  $d$  = distância entre as placas (m).

### **2.3 Irrigação de precisão**

A irrigação de precisão utiliza tecnologias que permitem aplicar quantidades uniformes de água em locais precisos dentro do perfil do solo, proporcionando tratamentos diferenciais de irrigação focalizando plantas individualmente ou pequenas áreas dentro do campo. A irrigação de precisão vem estabelecendo condições para aperfeiçoar ainda mais o uso eficiente da água. Contudo, somente será viável ao levar em conta alguns pontos fundamentais para torná-la um empreendimento proveitoso, como os sistemas de aquisições de dados aliado a um bom gerenciamento das suas análises e a definição de uma política administrativa (SONKA; BAUER; CHERRY, 1997). Porém, para se alcançar completamente as metas da irrigação de precisão no campo é importante a compreensão da variabilidade temporal e espacial das variáveis do solo (HATFIELD, 2000). Quando administrada de forma correta, proporciona um conjunto de novas tecnologias direcionadas ao manejo da agricultura comercial em larga e média escala (TSCHIEDEL; FERREIRA, 2002).

Apesar disso, a maioria dos usuários da agricultura irrigada não utiliza qualquer tipo de estratégia no manejo de irrigação e o monitoramento automático é ainda incipiente (QUEIROZ et al., 2005). Afinal, a obtenção do sucesso em um sistema de irrigação de precisão está na definição do local e nas metas específicas que se deseja alcançar, que incluem: redução dos custos aplicando apenas a quantidade de água necessária para a irrigação; minimizar os impactos ambientais administrando melhor o recurso; otimizar o valor econômico da água aplicada na irrigação; aperfeiçoar a produção (rendimento da quantidade e qualidade) e economia de água (LEONARDI; ROTH, 2009).

### **2.4 Automação em irrigação**

Nos últimos anos a automação na maioria dos sistemas de irrigação tem ocorrido com grande intensidade. A sua aplicação pode diminuir a mão-de-obra, possibilitar irrigações noturnas sem necessidade de acompanhamento, contribuindo para reduzir a potencia de acionamento e custo de bombeamento, além da precisão nos tempos e turnos de irrigação, o que repercutirá em eficiência na aplicação de água (SUZUKI; HERNADEZ, 1999). Além destas vantagens, Queiroz et al. (2005) enfatizam a possibilidade do manejo automático substituir o manual sem prejuízo algum na produção ou consumo excessivo de água, podendo determinar com precisão as condições de umidade do solo, revertendo em ganhos com

produção e lucratividade. Na verdade, os processos de automação estão em constante evolução para todos os setores, principalmente aqueles que utilizam tecnologia de sensores eletrônicos, e está facilitando a difusão de conhecimentos sobre novas técnicas para o melhor aproveitamento dos recursos naturais (SILVA, 2008). Por esta razão, muitos estão optando por modernizar a agricultura, com tecnologia de automação apropriada, na tentativa de aperfeiçoar os recursos produtivos e tornar a exploração cada vez mais proveitosa.

## **2.5 Sistema de aquisição de dados**

Ao analisar um fenômeno, seja ele físico ou químico, quanto maior o número de dados coletados melhor será a sua avaliação. Isso é possível com o uso de um sistema de aquisição de dados, onde o mesmo tem a possibilidade de armazenar e divulgar, em tempo real, as eventuais respostas coletadas de um determinado equipamento. Os elementos fundamentais que constituem um sistema de aquisição de dados são: condicionadores de sinais; CAD; microcontroladores; interface de comunicação, para a transferência das informações digitais e programa computacional de gerenciamento e processamento de dados (TAYLOR, 1997 apud STEIDLER NETO; ZOLNIER, 2006).

Quando os valores médios são adquiridos por intermédio de um sistema de aquisição de dados, a precisão será muito melhor (CARMO; BIAGE, 2002). Dessa forma, para se obterem melhores avaliações provem, em sua maioria, a aplicação dos sistemas de aquisição de dados. Não é por acaso que tais instrumentos são tão utilizados em controles automáticos devido a sua consistência, que por um lado facilita o gerenciamento automático de vários dispositivos eletrônicos.

## **2.6 Manejo da irrigação utilizando sensores**

O monitoramento do teor de água no solo utilizando sensores tem sido cada vez mais importante na agricultura. Os sensores de umidade são ferramentas muito úteis, pois fornece informações em tempo real do conteúdo de água existente no solo (BREMER, 2003). Embora o objetivo principal seja a conservação dos recursos hídricos, os sensores de umidade também podem ajudar a melhorar a qualidade da água ao evitar aplicações excessivas durante

a irrigação, reduzindo, assim, escoamentos superficiais e diminuindo consequentemente o transporte de pesticidas e nutrientes para o lençol freático (MCCANN; STARR, 2007).

Vários são os tipos de sensores utilizados no manejo de água na agricultura para indicar o momento da irrigação. O sensor capacitivo FDR, por exemplo, que funciona com base no princípio da capacitância, foi o instrumento empregado por Oliveira (2008) para monitorar e controlar a irrigação em um cultivo de melancia. O autor obteve maior eficiência de irrigação, em decorrência da precisão do sensor referido, pois o mesmo foi capaz de acompanhar em tempo real o teor de água no solo e definir o tempo correto de irrigação.

Santos et al. (2008) foram mais além e desenvolveram um sistema de redes de sensores sem fio, de baixo custo, para o monitoramento e controle de irrigação de precisão. Em suas avaliações, os autores obtiveram dados de infiltração de água no solo, adquiridos por dois sensores capacitivos FDR, através da transmissão entre um modulo sensor e o modulo mestre conectado a um PC e evidenciaram o correto funcionamento do sistema podendo ser facilmente instalado em campo.

## **2.7 Posicionamento dos sensores**

O posicionamento do sensor em relação à planta é de fundamental importância e o seu procedimento deve ser muito bem planejado, para que dessa forma o manejo de irrigação seja adequado. Os sensores de umidade devem ser instalados nas regiões em que as variações do conteúdo de água são altamente sensíveis à extração pelas raízes efetivas, pois as respostas dos sensores serão mais precisas e consequentemente a irrigação será aplicada no momento certo (COELHO; SANTOS; AZEVEDO, 2007). Detalhe como este foi examinado por Oliveira (2008), que em seu trabalho observou que a distância entre o emissor e o sensor tem influência direta na resposta deste último e consequentemente no teor de água existente no solo. O autor verificou que quanto maior a distância entre o sensor e o emissor, menor o teor de água e, portanto, maior a necessidade de funcionamento do sistema de irrigação. Pensando nisso Rocha Neto et al. (2009), dimensionaram, através de sensores capacitivos FDR, o comportamento do bulbo molhado estabelecido pelo emissor de um gotejador (vazão de 1,5 L h<sup>-1</sup>; pressão de 8 m.c.a) no perfil de um solo com textura média e evidenciaram que o teor de água concentrou-se mais intensamente nas profundidades de 20 cm a 40 cm e num raio de 2 cm a 15 cm do emissor.

## **2.8 Tecnologia na agricultura**

O avanço da tecnologia refletiu em progresso para muitos setores, inclusive o setor agrícola, contribuindo em vários aspectos. Isto porque, há a ausência de técnicas na agricultura que possibilitem um manejo adequado dos recursos hídricos. A forte ênfase na ação de obter tais técnicas sobre como melhorar o manejo da irrigação teve como decorrência investimentos em novas tecnologias que permitissem controlar o uso das fontes energéticas, sejam elas a água ou a eletricidade, de forma racional e equilibrada, levando em questão, também, a degradação do solo e a conservação do meio ambiente. Afinal, o desenvolvimento da agricultura irrigada exige procedimentos tecnológicos e econômicos para aperfeiçoar o uso da água sem comprometer a disponibilidade nem a qualidade desse recurso (PAZ et al., 2000).

Uma inovação tecnológica que está se estendendo cada vez mais em estudos e pesquisas é a Rede de Sensores Sem Fio (RSSF). As principais características que viabilizaram a tendência foram os sistemas embarcados, os circuitos integrados, a comunicação sem fio e os micro sistemas eletromecânicos (LOUREIRO et al., 2003; RUIZ et al., 2004). Esta tecnologia pode ser aplicada nas áreas de engenharia civil, militares, saúde, no monitoramento ambiental e na agricultura (ILYAS; MAHGOUB, 2005). Neste sentido, serão discutidos a seguir alguns tópicos que repercutiram no itinerário do seu desenvolvimento.

### **2.8.1 Sistemas Embarcados**

Sistema embarcado é uma combinação de hardware e software, partes mecânicas ou outras partes adicionais, projetadas para a execução de funções específicas e em alguns casos podem ser conectadas por algum tipo de rede de comunicações (BARR, 1999). Eles estão presentes em equipamentos como fornos microondas, televisores, telefones celulares, leitores de cartão de crédito, caixas eletrônicas e demais equipamentos que executem algum processo específico. Ao contrário dos computadores, os sistemas embarcados são executados com recursos computacionais limitados, ou seja, com pouca memória e sem a utilização de teclado e tela.

O software escrito para os sistemas embarcados, chamado também de firmware (software embutido que é armazenado como código de objeto dentro de um ROM), são armazenados em uma memória ROM ou flash (RAM-ROM híbrido que pode ser apagado e reescrito sob controle de software), ao invés de um disco rígido. A natureza heterogênea da

maioria dos sistemas embarcados faz dos modelos múltiplos de computação uma necessidade (EDWARDS et al., 1997). Além disso, o desenvolvimento de sistemas embarcados tem adquirido recursos de muita funcionalidade, com o mínimo de hardware e software, agregando muita praticidade aos projetos e tornando viável a implementação de uma grande variedade de equipamentos (LEE, HSIUNG, 2004). Os nodos sensores, unidades remotas que compõem a RSSF, são vistos como um caso especial resultante desta evolução.

### **2.8.2 Microcontrolador**

Entre os vários circuitos integrados existentes, os microcontroladores predominam em sistemas automatizados. O microcontrolador é especificamente projetado para o uso em sistemas embarcados (MICHAEL BARR, 1999) e é um circuito integrado programável que contém todos os componentes de um computador e outros periféricos no mesmo chip (USATEGUI; MARTÍNEZ, 2003). Muitos deles têm sido desenvolvidos de modo a atender aplicações específicas, que exijam um pequeno conjunto de funções e que não necessitem trabalhar com funções matemáticas avançadas. Eles permitem a automatização de diversas tarefas manuais. De acordo com Peatman (2003), a evolução dos microcontroladores foi promovida a partir de duas tendências. Uma é a procura por meios mais baratos de introduzir inteligência nos produtos e a outra está relacionada ao desenvolvimento de soluções para aplicações que envolvam processamentos em intervalos críticos de tempo, como os controles utilizados na engenharia automobilística, que levou ao desenvolvimento de arquiteturas de microcontroladores mais sofisticados e rápidos. A tecnologia dos microchips tem evoluído e aumentado sua linha de opções, partindo dos mais simples e baratos para uma nova geração de componentes dotados de mais recursos. O objetivo desta evolução é atender as necessidades de um crescente conjunto de aplicações. Por isso, os avanços recentes na microeletrônica apontam, para o futuro, a concepção de arquiteturas sensoriais cada vez mais inteligentes (SWART, 2006).

Conforme descrito por Silva (2006), os microcontroladores podem controlar equipamentos ou ser incluídos em diversas unidades de controle como, por exemplo, sistemas autônomos de controle, incêndio, umidade, temperatura, telefonia, automóveis, medicina, máquinas pneumáticas e hidráulicas comandadas, máquinas dispensadoras de produtos, motores e temporizadores. Dentre os microcontroladores mais usuais, que envolve atuações específicas, os da família PIC são os mais conhecidos. Eles possuem dispositivos RISC

(Reduced Instruction Set Computer – Computador com conjunto reduzido de instruções) com arquitetura HARVARD (Barramentos de memória de programa e de memória de dados diferentes) e fluxo de instruções PIPELINE (Enquanto se executa uma determinada instrução, a próxima já está sendo lida), possuindo baixo preço, com uso, praticamente ilimitado e obtendo excelentes características (USATEGUI; MARTÍNEZ, 2003).

### 2.8.3 Comunicação sem fio

Muitos dos sistemas de comunicação realizam a transmissão dos dados via cabos coaxiais ou fibras óticas. Entretanto, existem outros que transmitem os dados pelo ar como é o caso de transmissões de raios infravermelhos, lasers, microonda e rádio. Cada uma destas técnicas pode ser empregada em LAN's (Redes de Áreas Locais, por exemplo, dentro de um edifício) e WAN's (Redes em Áreas amplas, por exemplo, entre edifícios). Porém, existem algumas características importantes que devem ser levadas em conta ao utilizar um sistema de transmissão e recepção via rádio (GOMES, 2004), que são: custos do equipamento (ainda são caros e complexos); níveis de potência do sinal de transmissão; utilização de técnicas analógicas de modulação e multiplexação; variedades de fonte de interferência e ruído; regulamentação pública (a implantação dos serviços de comunicação tem sido limitada por causa do compartilhamento do ar).

A tecnologia de informação sem fio, além de reduzir a complexidade de manutenção e o custo (WANG; ZHANG; WANG, 2006), envolve o uso de dispositivos conectados a uma rede ou a outro aparelho por links de comunicação sem fio, como as redes de telefonia celular ou transmissão de dados via satélite (SACCOL; REINHARD, 2007).

As arquiteturas de comunicação para potências muito baixas, como é o caso das RSSF, apresentam como tecnologias compatíveis as baseadas em rádio frequência (RF) e as óticas. No caso da tecnologia ótica algumas dificuldades são atribuídas a este tipo de comunicação, como necessidade de visada direta com seu nodo parceiro e a exigência de condições atmosféricas favoráveis (BARROS, 2002).

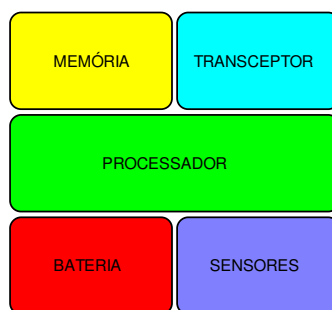
Um dos desafios mais importantes em dispositivos de comunicações RF é a adequação do tamanho da antena à faixa de frequência utilizada. Também é necessário reduzir o consumo de energia com modulação, filtragem e demais funções inerentes ao processo de comunicação. As vantagens da comunicação RF são suas facilidades de uso, integralidade, e

boa oferta de opções comerciais, o que a torna uma plataforma ideal para uso em RSSF (FIGUEIREDO; NAKAMURA, 2003).

## 2.9 Redes de sensores sem fio (RSSF)

As RSSF são redes “ad hoc” em que a comunicação entre os elementos (nodos sensores) é feita através de estações base chamadas de nodo sorvedouro, que constituem uma infra-estrutura de comunicação sem fio (LOUREIRO et al., 2003). As redes “ad hoc” equivalem a WLAN (Wireless LAN), que são sistemas de comunicação de dados flexíveis com ondas eletromagnéticas transmitindo e recebendo dados pelo ar, minimizando a necessidade de conexões com fio (PEREIRA; AMORIM; CASTRO, 2003). Ainda segundo os autores, na rede “ad hoc” não há infra-estrutura fixa e a informação pode ser passada ponto a ponto usando comunicação multihop (múltiplas rotas). Esta última é considerada como uma característica muito importante, no que diz respeito à área de cobertura, pois quando os nodos sensores estão fora de alcance dos nodos sorvedouros, não implica que os mesmos não poderão se comunicar, uma vez que, a existência de nodos intermediários viabilizará a comunicação atuando como roteadores, recebendo e encaminhando os dados (SEIDEL; FERREIRA; OLIVEIRA, 2007).

O objetivo da RSSF é executar uma função cooperativa onde os nodos sensores fornecem dados que são processados pelos nodos sorvedouros. As pequenas dimensões destes nodos sensores acabam estabelecendo limitações nos recursos de seus componentes (RUIZ, 2003) que compreendem o desenvolvimento de um nodo sensor consistindo basicamente em cinco elementos: transceptor, bateria, memória, processador e o sensor para monitorar o fenômeno desejado (LOUREIRO et al., 2003; RUIZ, 2003). A Figura 1 traz um desenho esquemático destes elementos.

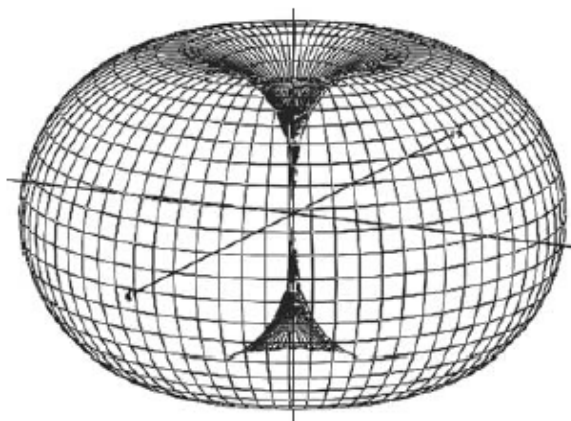


**Figura 1** - Elementos Básicos de um nodo sensor.

### 2.9.1 Transceptor

O transceptor é responsável por conectar o nodo sensor à rede. Ele é um dispositivo de antena utilizado para transmitir e/ou receber ondas de rádio, podendo ser de vários tipos. Os principais, já comentados anteriormente, são: RF, infravermelho e óptico. As antenas são dispositivos passivos onde muitas são projetadas para transmitir seus sinais em todas as direções, conhecidas como antenas omnidirecionais, enquanto outras são designadas para centrar os seus sinais em uma direção específica, conhecidas como antenas direcionais, mas devido à complexidade que as acompanham a sua aplicação requer certo conhecimento e a escolha correta vai depender de cada situação que será de fundamental importância em sistemas de redes sem fio (WHEAT et al., 2001).

Embora não possa ser melhorado o poder de transmissão, a sensibilidade e a perda de sinal de um transceptor, depois que o mesmo é posto em uma aplicação particular, uma melhor taxa de comunicação pode ser alcançada pela escolha de uma boa antena (NEUPANE; RICHIE; WEEKS, 2005). O padrão de radiação define a distribuição de espaço do poder radiada por uma antena e pode ser representado graficamente por uma superfície tridimensional de poder igual ao redor da antena (BARBEAU; KRANAKIS, 2007). A Figura 2 representa o padrão de radiação de uma antena omnidirecional (emissão e recepção num raio de  $360^\circ$ ).



**Figura 2.** Padrão de radiação de antenas omnidirecional.  
Fonte: Barbeau e Kranakis (2007).

### 2.9.2 Bateria

A bateria fornece energia ao dispositivo do nodo sensor e possui capacidade limitada, restringindo a quantidade de energia por toda a rede, por isso, a escolha do tipo de bateria é importante já que pode afetar o desempenho do nodo sensor. Além disso, para controlar o consumo de energia de um nodo sensor devem ser considerados quatro estados básicos: transmissão, recepção, modo ativo (escutar) e modo inativo (dormir), e encontrar a melhor relação que possibilite suas tarefas sem consumir muita energia (ILYAS; MAHGOUB, 2005).

Em RSSF o tempo de vida é limitado por causa do tamanho reduzido dos dispositivos, que recorrem apenas à capacidade disponibilizada pela bateria para desempenhar os estágios de escutar, receber, transmitir e dormir, onde cada uma destas funções vai demandar determinada quantidade de energia e a taxa a qual o trabalho é terminado é medida em Joules por segundo (J/s) ou Watts (BARBEAU; KRANAKIS, 2007). A Tabela 2 lista os valores representativos de consumo de energia, encontrados por Feeney e Nilsson (2001), para cada condição de trabalho a uma taxa de envio de 10 a 20 pacotes por segundo com um IBM ThinkPad 560 FreeBSD 4.0 pelo protocolo WaveLAN IEEE 802.11. Destaque para a condição dormir que oferece potencial em economizar energia.

