



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Fábio Nelson de Sousa Pereira

**REDE DE SENSORES SEM FIO PARA FINS DE MANEJO DA  
IRRIGAÇÃO**

JUAZEIRO – BA  
2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Fábio Nelson de Sousa Pereira

**REDE DE SENSORES SEM FIO PARA FINS DE MANEJO DA  
IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da UNIVASF, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, com área de concentração em Engenharia de Água e Solo.

Orientador: Prof. DSc. Brauliro Gonçalves Leal

JUAZEIRO – BA  
2014

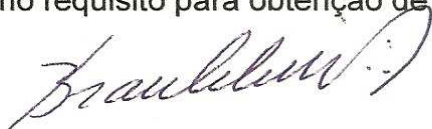
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Fábio Nelson de Sousa Pereira

REDE DE SENSORES SEM FIO PARA FINS DE MANEJO DA IRRIGAÇÃO

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da UNIVASF, como requisito para obtenção de título de Mestre.



---

Dr. Brauliro Gonçalves Leal  
Universidade Federal do Vale do São Francisco - Univasf



---

Dr. Pedro Robinson Fernandes de Medeiros  
Universidade Federal do Vale do São Francisco - Univasf

---



Dr. Fabio Freire de Oliveira  
IF Sertão Pernambucano

Juazeiro, 27 de junho de 2014.

## **Dedicatória**

***Ao meu pai, Nelson José,  
pelo seu esforço e dedicação  
para que seus filhos ficassem  
com a sua única herança, o  
conhecimento!***

***Dedico.***

## **Agradecimentos**

Uma jornada se dá a partir do primeiro passo, mas sem o apoio e incentivo daqueles que estão à nossa volta, certamente não seria possível concluí-la. A todos que apoiaram, incentivaram e torceram por essa conquista...

À Deus.

À minha família, Adriana Carla pela sua paciência e apoio nos momentos de desespero; E Fabíola Maria, por me alegrar e distrair, me fazendo esquecer temporariamente dos estresses. A vocês duas que foram meu esteio, souberam suportar meus momentos de inflexão e me fizeram entender que devo sempre reservar um tempo para vocês.

Aos meus pais Nelson Pereira e Darci Pereira, pelo exemplo de vida e apoio.

Aos meus sogros, Manoel e Clécia, pois seu apoio e torcida pelo sucesso sempre me motivaram.

Aos meus irmãos, Carlos Henrique e Marcos Emílio, e suas famílias, pois os momentos que estamos juntos é sempre uma festa!

Ao meu primo João Cláudio Bastos, sem suas receitas eu não teria condições de me concentrar na dissertação!

À Universidade Federal do Vale do São Francisco e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – CPGEA, pela oportunidade oferecida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB, financiadora do Projeto de Pesquisa.

À Companhia para o Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba – CODEVASF 6ª Superintendência Regional, Juazeiro-BA.

Ao meu orientador Prof. DSc. Brauliro Gonçalves Leal, por acreditar em mim, mostrando como trabalhar com leveza e suavidade. Um exemplo de humildade, trabalho e sinergia com todos à sua volta.

Aos professores do CPGEA, que com paciência e dedicação, conseguiram que eu formasse a base necessária para entender o lado Agrícola do experimento.

Aos parceiros de mestrado que “suaram” debaixo do sol comigo: Danillo Olegário, Saulo Medrado, Hideo Nagahama e Daniel Costa.

Aos companheiros do mestrado: Ana Terranova, Marcos Alexandre, Fernando, José Alberto, Francisco, Fátima, Flávia e Bruno. Cujo companheirismo, apoio e amizade me auxiliaram a entender e apreciar essa área que adentro.

Aos colegas do CECOMP: Marcelo Linder, Mário Godoy, Leonardo Navarro, Max Santana, Ana Emília, Jorge Cavalcanti, Ricardo Argenton e demais colegas pelo suporte.

Aos alunos de Eng. da Computação e Eng. Agrícola: Sérgio Murilo, Eduardo Santana, Raphael Mendes, Sergio Soares, Bruno Pinho e Iug Lopes. A participação de vocês no projeto da FAPESB foi essencial.

Aos funcionários terceirizados que me auxiliaram em várias etapas do projeto: Estevão Soares, José Carlos e Neiler Raniere. Sem o auxílio de vocês o projeto não aconteceria.

A todos aqueles que contribuíram para a conclusão desta dissertação,

... Meus sinceros agradecimentos.

PEREIRA, F. N. S. **Rede de sensores sem fio para fins de manejo da irrigação**. 2014. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF. Juazeiro-BA.

## RESUMO

O Pólo de Desenvolvimento Juazeiro-Petrolina é um exemplo da aplicação de políticas públicas bem sucedidas, voltada para o desenvolvimento do Semiárido Nordeste, fundamentado na agricultura irrigada. Neste projeto foi desenvolvido o hardware necessário para o funcionamento de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) com sensores de umidade do solo de matriz granular e o software para controle e aquisição dos dados. Os testes foram feitos em vasos preenchidos com Vertissolo Háplico e Cambissolo Háplico, cultivados com gramas batatais (*Paspalum notatum*), através da análise estatística entre os valores de umidade do solo medidos pela RSSF em três ciclos de umedecimento/secagem e os valores de amostras obtidas pelo método termogravimétrico. Nos experimentos realizados, pôde-se comprovar o funcionamento da RSSF e a possibilidade de seu uso no auxílio à tomada de decisão no manejo da irrigação. Os sensores utilizados apresentaram Erro Relativo Percentual de 10,32% e 9,18 para Vertissolo Háplico e Cambissolo Háplico respectivamente. A performance dos sensores de umidade estudados é satisfatória e podem ser recomendados para o manejo da irrigação nos solos avaliados.

**Palavras Chave:** Semi-árido, Umidade do solo, Agricultura de Precisão, Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The Petrolina-Juazeiro Development Center is an example of the successful application of public policies, aimed at the development of the Semiarid Northeast, based on irrigated agriculture. In this project the hardware required for the operation of WSNs with soil moisture sensors and software for control and data acquisition was developed. The tests were done in vases filled with Cambisol and Vertisol, planted with Bahiagrass grasses (*Paspalum notatum*), by the statistical analysis between the values of soil moisture measured by WSN in three cycles of wetting/drying and the values of samples obtained by thermogravimetric method. In the experiments, we could demonstrate the operation of the WSN and the possibility of its use as an aid to decision making in irrigation management. The sensors used showed relative percentage error of 9.18% and 10.32% for Cambisol and Vertisol respectively. The performance of moisture sensors studied is satisfactory and can be recommended for the management of irrigation in the evaluated soils.

**Keywords:** Semiarid, Soil moisture, Precision Agriculture, Sustainability



# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>12</b>
2.1 O Solo .....	12
2.2 O Fluxo de Água no Solo .....	12
2.3 Métodos de Determinação da Umidade do Solo .....	15
2.3.1 Métodos indiretos volumétricos .....	16
2.3.2 Métodos indiretos tensiométricos .....	16
2.3.3 Sensor de Umidade de Matriz Granular ( <i>granular matrix sensor – GMS</i> ) .....	17
2.4 Redes de Sensores Sem Fio – RSSF .....	18
2.4.1 Padrão ZigBee .....	19
<b>CAPÍTULO 1. Determinação da Variação da Umidade do Solo Através de uma Rede de Sensores Sem Fio .....</b>	<b>21</b>
Introdução .....	22
Material e Métodos .....	23
Resultados e Discussão .....	28
Conclusões .....	33
Referências Bibliográficas .....	34
<b>CAPÍTULO 2. Desenvolvimento e Avaliação de uma Rede de Sensores Sem Fio para Uso no Manejo da Irrigação .....</b>	<b>38</b>
Introdução .....	39
Material e Métodos .....	40
Resultados e Discussão .....	57
Conclusões .....	59
Trabalhos Futuros .....	59
Referências Bibliográficas .....	59
<b>3. CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>63</b>
<b>4. AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>64</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>65</b>

# 1. INTRODUÇÃO

O uso da água apresenta tendência de aumento, seja pelo aumento populacional, culminando numa maior necessidade por alimentos, seja pelo aumento da disponibilidade de terras com aptidão para uso na agricultura irrigada.