**Tabela 2** – Consumo de energia.

| Condição   | Consumo (mW) |
|------------|--------------|
| Ativo      | 890          |
| Receber    | 1020         |
| Transmitir | 1400         |
| Dormir     | 70           |

Fonte: Barbeau e Kranakis (2007).

### 2.9.3 Processador, memória e sensor

A memória e o processador contêm dimensões reduzidas restringindo também a capacidade de ambos, isso por causa do tamanho do nodo sensor, mas eles são os responsáveis por todo o processo da rede, permitindo que os nodos sensores processem e armazenem os dados coletados. No caso dos processadores a baixa capacidade é uma

qualidade do dispositivo, uma vez que, o mesmo consome menos energia, aumentando a sua eficiência (RUIZ, 2003).

Um nodo sensor pode ser composto por um ou mais tipos de sensores, podendo ter característica e finalidade diferentes, obtendo respostas elétricas ou eletromagnéticas decorrido das mudanças físicas ocorridas no ambiente monitorado. O sensor é o dispositivo responsável pelo monitoramento físico de um fenômeno ambiental, produzindo uma resposta mensurável a mudanças em condições físicas, tais como temperatura, campo magnético e luz (MEGERIAN et al., 2002), onde as medidas podem também ser transmitidas e observadas através de uma comunicação sem fio (SEIDEL; FERREIRA; OLIVEIRA, 2007).

Para um dado tipo de sensor, o aumento no número de nodos sensores no campo resultará em um melhor desempenho na rede, levando em conta que a precisão de monitoramento aumentará, já que haverá mais sensores para relatar o fenômeno, aumentando a disponibilidade de energia dentro da rede e oferecendo caminhos mais eficientes entre os nodos sensores e a estação base. Entretanto, se os nodos sensores excederem a capacidade da rede, em termos de acesso, e gerar congestionamento nos nodos intermediários, um aumento no número de nodos ativos pode afetar o desempenho da rede de sensores (PEREIRA; AMORIM; CASTRO, 2003). Contudo, deve-se atentar para o manuseio dos sensores sem fio, uma vez que, durante a operação das redes, alguns nodos sensores podem ser danificados, movidos, desligados ou perderem a capacidade de comunicação (SAVVIDES et al., 2005 apud GIACOMIN; VASCONCELOS, 2006).

## **2.10 Monitoramento e comunicação nas RSSF**

As atividades de sensoriamento estão relacionadas com a percepção do ambiente e a coleta de dados e os parâmetros da função de sensoriamento dependem da natureza do dispositivo sensor, estando a cobertura diretamente relacionada à exposição dos mesmos (LOUREIRO et al., 2003). Acompanhando o raciocínio dos autores, a percepção do ambiente inclui a determinação das áreas de sobreposição dos nodos sensores e a descoberta destas áreas pode resultar na alteração do estado de um nodo sensor. Já a coleta de dados tem o objetivo de coletar informações de um local específico, processar estas informações, e transmiti-las até o último ponto de acesso da rede que é a estação base.

Neste âmbito Ruiz (2003) descreve as três principais formas de coleta que comportam o sensoriamento em uma RSSF, que são: periódica, contínua e reativa. Na

primeira os nodos sensores coletam dados sobre o(s) fenômeno(s) em intervalos regulares, enquanto que na segunda os nodos sensores realizam a coleta dos dados continuamente. Na reativa os nós sensores só coletam os dados quando ocorrem eventos de interesse ou quando solicitado pelo observador.

Para o controle de sensoriamento remoto em redes de sensores sem fio são utilizados os módulos híbridos, que são circuitos completos do transmissor e receptor já montados em componentes SMD numa placa muito pequena que pode ser acoplada diretamente na placa principal (GOMES, 2004). Os componentes SMD têm sido amplamente utilizados em equipamentos eletrônicos nos últimos anos, devido ao seu tamanho reduzido comparados com os componentes convencionais.

Um aspecto importante em RSSF é a forma de comunicação. O tipo de comunicação na internet é diferente da existente na rede de sensores sem fio, como “ad hoc” e infra-estrutura (LOUREIRO et al., 2003). No entanto, nesta última, os autores esclarecem que toda a comunicação entre os nodos móveis é realizada através da utilização de estações de suporte a mobilidade (estações rádio base), ou seja, os nodos mesmo próximos entre si estão impossibilitados de efetuar qualquer tipo de comunicação direta. Já na rede “ad hoc” os nodos móveis realizam a comunicação diretamente entre si, sem estação de suporte a mobilidade. Dessa forma os nodos podem se mover arbitrariamente ocorrendo freqüentes mudanças na topologia da rede, porém, na maioria das vezes os nodos de uma rede de sensores são estacionários e a sua topologia é altamente variável por causa do recurso limitado de energia.

Como a RSSF apresenta problemas clássicos de elevada taxa de dados perdidos durante a comunicação e dificuldade de controle de consumo de energia, é necessário a utilização de algoritmos para definir o comportamento do nodo sensor (LOUREIRO et al., 2003). Os algoritmos são rotinas que facilitam a transmissão de dados através das redes de sensores sem fio, pois as rotinas de algoritmos consideram combinações de parâmetros para determinar o caminho mais curto do nodo sensor ao nodo sorvedouro, incluindo o consumo de energia, qualidade e potência de conectividade, falha de nodos, e a habilidade de um nodo remeter os seus dados (EVANS, 2005).

As comunicações de RF em RSSF sofrem muito com as interferências, até mesmo em sistemas que utilizam técnicas sofisticadas, obrigando os nodos sensores a retransmitir os dados, o que muitas vezes ocasiona as perdas destes (EVANS, 2005). Deste ponto de vista é importante sincronizar o tempo em uma rede sensores sem fio para beneficiar a rotina e a conservação de energia, uma vez que, a falta de precisão pode reduzir significativamente o tempo de vida da rede e com esta sincronização do tempo os nodos vão cooperar a transmitir

os dados de uma maneira mais programada, contribuindo com menos colisões e retransmissões, e com isso conservando energia (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

Outro ponto importante no processo de transmissão nas RSSF é a definição de um protocolo de comunicação. O protocolo numa rede de sensores é responsável por dar suporte a toda a comunicação entre os nodos sensores e o seu desempenho pode ser altamente influenciado pelo dinamismo das redes e pelo modelo construído de envio de dados específicos. No desenvolvimento da rede de sensores o seu protocolo deve suportar dois tipos de categorias de comunicação: aplicação e infra-estrutura (PEREIRA; AMORIM; CASTRO, 2003). A comunicação da aplicação relaciona-se à transferência do dado monitorado (ou informação obtida dele) com o objetivo de informar ao observador sobre o fenômeno e há dois modelos: o cooperativo (comunicação dos sensores para atender o interesse do observador) e o não-cooperativo. A infra-estrutura de comunicação refere-se à comunicação necessária para configurar, manter e otimizar a operação. A rede de sensores deve ser capaz de descobrir caminhos para outros sensores de interesse para si próprios e para o observador, desconsiderando a mobilidade ou falha do sensor. Este modelo de comunicação é necessário para manter a rede funcional, assegurando robustez da operação em ambientes dinâmicos e otimizando o desempenho global.

## **2.11 Aplicações das Redes de sensores sem fio no campo agrícola**

Sabe-se que os recursos avançados de eletrônica estão cada vez mais presentes em campos agrícolas, entretanto, a implementação das redes de sensores sem fios é relativamente recente. Um sistema de controle de irrigação em tempo real foi implementado por Pierce et al. (2006). Neste trabalho as unidades remotas, desenvolvidas pelos mesmos, monitoravam e controlavam a irrigação e mostraram-se altamente flexíveis e capazes de integrar séries de redes de monitoramento sem fio na irrigação. Para Monteiro et al. (2008), a implementação das redes de sensores sem fio não foi tão rápido como se imaginaria pelo fato da necessidade de superar alguns fatores limitantes (tolerância, custo, hardware, topologia, manejo e disponibilidade), mesmo assim a rede de sensores pode ser facilmente instalada em um campo aberto.

Giacomin, Vasconcelos e Silva (2008) utilizaram redes de sensores sem fio para quantificar o conteúdo de água da vegetação em um campo cultivado por milho e, apesar da forte influência da vegetação na atenuação da comunicação do sinal, a forma de comunicação

multi-hop demonstrou-se apropriada para a medida dos dados dentro de campos de milho. Em outro caso, Torre Neto e Rabello (2008) desenvolveram um sistema automatizado para controle de irrigação por gotejamento utilizando rede de sensores sem fio para monitorar o teor de água. O mapeamento da umidade do solo foi obtido com dados espaço-temporal através das funcionalidades de SIG. Neste sistema o usuário saberá onde, quando e quanto irrigar, de acordo com as regiões observadas pelas sequências de mapas de umidade do solo adquiridas por imagens de satélite.

Procurando alternativas de monitoramento de umidade do solo e controle automático de sistemas de irrigações, Santos et al. (2008) desenvolveram um sistema de comunicação sem fio utilizando componentes de baixo preço e de fácil disponibilidade no mercado. Santos (2008) testou esta RSSF em um campo agrícola cultivado com melancia coletando dados, via rádio frequência, dos teores de água no solo fornecidos por sensores de umidade FDR. Segundo o autor, a RSSF possibilitou acompanhar em tempo real o processo de variação do conteúdo de água no solo, adquirindo dados em distâncias de 142 metros entre os módulos sensores e o módulo mestre, mostrando-se um sistema bastante flexível para aplicação na agricultura.

## **2.12 Restrições da RSSF**

Vários trabalhos já relataram alguns fatores limitantes em RSSF procedentes de fatores externos e internos, quando expostos em situações extremas. O limite de alcance entre os nodos sensores é uma delas. Alguns modelos de rádios não suportam transmissões de seus sinais em longas distâncias. Em razão desta limitação do alcance de transmissão de nodos, o envio da informação envolve os caminhos multihops através de outros nodos (LOUREIRO et al., 2003). Mas o limite de alcance varia de acordo com os modelos e os seus fabricantes. Pode-se citar, por exemplo, o trabalho realizado por Thelen, Goense e Langendoen et al. (2005), que em suas análises verificaram que a distância máxima de comunicação segura é muito mais curta que a equação de propagação plana indicada pelo fabricante.

Outro fator que pode comprometer o desempenho da RSSF é a altura da plantação. No caso da agricultura, em que os nodos sensores estão situados dentro de um plantio, dependendo da elevação da cultura a transmissão do sinal entre eles pode ser interrompida ou não. É por isso que a complexidade e o alto custo para cobertura em plantas de porte superior aos nodos sensores são muitas vezes o que impedem a adoção rápida da

RSSF (WANG; ZHANG; WANG, 2006). A explicação para isto se deve a diminuição na intensidade do sinal recebido que a presença da vegetação causa. Esta diferença entre os valores medidos é ocasionada principalmente pela atenuação das ondas eletromagnéticas que a água contida no interior das plantas causa (GIACOMIN; VASCONCELOS, 2006). Muitas vezes o aumento da distância e a diferença de elevação produzem uma situação que limita o desempenho do rádio sensor e que para o comportamento da potencia do sinal há combinações de altura e distância que podem melhorar o seu desempenho (SANCHEZ; PIERCE; ELLIOTT, 2007).

Nem todos os sensores são iguais em termos de precisão. Dependendo da localização, um sensor específico pode ter uma melhor qualidade de dados ou uma combinação de sensores pode ministrar uma precisão maior do que outra (PEREIRA; AMORIM; CASTRO, 2003). Nesse sentido, deve-se considerar o local e a cultura a qual a rede de sensores sem fios vai atuar, já que as características de reflectância de cada ambiente agrícola podem afetar a propagação da distância do rádio (ZHANG, 2004). Na verdade, o que o autor quer nos passar é que alguns dos sinais são refletidos ou absorvidos pela vegetação e isto causa uma diferença de cobertura do rádio, resultando, consequentemente, em um impacto na capacidade da rede de sensores sem fio, e para evitar este problema as unidades de rádios devem ser colocadas longe do solo para evitar que fiquem próximas às plantas.

Outro fator limitante e o que requer mais atenção no projeto de uma rede de sensores sem fio é o tempo de vida que a bateria pode oferecer ao nodo sensor da rede. O conhecimento das reservas de energia disponível em cada parte da rede é uma informação importante para a rede de sensores sem fio e por esta razão devem ser propostas técnicas mais eficientes de consumo de energia para obter a quantidade de energia disponível em cada parte da rede (LOUREIRO et al., 2003).

Há ainda outro fator determinante num projeto de RSSF. Na sua elaboração é necessário um grande número de nós sensores, dessa forma o custo de produção torna-se um fator fundamental para viabilizar a utilização da RSSF (TAVARES, 2002). Atualmente existem muitas empresas que comercializam produtos de comunicação sem fio e o preço muitas vezes excedem as expectativas. Par se ter uma idéia um kit de RSSF Mica da Crossbow, contendo uma estação base e seis módulos sensores, está custando 3.200 dólares (CROSSBOW, 2009).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Local de experimento**

O experimento foi conduzido no Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, localizado a 270 km de Fortaleza, cujas coordenadas geográficas são 3°07'13" de latitude Sul e 40°05'13" de longitude Oeste. A precipitação média anual da região é de 900 mm, atingindo anualmente a temperatura mínima de 22,8 °C e máxima de 34,7 °C, com média em torno de 28,1 °C. A insolação na região é de 2.650 h ano<sup>-1</sup> e a velocidade média dos ventos chega a 3,0 m s<sup>-1</sup>. A evaporação média anual é de 1600 mm (DNOCS, 2009).

#### **3.2 Sistema de irrigação**

O sistema de irrigação (ver layout na Figura 18) foi formado por um conjunto motor bomba de 3 CV, uma tubulação principal de 150,0 m com tubos de PVC de 100 mm, uma linha de derivação de 66,0 m com tubos de PVC de 50 mm e 66 linhas laterais de 100 m formadas por tubos de polietileno de 18 mm dotados de gotejadores, a cada 30 cm, com vazão de 1,49 L h<sup>-1</sup> a uma pressão de serviço de 8,0 m.c.a. Esse sistema de irrigação permite, pelo seu dimensionamento, uma irrigação de 0,5 ha por vez.

#### **3.3 Sensor capacitivo FDR**

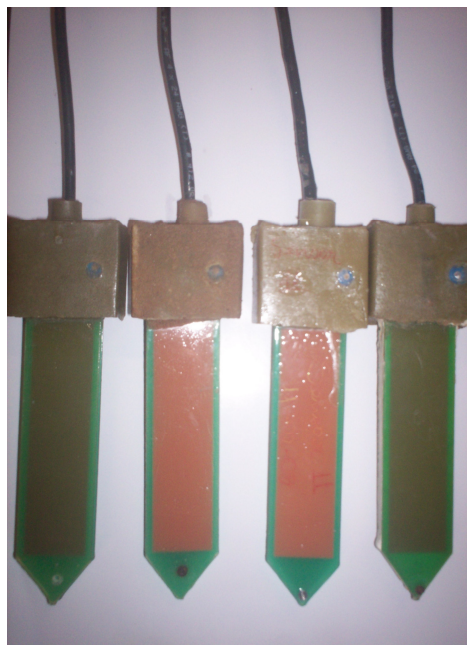
O sensor capacitivo FDR utilizado neste trabalho foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Agrícola (DENA), mais especificamente no Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA). Este sensor já foi utilizado em campo e mostrou-se eficiente ao monitorar a irrigação, acompanhando de forma precisa a umidade em tempo real, possibilitando o perfeito fracionamento da distribuição de água (OLIVEIRA, 2008).

O sensor capacitivo FDR é confeccionado na forma retangular em placas de circuito impresso (fibra de vidro, com uma fina camada de cobre em um dos lados), com espessura, largura e tamanho aproximados de 0,2 cm, 3 cm e 15 cm, respectivamente (Figura 3). Suas placas são posicionadas paralelamente, definindo os eletrodos do capacitor, separadas

em 0,5 cm e cobertas por um verniz, tanto para evitar oxidação das placas de cobre, devido o contato com o solo, como para eliminar o efeito da condutância elétrica da carga através do dielétrico. A área da placa que constitui o campo elétrico é de 25,48 cm<sup>2</sup>. Este sensor é composto de um oscilador, cuja frequência é definida pelo capacitor que pode variar o dielétrico e por um resistor fixo de 10 k $\Omega$ . Toda a área correspondente ao circuito é encapsulada por material composto de resina industrial. Alguns sensores prontos para instalação podem ser observados na Figura 04.



**Figura 3 – Sensor capacitivo FDR**



**Figura 4 – Sensores capacitivos FDR revestidos com resina.**

### 3.4 Calibração do sensor capacitivo FDR

Antes da instalação dos sensores no campo, um sensor passou por um processo de calibração, onde a sua resposta em frequência foi relacionada em umidade a base de peso do solo. Para que este procedimento fosse concretizado, o solo, em questão, foi retirado na forma indeformada da área experimental por meio de um tubo de PVC (Figura 5 a), esse apresentando medidas aproximadas de 0,295 m de altura e 0,255 m de diâmetro, o que proporciona um volume de 0,015 m<sup>3</sup>. Na extremidade inferior deste tubo confeccionou-se um telado de linha nylon, para sustentação do solo, e sobre a mesma fixou-se, internamente, um

pedaço de tecido de malha fina, para facilitar o processo de escoamento de água através deste, sem que ocorresse perda de solo (Figura 5 b). O solo utilizado para a calibração possui classificação textural como areia franca contendo 57,8 % de areia grossa, 29,4 % de areia fina, 2,8 % de silte e 10 % de argila.



**Figura 5** - Segmento de PVC contendo amostra de solo indeformada (a) e detalhe, interno e externo, de sua parte inferior (b).

Inicialmente, a amostra de solo indeformada foi saturada por completo e posta numa balança de braço formada por uma célula de carga de 50 kg (Figura 6). Esta balança foi calibrada adicionando-se lentamente sobre a bandeja peças de metal de massas conhecidas.

A placa de aquisição de dados (Figura 7) foi também produzida e montada no Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA), do Departamento de Engenharia Agrícola (DENA), da UFC. Nesta placa de aquisição de dados foi utilizado um microcontrolador PIC 18F2331 para realizar o programa de coleta de dados, conversão desses dados em contadores e gravação na memória do PC. Optou-se por este microcontrolador, pois é um modelo compacto e possui 768 bytes de memória RAM (MICROCHIP, 2007). A interface de comunicação foi desenvolvida com a utilização do software Borland Builder permitindo a visualização e gravação dos dados de saída do sensor capacitivo FDR, da célula de carga e da temperatura ambiente, que eram coletados pela placa de aquisição de dados, proporcionando o acompanhamento da calibração de forma constante.

A calibração foi efetuada desde a saturação da amostra de solo até a sua secagem parcial. Para atingir esta condição mais rapidamente, uma lâmpada comum de 100 watts foi

utilizada (Figura 8). Dessa forma, o calor foi dissipado diretamente sobre a amostra e permitiu antecipar as condições mais secas do solo.

Ao final da calibração os valores das frequências dos sensores capacitivos FDR foram transformados em respectivos valores de umidade volumétrica ( $\theta$ ), por meio da equação encontrada. É importante lembrar que calibrações de sensores ao ser realizadas em condições de laboratório são bastante representativas, pois preservam as características do solo, como estrutura, densidade, aeração, etc., devido o mesmo permanecer em sua forma original. Referente a isso, Santos et al. (2006) asseguram que é confiável a transferência dos modelos de calibração em laboratório para aplicações práticas em condições de campo.

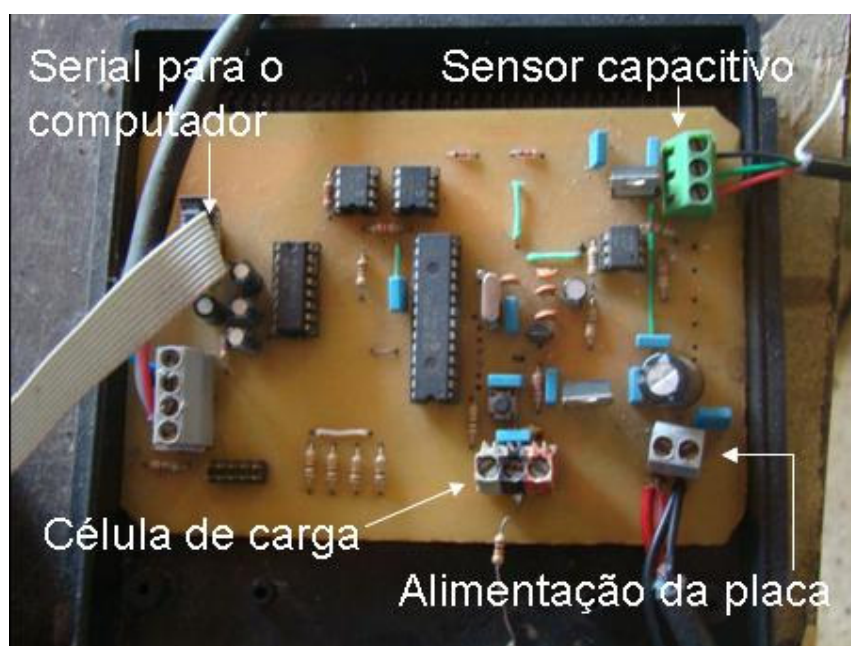
A célula de carga utilizada é da ALFA Instrumentos, com capacidade nominal de 50 kg. O peso nominal é compatível com o da amostra de solo, já que a mesma, quando totalmente saturada, não chegava a 40 kg. Esta célula de carga foi empregada anteriormente em um trabalho feito por Leão (2004), onde o mesmo relatou apenas 0,25 % de erro em suas respostas recorrentes às variações de umidade do solo, advertindo ser apenas as mudanças diurnas de temperatura os causadores deste erro.

O dispositivo da célula de carga funciona como um transdutor de força e peso. O seu princípio de funcionamento consiste basicamente em alterar o comprimento dos “strain gages”, sensores que funcionam como uma ponte de Wheastone, que ao sofrerem algum tipo de deformação, modificam a passagem de corrente elétrica através deles.

O sinal enviado pela célula de carga consiste em tensão, mais precisamente em milivolts (mV). De qualquer forma, o valor do sinal era muito baixo para que a placa conseguisse capturar os dados. Para isso, um amplificador foi inserido entre a saída da célula e a entrada da placa de aquisição de dados. Este artifício permitiu amplificar o sinal em milivolts (mV) para volts (V), para que a placa de aquisição de dados pudesse fazer a leitura do sinal emitido da célula de carga.



**Figura 6** - Estrutura utilizada para a calibração com os principais componentes: PVC contendo solo e com o sensor capacitivo FDR inserido; balança e célula de carga.



**Figura 7** – Placa de aquisição de dados.



**Figura 8** – Balança de calibração com a lâmpada implementada.

Para a determinação da umidade em base de volume, primeiramente foi obtida a densidade do solo, através da relação entre a massa do solo seco e o volume ocupado pela amostra, e posteriormente a umidade a base de massa. As Equações 6, 7 e 8 definem o procedimento de obtenção da umidade em base de volume.

$$d_{\rho} = \frac{m_s}{V_s} \quad (6)$$

$$u = \frac{(m_u - m_s)}{m_s} \quad (7)$$

$$\theta = d_{\rho} \cdot u \quad (8)$$

onde,

$d_{\rho}$  - densidade do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $m_s$  - massa do solo seco (kg);  $V_s$  - volume do solo ( $\text{m}^3$ );  $u$  - umidade do solo a base de massa ( $\text{kg kg}^{-1}$ );  $m_u$  - massa do solo úmido (kg);  $\theta$  - umidade do solo a base de volume ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ).

Os dados de umidade volumétrica foram analisados no software SPSS 13.0 for Windows, onde foram examinados os seguintes modelos: polinomial do 2º grau, exponencial, logaritmo e potencial. Ao final, foi escolhida a curva que apresentou maior coeficiente de determinação e a que melhor se ajustou fisicamente aos dados reais.

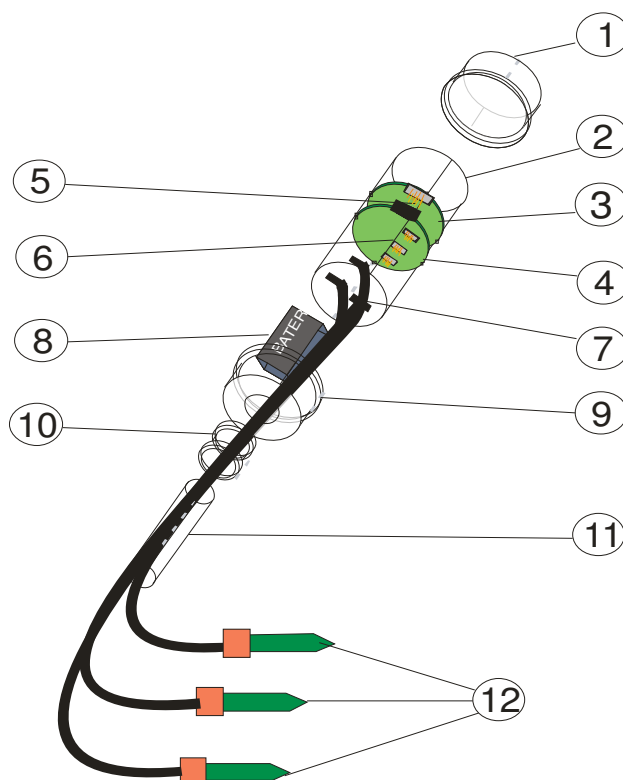
### **3.5 Aplicação da Rede de Sensores Sem Fio**

Para a estratégia do manejo de irrigação foi implementado um sistema de rede de sensores sem fio desenvolvido por Santos et al. (2008). Seu desenvolvimento derivou da necessidade de se economizar água e energia em campos agrícolas no semi-árido através de melhorias nos métodos atuais de administração da irrigação.

#### **3.5.1 Características do módulo sensor**

O módulo sensor (Figura 9) é composto pelo rádio sensor (Figura 10), contendo a unidade de processamento, e os sensores capacitivos FDR.

O módulo sensor desenvolvido e utilizado por Santos et al. (2008), conforme ilustrado na Figura 9 é composto pelos seguintes elementos: transceptor (banda de 1 Kbit/s a 1Mbit/s); memória (128 kbytes a 1 Mbyte); microcontrolador; sensor de umidade; bateria de 12 volts e conexão com outras redes através de gateways. Para o fornecimento de energia deste módulo sensor foi escolhida uma bateria de 12 volts e 1,3 Ah da marca HAZE POWER, cuja mesma é recarregável e constituída de chumbo, ácido sulfúrico e polipropileno, de fácil acesso no mercado. Para o processamento dos comandos do módulo sensor foi utilizado o microcontrolador PIC 18F4550 da Microchip, ideal para baixo consumo de energia e para aplicações de monitoramento que requer conexão periódica com um computador pessoal para transferência de dados, possuindo grande quantidade de memória RAM (MICROCHIP, 2009). O rádio transceptor utilizado foi o modelo TRF 2.4 GHz (Figura 11) da Laipac, com alcance, segundo o fabricante, de 150 metros utilizando taxa de transmissão de 1 Mbps (LAIPAC, 2009). Ele opera em banda de frequência ISM de 2.4 GHz com espalhamento espectral e não necessita de licença da Anatel. Sua escolha decorreu de suas características, que permite alcançar distâncias satisfatórias, possuindo taxa de transmissão de dados compatível com as variáveis a ser monitoradas, proporcionando baixo consumo de energia, além da sua disponibilidade no comércio oferecendo custo de compra reduzido.



|   |                          |    |                                           |
|---|--------------------------|----|-------------------------------------------|
| 1 | Tampa superior (75 mm)   | 7  | Cabos de extensão dos sensores            |
| 2 | Tubo PVC de 75 mm        | 8  | Bateria (12 volts)                        |
| 3 | Unidade de processamento | 9  | Tampa inferior (75 mm)                    |
| 4 | Unidade de sensores      | 10 | Bucha de redução 1 <sub>1/4</sub> para 1" |
| 5 | Conectores das placas    | 11 | Cano de extensão 1"                       |
| 6 | Conectores dos cabos     | 12 | Sensores capacitivos FDR                  |

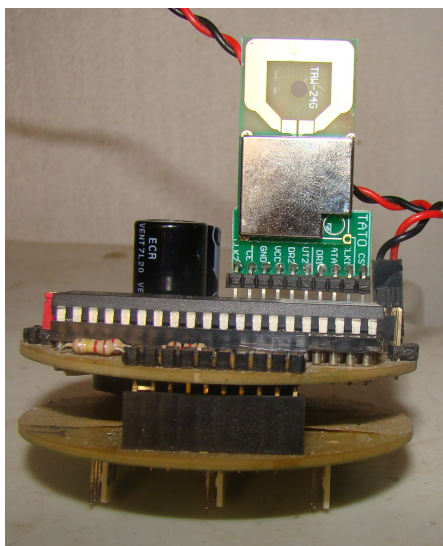
**Figura 9.** Módulo sensor. Fonte: Santos (2008).

### 3.5.2 Rádio Sensor

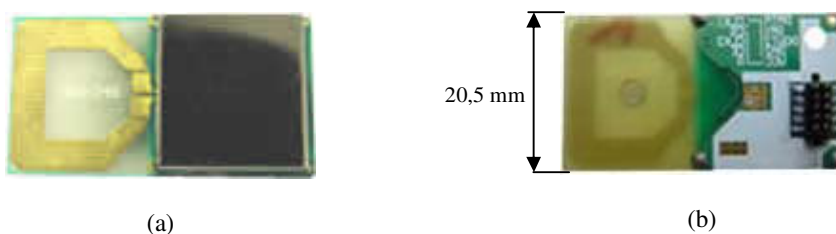
O rádio sensor é composto por duas unidades. Uma de processamento do circuito e outra destinada aos sensores capacitivos FDR. Entretanto, vale considerar o uso alternativo de outros tipos de sensores já que a unidade de sensores é removível. Neste protótipo o controle suporta a conexão de até três sensores capacitivos FDR.

A unidade foi confeccionada no método de foto revelação positiva, em placa de fenolite de uma camada. As placas do rádio sensor foram confeccionadas na forma circular com o objetivo de moldar o protótipo de forma compacta para ser acondicionado em peças de PVC.

O uso dos tubos de PVC como compartimento do circuito traz várias vantagens, a começar pelo fácil manuseio com ferramentas simples, comprovada resistência às intempéries de umidade e radiação do meio rural e ainda garantir uma relativa estética ao produto final. A modularização do circuito prevê ainda a conexão de mais camadas de placas, onde outros sensores, além dos já testados, poderão ser adicionados ao módulo e multiplexados por sua unidade de processamento. Na Figura 10 são mostradas as unidades do rádio sensor conectadas e prontas para ser acondicionadas nos tubos de PVC.



**Figura 10** – Rádio sensor.



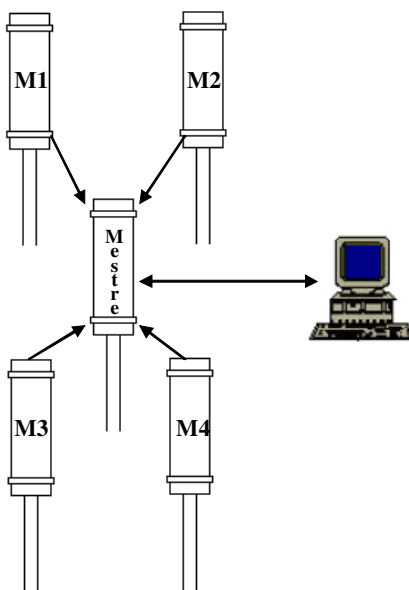
**Figura 11** - Rádio transceptor da Laipac, modelo TRF 2.4 GHz vista de frente (a) e vista do conector (b).

### 3.5.3 Topologia de comunicação

O sistema foi desenvolvido com base numa arquitetura distribuída em que cada unidade remota (módulo sensor) comunica-se via rádio frequência com uma unidade central (Módulo mestre) por rádio frequência. Esta, por sua vez, comunica-se via cabo serial com um computador pessoal que tem a função de supervisionar o arquivo dos dados coletados. O desenho esquemático do diagrama do sistema encontra-se na Figura 12.

Cada módulo sensor envia os dados de resposta do sensor capacitivo FDR e tensão da bateria. O microcontrolador PIC18F4550 possibilita desligar a alimentação de todo o circuito do módulo e minimizar o seu consumo quando no modo “dormir”. Cada módulo sensor possui um conjunto de parâmetros que possibilita o seu reconhecimento pela estação base, quando configurado para funcionar.

A estação base tem a função de recolher todos os dados recebidos dos módulos sensores e enviá-los para um computador pessoal. O transceptor utilizado nesta estação é idêntico ao utilizado nos módulos sensores.



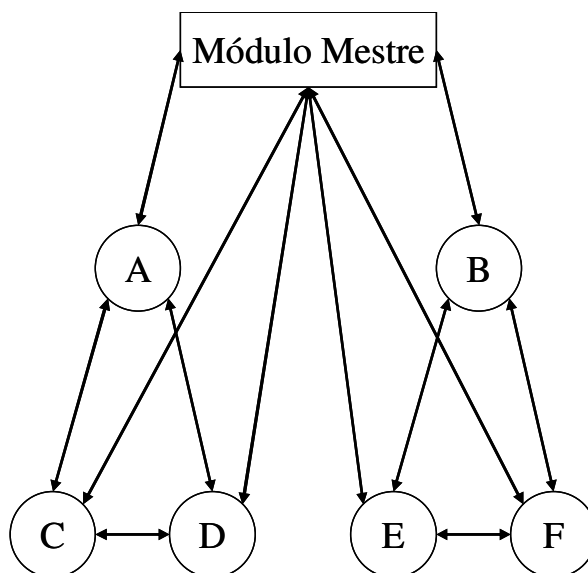
**Figura 12** – Sistema de comunicação.

Os tipos de antenas dipolo em placa de circuito impresso, como o transceptor utilizado neste trabalho, operam em uma faixa de frequência de transmissão de até 2,4 GHz com taxa máxima de potência de 0 dB. Modelos como CC2500, CC2550, CC2510 e CC2511 da Texas Instrument, por exemplo, possuem estas características.

### 3.5.4 Protocolo de comunicação

Nesta etapa foi definida a comunicação entre a estação base e os módulos sensores. Foi investido em um protocolo que tivesse o compromisso de relacionar a limitação de energia com o alcance e banda de frequência. Agindo de forma racionalizada, o processo de comunicação é realizado em rajadas de curta duração, mantendo-se os nodos da rede, na maior parte do tempo, em estado de dormência.

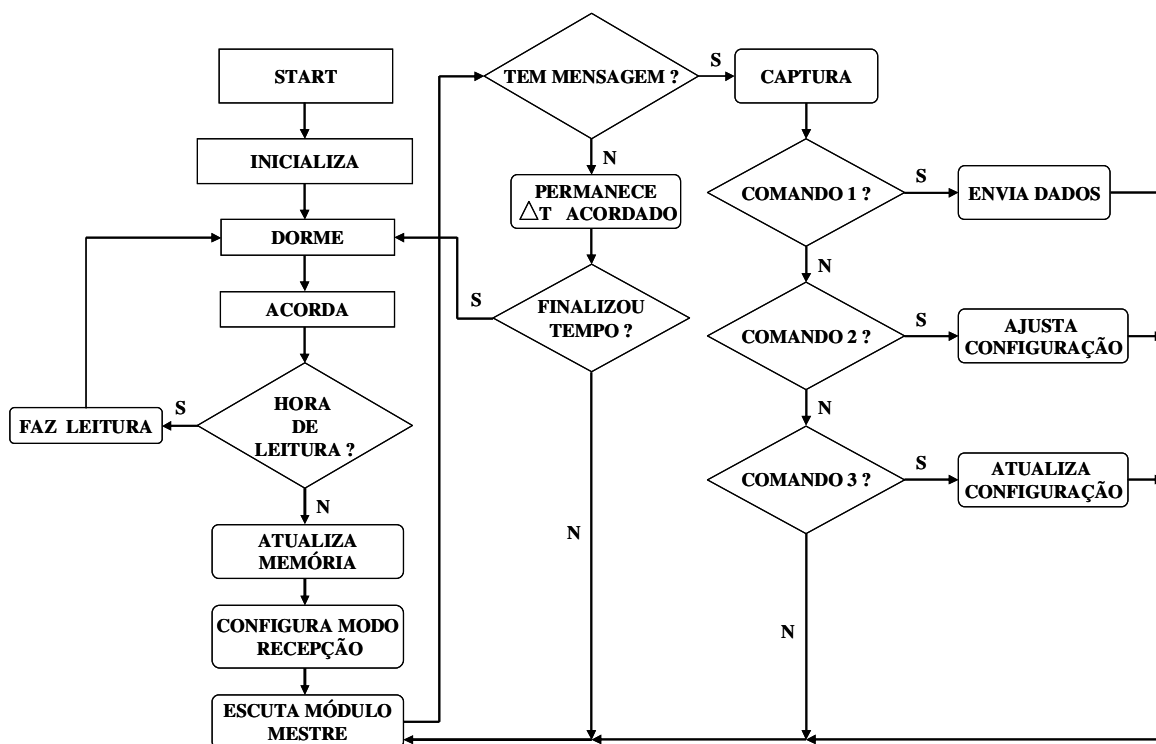
O protocolo é descrito da seguinte maneira: o módulo mestre envia uma mensagem a todos os módulos sensores solicitando os dados e esses ao saírem do modo “dormir” e entrar no modo “acordar”, detectam o pedido e enviam os dados para o módulo mestre ou através de um módulo sensor mais próximo por multihop (múltiplos saltos). Dessa forma, os dados de todos os módulos sensores são remetidos ao destino final e em seguida analisados. A Figura 13 representa o tipo de protocolo de comunicação utilizado neste trabalho. As letras A e B referem-se aos módulos destinados somente como multihops, ou seja, não possuem sensores capacitivos FDR, e as letras C, D, E e F são os módulos sensores que coletam os dados do lugar monitorado e que também podem realizar a função multihop. Os módulos sensores somente enviam os dados diretamente para estação base quando as condições do raio de transmissão e a cobertura da plantação estão favoráveis, caso contrário, o módulo sensor multihop se encarregará desta função, já que o mesmo estará situado em condições mais adequadas.



**Figura 13** – Desenho esquemático da comunicação dos módulos sensores.

### 3.5.5 Software

Duas etapas foram realizadas para definir o processo de envio e recepção do pacote de dados dos módulos sensores. A primeira consistiu no controle do transceptor, onde foram desenvolvidas pequenas rotinas para a contagem de pacotes enviados e recebidos. Nesta etapa foi definido o protocolo de comunicação entre o módulo mestre e os módulos sensores. Foi investido em um protocolo que relacionasse a limitação de energia com o alcance e banda de frequência. Em seguida, realizou-se o processamento do código dos módulos sensores, os quais foram escritos em C++. O desenvolvimento do programa, em linguagem C, foi feito através dos compiladores CCS, Source Boost e de um emulador (SANTOS et al., 2008). Segundo os autores, este kit de desenvolvimento é formado por um compilador e placas dotadas de vários recursos baseadas no microcontrolador 8051, especificamente o modelo AT89S8252 DIP 40 da Atmel com clock de 11 MHz. A segunda etapa foi destinada ao controle das ações de transmissões dos módulos sensores em situações de campo, que se dividem em controle, aquisição e comunicação dos dados. A Figura 14 expõe o fluxograma do programa principal dos módulos sensores.