Além do uso da água pela agricultura existem diversas demandas de água, tais como: pecuária, industrial, urbana, entre outras. O maior usuário de água é a população mundial que depende da irrigação para a produção de alimentos, com cerca de 70% do consumo. O abastecimento urbano representa 11%, o consumo animal, 11%, o industrial, 7% e o abastecimento rural, 2% (BRAGA, 2008).

A agricultura irrigada, para manter-se sustentável em termos ambientais, precisa ser eficiente no uso da água na irrigação. Essa eficiência pode ser alcançada atuando-se: a) na estrutura de irrigação então existente, em termos de tipos de cultivo, sistemas de irrigação e gestão do uso de água; b) nos métodos de manejo da irrigação e c) nas técnicas que permitem aumento da eficiência do uso da água (BERNARDO, 1996). Através da agricultura de precisão é possível ter uma produção agrícola de alta eficiência e sustentável (ZHANG et al., 2002), inclusive com o a incorporação de avanços tecnológicos nos sistemas de produção agrícola (SUN et al, 2010; ZHANG et al., 2002).

A agricultura de precisão consiste em uma grande perspectiva de trabalho no campo das redes de sensores sem fio. O estabelecimento de uma RSSF em uma fazenda ou plantação para monitorar variáveis relacionadas a estas culturas vem se destacado em diversos trabalhos científicos e aplicações práticas. O monitoramento da temperatura, pressão, umidade do solo e nível de radiação solar são os principais tópicos investigados na literatura, visando a otimização da irrigação e um maior benefício da atividade agrícola em diversas situações, como: a) em uma plantação de chá (SUN et al, 2010); a) evitando o excesso de água em plantações (SHU-MING et al, 2009); c) combatendo a propagação de fungos em uma plantação graças ao controle da umidade e temperatura da cultura (BAGGIO, 2005); e d) na irrigação de um campo de futebol (DE LIMA et al, 2010).é um método para estimar, avaliar e compreender as mudanças que ocorrem em culturas, a fim de ser capaz de determinar a necessidade de irrigação e fertilizantes (ZHANG et al., 2002)

O uso de rede de sensores sem fio é uma tecnologia emergente que pode contribuir para o aumento da eficiência do uso da água de irrigação (LIMA et al., 2010). Cardenas-Lailhacar e Dukes (2010) verificaram que o manejo da irrigação feito via sensoreamento da umidade do solo pode resultar em até 80% de economia de água.

STAFFORD (2000) afirma que na agricultura de precisão é necessário que haja a atuação de equipes multidisciplinares para a criação de soluções. A SBC (2006) mostra que novas formas de interação entre as ciências, em vários níveis e escalas, são mediadas pela Tecnologia da Informação, que é a simbiose da Ciência da Computação com diferentes domínios do conhecimento. Muitas das grandes descobertas científicas recentes são resultados do trabalho de equipes multidisciplinares que envolvem cientistas da computação

A aplicação da computação no projeto desenvolvimento de Redes de Sensores sem fio para fins de manejo agrícola pode contribuir para o aumento da eficiência da água na agricultura e permitir a sustentabilidade do uso da irrigação.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 O solo**

Segundo Prevedello (1996), o solo é um sistema multicomponente formado pelas fases sólida, líquida e gasosa. No manual técnico de pedologia (IBGE, 2007) encontra-se a seguinte definição: material mineral e/ou orgânico inconsolidado na superfície da terra que serve como meio natural para o crescimento e desenvolvimento de plantas terrestres.

A parte sólida do solo é formada, na sua maior parte, por partículas, minerais e substâncias orgânicas em decomposição. As partículas são divididas em frações texturais: areia, silte e argila. As proporções de cada fração textural irão resultar em diferentes texturas do solo. A forma como essas partículas estão dispostas irá determinar a estrutura do solo (PREVEDELLO, 1996).

A parte líquida é formada pela solução do solo, contendo cátions como, por exemplo,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{H}^+$ . A solução do solo ocupa os espaços entre as partículas sólidas (poros) e pode estar presente completamente (solo saturado) ou parcialmente (solo não saturado). Os espaços não preenchidos pela parte líquida serão ocupados pela parte gasosa, composta por gases como o  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$   $\text{NH}_3$  e vapor de água (PREVEDELLO, 1996).

### **2.2 O Fluxo de Água no Solo**

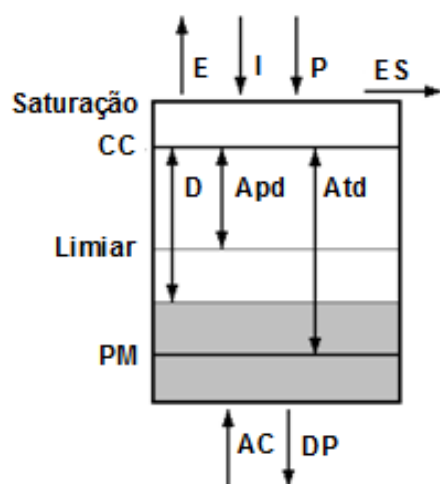
Segundo Brady (1989), água é o componente dinâmico do solo. O fluxo da água em seu estado líquido se dá de uma zona com potencial de umidade mais elevado para uma zona com potencial mais reduzido, sendo identificados três tipos de movimento no interior do solo: fluxo não saturado, fluxo saturado e equalização de vapores.

O fluxo saturado ocorre quando os poros na porção mais molhada do solo estão totalmente cheios de água. O fluxo não saturado se dá quando os poros estão

parcialmente cheios de água (ALLEN et al., 1998; CHANDRASEKARAN et al., 2010).

O balanço hídrico é um método que permite avaliar os fluxos de água no solo, quantificando a água que entra e que sai de um volume de solo em determinado período de tempo (PEREIRA, 2005). A Figura 2 apresenta os fluxos e limites da água no solo, aqui denominados componentes do balanço hídrico.

**Figura 1.** Componentes do balanço hídrico proposto por Allen et al. (1998). Representação esquemática dos componentes do balanço hídrico (seus fluxos e limites no solo), a área em cor cinza representa água no solo (Fonte: ALLEN et al.,1998).



**Legenda:**

Sigla	Descrição
AC	Ascensão Capilar
Apd	Água parcialmente disponível
Atd	Água total disponível
CC	Capacidade de Campo
D	Déficit hídrico
DP	Drenagem Profunda
E	Evaporação
ES	Escoamento Superficial
ETc	Evapotranspiração da cultura
I	Irrigação
Limiar	Limite para água parcialmente disponível
P	Precipitação
PM	Ponto de Murchamento
Saturação	Limite de água no solo

Dependendo da quantidade de água presente no solo, ele pode estar saturado, na capacidade de campo (CC) ou no ponto de murchamento permanente (PM). A água presente no solo entre a capacidade de campo e o ponto de

murchamento (Atd) é que está disponível para as plantas (ALLEN et al., 1998; CHANDRASEKARAN et al., 2010).

A capacidade das culturas agrícolas de extrair água do solo diminui à medida que o solo atinge o seu ponto de murchamento. Quando o solo está suficientemente úmido, ele provê água de modo rápido o bastante para atender a demanda atmosférica. Com a diminuição da água do solo, sua matriz tende a retê-la com maior intensidade e a sua extração torna-se mais difícil. Quando a água do solo fica abaixo de um valor limiar (Apd), ela não pode ser transportada do solo para as raízes da planta de modo rápido o suficiente para atender a transpiração da cultura e ela começa a experimentar estresse hídrico (ALLEN et al., 1998; CHANDRASEKARAN et al., 2010).

A água pode ser armazenada no perfil do solo até alcançar a sua capacidade de campo. Devido à chuva e, ou, irrigação, a água contida no perfil do solo pode exceder sua capacidade de campo. Em decorrência da infiltração, da evaporação e da transpiração, a água contida no perfil do solo diminui gradativamente ocasionando o aumento de sua depleção. Na ausência de chuva e irrigação, a água contida no perfil do solo alcançará seu valor mínimo (PM). Neste momento a evaporação e a transpiração cessam e a depleção alcançará seu valor máximo (ALLEN et al., 1998).

A irrigação e a chuva acrescentam água no solo. Parte delas pode ser perdida através do escoamento superficial e da percolação profunda. A água também pode ser transportada verticalmente para o perfil do solo através de ascensão capilar. A água transportada horizontalmente através de fluxo sub-superficial, para dentro ou para fora do perfil do solo pode ser desprezada, exceto para o caso do solo apresentar elevada declividade. A evaporação do solo e a transpiração da cultura retiram água da zona radicular (ALLEN et al., 1998).

## 2.3 Métodos de Determinação da Umidade do Solo

Os sensores de umidade do solo são bastante utilizados na agricultura de precisão, pois podem mensurar e monitorar a quantidade de água, possibilitando o gerenciamento de água, sendo uma das técnicas aplicadas na agricultura sustentável (BENEDÍ; MUÑOZ-CARPENA, 2005; BAGGIO, 2005).

O monitoramento da umidade do solo é necessário para determinar quando e quanto irrigar, sendo essencial para o manejo da irrigação (BENEDÍ; MUÑOZ-CARPENA, 2005; BAGGIO, 2005).

Os métodos de determinação de umidade do solo e podem ser de dois tipos: direto e indireto. Os métodos diretos são bastante precisos e baratos, mas são lentos e destrutivos. Os métodos indiretos não são destrutivos, ou seja, podendo ser utilizados para serem realizadas inúmeras leituras em um mesmo ponto, mas podem sofrer influências de vários fatores como salinidade, tipo do solo e temperatura (BENEDÍ; MUÑOZ-CARPENA, 2005; CARDENAS-LAILHACAR; DUKES, 2010).

O teor de água no solo pode ser mensurado de forma direta pelo método termo gravimétrico (método padrão), utilizado para determinar a quantidade de água no solo através da razão entre a massa de solo úmido e a massa do mesmo solo seco. O processo se dá através da coleta de uma amostra, faz-se sua pesagem (solo úmido) e leva-a para secar, em uma estufa a 105°C durante 48 horas, após esse período a amostra é novamente pesada (solo seco) (BENEDÍ; MUÑOZ-CARPENA, 2005; SÁ et al, 2008).

Benedí e Muñoz-Carpena (2005), classificam os métodos indiretos em volumétrico e tensiométrico, usados para a obtenção do volume de água e o potencial matricial do solo, respectivamente.

Os métodos indiretos volumétricos são a sonda de nêutrons e os métodos dielétricos (reflectometria no domínio do tempo – Time Domain Reflectometry–TDR, reflectometria no domínio da frequência – Frequency Domain Reflectometry – FDR, reflectometria no domínio da amplitude – Amplitude Domain Reflectometry – ADR, transmissão de fase – phase transmission e transmissão no domínio do tempo – Time Domain Transmission – TDT).

Os métodos indiretos tensiométricos são tensiômetro, bloco de gesso, sensor de dissipação de calor e psicrômetro.

### 2.3.1 Métodos indiretos volumétricos

A sonda de nêutrons é um método baseado na emissão de nêutrons que são desacelerados ao colidir com átomos de hidrogênio, criando uma nuvem de nêutrons proporcional a quantidade de água no solo (BENEDÍ; MUÑOZ-CARPENA, 2005).

Os métodos dielétricos são caracterizados por estimar o volume de água através da constante dielétrica do solo, que é influenciada pela presença de água. São eles:

- TDR: baseado na análise do tempo decorrido na propagação de um pulso no solo;
- FDR: utiliza o solo como um dielétrico de um capacitor, o qual faz parte de um oscilador, a frequência gerada por esse oscilador é relacionada com a quantidade de água no solo;
- ADR: relaciona a impedância do solo com a quantidade de água, através da variação da amplitude de uma onda eletromagnética;
- Transmissão de fase: relaciona a umidade com a mudança de fase ocasionada pela transmissão de uma onda pelo solo;
- TDT: baseado na análise do tempo decorrido na propagação de um pulso em uma linha de transmissão, parecido com o TDR, mas requer uma conexão elétrica no começo e no fim da linha de transmissão.

### 2.3.2 Métodos indiretos tensiométricos

Os métodos deste grupo estimam o potencial matricial de água no solo, que inclui os efeitos de capilaridade e absorção da fase sólida do solo. A determinação do potencial matricial, que é um dos componentes do potencial total de água do solo, se dá através da tensão da água (ALLEN et al, 1998; BENEDÍ; MUÑOZ-CARPENA, 2005).

Os sensores tensiométricos possuem um material poroso. Em contato com o solo, a água pode se mover para dentro ou para fora deste meio poroso (BENEDÍ; MUÑOZ-CARPENA, 2005).

São eles:



- Tensiômetro: a pressão de um tubo selado preenchido com água em equilíbrio com a água contida no solo representa o potencial matricial do solo;
- Bloco resistivo: relaciona a resistência elétrica entre eletrodos inseridos em um meio poroso com o potencial matricial do solo;
- Dissipação de calor: relaciona a taxa de dissipação de calor em um meio poroso com o potencial matricial do solo;
- Psicrômetro do solo: o potencial matricial é determinado pela umidade relativa de uma câmara dentro de um copo poroso em equilíbrio com o solo.

### **2.3.3 Sensor de Umidade de Matriz Granular (*granular matrix sensor* – GMS)**

O sensor de umidade Watermark modelo 200SS (Figura 03) é um sensor de bloco resistivo do grupo de sensores do método tensiométrico, consiste em eletrodos inseridos em um material granular de quartzo, envolvido por uma membrana sintética e uma malha protetora de metal. Internamente possui um bloco de gesso para amenizar os efeitos de um solo salino (BENEDÍ; MUÑOZ-CARPENA, 2005; IRRONETER, 2012). Silva (2013) testou sensores de matriz granular em quatro níveis de água salina (0, 3, 6, e 9 dS/m), não percebendo diferença entre eles.

**Figura 2:** O sensor de umidade Watermark modelo 200SS(Fonte: IRRONETER, 2011).



## 2.4 Redes de Sensores Sem Fio – RSSF

Uma Rede de Sensores (RS) é descrita por Sohraby et al (2007) como sendo uma infraestrutura composta por elementos de medição, computação e comunicação, que dão a capacidade de analisar, observar e reagir a eventos e fenômenos em um ambiente específico. Quando os nós sensores componentes de uma RS são ligados em rede através de um meio sem fio (*wireless*), esses dispositivos podem ser utilizados para as mais variadas situações, por exemplo, em soluções tecnológicas aplicadas nas áreas de medicina, agricultura, segurança, ambiental (BARONTI et al, 2007; SOHRABY et al, 2007; LÓPEZ RIQUELME et al, 2009; HUANG et al, 2010; SANTOS et al, 2011).

Existem quatro componentes básicos em uma RS (SOHRABY et al, 2007):

- Uma série de sensores distribuídos;
- Uma rede de interconexão destes sensores;
- Um ponto central para o envio dos dados dos sensores e
- Um componente computacional para processar os dados recebidos.