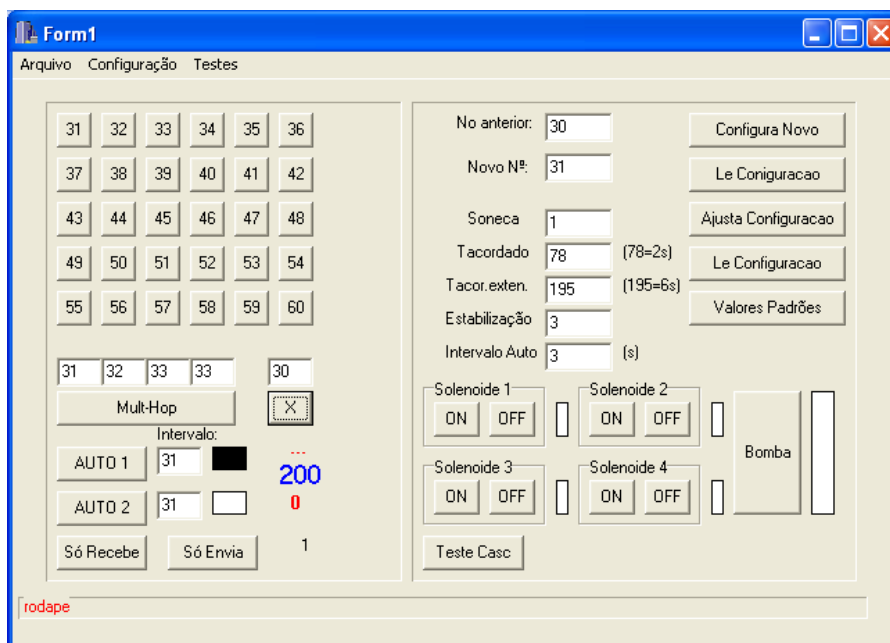


**Figura 14** - Fluxograma do programa de comunicação dos módulos sensores.

O módulo sensor, uma vez colocado para funcionar, permanecerá em um ciclo de comandos de dormir e acordar. Na condição deste último, o módulo sensor verifica se está no instante de realizar a leitura e após a obtenção dos dados volta a dormir. Se não for o momento a memória do processador é atualizada e configurada para o modo recepção, onde o módulo sensor aguarda algum comando de pedido do módulo mestre. Caso isto não ocorra, ele ainda continua acordado escutando o módulo mestre até que este intervalo de tempo seja finalizado e a partir daí volta ao modo dormir. Mas, se o módulo mestre solicitar algum tipo de comando, durante o intervalo de tempo que o módulo sensor encontra-se acordado, o mesmo responderá de acordo com o tipo de tarefa a cumprir, como, por exemplo, enviar os dados ou servir de multihop para conseguir dados de outro módulo sensor.

Os comandos solicitados pelo módulo mestre são definidos através da interface de comunicação. Esta interface de controle e aquisição foi implementada em linguagem C para realizar a comunicação entre o módulo mestre e um computador pessoal do tipo IBM-PC ou compatível, possibilitando a configuração dos módulos remotos via rádio e o armazenamento dos dados adquiridos.

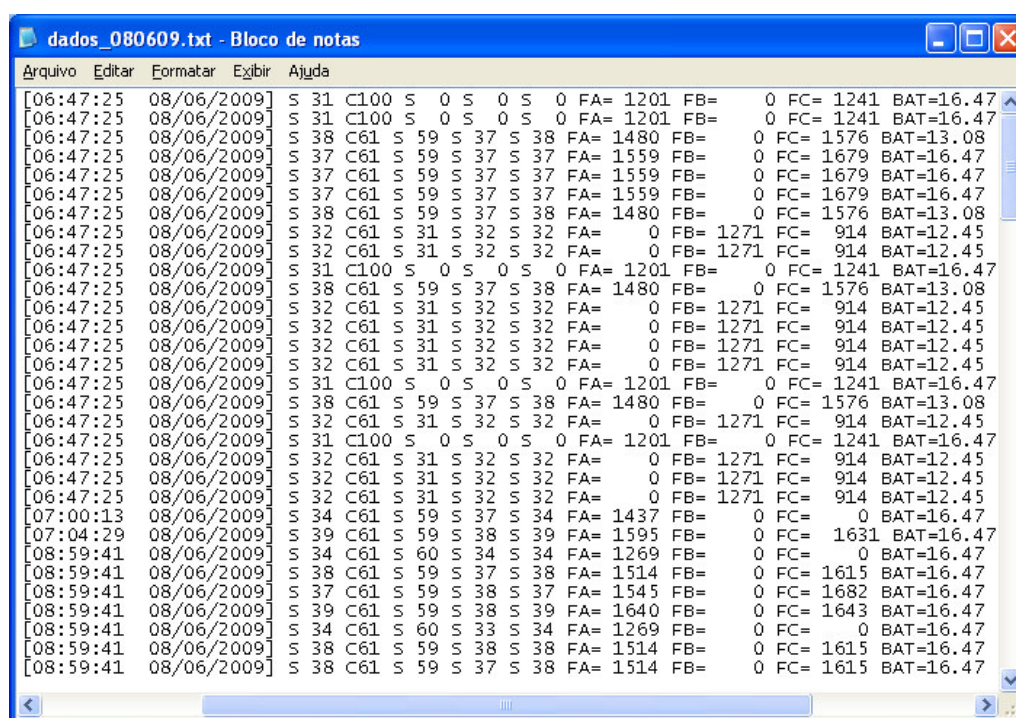
O software Borland Builder foi utilizado para elaborar a interface de comunicação (Figura 15). Quando esta interface foi projetada pretendia-se também controlar o acionamento da eletro bomba e de válvulas tipo latch através dos módulos sensores, o que será aplicado aos trabalhos futuros.



**Figura 15** – Interface de aquisição e controle da comunicação da rede de sensores sem fio.

A interface de comunicação permite configurar os rádios sensores e aquisitar dados em intervalos de tempo que podem variar desde 3 segundos a no máximo 4 minutos. Depois de configurados e instalados no campo, os módulos sensores podem receber os comandos de aquisições de dados através dos botões “AUTO 1” e “AUTO 2”, onde o primeiro coleta os dados dos módulos 31, 32, 33 e 34, enquanto o segundo adquire os dados dos módulos 37, 38 e 39.

Através desta interface de comunicação os dados adquiridos eram salvos em pastas com arquivos na extensão .txt como apresentada na Figura 16. Estes arquivos eram nomeados e organizados por data para análise.



**Figura 16** – Formato de aquisição de dados dos módulos sensores.

### 3.6 Testes preliminares

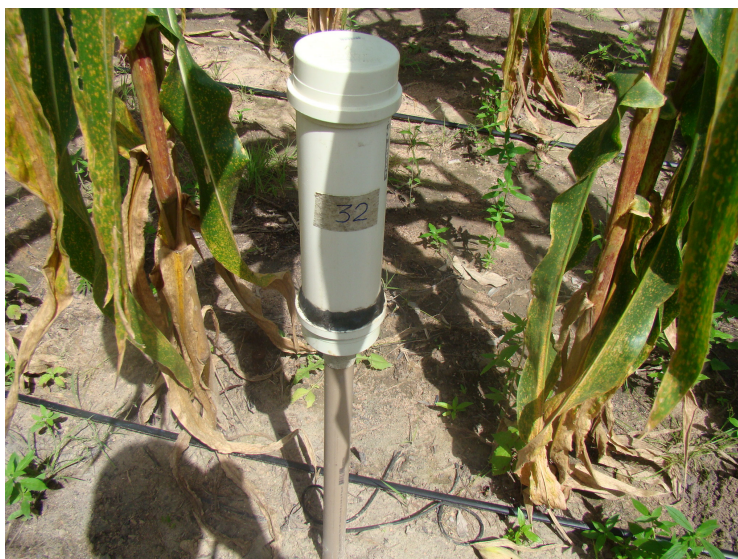
Antes da efetivação do experimento foram testadas as comunicações dos módulos sensores dentro de um campo cultivado com milho em estágio avançado de produção, quando as plantas já alcançavam mais de dois metros de altura. Este teste foi útil para observar o desempenho das transmissões entre os módulos sensores e identificar possíveis topologias de distribuição dos módulos dentro do plantio de milho. A área total do cultivo de milho abrangia aproximadamente 1 ha, onde a irrigação era efetuada em metade por vez. Portanto,

os módulos sensores foram instalados na metade da área, próxima a casa de apoio. Os módulos foram distribuídos à 1/3, aproximadamente, do início da linha de gotejadores. As coordenadas de latitude e longitude referente aos pontos das instalações dos módulos sensores e do módulo mestre foram coletadas por um aparelho GPS manual.

### 3.7 Instalação da Rede de Sensores Sem Fio

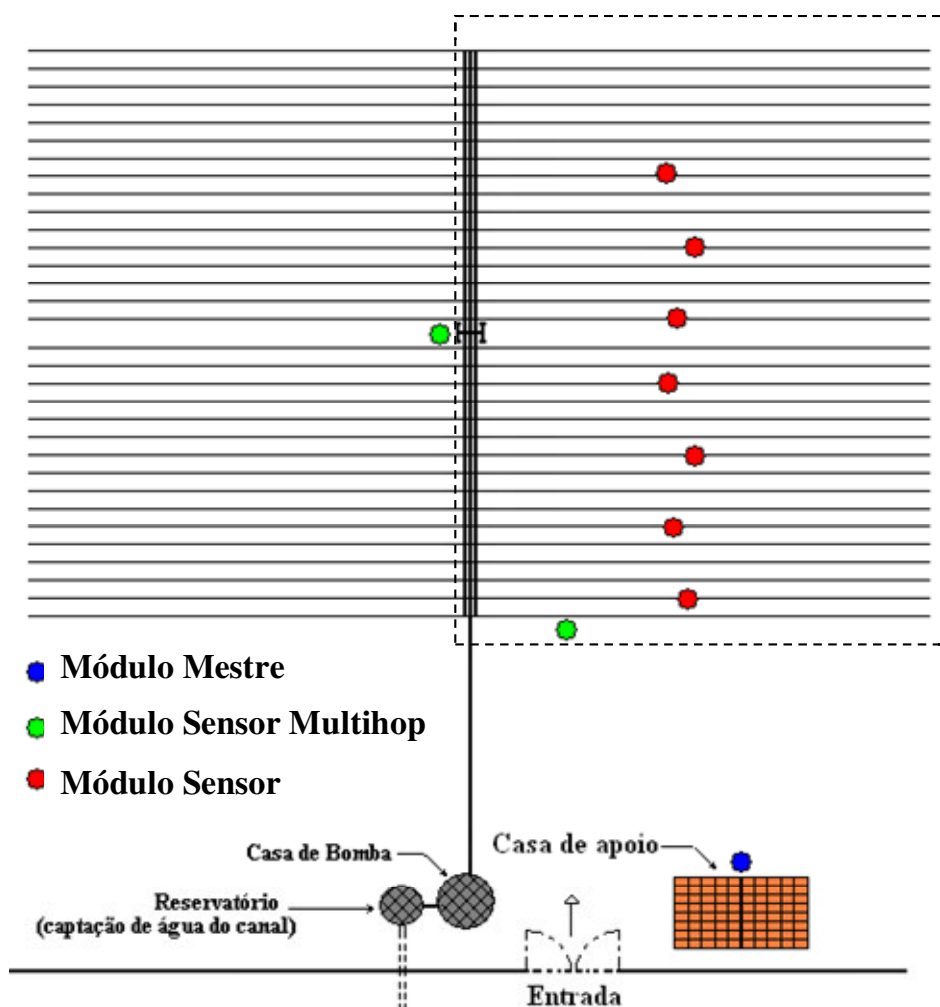
Os módulos sensores foram instalados em um campo cultivado com milho em estágio avançado de produção (30 DAS). Até duas semanas antes da instalação o milho estava suprindo suas necessidades hídricas pela estação chuvosa, onde houve uma pequena estiagem no período que precede o embonecamento do milho, que segundo alguns autores (ALBUQUERQUE e REZENDE, 2008) é uma fase crítica, pois déficits de água nesse período podem provocar redução da produtividade.

Durante a instalação da rede de sensores sem fio, optou-se por uma distribuição, na cultura do milho, que favorecesse melhores condições de comunicações entre os módulos sensores até o seu destino final (estação base). Com isso, 7 módulos sensores foram instalados nas linhas de plantio, espaçados em 8 metros, com cada um comportando dois sensores capacitivos FDR. Estes últimos foram inseridos próximos à planta, aproximadamente 10 cm de distância da base do milho e 5 cm de distância do emissor (Figura 17). O primeiro sensor permanecia a uma profundidade de 10 cm, enquanto o segundo encontrava-se a 25 cm.



**Figura 17** – Módulo sensor instalado no campo.

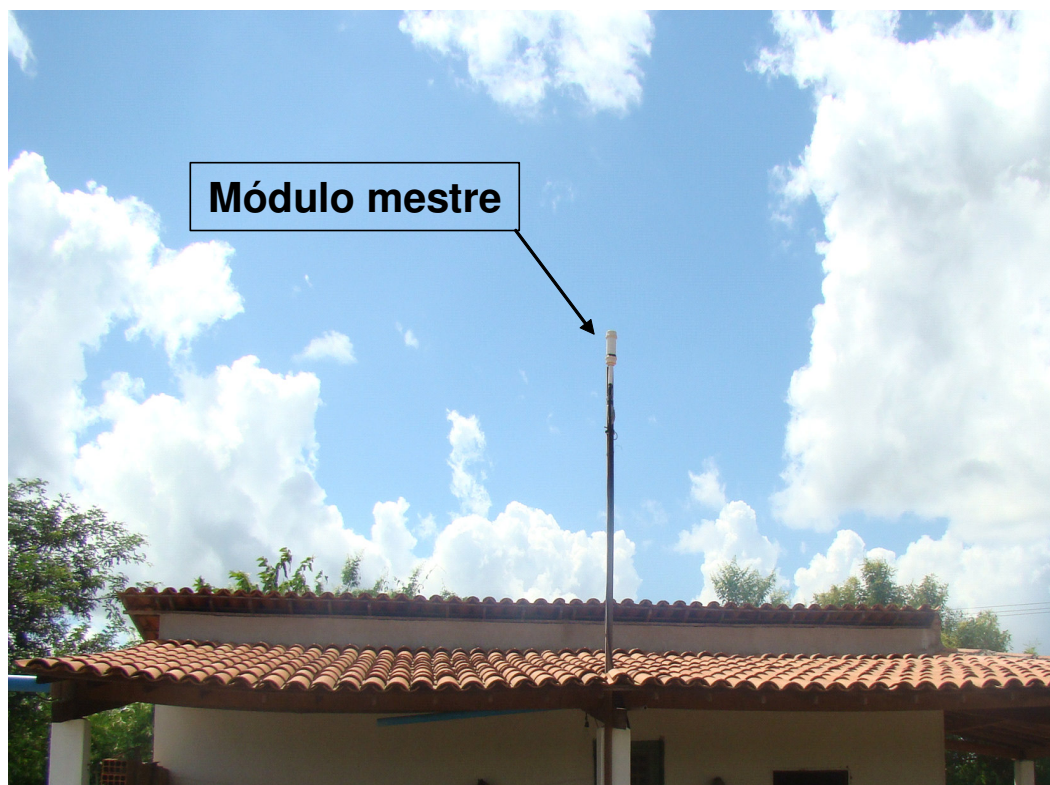
Os módulos sensores foram instalados a 1/3 do início da linha de gotejadores, aproximadamente 35 metros. Um desenho esquemático apresentado na Figura 18 dá uma noção da distribuição dos módulos sensores no campo. Todos os rádios sensores encontravam-se, em média, a 80 cm em relação à superfície do solo. Esta altura limitou-se aos sensores de umidade, que continham comprimentos de cabos de 1,5 metros. A razão deste comprimento é dada às interferências de leituras que ocorrem através dos cabos quando os mesmos possuem dimensões maiores, o que ocasiona erros nas respostas coletadas. Tal influência foi observada por Cruz (2007), que ao testar algumas medidas de comprimento de cabo relacionadas com a resposta fornecida por uma placa de aquisição de dados e por um frequencímetro digital, encontrou um modelo linear ( $R^2 = 0,9972$ ) que melhor identificou os dados reais de respostas dos sensores capacitivos FDR quando o cabo encontrava-se com o comprimento de 1,5 metros.



**Figura 18 - Croqui da área experimental.**

O monitoramento da irrigação iniciou-se no dia 4 de junho de 2009 e foi finalizado no dia 19 de junho de 2009, permanecendo em estado ativo no campo por aproximadamente 15 dias. Todos os dias efetuavam-se duas leituras antes de cada irrigação, sendo que a primeira entre 07h00min e 08h00min e a segunda entre 14h00min e 15h00min. Após os eventos de irrigação, outras leituras eram realizadas para verificar a resposta do sensor capacitivo FDR. Algumas leituras eram realizadas em eventos de chuvas, e estas precipitações foram medidas com um pluviômetro instalado no campo.

Para enviar as respostas dos sensores capacitivos FDR à estação base (Figura 19), os módulos sensores comunicavam-se por meio da função multihop com outros dois módulos destinados apenas para esta função. Depois de concluída as transmissões, a estação base enviava os dados ao PC. O registro destes dados, salvos em .txt, eram posteriormente digitados em uma planilha do programa EXCEL (Figura 20), com os parâmetros necessários para estabelecer o tempo de irrigação.



**Figura 19** – Módulo mestre de coleta de dados.

|    | A         | B     | C | D    | E    | F    | G | H    | I | J    | K | L    | M | N    | O | P | Q | BL    | BM | E |
|----|-----------|-------|---|------|------|------|---|------|---|------|---|------|---|------|---|---|---|-------|----|---|
| 3  |           |       |   |      |      |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |   |   |       |    |   |
| 4  | Dia       | Hora  |   | 31   | 32   | 33   |   | 34   |   | 37   |   | 38   |   | 39   |   |   |   |       |    |   |
| 5  |           |       |   |      |      |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |   |   |       |    |   |
|    |           |       |   |      |      |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |   |   |       |    |   |
| 35 | 5/6/2009  | 07:03 | # | 1212 | 1341 | 1563 |   | 1375 |   | 1579 |   | 1528 |   | 1741 |   |   |   | 24,51 |    |   |
| 36 |           | 10:00 | # | 1186 | 1317 | 1536 |   | 1388 |   | 1533 |   | 1509 |   |      |   |   |   | 22,65 |    |   |
| 37 |           | 13:50 | # | 1201 | 1319 | 1557 |   |      |   | 1565 |   | 1501 |   | 1890 |   |   |   | 24,94 |    |   |
| 38 | 6/6/2009  | 12:55 | # | 1209 | 1322 | 1566 |   |      |   | 1504 |   | 1516 |   |      |   |   |   | 23,01 |    |   |
| 39 |           | 17:00 | # | 1194 | 1188 | 1531 |   | 1306 |   | 1492 |   | 1503 |   |      |   |   |   | 21,01 |    |   |
| 40 |           | 18:00 | # | 1144 | 1133 | 1241 |   | 1256 |   | 1339 |   | 1282 |   |      |   |   |   | 15,93 |    |   |
| 41 | 7/6/2009  | 08:50 | # | 1168 | 1262 |      |   | 1377 |   | 1519 |   | 1507 |   | 1541 |   |   |   | 22,00 |    |   |
| 42 |           | 14:45 | # | 1159 | 1236 |      |   | 1410 |   | 1521 |   | 1473 |   | 1604 |   |   |   | 22,02 |    |   |
| 43 | 8/6/2009  | 07:00 | # | 1201 | 1480 |      |   | 1437 |   | 1559 |   | 1480 |   | 1595 |   |   |   | 24,19 |    |   |
| 44 |           | 16:30 | # | 1212 | 1301 | 1546 |   | 1452 |   | 1471 |   | 1468 |   |      |   |   |   | 22,66 |    |   |
| 45 | 9/6/2009  | 08:05 | # | 1234 | 1323 | 1555 |   | 1365 |   | 1539 |   | 1499 |   | 1642 |   |   |   | 23,93 |    |   |
| 46 |           | 14:35 | # | 1194 | 1292 | 1340 |   | 1176 |   | 1093 |   | 1389 |   |      |   |   |   | 16,38 |    |   |
| 47 | 10/6/2009 | 08:35 | # | 1190 | 1305 | 1296 |   | 1222 |   | 1285 |   | 1427 |   | 1546 |   |   |   | 19,63 |    |   |
| 48 |           | 14:19 | # | 1114 | 1116 | 1054 |   | 942  |   | 1027 |   | 1279 |   | 1109 |   |   |   | 7,92  |    |   |
| 49 |           | 15:00 | # | 1114 | 1112 | 1100 |   | 994  |   | 1006 |   | 1249 |   | 1144 |   |   |   | 8,83  |    |   |
| 50 | 11/6/2009 | 10:22 | # | 1139 | 1264 | 1372 |   |      |   | 1175 |   | 1406 |   |      |   |   |   | 17,44 |    |   |
| 51 |           | 13:40 | # | 1141 |      | 1416 |   |      |   | 1235 |   | 1411 |   |      |   |   |   | 18,58 |    |   |
| 52 |           | 15:19 | # | 1113 | 1080 | 1119 |   | 1041 |   |      |   |      |   |      |   |   |   | 8,30  |    |   |
| 53 |           | 15:51 | # |      |      |      |   |      |   |      |   | 1290 |   | 1404 |   |   |   | 20,82 |    |   |
| 54 | 12/6/2009 | 15:33 | # | 1130 | 1201 | 1299 |   | 1159 |   |      |   | 1414 |   | 1462 |   |   |   | 17,53 |    |   |
| 55 | 15/6/2009 | 14:55 | # | 1239 | 1240 | 1405 |   | 1581 |   |      |   |      |   |      |   |   |   | 21,00 |    |   |
| 56 |           | 15:10 | # |      |      |      |   |      |   | 1625 |   | 1506 |   | 1593 |   |   |   | 27,81 |    |   |
| 57 | 16/6/2009 | 07:05 | # | 1287 | 1217 | 1622 |   | 1610 |   | 1133 |   | 1496 |   | 1470 |   |   |   | 21,94 |    |   |

**Figura 20 - Planilha de cálculo da irrigação.**

### 3.8 Validação da calibração em campo

Durante o experimento foram realizadas comparações das respostas dos sensores capacitivos FDR adquiridas pela RSSF, com o método padrão de estufa. As amostras de solos foram coletadas durante o manejo da irrigação do milho, em posições semelhantes ao local de instalação dos sensores, para determinar o teor de água pelo teste gravimétrico com a finalidade de comparar esses dados com os obtidos pela equação de calibração realizada no laboratório. Assim, as amostras de solo foram retiradas de locais semelhantes às instalações dos sensores, tomando por base a planta ao lado. Este procedimento foi efetuado no período onde ocorria irrigação. Após a colheita do milho, quando a irrigação foi cessada, outras amostras foram removidas para condições mais secas do solo, desta vez adjacente ao sensor, aproximadamente 5 cm de distância.