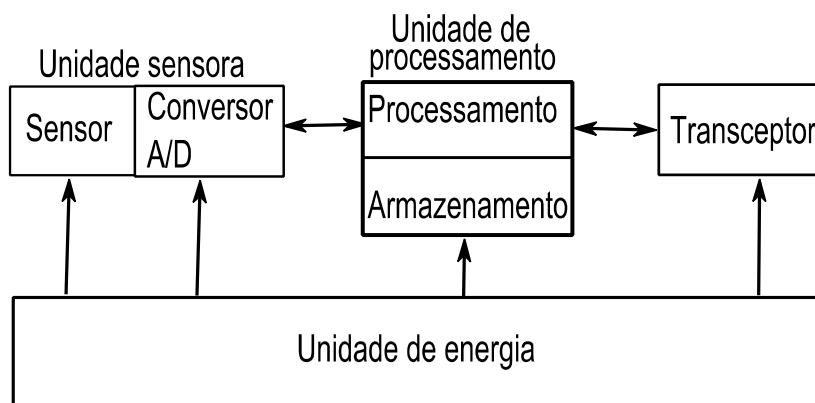
Uma Rede de Sensores Sem Fio é uma RS composta por dispositivos de baixo consumo de energia, pequeno poder de processamento e memória, interligados por uma rede sem fio. Uma característica marcante da RSSF é que após implantada, ela se organiza automaticamente para o envio dos dados medidos ao nó central (AKYILDIZ et al, 2002; LOUREIRO et al, 2003; BARONTI et al, 2007).

O nó central, também chamado de coordenador ou sorvedouro, é o responsável por controlar a rede, através dele é possível enviar comandos, solicitar o envio de dados, transferir tarefas e processamento aos nós sensores (AKYILDIZ et al, 2002; LOUREIRO et al, 2003; BARONTI et al, 2007).

O nó sensor de uma RSSF (Figura 04) é composto de uma unidade sensora, unidade de processamento, unidade de energia e transceptor. A unidade sensora é composta por um transdutor (sensor) ativo ou passivo, responsável por perceber um fenômeno, e um conversor analógico/digital (A/D), responsável por converter a entrada analógica em digital para ser transmitida à unidade de processamento. A unidade de processamento é responsável por processar e armazenar os dados recebidos pela unidade sensora, gerencia o funcionamento do sensor e sua função na rede. A unidade de energia é responsável por energizar as unidades do nó

sensor. O transceptor é o componente responsável por enviar e receber mensagens para a rede sem fio, a qual o nó faz parte. Além destes componentes o nó sensor pode ter atuadores, sistemas de geração de energia, sistemas de localização, movimentação entre outros (AKYILDIZ et al, 2002; LOUREIRO et al, 2003; BARONTI et al, 2007)

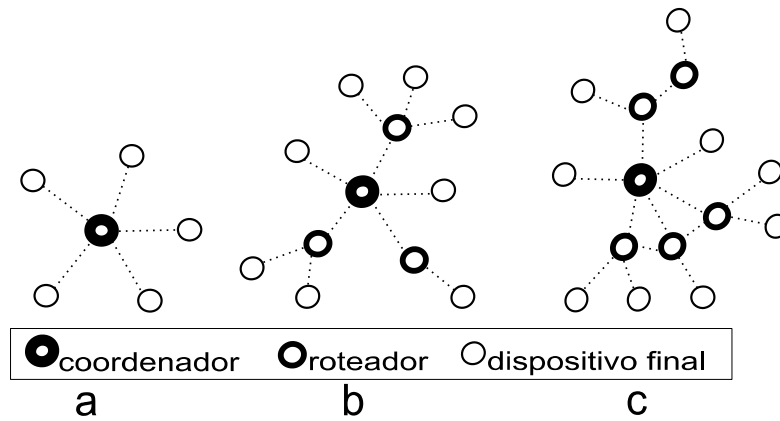
**Figura 3:** Arquitetura básica de um nó sensor, componente de uma RSSF.



### 2.4.1 Padrão ZigBee

ZigBee Alliance é um consórcio de empresas, com o intuito de desenvolver padrões e produtos de rede sem fio confiáveis, de baixo custo e baixa potência (BARONTI et al, 2007). O padrão ZigBee foi construído em cima do padrão criado pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE*), IEEE 802.15.4, o qual define o funcionamento das camadas física e de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control - MAC*) para redes pessoais (*Personal Area Networks - PAN*) de baixo custo e baixa taxa de transmissão. ZigBee define as especificações da camada de rede e fornece um suporte a programação para a camada de aplicação. As topologias suportadas pelo ZigBee são estrela, árvore e malha (Figura 4). (BARONTI et al, 2007; MORAIS et al, 2008; DIGI INTERNATIONAL INC., 2011).

**Figura 4:** Topologias adotadas pelo padrão ZigBee: estrela (a), árvore (b) e em malha (c). (Fonte: DIGI INTERNATIONAL INC., 2011.)



1 **DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO ATRAVÉS DE UMA**  
2 **REDE DE SENSORES SEM FIO.<sup>(1)</sup>**

3 Fábio Nelson de Sousa Pereira<sup>(2)</sup> & Brauliro Gonçalves Leal<sup>(3)</sup>

4

5 **RESUMO**

6 Foi avaliado uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), utilizando nós XBee Pro S2 e  
7 sensores de umidade do solo de matriz granular, na região do Polo de Desenvolvimento  
8 Juazeiro-Petrolina, no Semiárido Nordeste. Foram utilizados dois tipos de solos em vasos,  
9 Cambissolo e Vertissolo Háplicos, plantados com gramas batatais (*Paspalum notatum*). A  
10 performance dos sensores estudados, foi satisfatória e podem ser recomendados para o  
11 manejo da irrigação nos solos avaliados. Os sensores de umidade apresentaram Erro Relativo  
12 Percentual médio de 10,32% e 9,18% para Vertissolo Háplico e Cambissolo Háplico  
13 respectivamente.

14 **Palavras-chave:** Sensor de matriz granular, Manejo, Semi-árido, Irrigação.

15

16 **ABSTRACT**

17 A Wireless Sensor Network using us XBee Pro S2 and Watermark 200SS soil moisture  
18 sensors in the development center Petrolina-Juazeiro in Semiarid Northeastern region has  
19 been reported. Were used two types of soil in vases, Cambisol and Vertisol, planted with  
20 grasses Bahiagrass (*Paspalum notatum*). The performance of the studied sensors was  
21 satisfactory and can be recommended for the management of irrigation in evaluated soils. The  
22 humidity sensors showed mean Relative Percentage Error of 10.32% and 9.18% for Vertisol  
23 and Cambisol respectively.

24 **Keywords:** Granular Matrix Sensor, Management, Semi-arid, Irrigation.

25

## 26       **INTRODUÇÃO**

27           O conceito de agricultura de precisão (AP) não é novo, como demonstra Stafford  
28 (2000) e a visão da necessidade do uso de novas tecnologias e automação já era previsto  
29 desde o início do século XX (STAFFORD, 2000), inclusive no Brasil (TSCHIEDEL &  
30 FERREIRA, 2002; GENTIL & FERREIRA, 1999). O aparecimento de novas tecnologias  
31 possibilitou o aumento nas pesquisas (COX, 2002), desenvolvimento de sistemas integrados  
32 (LEE et al, 2010; RUIZ-ALTISENT, M. et al, 2010; CUGNASCA et al, 2010; CAMILLI et  
33 al, 2007) e na utilização destes no campo (MACEDO et al, 2012; MACHADO et al, 2004).  
34 Como a necessidade do aumento na produção de alimentos vem aumentando a cada ano  
35 (ABBASI et al, 2014; TSCHIEDEL & FERREIRA, 2002; COX, 2002), existe a necessidade  
36 do uso consciente dos recursos hídricos (COX, 2002), para termos um aumento sustentável  
37 desta produção. Por outro lado uma das barreiras à implementação da AP, segundo Stafford  
38 (2000), é que muitos dos dados necessários são trabalhosos e custam caro, portanto os dados  
39 necessários devem ser gerados de forma automatizada através de sistemas de sensoriamento.  
40 Sensores podem ser usados para monitorar fenômenos físicos da natureza (ABBASI et al,  
41 2014), e serem utilizados para não só evitar o desperdício de água, como doenças causadas  
42 pela umidade excessiva (RAMYA et al, 2012; MORAIS et al, 2008), perda de nutrientes do  
43 solo e salinização (HERNANDEZ, 2014).

44           Novas tecnologias capazes de mudar paradigmas de produção de alimentos precisam  
45 ser desenvolvidas e disponibilizadas para seus usuários. A água e seu uso sustentável é um  
46 imperativo mundial. Segundo Bernardo (1996) e Hernandez (2003), a grande fonte de  
47 preocupação dos irrigantes são os questionamentos de quando e quanto irrigar. Saber o  
48 momento certo de iniciar a irrigação e quanto de água deve ser aplicada é o objetivo do  
49 manejo da irrigação. Neste sentido o uso de uma RSSF para o manejo da irrigação vem  
50 contribuir para o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias que podem aumentar

51 significativamente a economia de água, esta realidade foi observada por Cardenas-Lailhacar e  
52 Dukes (2010), os quais verificaram que o manejo da irrigação feito via sensoriamento da  
53 umidade do solo pode resultar em até 80% de economia de água. Bem como Lima et al  
54 (2010), observaram que o uso de rede de sensores sem fio é uma tecnologia emergente que  
55 pode contribuir para o aumento da eficiência do uso da água de irrigação.

56 A Região Integrada de Desenvolvimento (RIDE), situada em Petrolina/Juazeiro, é uma  
57 região de intensa produção de fruticultura irrigada (IBGE, 2014), mas o manejo da irrigação  
58 ainda não é feito de forma adequada. Este trabalho apresenta a aplicação de uma Rede de  
59 Sensores Sem Fio no manejo da irrigação, utilizando sensores de umidade do solo de matriz  
60 granular e discute a sua eficiência e precisão.

## 61 MATERIAL E MÉTODOS

62 O trabalho foi conduzido em uma área experimental da Universidade Federal do Vale  
63 do São Francisco – Campus de Juazeiro– BA, que se localiza nas coordenadas geográficas:  
64 latitude 09° 24' S, longitude 40° 31' W, e altitude de 371 m. Segundo a classificação de  
65 Köppen, o clima desta região apresenta-se como tropical semiárido, tipo BshW, seco e quente  
66 na parte norte e semiárido quente estúpico na parte sul, caracterizado pela escassez e  
67 irregularidade das precipitações, com chuvas no verão e forte evaporação em consequência  
68 das altas temperaturas.

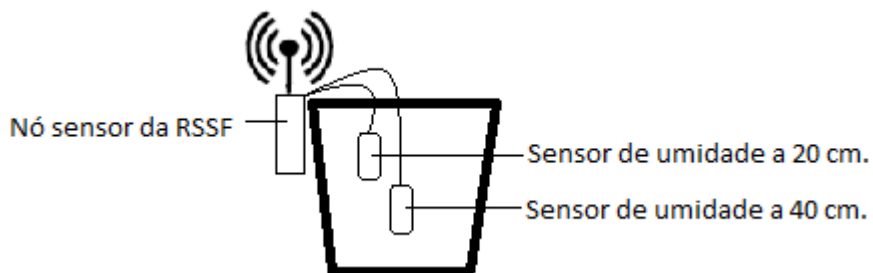
69 O experimento ocorreu no período de 01 de agosto a 27 de novembro de 2013, sendo  
70 que a coleta de dados ocorreu a partir de 24 de outubro no ano de 2013. Foram utilizados dois  
71 solos característicos do Submédio São Francisco: o Cambissolo Háptico, retirado do Distrito  
72 de Irrigado do Salitre, de textura franco-argilo-arenosa, classificado segundo o Sistema  
73 Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006) com 56,3% de areia, 17,6% de silte e  
74 26,1% de argila e o Vertissolo Háptico, retirado do Distrito Irrigado do Mandacaru, de textura  
75 franco/argilosa, classificado segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

76 (EMBRAPA, 2006) com 40,7% de areia, 22,0% de silte e 37,3% de argila. O solo foi seco ao  
77 ar, destorroado e peneirado em malha de 2 mm de diâmetro.

78 Foram utilizados sete vasos de 63 cm altura e diâmetro superior igual a 53 cm, com um  
79 volume total de 100 litros. O fundo dos vasos foram perfurados para o escoamento da água,  
80 foi adicionada uma camada de 5 cm de brita e preenchido com o solo. O solo foi saturado  
81 com água diariamente durante uma semana para sua acomodação. Após esse período foram  
82 plantadas mudas de grama-batatais (*Paspalum notatum*), por serem uma das culturas de  
83 referência em pesquisas de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998). Os sensores de umidade  
84 foram instalados um mês após o plantio das mudas. Antes da instalação os sensores de  
85 umidade foram imersos em água durante 24 horas, para que ficassem saturados, e instalados  
86 dois em cada vaso, nas profundidades médias de 20 cm e 40 cm (figura 01), faixa de  
87 profundidade do sistema radicular da maioria das culturas (BRADY, 1989). Os sensores 01,  
88 02, 03, 04, 05 e 06 foram instalados nos vasos preenchidos com Cambissolo Háplico, sendo  
89 que o grupo formado por 01, 03 e 05 estavam na profundidade média de 20 cm; E o grupo 02,  
90 04 e 06 estavam na profundidade média de 40 cm. Os sensores 07, 08, 09, 10, 11 e 12 foram  
91 instalados nos vasos preenchidos com Vertissolo Háplico, sendo que o grupo formado por 07,  
92 09 e 11 estavam na profundidade média de 20 cm; E os sensores 08, 10 e 12 estavam na  
93 profundidade média de 40 cm. Cada conjunto de sensores de umidade (Figura 3) foi  
94 conectado a um nó sensor de uma rede de sensores sem fio (RSSF). Cada nó sensor da RSSF  
95 possuía dois módulos SMX (Figura 2), os quais foram utilizados para o condicionamento do  
96 sinal do sensor de umidade, de forma que o sinal captado do sensor de umidade pudesse ser  
97 discretizado e enviado pela RSSF para posterior análise.

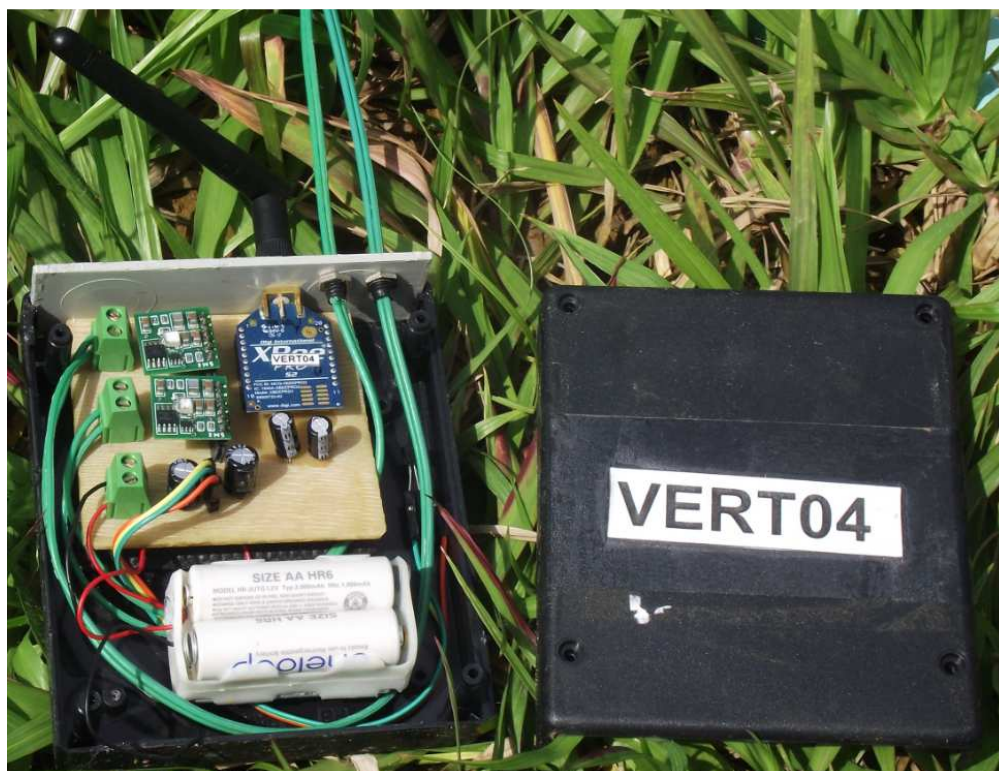
**Figura 1.** Vaso com os sensores de umidade e o nó sensor da RSSF.