Imediatamente após a coleta das amostras de solo, em ambos os perfis de profundidades de instalações dos sensores, respectivo a cada módulo sensor, os dados dos sensores eram aquisitados e posteriormente gravados no PC. Ao final, uma análise de regressão foi implementada para verificar a relação do teor de água pelo teste gravimétrico com as respostas dos sensores capacitivos FDR.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Características físicas do solo

As características físicas do solo podem ser visualizadas na Tabela 3. Foram realizadas duas amostragens na área experimental onde foi instalada a RSSF. Cada amostra, A1 e A2, representa um espaço de 0,33 ha. Da primeira área (A1) para segunda área (A2) existe um peno aclone.

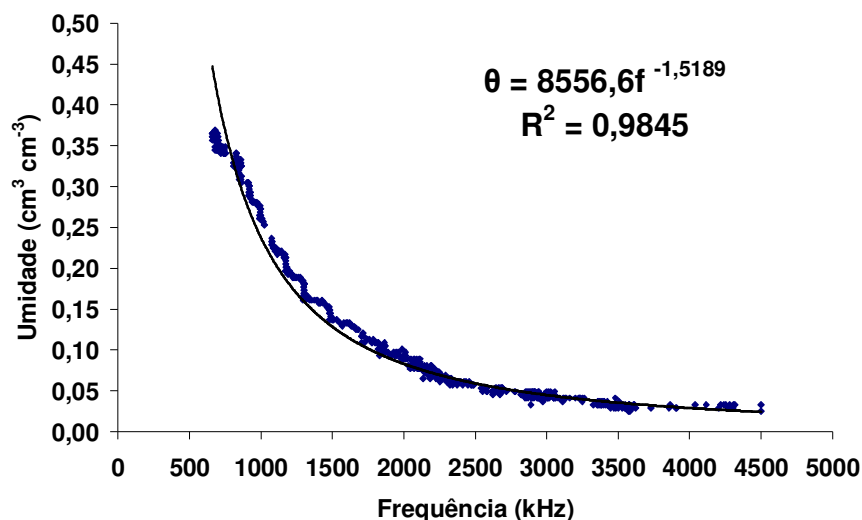
**Tabela 3** – Análise física do solo para duas áreas de 0,33 ha.

| Amostra | Profundidade | Composição Granulométrica (g/kg) |            |       |        | Classificação Textural |
|---------|--------------|----------------------------------|------------|-------|--------|------------------------|
|         |              | Areia Grossa                     | Areia Fina | Silte | Argila |                        |
| A 1     | 20 cm        | 554                              | 325        | 29    | 92     | Areia Franca           |
| A 2     | 20 cm        | 578                              | 294        | 28    | 100    | Areia Franca           |

Em termos percentuais o solo da área 1 é composto de 55,4 % de areia grossa, 32,5 % de areia fina, 2,9 % de silte e 9,2 % de argila, enquanto o solo da área 2 possui 57,8 % de areia grossa, 29,4 % de areia fina, 2,8 % de silte e 10 % de argila. Os valores de densidade do solo foram analisados para as duas profundidades de instalação dos sensores, onde em cada uma foram retiradas duas repetições com o cilindro de Uhland. As análises realizadas para estas amostras apontaram valores médios de  $1.540 \text{ kg m}^{-3}$  para a camada de 0 a 15 cm de profundidade e  $1.650 \text{ kg m}^{-3}$  para a camada de 15 a 30 cm, neste perfil de solo.

## 4.2 Calibração de laboratório

A relação de umidade do solo com as respostas do sensor capacitivo FDR obteve uma curva potencial (Figura 21) em que a sua equação foi utilizada para acompanhar, em tempo real, o teor de água no solo ao decorrer do experimento e realizar o manejo de irrigação.



**Figura 21** - Dispersão dos dados do teor de água do solo versus respostas do sensor capacitivo.

O teste F realizado pelo SPSS validou a hipótese de que a regressão é significativa ao nível de significância acima de 99,9 %. O melhor modelo que se ajustou fisicamente aos dados foi o potencial, apresentando também o melhor coeficiente de determinação. A equação polinomial de 2ª ordem superestimou os valores de umidade, acontecendo mais amplamente desde 10 % de umidade à valores menores. A análise de regressão que identificou as equações e os coeficientes de determinação, nos quatro modelos estudados, está expressa na Tabela 4.

**Tabela 4** – Parâmetros avaliados para a curva de calibração no Software SPSS.

| Equação     | Sumário do Modelo |           |     |     |       | Parâmetros Estimados |        |           |
|-------------|-------------------|-----------|-----|-----|-------|----------------------|--------|-----------|
|             | R²                | F         | df1 | df2 | Sig.  | Constante            | b1     | b2        |
| Logarítmica | 0,954             | 13071,522 | 1   | 633 | 0,000 | 1,689                | -0,207 |           |
| Quadrática  | 0,978             | 14098,644 | 2   | 632 | 0,000 | 0,541                | 0,000  | 5,03E-008 |
| Potencial   | 0,984             | 40192,032 | 1   | 633 | 0,000 | 8556,569             | -1,519 |           |
| Exponencial | 0,958             | 14329,696 | 1   | 633 | 0,000 | 0,560                | -0,001 |           |

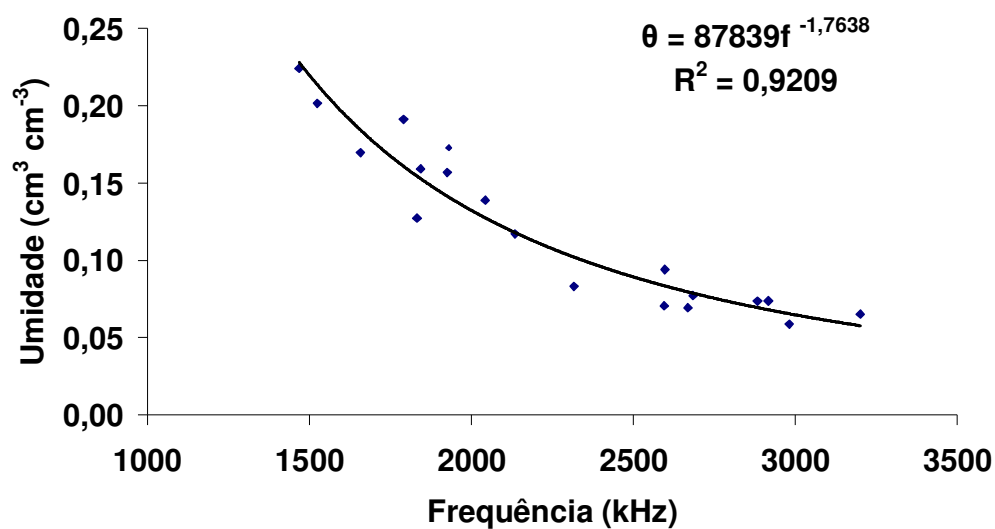
O tipo de modelo adquirido com a calibração do sensor capacitivo FDR (Figura 21) é semelhante ao encontrado pelos autores Silva et al. (2007), Oliveira (2008) e Cruz et al. (2009). Ao contrário do modelo polinomial encontrado por Topp et al. (1980) e Silva et al. (2005), o potencial não superestimou o teor de água para as respostas dos sensores.

#### **4.3 Testes de laboratório**

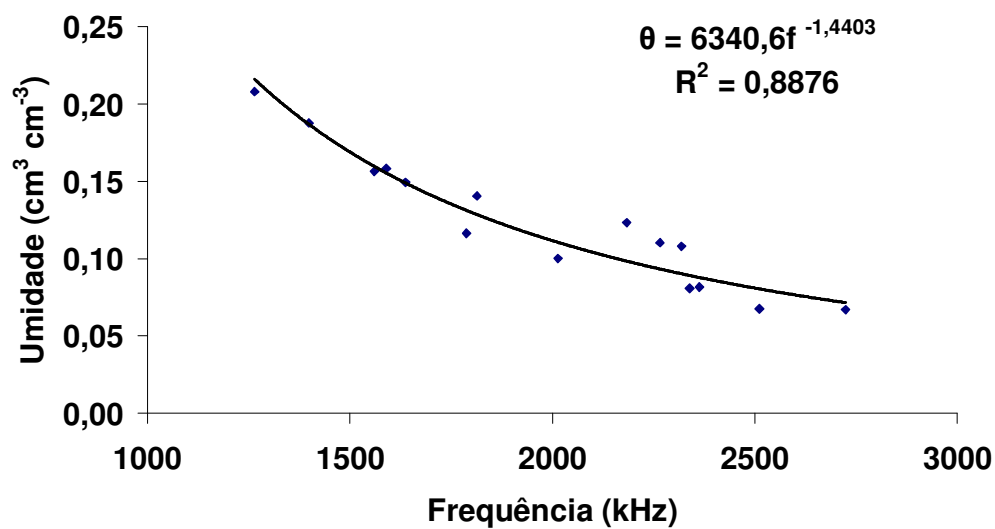
Durante os testes com os módulos sensores, em laboratório, foi observado que as leituras em contadores não alcançavam o máximo das leituras do sensor capacitivo FDR quando realizadas pelo frequencímetro. O primeiro firmware do rádio sensor proporcionava uma escala baixa de leituras dos contadores, apresentando valores mínimo e máximo de 240 e 1950, respectivamente, o que proporciona menor sensibilidade à resposta do sensor capacitivo FDR, que possui limite de 0,6 MHz (água como dielétrico) a 5 MHz (ar como dielétrico). Assim, aumentou-se o número de bits e a sua modificação foi gravada numa versão mais atual oferecendo uma escala mais adequada (480 a 3900 contadores). Após isso, foram testadas as transmissões de curta distância (10 m) e longa distância (100 m) entre os módulos sensores, tanto em visada direta com o módulo mestre como pela função multihop. Foi verificado que a comunicação dos módulos sensores entre si e com o módulo mestre foi efetivada com sucesso.

#### **4.4 Validação da Calibração em campo**

Os dados coletados para a determinação da calibração em condições de campo proporcionaram curvas estabelecendo relações entre as respostas dos sensores capacitivos FDR com os teores de água no solo medidos pelo método padrão de estufa. Uma curva foi ajustada para os sensores que se encontravam a 10 cm de profundidade (Figura 22) e a outra para os instalados a 25 cm de profundidade (Figura 23). Nas duas profundidades foram utilizadas, nos cálculos de umidade volumétrica, as densidades encontradas,  $1.500 \text{ kg m}^{-3}$  para a camada de 10 cm e  $1650 \text{ kg m}^{-3}$  para a de 25 cm. Os dados para ambas as curvas também foram analisados no software SPSS 13.0 for Windows.



**Figura 22** – Dispersão, em tempo real, dos dados do teor de água do solo com as respostas dos sensores capacitivos FDR a 10 cm de profundidade.



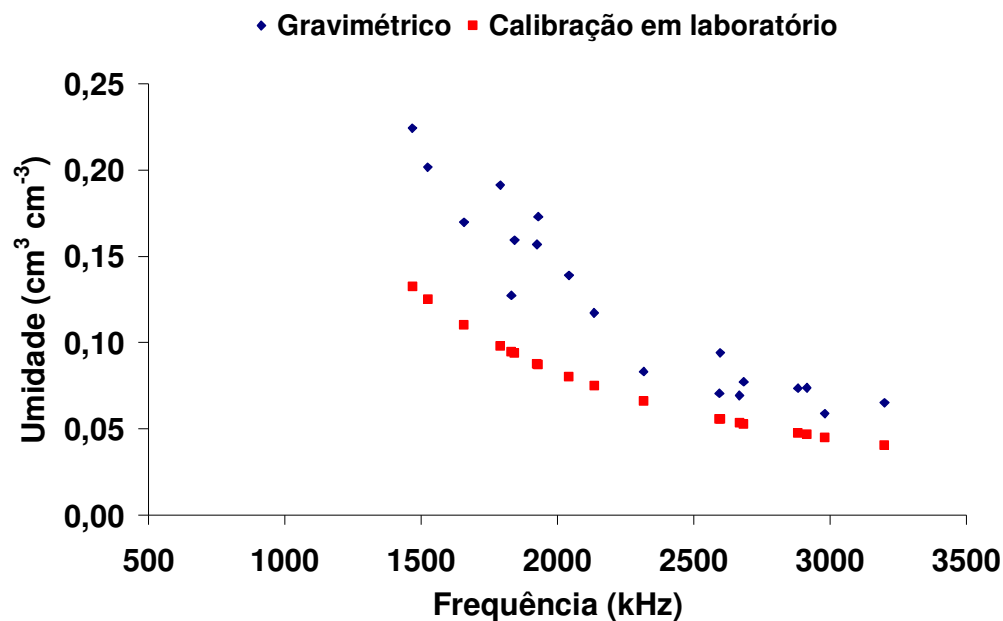
**Figura 23** – Dispersão, em tempo real, dos dados do teor de água do solo com as respostas dos sensores capacitivos FDR a 25 cm de profundidade.

O teste F realizado pelo SPSS validou a hipótese de que as regressões são significativas ao nível de significância acima de 99,9 %. O melhor modelo que se ajustou fisicamente aos dados da Figura 22 foi o potencial, apresentando coeficiente de determinação abaixo somente do modelo quadrático. No entanto, os dados estimados pela equação deste último foram os mais distantes dos dados reais. Já na Figura 23 o modelo que melhor se ajustou foi o logaritmo, mas para melhor relacionar os valores das duas profundidades é ideal que sejam os mesmos modelos. Foi Atribuído então o modelo potencial para a Figura 23 mantendo-se, assim, os mesmos tipos de modelos.

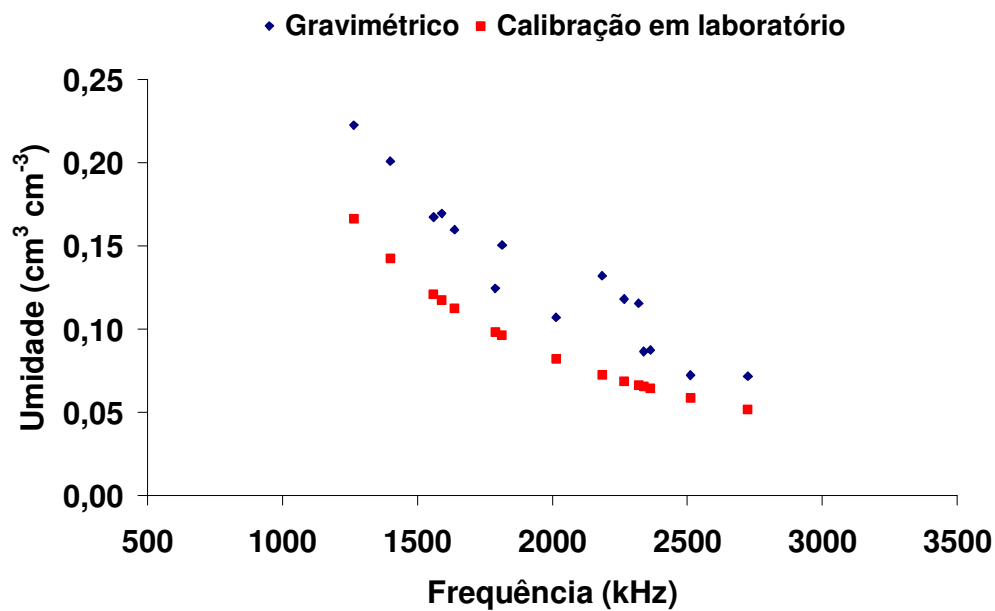
Os valores de umidade volumétrica obtidas pelo teste gravimétrico, quando as amostras foram retiradas do solo em circunstâncias mais secas, contendo em média 6,09 % de teor de água, apresentaram valores mais semelhantes com os fornecidos pela equação de calibração (Figura 21), tanto no primeiro perfil de profundidade quanto no segundo. Esta similaridade deve-se provavelmente a maior sensibilidade do sensor para condições mais baixas do teor de água presente no solo, conforme observado por Gardner et al. (1998) e Cruz et al. (2009). No entanto, vale ressaltar que as últimas amostras foram retiradas bem próximas do sensor, em torno de 3 cm de distância, já que durante o experimento tornava-se inviável coletar amostras adjacentes ao sensor, para manter as características físicas do solo.

Os ajustes das curvas nas Figuras 22 e 23 não apresentaram um coeficiente de determinação mais alto, devido às variações de quantidade de água em ambas as condições, sendo relevante discutir a variabilidade espacial do solo como um dos fatores para contribuir para esta dispersão. Entretanto, os dados seguiram uma tendência similar à curva de calibração (Figura 21). Isso implica que, apesar da variabilidade espacial do solo, os dados têm comportamentos semelhantes aos eventos de secamento do solo.

A análise comparativa do teor de água verificado pelo método gravimétrico com o determinado pela equação de calibração permite observar que por esta última os valores de umidade volumétrica estavam sendo subestimados em relação às condições reais em ambas as profundidades. Esta situação pode ser visualizada nas Figuras 24 e 25.



**Figura 24** – Dispersão dos valores reais e estimados da umidade do solo com a resposta dos sensores capacitivos FDR a 10 cm de profundidade.



**Figura 25** – Dispersão dos valores reais e estimados da umidade do solo com a resposta dos sensores capacitivos FDR a 25 cm de profundidade.

As diferenças entre as Figuras 24 e 25 podem ser atribuídas ao efeito que a temperatura, emitida pela lâmpada, causou na resposta do sensor capacitivo FDR, já que o calor dissipado pela lâmpada sobre a amostra de solo foi praticamente ininterrupto durante todo o processo de calibração. Muitos autores afirmaram que a variação que ocorre na resposta de sensores de umidade quando expostos as oscilações de temperaturas (COELHO; TEIXEIRA, 2004; SILVA et al., 2005; LEÃO et al., 2007; CRUZ et al., 2009). Dentre eles pode-se destacar o trabalho realizado por Cruz et al. (2009), onde verificaram que a resposta do sensor capacitivo FDR declina à medida que a temperatura ambiente se eleva. De posse desta afirmação é possível que os valores adquiridos durante a calibração tenham permanecido abaixo do teor de água que seria o real para o solo estudado. Além disso, durante o manejo de irrigação foi utilizado o valor de densidade do solo de  $1.670 \text{ kg m}^{-3}$  encontrado por Oliveira (2008). Contudo, com o ciclo de eventos da preparação convencional da área, o solo muitas vezes sofre modificações, alterando as suas propriedades físicas.

A análise de densidade do solo realizada ao final do experimento, discutida anteriormente, apontou um valor de  $1.540 \text{ kg m}^{-3}$  para a camada de 0 a 15 cm de profundidade, enquanto que a camada de 15 a 30 cm apresentou  $1.640 \text{ kg m}^{-3}$ . Com isso, os teores de água subestimados na estimativa do tempo de irrigação durante o manejo também estão ligados a estes parâmetros.

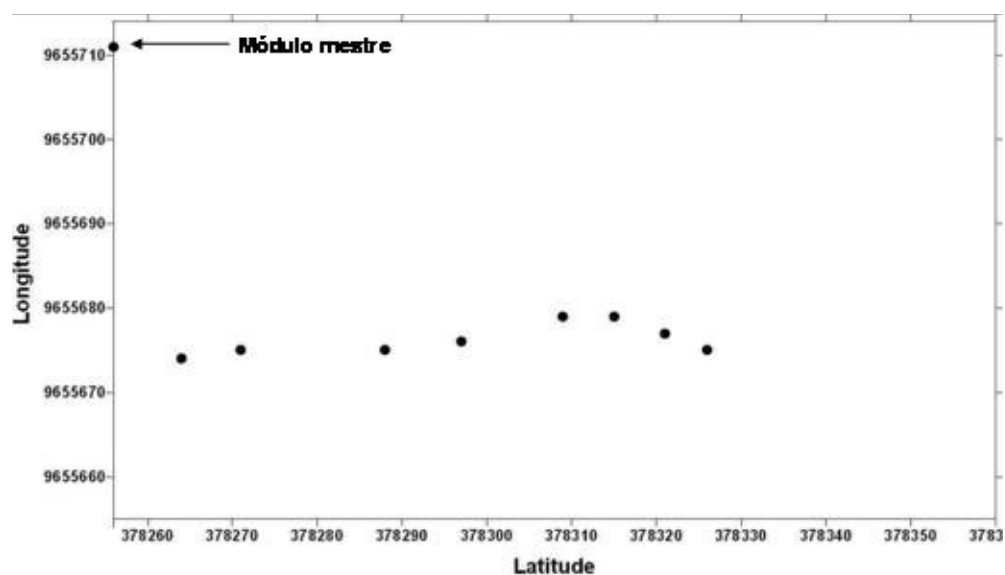
Ao final do experimento os sensores capacitivos FDR foram retirados do solo para avaliação de suas condições físicas. Percebe-se pela Figura 26 que os espaços internos das placas dos sensores capacitivos FDR encontravam-se completamente preenchido por solo. Isto é importante porque a presença de espaços vazios pode causar extrapolação na resposta do sensor, já que a capacitância será equivalente ao ar e não ao solo ocasionando erros de medida, conforme observado por Lee et al. (2004).



**Figura 26** – Sensores capacitivos FDR retirados do solo.

#### 4.5 Testes preliminares

Na Figura 27 estão os pontos coletados pelo aparelho GPS das instalações dos módulos sensores. O eixo “X”, onde se encontram os valores de latitude, corresponde ao início da linha de gotejadores. Já o eixo “Y”, que expõem os valores de longitude, equivale a linha principal do sistema de irrigação.



**Figura 27** - Distribuição dos módulos sensores na área de testes preliminares.

Os quatro módulos sensores mais próximos do módulo mestre realizaram as transmissões de dados sem a necessidade de comunicações multihop. O mais afastado dos quatro módulos localizava-se a 53 metros de distância do módulo mestre. No entanto, os restantes dos módulos sensores não se comunicavam com o módulo mestre e foi preciso implementar no campo um módulo sensor para funcionar especificamente como multihop, porque mesmo os módulos sensores sendo capazes de também realizar a função multihop não conseguiam se comunicar com seus vizinhos. Vale salientar a dificuldade de transmissão entre os módulos sensores dentro do campo de milho, uma vez que, a altura e a densidade das plantas interferem nas suas transmissões (Figura 28). A altura média das plantas foi de 2,30 metros, enquanto que a altura média dos módulos era de 0,77 metros. Dessa forma um módulo sensor multihop foi instalado na mesma altura das plantas para coletar os dados dos módulos sensores e para possibilitar a comunicação com o módulo mestre (Figura 29).



**Figura 28** – Disposição de um módulo sensor dentro do plantio de milho.



**Figura 29** – Módulo multihop instalado no campo para testes.

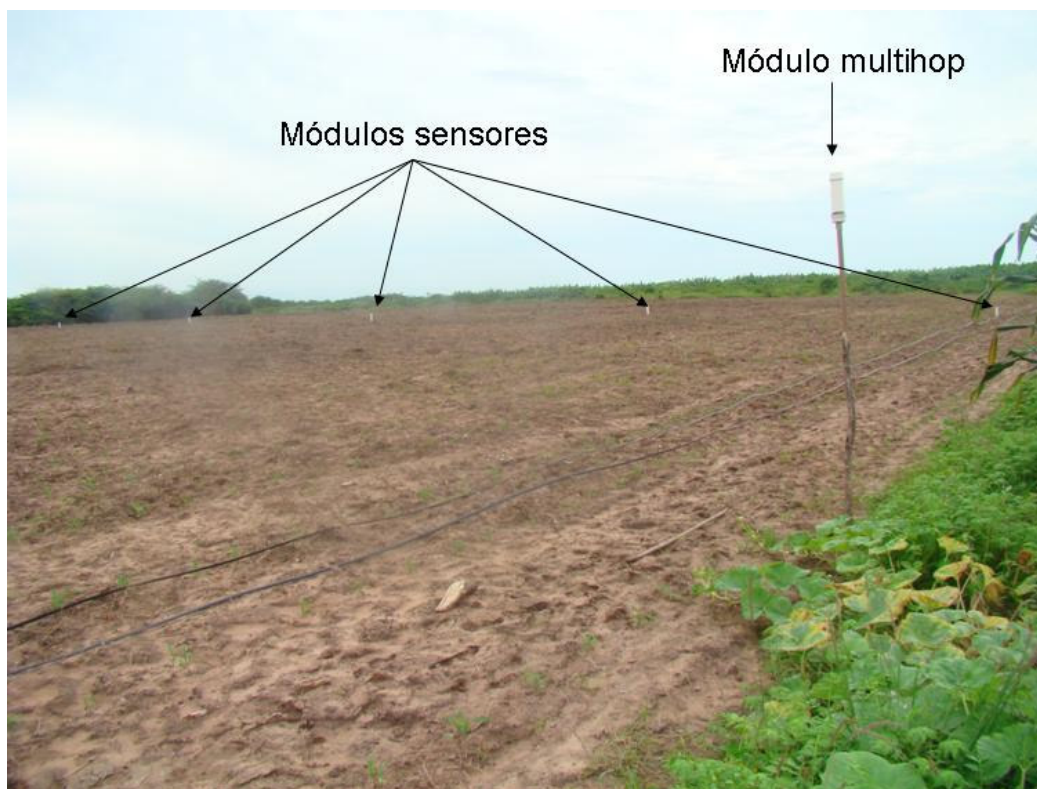
Apesar da altura das plantas intervir nas transmissões dos módulos sensores, os mesmos realizaram as comunicações diretas com o módulo mestre ou por multihop. Porém, quando os módulos sensores realizavam a transmissões multihop a queda de tensão das baterias foi mais rápida se comparadas com o módulo multihop. Este último por não ter nenhum sensor capacitivo FDR conectado, certamente sustenta por mais tempo a carga da bateria.

No final dos testes todos os módulos sensores foram retirados do campo e levados para a área destinada ao experimento com 15 DAS (Figura 30). Vale salientar, então, a facilidade da retirada do sistema de RSSF e sua transferência para outro local, permitindo pronunciar a flexibilidade deste sistema em aplicações no campo.

Foi verificado que o módulo mestre se comunicou facilmente com os módulos sensores neste estágio de desenvolvimento do milho. Justificando então a interferência que a altura da planta pode ocasionar na transmissão dos dados, como já comentado por outros autores (GIACOMIN; VASCONCELOS, 2006; SANCHEZ; PIERCE; ELLIOTT, 2007).

O módulo sensor mais próximo do módulo mestre encontrava-se a uma distância de aproximadamente 100 metros e o mais distante a 156 metros. No entanto, o módulo mestre conseguiu realizar comunicação até a uma distância de 148 metros, respeitando assim as especificações do fabricante, que ao utilizar taxa de transmissão de 1 Mbps alcançará no máximo 150 metros (LAIPAC, 2009).

Diante das declarações expostas acima é necessário implementar módulos multihops no campo cultivado com milho quando a altura das plantas ultrapassarem a dos módulos sensores. Lembrando que os módulos que funcionam como multihop devem permanecer em alturas maiores que as plantas de milho. No caso do módulo mestre é ideal que o mesmo esteja situado em altura maior que o dos módulos multihops para que a cobertura de transmissão no sistema de RSSF seja melhor.



**Figura 30** – Módulos sensores instalados na área de milho com 15 DAS.

#### 4.6 Acompanhamento pluviométrico

Na Figura 31 estão expostos alguns dados coletados através de três módulos sensores nos dias em que ocorreram eventos de chuva. Os dados apresentados na Figura 31 foram adquiridos poucos minutos antes e depois das ocorrências das precipitações. As respostas adquiridas pelos sensores capacitivos FDR foram convertidas em umidade volumétrica, através das equações de calibrações (Figuras 22 e 23). Foram elaborados dois gráficos, um para os sensores instalados a 10 cm de profundidade e outro para os que se encontravam a 25 cm de profundidade. Foram mantidos em ambos os gráficos as mesmas escalas para identificar o comportamento das respostas dos sensores perante as modificações de água nos dois perfis de profundidade do solo. Os gráficos da Figura 31 apresentam, ainda, a precipitação em milímetros (mm) ocorrida durante os eventos de chuva.

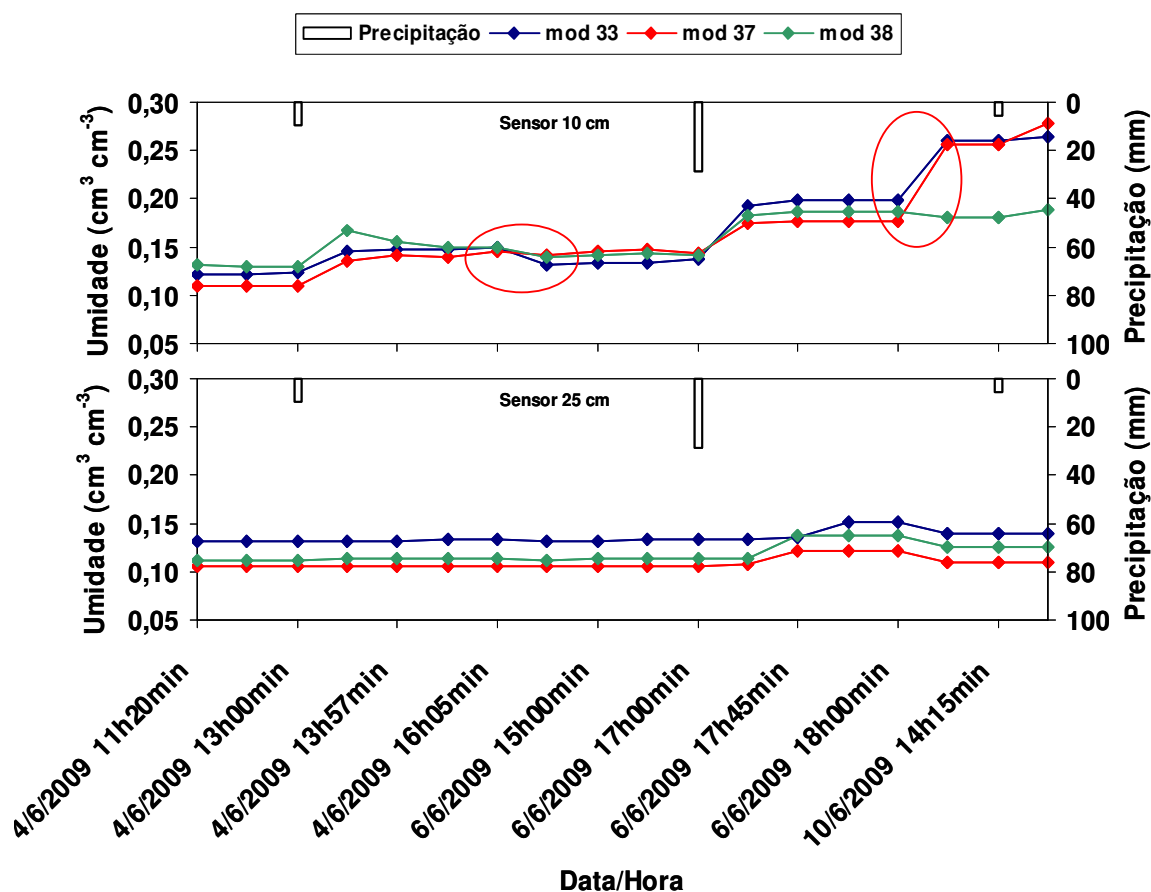


Figura 31 - Coleta de dados de umidade em eventos de chuva.

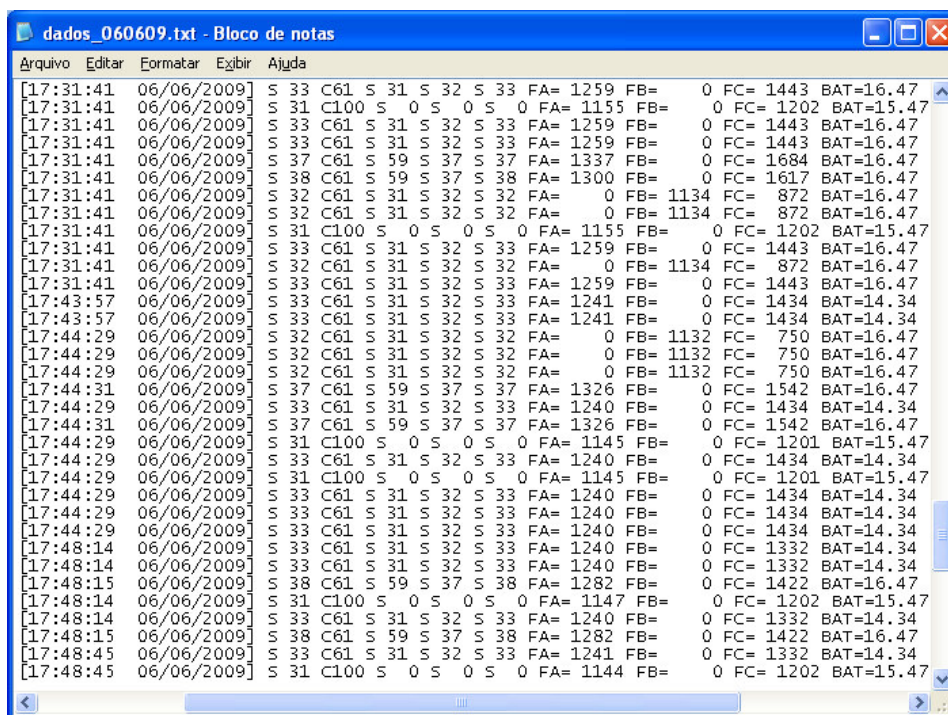
Os valores das respostas dos sensores capacitivos FDR a 10 cm de profundidade, na Figura 31, se mantiveram sem muita variação até os momentos de chuva. Entre as 12h50min e 13h00min do dia 4 de junho de 2009 ocorreu uma precipitação de 9,9 mm e os sensores responderam a este evento aumentando em média 2,82 % da quantidade de água neste intervalo. Já no dia 6 de junho de 2009 das 17h22min às 17h57min foi registrado 28,7 mm de precipitação, sendo mais intenso nos primeiros 20 minutos. Neste intervalo de tempo houve aumento médio do teor de água em torno de 4,70 %. Após estes dias ocorreu precipitação de 5,3 mm, durante 5 minutos, no dia 10 de junho de 2009, mas demonstrou aumento médio do teor de água de apenas 1,05 %. Os pontos destacados por círculos indicam a não continuidade dos dados, ou seja, é apenas o intervalo entre os dias de coletas.

Ao observar, na Figura 31, durante a chuva incidida entre as 12h50min e 13h00min do dia 4 de junho de 2009, nota-se que, ao contrário dos sensores instalados acima, os teores de água calculados com as respostas dos sensores instalados a 25 cm de profundidade não registraram aumento significativo. Para se ter uma idéia, a variação média foi somente 0,04 %. Porém, estes mesmos sensores, durante a chuva que ocorreu no dia 6 de junho de 2009 das 17h22min às 17h57min, forneceram leituras que indicaram aumentos médios da quantidade de água na ordem de 1,30 %. Outro detalhe que pode ser visto claramente neste intervalo de tempo é que, enquanto a umidade aumentava nas camadas mais superficiais do solo, os valores de umidade a 25 cm de profundidade só começaram a aumentar 25 minutos após a chuva e foi neste momento que a umidade a 10 cm começou a estabilizar.

Com base no comportamento destes dados pode-se utilizar os sensores capacitivos FDR no sistema de RSSF para monitorar o teor de água no solo em períodos chuvosos. Dessa forma, é possível intercalar irrigações suplementares, quando a quantidade de água fornecida pelas chuvas não for suficiente para o suprimento adequado das plantas. Sabendo-se desta importância, a rede de sensores sem fio, neste aspecto, torna-se bastante vantajosa, uma vez que os valores dos teores de água podem ser acompanhados e registrados no momento da chuva, já que seria inviável coletar os dados utilizando os equipamentos portáteis ou agregados por vários cabos, o que aumentaria muito o custo.

Vale ressaltar, ainda, que as coletas destes dados eram dificultadas no momento da precipitação, talvez por causa da interferência que a chuva estabelecia na transmissão entre os módulos sensores. Contudo, as transmissões dos dados conseguiram ser efetuadas (Figura 32). Com o termino da chuva a transmissão com os módulos sensores tornavam-se mais rápidas. Resultados diferentes foram observados por Thelen, Goense e Langendoen (2005), ao

estudarem a propagação de ondas de rádio utilizando nodos sensores CC1000 da empresa Chipcon em um campo cultivado com batata. Estes autores verificaram que as propagações das ondas melhoraram em condições de chuva.



**Figura 32** - Coleta das respostas dos sensores capacitivos FDR durante a chuva.

#### 4.7 Monitoramento da irrigação

As Figuras 33, 34 e 35 ilustram o comportamento da umidade do solo ao longo do experimento pelos três módulos que proporcionaram maiores quantidades de dados neste trabalho. Nas três Figuras observam-se as respostas dos sensores capacitivos FDR, em umidade volumétrica, para as profundidades de 10 cm e 25 cm. Os valores de umidade volumétrica para as duas profundidades dos sensores capacitivos FDR foram obtidos pelas equações encontradas na validação da calibração em campo (Figuras 24 e 25). Estão expostos nestes três gráficos os dados que foram possíveis adquirir dos módulos sensores. Os gráficos apresentam em seus eixos secundários os tempos das irrigações durante o manejo. Além disso, estão indicados nos gráficos os eventos de chuva que ocorreram.