98

99 **Figura 2.** Instalação do nó sensor para o início do experimento.



100

**Figura 3.** Sensores Watermark 200SS, nas profundidades média de 20 e 40 cm.



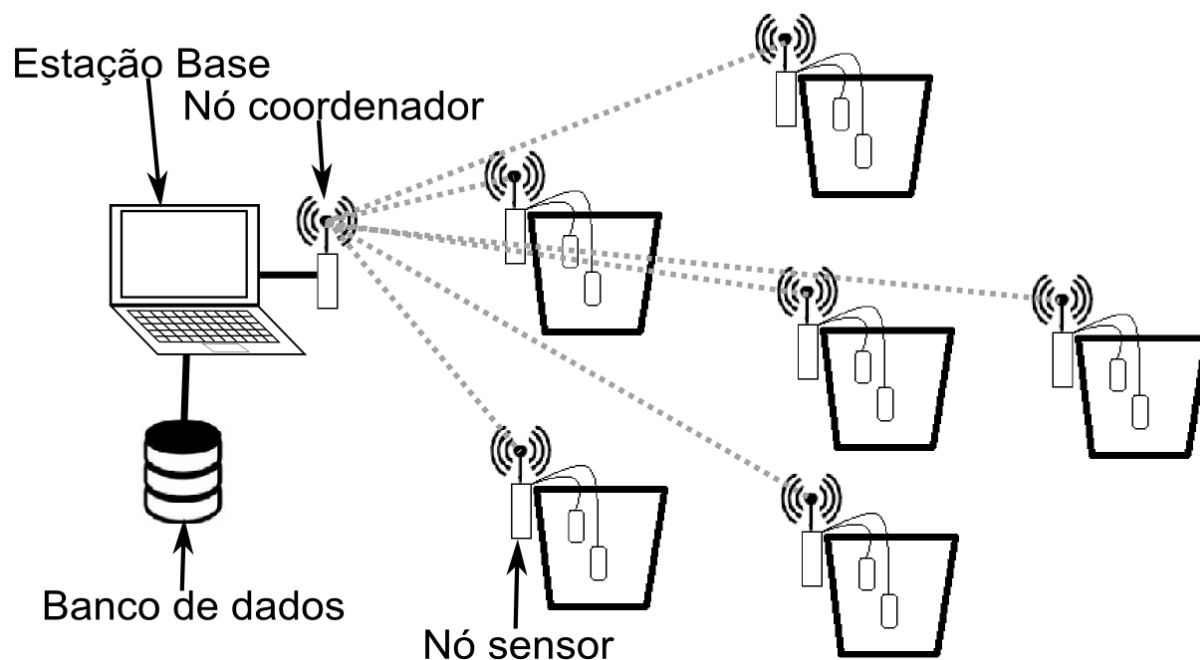
101 A RSSF, foi composta por sete XBee´s Pro, sendo um com a função de coordenador (nó  
102 sorvedouro) e seis nós sensores. O nó coordenador conectado a um computador através da  
103 porta USB (Figura 4), no qual um sistema de controle da rede era executado e os dados  
104 coletados armazenados em um banco de dados. Os nós sensores foram afixados nos vasos e  
105 conectados aos sensores de umidades instalados nos mesmos (figura 05).

**Figura 4:** Estação Base com o nó coordenador.



106

107 **Figura 5.** Representação da RSSF utilizada no experimento, onde um aplicativo sendo  
 108 executado em um computador recebia os dados das leituras feitas pelos sensores de umidade  
 109 instalados nos vasos e os armazenava em um banco de dados para posterior análise.



110  
 111 Após a instalação da RSSF, deu-se início a coleta de dados dos sensores de umidade,  
 112 uma leitura era enviada a cada 20 minutos durante todo o período do experimento. Foram  
 113 coletadas duas amostras de solo por vaso com uma sonda, às 08:00 h, nas profundidades  
 114 médias de 20 cm e 40 cm. Devido a dificuldade de acesso ao laboratório de análise não foi  
 115 possível fazer as coletas nas primeiras horas do dia. A umidade do solo coletado foi  
 116 determinada segundo o método gravimétrico (Embrapa, 1999).

117 Cada sensor de umidade foi calibrado através de uma equação linear (1), utilizando  
 118 cinco valores de umidade obtida pelo método padrão e os 5 valores correspondentes obtidos  
 119 do sensor de umidade. A equação apresenta a relação entre a umidade obtida pelo método  
 120 gravimétrico e a umidade e a leitura obtida do respectivo sensor. Na equação, "y" representa o  
 121 valor da umidade do solo estimada através das leituras dos sensores e "x" é o valor do sensor  
 122 enviado pela RSSF .

$$y = a + bx \quad (1)$$

123

124 Foi realizada uma análise descritiva e quantitativa dos erros obtidos através da equação  
 125 linear (1). Um dos parâmetros para determinar a precisão do sensor, foram o erro relativo  
 126 percentual ( $\Delta U$ , equação 2), o erro médio (EA, equação 3), o erro absoluto médio (MAE,  
 127 equação 4) e a raiz quadrada do erro quadrado médio (*Root Mean Square Error* - RMSE,  
 128 equação 5). Nas equações,  $U_p$  é a umidade do solo medida pelo método gravimétrico e  $U_s$  é a  
 129 umidade estimada através da equação linear 1.

130

$$\Delta U = 100 \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|U_{p_i} - U_{s_i}|}{U_{p_i}} \quad (2)$$

131

$$EA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_{p_i} - U_{s_i}) \quad (3)$$

132

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |U_{p_i} - U_{s_i}| \quad (4)$$

133

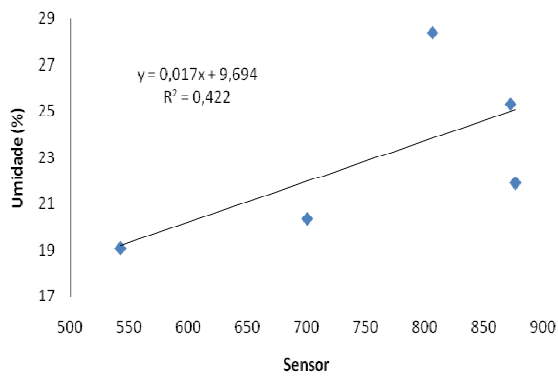
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{p_i} - U_{s_i})^2}{n - 1}} \quad (5)$$