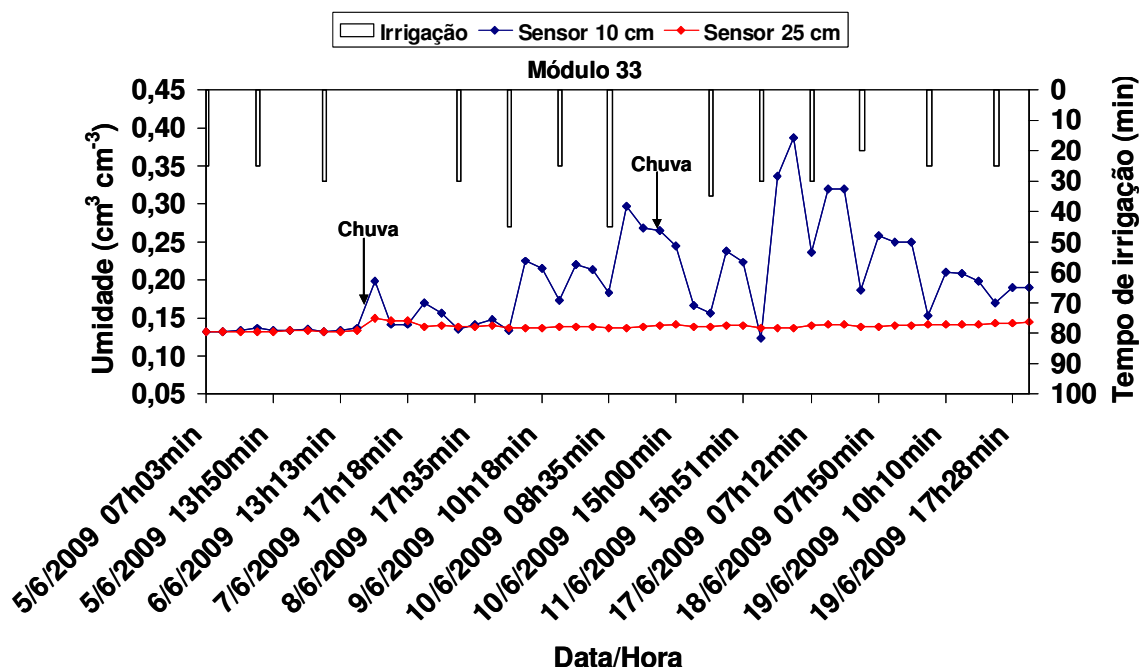


Figura 33 – Variação da umidade volumétrica do solo pelo módulo 33 durante o manejo.

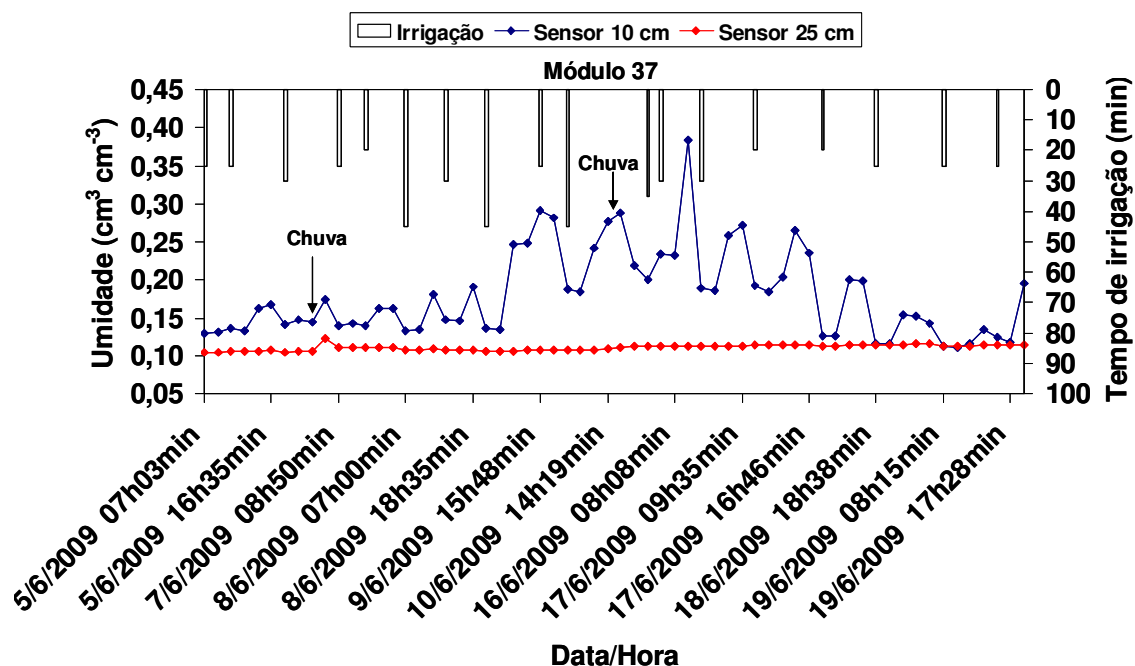
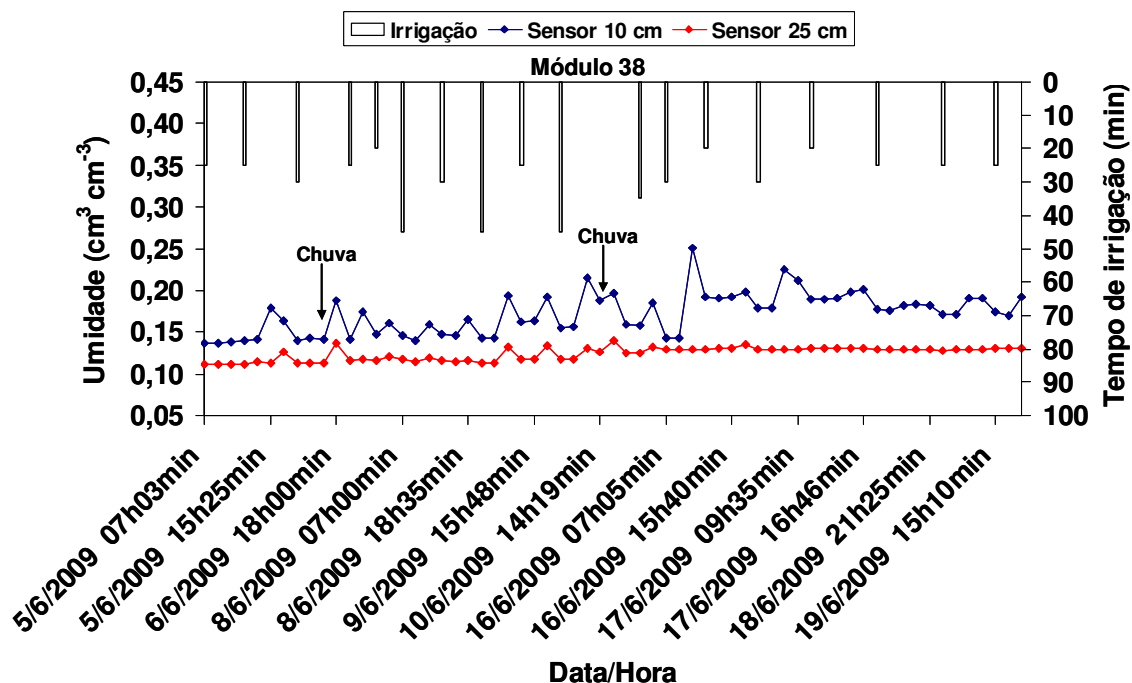


Figura 34 – Variação da umidade volumétrica do solo pelo módulo 37 durante o manejo.



**Figura 35** – Variação da umidade volumétrica do solo pelo módulo 38 durante o manejo.

Nas Figuras 33, 34 e 35 pode-se observar que o teor de água variou mais nas camadas de 10 cm do que nas profundidades de 25 cm. As irrigações duravam em média 30 minutos. Somente nos dias que eram realizadas as fertirrigações é que o tempo permanecia por 45 minutos, para que garantisse toda a distribuição do fertilizante. Ressalta-se que o teor de água a 10 cm de profundidade, nas primeiras leituras do dia, aumentou ao longo do ciclo de irrigação. Este processo identifica a estabilidade do conteúdo de água no solo, deixando com o tempo a umidade próxima à capacidade de campo. A maior redução do teor de água no solo desde o fim de irrigação da manhã até o início da irrigação do período da tarde foi de 8 % e durou aproximadamente 5 horas. Dessa forma, se o conteúdo de água no solo reduziu 1,6 % em cada hora, então, em 15 minutos pode chegar a variar pelo menos 0,4 %.

Outro aspecto observado foi a diferença de armazenamento de água quando comparou-se a variação do teor de água que ocorreu durante a incidência de chuva com a que aconteceu nas irrigações. Por exemplo, na Figura 31, que apresenta a variação de umidade nos eventos de chuva, os sensores a 10 cm de profundidade, no dia 6 de junho, detectaram um aumento médio do teor de água de 2,46 % em aproximadamente 40 minutos. Quando ocorreu irrigação de 45 minutos no dia 9 de junho, nas Figuras 33, 34 e 35, os sensores instalados a 10 cm de profundidade identificaram um aumento do teor de água em 9,10; 11,14 e 5,17 %, respectivamente.

respectivamente. No dia 10, ainda referente às Figuras 33, 34 e 35, os mesmos sensores responderam a um tempo de irrigação de 45 minutos, com aumento do teor de água de 8,45; 5,46 e 5,95 %, respectivamente. Já no dia 16 de junho foram irrigados 30 minutos e quando a próxima leitura foi realizada, cerca de uma hora depois, os módulos 33, 37 e 38, referentes às Figuras 33, 34 e 35, identificaram aumento do teor de água de 21,34; 15,07 e 10,8 %, respectivamente. Os resultados indicam que para o mesmo tempo de irrigação houve resposta diferente para a variação do conteúdo de água no solo. Isso infere que a condutividade hidráulica e a porosidade do solo estejam ligadas a este efeito. Embora estes aspectos não tenham sido avaliados, propõe-se uma análise mais apurada deste comportamento para verificar as possíveis relações.

O teor de água das Figuras 33, 34 e 35 referentes às profundidades de 25 cm variou pouco ao longo do experimento. Esta condição permite pronunciar que a água aplicada pela irrigação não estava sendo percolada para as camadas mais profundas. A grande variação do teor de água ficou restrita às profundidades de 10 cm como deixam claras as Figuras 33, 34 e 35. Este fato indica que não está havendo perda de água por percolação.

Com base nas afirmativas acima, fica claro que o teor de água pode ser controlado e mantido nas camadas mais superficiais do solo sem ocorrer lixiviação para camadas mais profundas. Deste ponto de vista, o manejo utilizando os sensores capacitivos FDR no sistema de RSSF desenvolvido indicará a distribuição da água no perfil do solo e ajudará nas decisões de irrigação.

Vale ressaltar que, por eventos de descarregamento das baterias ou outros contratemplos, algumas leituras não foram realizadas ou aconteciam tardiamente. Outras dificuldades como linhas de gotejadores afastadas do local de instalação dos sensores capacitivos FDR e emissores entupidos ou que não gotejavam no local correto (escorrendo na linha para outro ponto) induziam a diferenças de leituras, necessitando de atenção especial para estes detalhes. Contudo, os módulos sensores, ainda que encobertos pela plantação de milho e em meio às condições climáticas, comunicaram-se com os módulos multihops, revelando-se um sistema bastante robusto (Figura 36).



**Figura 36** – Módulos multihops instalados acima da plantação de milho.

Foi estudada uma opção para a comunicação do módulo mestre diretamente com os módulos sensores, quando estes últimos estavam totalmente encobertos pela plantação de milho. O procedimento foi improvisado em um módulo sensor que transmitia os dados somente pelo módulo multihop. Foi elevado, a uma altura de 2,30 metros, apenas o transceptor (antena) do módulo sensor selecionado (Figura 37). Após esta montagem foi realizado o teste de comunicação e o módulo sensor conseguiu transmitir os dados diretamente para o módulo mestre.

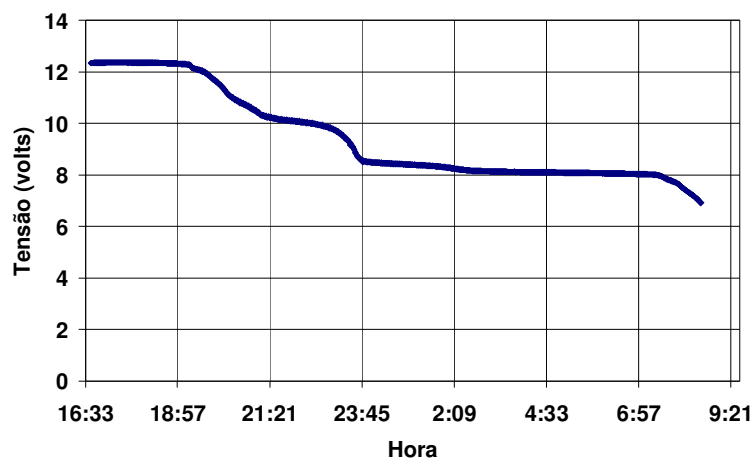
Fica claro que em condições onde não se consegue realizar comunicação direta entre módulo sensor e módulo mestre, a elevação do transceptor em altura superior a das plantas é uma alternativa cabível para a performance da RSSF. Isso só deve ser levado em conta se não for possível arquitetar a RSSF em alturas maiores. No caso do módulo sensor utilizado neste trabalho o mesmo ficou limitado ao tamanho do cabo do sensor capacitivo FDR.



**Figura 37** – Elevação do transceptor acima da plantação do milho.

#### 4.8 Consumo da bateria

A projeção do tempo de consumo da bateria, utilizada nos módulos sensores, pode ser visualizada na Figura 38. Em condições de laboratório, os dados foram coletados desde as 16h42min do dia 14 de julho de 2009 até as 08h35min do dia 15 do mesmo mês, fornecendo carga por aproximadamente 16 horas.



**Figura 38** – Dados da queda de tensão da bateria do módulo sensor com o tempo.

A descarga da bateria durante o tempo de coleta como identifica a Figura 38 foi rápida por causa da rotina de ativação da alimentação do sensor capacitivo FDR, onde a tensão era fornecida a cada 3 segundos, ou seja, a cada minuto o módulo sensor realiza 20 leituras. Esta alta frequência de coleta ocasionou um rápido descarregamento das baterias no campo, mas através da interface comunicação só foi possível determinar um tempo de coleta em intervalos de 4 minutos.

É importante ressaltar que os módulos sensores não transmitiam os dados a cada 4 minutos. Neste tempo eles realizavam as leituras dos sensores capacitivos FDR. No entanto, é necessário modificar o protocolo de comunicação e aumentar o período de acionamento de leitura dos sensores para, dessa forma, otimizar a rede de sensores e consequentemente reduzir o consumo das baterias.

A tensão mínima que a bateria proporciona ao módulo sensor para manter estável a tensão de alimentação do sensor capacitivo FDR é de 8 volts. A queda de tensão da bateria durante o funcionamento não foi linear, apresentando redução mais acentuada entre 12,2 volts e 8,5 volts. Após esta tensão a redução foi mais suave até a queda repentina após 8 volts. As leituras coletadas abaixo da tensão de 8 volts devem ser ignoradas, pois não apresentam precisão nas medidas (SANTOS, 2008). No teste realizado por Santos (2008), observou-se esta tensão em um intervalo de aproximadamente 11 horas e 30 minutos. Contudo, nos dados expostos na Figura 38 essa tensão limite manteve-se até as 7h25min, totalizando 14 horas e 43 minutos de funcionamento. No entanto, para garantir uma maior longevidade é necessário que a tensão da bateria não reduza a valores muito baixos. É ideal que haja um controle da tensão da bateria, no sistema de RSSF, de modo que fique restrita até o limite de 10 volts para evitar o desgaste das baterias em curto prazo.

Zhang (2004), testando o consumo da bateria de um nodo sensor CrossNet CN1100 LX da Crossbow, observou perda significativa do sinal após 8 horas contínuas de funcionamento. O nodo utilizado pelo autor é alimentado com tensão de 6 volts, enquanto que o nodo utilizado neste trabalho precisa de uma tensão de 9 a 12 volts.

## 5 CONCLUSÕES

A RSSF permitiu monitorar o teor de água no solo, através dos sensores capacitivos FDR, em eventos de irrigação e chuva revelando-se altamente robusto, tendo sido, a bateria o fator mais limitante, necessitando de modificações no protocolo de comunicação para otimizar o consumo das baterias dos módulos sensores e dessa forma evitar perdas de dados que serão essenciais para dinamismo do sistema.

As comunicações dos módulos sensores foram bem sucedidas, apesar da altura das plantas e as ocorrências das chuvas terem impedido em alguns momentos as suas transmissões.

Apesar dos dados subestimados pela equação de calibração do sensor capacitivo FDR o mesmo está capaz de acompanhar a variação da quantidade de água no solo em tempo real, necessitando apenas de calibrações em condições de campo.

A RSSF utilizada neste trabalho, além de apresentar baixo custo, quando comparados com os produtos industriais disponíveis no mercado, é um sistema bem dinâmico e preciso, que em conjunto com os sensores capacitivos FDR poderá auxiliar o pesquisador ou o produtor na tomada de decisão de irrigação ajudando na redução dos custos com água e energia elétrica.

## 6 RECOMENDAÇÕES

Para o manejo de irrigação os dados dos sensores capacitivos FDR podem ser adquiridos pela RSSF apenas antes do momento que se deseja irrigar. Se o objetivo for o acompanhamento do movimento da água no solo para identificar a sua variação ao longo do dia, o intervalo de aquisição dos dados de 15 minutos é o bastante para que ocorra modificação significativa do conteúdo de água no solo, desde que haja condições das baterias dos módulos sensores permanecerem com carga suficiente por mais tempo.

O posicionamento de todos os sensores capacitivos FDR, em relação aos emissores, deve ser igual para não haver subestimação ou superestimação do tempo de irrigação. Essas e outras condições como: emissores entupidos ou que não estejam emitindo água no local preciso; linha de gotejadores afastadas dos sensores por motivo desconhecido e vazamentos; necessitam sempre ser observadas e corrigidas para não ocasionar erros de leituras.

A antena do módulo sensor em alturas superiores a da plantação pode ser uma alternativa para melhorar a comunicação da RSSF e evitar a utilização de módulos multihops, podendo estes últimos ser destinados como módulos sensores e dessa forma aumentar os pontos de coletas da RSSF implantada no campo.

## REFERÊNCIAS

AMÂNCIO R.; BOTELHO, D. O.; AMÂNCIO, C. O. G. **Gestão Social das Águas: Uma Reflexão sobre Propostas para Encarar esse Desafio**. In: VII Congresso Latinoamericano de Sociologia Rural, Quito – Equador, Nov. 20-24, 2006.

ALBUQUERQUE, P. E. P.; RESENDE, M. **Manejo de irrigação do milho**. Embrapa Milho e Sorgo, sistemas de produção n. 2, ed. 4 versão eletrônica, Set. 2008. Disponível em: <[http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho\\_4ed/ima-nejo.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_4ed/ima-nejo.htm)>. Acesso em: 23 de Setembro de 2009.

BARR, M. **Programming Embedded Systems in C and C++**. O'Reilly, 1999. 191 p.

BARBEAU M.; KRANAKIS, E. **Principles of ad hoc networking**. England: Jhon Wiley & Sons Ltd, 2007. 254 p.