134

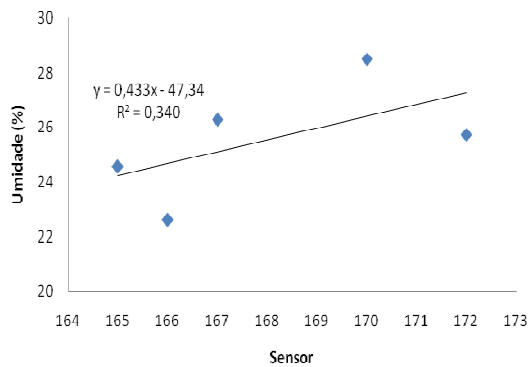
## 135 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

136

137 Os gráficos 3, 4, 5, 6, 7 e 8 apresentam as curvas de calibração dos sensores com as suas  
 138 respectivas equações e coeficientes de determinação



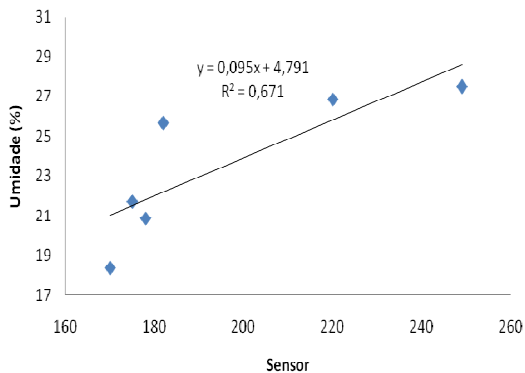
(a)



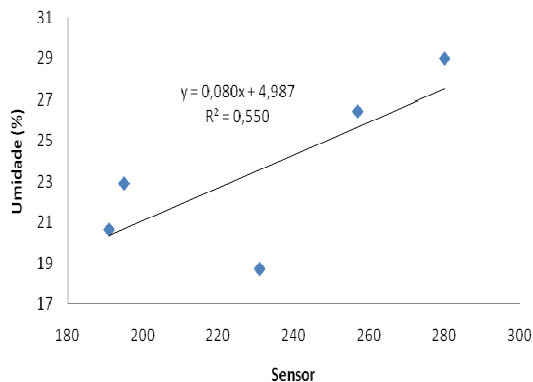
(b)

**Figura 3.** Curva de calibração do GMS no Cambissolo Háplico, nas profundidades médias:  
a) Sensor 01 a 20 cm; b) Sensor 02 a 40 cm.

139



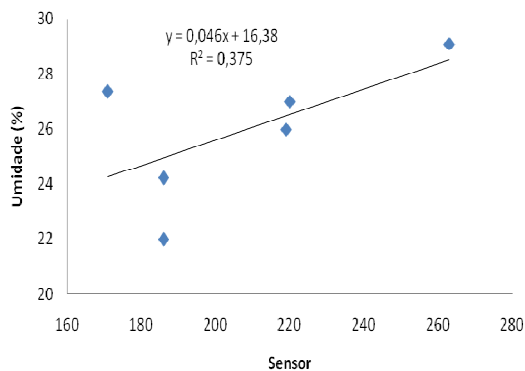
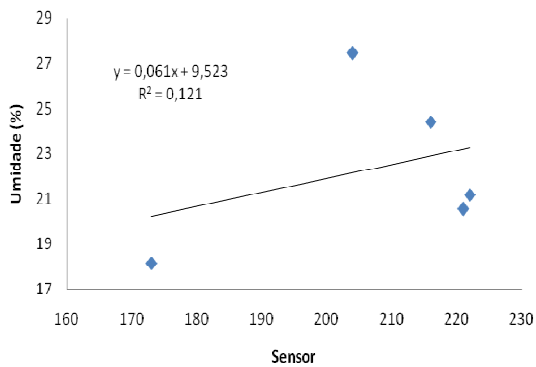
(a)



(b)

**Figura 4.** Curva de calibração do GMS no Cambissolo Háplico, nas profundidades médias:  
a) Sensor 03 a 20 cm; b) Sensor 04 a 40 cm.

140



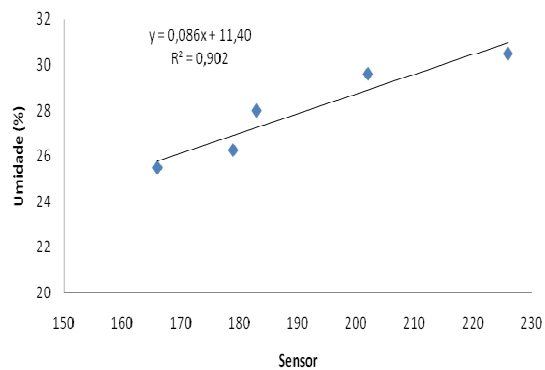
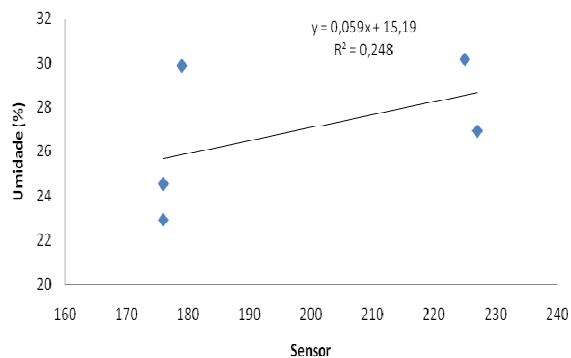
(a)

(b)

**Figura 5.** Curva de calibração do GMS no Cambissolo Háplico, nas profundidades médias:

a) Sensor 05 a 20 cm; b) Sensor 06 a 40 cm.

141



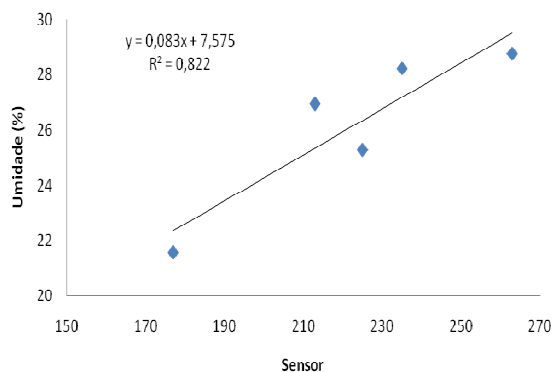
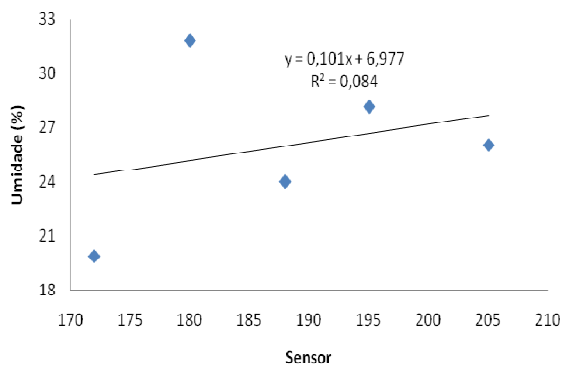
(a)

(b)

**Figura 6.** Curva de calibração do GMS no Vertissolo Háplico, nas profundidades médias: a)

Sensor 07 a 20 cm; b) Sensor 08 a 40 cm.