BARROS, F. A. R. **Rede de sensores sem fio**. GTA/UFRJ. 2002. Disponível em: <[http://www.gta.ufrj.br/seminarios/semin2002\\_1/flavio/](http://www.gta.ufrj.br/seminarios/semin2002_1/flavio/)>. Acesso em: 05 de outubro de 2009.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 5. ed. Viçosa: UFV, 1989, 596p.

BERNARDO, S. SOARES. MANTOVANI. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006, 625p.

BREMER, D. **Soil moisture can help regulate irrigation**. Jun 2003. Disponível em: <<http://www.turfgrasstrends.com/turfgrasstrends/article/articleDetail.jsp?id=58294>>. Acesso em: 07 de Outubro de 2009.

BULL, K. **Methods of accurately measuring capacitive RH sensors**. 5<sup>th</sup> International Symposium on Humidity and Moisture – ISHM, Rio de Janeiro – Brazil, May 02-05, 2006. Disponível em: <<http://veriteq.com/download/Methods-of-Accurately-Measuring-Capacitive-RH-Sensors.pdf>> . Acesso em: 23 de Abril de 2007.

CARMO, L. C.; BIAGE, M. **Calibração de sensores capacitivos para monitoramento de irrigação**. Revista Eletrônica Horizonte Científico, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação - PROPP, Universidade Federal de Uberlândia. Edição nº1, Volume 1, 2002. Disponível em: <[www.propp.ufu.br/revistaeletronica/edicao2002/C/CALIBRACAO.PDF](http://www.propp.ufu.br/revistaeletronica/edicao2002/C/CALIBRACAO.PDF)>. Acesso em: 16 de Maio de 2007.

CICHOTA, R.; LIER, Q. J. **Avaliação no campo de um TDR segmentado para estimativa da umidade do solo.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.8, n.1, p.72-78, 2004.

COELHO, E. F.; SANTOS, D. B.; AZEVEDO, C. A. V. **Sensor placement for soil water monitoring in lemon irrigated by micro sprinkler.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental. Campina Grande - PB, v.11, n.1, p.46-52, 2007.

COELHO, S. L.; TEIXEIRA, A. S. **Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.24, n.3, p.536-545, set/dez, 2004.

CROSSBOW. **Wireless sensor network kit.** 2009. Disponível em: <<http://www.xbow.com>>. Acesso em: 09 de novembro de 2009.

CRUZ, T. M. L. **Avaliação de um sensor capacitivo para o monitoramento da umidade do solo.** 2007. 63 p. Monografia (Conclusão em Agronomia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

CRUZ, T. M. L.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; SANTOS, C. C.; OLIVEIRA, A. D. S.; NUNES FILHO, J. L. N. **Avaliação de um sensor capacitivo para o monitoramento da umidade do solo.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.29, n.4, out/dez, 2009. No prelo.

DNOCS. **Departamento nacional de obras contra as secas.** Disponível em: <[http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros\\_irrigados/ce/baixo\\_acarau.html](http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/ce/baixo_acarau.html)>. Acesso em: 10 de março de 2009.

EDWARDS, S.; LAVAGNO, L.; LEE, E. A.; VINCENTELLI, A. S. **Design of embedded systems: formal models, validation and synthesis.** Proceedings of the IEEE, vol.85, n.3, p.366-390, march 1997.

ELAIUY, M. L. C.; SATO, L. M.; SOUZA, C. F. **Desenvolvimento e avaliação de sonda de TDR para o manejo racional da água em substratos utilizados na produção de mudas florestais.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 38., 2009, Juazeiro(BA)/Petrolina(PE). *Anais...* Juazeiro(BA)/Petrolina(PE): Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2009. 1 CD-ROM.

EVANS, J.J. **Wireless sensor networks in electrical manufacturing.** Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, p. 460-465, outubro, 2005.

FEENEY, L.M.; NILSON, M. **Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment**. Proceedings of Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM), 2001, vol. 3, p.1548–1557.

FIGUEIREDO, C. M. S.; NAKAMURA, E. **Computação móvel: novas oportunidades e novos desafios**. T & C Amazônia, v.1, n.2, p.16-28, 2003.

GARDNER, C. M. K.; DEAN, T. J.; COOPER, J. D. **Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor**. Journal of Agricultural Engineering Research, v.71, issue 4, p. 395-403, dec. 1998.

GIACOMIN, J. C.; VASCONCELOS, F. H. **Wireless sensor network as a measurement tool in precision agriculture**. XVIII IMEKO WORLD CONGRESS. Rio de Janeiro, Brazil, 2006.

GIACOMIN, J. C.; VASCONCELOS, F. H.; SILVA, E. J.. **A distributed measurement system to estimate plant water content in agricultural fields based on wireless sensor networks**. *Sba Controle & Automação*. vol.19, n.4, p.367-378, 2008.

GOMES, R. C. S. **Monitoramento interativo de ambientes com opção de controle portátil**. 2004. 47 p. Monografia (Conclusão em Engenharia da Computação), Centro Universitário Positivo, Curitiba.

HATFIELD, J. L. **Precision agriculture and environmental quality: challenges for research and education**. In: National Workshop Precision Agriculture and the Environment: Research Priorities of the Nation, 2000. Disponível em: <[www.arborday.org/programs/Papers/PrecisAg.PDF](http://www.arborday.org/programs/Papers/PrecisAg.PDF)>. Acesso em: 02 de julho de 2009.

HOROWITZ, P.; HILL, W. **The art of eletronics**. Cambridge University Press, 1989. 2ª Edition, 1125p.

ILYAS, M.; MAHGOUB, I. **Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems**. Florida: CRC Press, 2005. 695 p.

KLAR, A.E. **Água no sistema**. 2ª ed. São Paulo: Nobel, 1988. 408p.

LAIPAC. **High frequency 2.4 GHz wireless transceiver antenna**. 2009. Disponível em: <[http://www.laipac.com/easy\\_trf24\\_esp.htm](http://www.laipac.com/easy_trf24_esp.htm)>. Acesso em: 05 de maio de 2009.

LEÃO, R. A. O.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; MESQUITA, P. E. G.; COELHO, S. L. **Desenvolvimento de um dispositivo eletrônico para calibração de sensores de umidade do solo.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.27, n.1, p.294-303, jan/abr, 2007.

LEÃO, R. A. O. **Desenvolvimento de dispositivo para calibração de sensores de umidade do solo e aplicação em sensores tipo tensiômetro eletrônico e resistência elétrica.** 2004. 72 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

LEE, K. H.; ZHANG, N.; KLUITENBERG, G.; KUHN, W.B.; DAS, S. **A Dielectric Permittivity Sensor for Simultaneous Measurement of Multiple Soil Properties.** In: ASABE – Annual International Meeting, Ottawa, Ontario, Paper Number: 041045, august 2004, 14p.

LEE, T. Y., HSIUNG, P. A., **Embedded Software Synthesis and Prototyping.** IEEE Transactions on Consumer Electronics, v.50, n.1, fevereiro, 2004.

LEONARDI, S. ROTH, G. **Defining precision irrigation: A new approach to irrigation management.** Research Bulletin, p.4, 2009. Dispon[ível em: <<http://www.npsi.gov.au>>. Acesso em: 17 de julho de 2009.

LOUREIRO, A. A. F.; NOGUEIRA, J. M. S.; RUIZ, L. B.; MINI, A. F.; NAKAMURA, E. F.; FIGUEIREDO, C. M. S. **Redes de sensores sem fio.** XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores – Mini Curso, Natal-RN, 2003.

MARTINS, C. C.; SOARES, A. A.; BUSATO, C.; REIS, E. F. **Manejo da irrigação por gotejamento no cafeeiro.** Biosci. J., Uberlândia – MG, v.23, n.2, p.61-69, Abr/Jun 2007.

MCCANN, R.; STARR, J. J. **Use of multisensor capacitance probes as irrigation management tool in humid areas: case studies and experiments from the mid-atlantic region.** American Society of Agricultural and Biological Enginners – ASABE, v.23, n.4, p.475-483, 2007.

MEGERIAN, S., KOUSHANFAR, F., VELTRI, G. and POTKONJAK, M. **Exposure in wireless sensor networks: theory and practical solutions.** Wireless Networks, Kluwer Academic Publishers, ISSN 1022-0038, v.8, n.5, 2002.

MICROCHIP. **PIC 18F2331 Data Sheet.** Microchip Technology, 2007. Disponível em: <<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010268>>. Acesso em: 06 de novembro de 2009.

**MICROCHIP. PIC 18F4550 Data Sheet.** Microchip Technology, 2009. Disponível em: <<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010268>>. Acesso em: 06 de novembro de 2009.

MIRANDA, D. B.; SANTORO, B. L.; PIRES, R. C. M.; SOUZA, C. F. **Calibração e validação de um equipamento de capacitância para a estimativa da umidade do solo.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 38., 2009, Juazeiro/Petrolina. Anais...Juazeiro/Petrolina: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2009. CD-ROM.

MIRANDA, J.H.; PIRES, C.M.P. **Irrigação.** Piracicaba: FUNEP, 2001. 410p. (Série Engenharia Agrícola, 1).

MONTEIRO, F.; BRASA, A.; OROZCO, L.; GARCIA, F. M. **A wireless sensor network for remote environmental data acquisition in precision viticulture.** In: International Conference of Agricultural Engineering. Brazilian Congress of Agricultural Engineering, 37, 2008, Iguassu Falls City, Brazil. CD ROM.

NEUPANE, U.; RICHIE, S. M.; WEEKS, A. R. **Characterization of a low power, short range wireless transceiver.** IEEE/ACES International Conference: Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics. April. 2005. p.1041-1044.

OLIVEIRA A. D. S. **Avaliação do Sensor de Umidade TOPDEA no manejo da irrigação.** 2008. 68 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

PALTINEANU, I. C.; STARR, J. L. **Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration.** Soil Sci. Soc. Am. J., Madison-WI, v.61, p.1576-1585, nov-dec, 1997.

PEATMAN, J. B., **Embedded design with the PIC18F452 Microcontroller.** Prentice Hall, 1nd Edition, USA, 2003.

PEREIRA, M. R.; AMORIM, C. L.; CASTRO, M. C. S. **Tutorial sobre rede de sensores sem fio.** Cadernos do IME – Série informática, v. 14, junho de 2003. Disponível em: <<http://magnum.ime.uerj.br/cadernos/cadinf/vol14/3-clicia.pdf>>. Acesso em: 24 de julho de 2009.

PEREIRA, S.; OLIVEIRA FILHO, D.; MANTOVANI, E. C.; RAMOS, M. M.; MARTINS, J. H. **Reflectometria no domínio do tempo na determinação do conteúdo de água no solo.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, v.10, n.2, p.306-314, 2006.

PIERCE, F. J.; CHÁVEZ, J. L.; ELLIOTT, T. V.; MATTHEWS, G. R.; EVANS, R. G.; KIM, Y. **Remote-real-time continuous move irrigation control and monitoring system**. In: ASABE – Annual International Meeting, Portland, Oregon. Paper Number: 062162, July 2006, 11p.

QUEIROZ, T. M.; CARVALHO, J. A.; RABELO, G. F.; ANDRADE, M. J. B. **Avaliação de sistema alternativo de automação da irrigação do feijoeiro em casa de vegetação**. Revista de Engenharia Agrícola, v.25, n.3, p.632-641, set/dez de 2005.

REDONDO, D. M.; LÍBERO, V. L. **Conceitos Básicos Sobre Capacitores e Indutores**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol.18, n.2, p.137-142, Junho de 1996.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188p.

REINERT D. J.; REICHERT J. M. **Apostila de Propriedades Física do Solo**. Fundamentos da Ciência do Solo. Universidade Federal de Santa Maria, maio de 2006. Disponível em: <[http://www.cesnors.ufsm.br/professores/vanderlei/fundamentos\\_da\\_ciencia\\_solo/propriedades\\_fisicas\\_do\\_solo\\_i\\_semestre\\_2006.pdf](http://www.cesnors.ufsm.br/professores/vanderlei/fundamentos_da_ciencia_solo/propriedades_fisicas_do_solo_i_semestre_2006.pdf)>. Acesso em 03 de Junho de 2008.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. S. **Física 3**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., 1992. 303p.

ROCHA NETO, O. C.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; SOUZA, F. N. P.; NUNES FILHO, J. L. N. **Utilização de uma grade de sensores para determinação do bulbo úmido**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 38., 2009, Juazeiro (BA)/Petroliana (PE). *Anais...* Juazeiro (BA)/Petroliana (PE): Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2009. 1 CD-ROM.

RUIZ, L. B. **MANÁ: Uma arquitetura para gerenciamento de Redes de Sensores Sem Fio**. 2003. 214 f. Tese (Doutorado em Ciência da Computação), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

RUIZ, L. B.; CORREIA, L. H. A.; VIEIRA, L. F.; MACEDO, D. F.; NAKAMURA, E. F.; FIGUEIREDO, C. M. S.; VIEIRA, M. A.; BECHELANE, E. H.; LOUREIRO, A. F.; NOGUEIRA, J. M. **Arquiteturas para Redes de Sensores Sem Fio**. In: Minicursos do 22º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores. 1 ed. Gramado, RS : SBC, 2004, v.1, p.167-218.

RUTH, B. **A capacitance sensor with planar sensitivity for monitoring soil water content**. Soil Sci. Soc. Am. J., v.63, p.48-54, 1999.

SACCOL, A. Z.; REINHARD, N. **Tecnologias de informação móveis, sem fio e ubíquas: definições, estado-da-Arte e oportunidades de pesquisa.** RAC, v.11, n.4, p.175 – 198, out/dez de 2007.

SANCHEZ, P. A.; PIERCE, F.J.; ELLIOTT, T. V. **Performance Assessment of Wireless Sensor Networks in Agricultural Settings.** In: ASABE – Annual International Meeting, Paper Number: 073076, Minneapolis, Minnesota, June 2007, 10p.

SANTOS, C. C.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; DAHER, S.; BARROSO, G. C. **A wireless system for remote monitoring soil moisture and temperature.** In: Brazilian Congress of Agricultural Engineering, 37., 2008, City Iguassu Falls. *Anais...* City Iguassu Falls - Brazil: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2008. 1 CD-ROM.

SANTOS, C. C. **Sistema de sensoriamento remoto de umidade e temperatura do solo para irrigação de precisão.** 2008. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SANTOS, R. M.; OLIVEIRA, A. S.; BRANDÃO, F. J. C.; PEREIRA, F. A. C. **Calibração em laboratório de sensores FDR (Frequency Domain Reflectometry) para medição da umidade do solo.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2006, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2006. 1 CD-ROM.

SEIDEL, C.; FERREIRA, F.; OLIVEIRA, E. **Aplicação de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) para Engenharia Ambiental.** International Conference on Engineering and Computer Education – ICECE, Santos, SP, Brasil, 11 a 14 de março de 2007. Disponível em: <[http://www.ic.uff.br/~eoliveira/Publicacoes/ICECE\\_07b.pdf](http://www.ic.uff.br/~eoliveira/Publicacoes/ICECE_07b.pdf)>. Acesso em: 28 de julho de 2009.

SIEMENS. **Sensores e redes de sensoriamento – AS interface.** Seminários Técnicos, Engenheiros e Projetistas, 56 p. Maio de 2003. Disponível em: <http://mediaibox.siemens.com.br/upfiles/1750.pdf>. Acesso em: 17 de Maio de 2007.

SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; ALVES JÚNIOR, J.; SOUZA, A. B.; MELO, F. B.; COELHO FILHO, M. A. **Calibration of a capacitance probe in a paleudult.** Sci. Agric., Piracicaba, v.64, n.6, p.636-640, nov/dec. 2007.

SILVA, I. O.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; LEÃO, R. A. O. **Development of a capacitance sensor for monitoring soil moisture.** In: ASAE Annual International Meeting, Paper Number: 052183, Tampa, Florida, July 2005, 11p.

SILVA, R. A. **Programando microcontroladores PIC: Linguagem C**. Ed. Ensino Profissional – São Paulo, 183p.,2006.

SILVA, T. J. A. **Importância da automação para monitoramento ambiental**. II Workshop de aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental, Taubaté – SP, 2008. CD ROM.

SONKA, S. T.; BAUER, M. E.; CHERRY, E. T. **Precision agriculture**. In: 21st Century Geospatial and Information Technologies in Crop Management, 1997. Disponível em: <[http://www.arvus.com.br/infos\\_AP.htm](http://www.arvus.com.br/infos_AP.htm)>. Acesso em: 01 de Outubro de 2009.

STEIDLER NETO, A. J.; ZOLNIER, S. **Avaliação de circuito eletrônico para medição de temperatura em instalações agrícolas por meio da porta paralela de um computador**. Revista de Engenharia Agrícola, Jaboticabal, n.2, vol.26, p.335-343, maio/ago. de 2006.

SUZUKI, M. A.; HERNADEZ, F. B. T. **Automação de sistemas de irrigação**. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos. Curso 25 a 29 de Janeiro, Ilha Solteira – SP. Disponível em: <<http://www.agr.feis.unesp.br/curso2.htm>> . Acesso em: 10 de Junho de 2008.

SWART, J.W. **Evolução de microeletrônica a microssistemas**. CCS e FEEC – Unicamp, SP. 2006. Disponível em: <<http://www.ccs.unicamp.br/cursos/fee107/download/cap01.pdf>>. Acesso em: 10 de novembro de 2009.

TAVARES, P. L. **Rede de sensores sem fio**. 2002. Disponível em: <[http://www.gta.ufrj.br/grad/02\\_2/Redes%20de%20sensores/Redes%20de%20Sensores%20Sem-fio.htm](http://www.gta.ufrj.br/grad/02_2/Redes%20de%20sensores/Redes%20de%20Sensores%20Sem-fio.htm)>. Acesso em: 09 de novembro de 2009.

TAVARES, V. E. Q. **Sistemas de irrigação e manejo de água na produção de sementes**. 2007. 182 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes), Universidade Federal de Pelotas, Rio Grande do Sul, 2007.

THELEN J., GOENSE D., LANGENDOEN K. **Radio wave propagation in potato fields**. In First workshop on Wireless Network Measurements (co-located with WiOpt 2005), Riva del Garda, Italy, Apr. 2005.

TOPP, G. C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A. P. **Eletromagnetic determination of soil watercontent: measurements in coaxial transmission lines**. Water Resources Research, New York, v.16, p.574-582, 1980.

TORRE NETO, A.; RABELLO, L.M. **Redes de sensores sem fio para manejo da irrigação**. II Workshop de aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental, Taubaté – SP, 2008. CD ROM.

TRINTINALHA, M. A.; GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; TORMENA, C. A.; BERTONHA, A.; TSUKADA, J. **Efeito da instalação e da variabilidade entre sondas no uso da técnica de TDR em um nitossolo vermelho distroférico**. Acta Scientiarum, Maringá, v.23, n.5, p.1165-1171, 2001.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. **Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens**. Revista Ciência Rural, Santa Maria, v.32, n.1, p.159-163, 2002.

USATEGUI, J. M. A.; MARTÍNEZ, I. A. **Microcontroladores PIC, diseño práctico de aplicaciones**. 3. ed. Spain: Mc Graw Hill, 2003, 357p.

WANG, N.; ZHANG, N.; WANG, M. **Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective**. Computers and Electronics in Agriculture, v.50, p.1-14, 2006.

WHEAT, J.; HISER, R.; TUCKER, J.; NEELY, A.; MCCULLOUGH, A. **Designing a Wireless Network**. Rockland: Syngress, 2001. 379p.

YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. **Wireless sensor network survey**. Computer Networks, v.52, p.2292-2330, 2008.

ZAZUETA, F. S.; XIN, J. **Soil Moisture Sensors**. University of Florida, Bulletin 292, 12p., April 1994. Disponível em: <<http://www.p2pays.org/ref/08/07697.pdf>>. Acesso em: 08 de Março de 2007.

ZHANG, Z. **Investigation of wireless sensor networks for precision agriculture**. In: ASABE – Annual International Meeting, Ottawa, Ontario, Canada. Paper Number: 041154, august 2004, 8p.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)