142



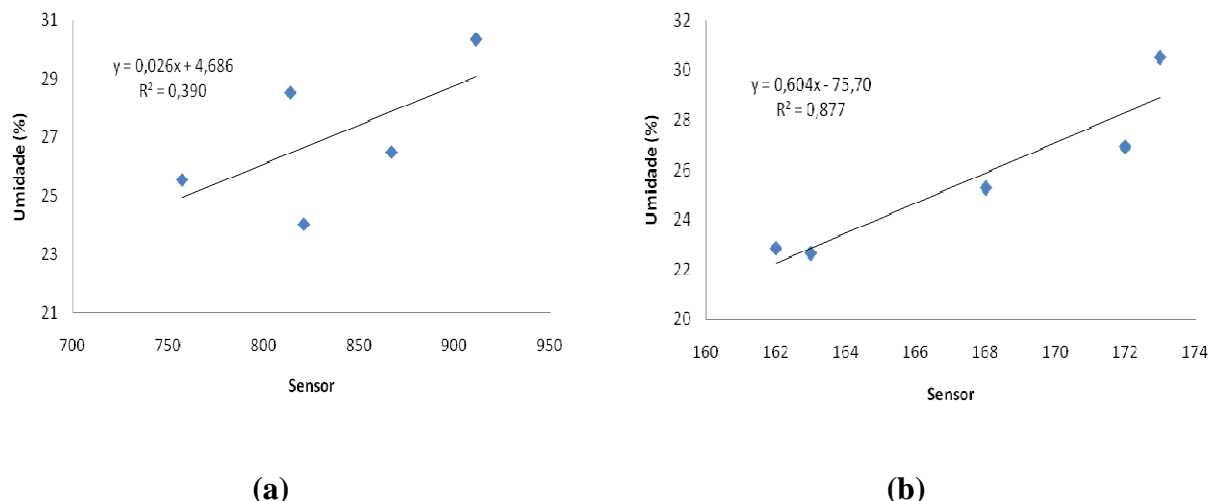
(a)

(b)

**Figura 7.** Curva de calibração do GMS no Vertissolo Háplico, nas profundidades médias: a)

Sensor 09 a 20 cm; b) Sensor 10 a 40 cm.





**Figura 8.** Curva de calibração do GMS no Vertissolo Háplico, nas profundidades médias: a) Sensor 11 a 20 cm; b) Sensor 12 a 40 cm.

143 Na maioria dos sensores foi observada uma defasagem nas medições feitas pelos  
 144 sensores, principalmente nos instalados na profundidade média de 20 cm no Vertissolo  
 145 Háplico. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Cardenas-Lailhacar e  
 146 Dukes (2010) e Thompson et al (2006), os quais observaram que o GMS apresenta um efeito  
 147 de histerese quando o solo é secado rapidamente ou em ciclos de umedecimento/secagem  
 148 parciais, levando o sensor a ter uma queda de performance na percepção real da umidade.

149 Os sensores instalados em Cambissolo Háplico apresentaram baixos coeficientes de  
 150 determinação, mas a média dos valores de  $\Delta U$  dos mesmos foram próximos dos apresentados  
 151 pelos sensores instalados no Vertissolo Háplico.

152 Foi observado que os sensores instalados no Vertissolo Háplico, na profundidade média  
 153 de 20 cm (sensores 07 e 09), apresentaram um coeficiente de determinação menor que os  
 154 instalados na profundidade média de 40 cm (sensores 08 e 10). O sensor de umidade utilizado  
 155 no experimento necessita de um certo tempo para entrar em equilíbrio com o solo, como nas  
 156 camadas próximas a superfície o movimento da água no solo é maior, devido a drenagem e a  
 157 evapotranspiração, como observaram González e Alves (2005), então o sensor poderia não ter  
 158 o tempo necessário para medir com maior exatidão a umidade nessas camadas, situação

159 também observada por Cardenas-Lailhacar e Dukes (2010). Apesar da diferença entre os  
 160 coeficientes de determinação entre os sensores, a média dos valores de  $\Delta U$  não tiveram uma  
 161 grande diferença, como pode ser observado na Tabela 1.

162 **Tabela 1.** Média do erro relativo percentual ( $\Delta U$ ) dos sensores de umidade do solo. A média  
 163 dos  $\Delta U$  para Cambissolo e Vertissolo Háplicos foram 9,18% e 10,32% respectivamente.

Solo	Sensor de Umidade	$\Delta U$ (%)	Intervalo de Confiança de $\Delta U$ com $\alpha$ 5%
CX	1	6,74	4,58 a 9,00
	2	6,51	4,32 a 9,00
	3	8,69	5,56 a 11,82
	4	13,48	9,16 a 17,80
	5	11,58	9,19 a 13,97
	6	8,08	4,44 a 11,72
VX	7	5,97	3,96 a 7,98
	8	7,31	3,91 a 10,71
	9	14,47	8,41 a 20,53
	10	14,16	10,13 a 18,19
	11	13,50	7,69 a 19,31
	12	6,49	4,24 a 8,74

Legenda: CX - Cambissolo Háplico e VX - Vertissolo Háplico.

164 Apesar dos baixos coeficientes de determinação apresentados pelos sensores instalados  
 165 em Cambissolo Háplico (sensores 01 a 06), a média do erro relativo percentual destes foi  
 166 parecido com o encontrados nos sensores instalados em Vertissolo Háplico (sensores 07 a 12).

167 O solo é um componente complexo e sua resposta pode sofrer influências de vários  
 168 fatores e a sua interação com os sensores nem sempre ocorre como o esperado, podendo  
 169 resultar em equações com coeficientes de determinação abaixo do esperado, como o ocorrido  
 170 com Villwock et al (2004), o qual encontrou coeficientes de determinação abaixo de 0,9 com  
 171 sensores TDR em condições de campo. Brito et al (2009) encontraram coeficientes de  
 172 determinação abaixo de 0,76 na calibração de tensiômetros digitais em solo de textura média.



173 Thompson et al (2007) também obteve baixos valores de coeficientes de determinação na  
 174 calibração de sensores de umidade TDR e capacitância. Cardenas-Lailhacar e Dukes (2010),  
 175 perceberam que o sensor de umidade Watermark 200SS ao ser submetido a uma alta  
 176 frequência de irrigação, teve uma grande queda no seu coeficiente de correlação.

177 **Tabela 02:** Erro por tipo de solo, profundidade e suas médias.

Solo	%											
	Profundidade (20 cm)				Profundidade (40 cm)				Média (20 - 40 cm)			
	MAE	EA	$\Delta U$	RSME	MAE	EA	$\Delta U$	RSME	MAE	EA	$\Delta U$	RSME
<b>CX</b>	2,145	0,230	9,006	2,666	2,404	0,850	9,357	3,219	2,275	0,540	9,181	2,942
<b>VX</b>	3,015	0,825	11,312	4,228	2,615	1,289	9,322	3,455	2,815	1,057	10,317	3,841
<b>Média</b>	<b>2,580</b>	<b>0,527</b>	<b>10,159</b>	<b>3,447</b>	<b>2,510</b>	<b>1,069</b>	<b>9,339</b>	<b>3,337</b>	<b>2,545</b>	<b>0,798</b>	<b>9,749</b>	<b>3,392</b>

178 VX – Vertissolo Háplico, CX - Cambissolo Háplico,  $\Delta U$  - erro relativo, EA - erro médio, RSME - raiz quadrada do erro  
 179 quadrado médio e MAE - erro médio absoluto.

180 Segundo a Tabela 02 observa-se que os  $\Delta U$  foram similares, variando de 2,145 a 3,015  
 181 em média. A média (20 – 40 cm) dos  $\Delta U$  foram 2,275 e 2,815 para Cambissolo Háplico e  
 182 Vertissolo Háplico.

183 As médias dos EA encontrados variaram de 0,230 a 1,289, os quais foram menores do  
 184 que aqueles encontrados por Brito et al (2009), que variaram de 2,23 a 4,39, utilizando  
 185 tensiômetro digital em solo de textura média. Teixeira et al (2005), comparando um  
 186 tensiômetro com uma sonda de nêutrons, encontrou EA com variações maiores que os  
 187 mostrados na Tabela 02, os quais variaram de -3,84 a -0,04, em um Nitossolo Vermelho  
 188 distrófico latossólico.

## 189 CONCLUSÕES

190

191 Os sensores utilizados apresentaram Erro Relativo Percentual de 10,32% e 9,18 para  
 192 Vertissolo Háplico e Cambissolo Háplico respectivamente.

193 O erro relativo percentual mostrou-se um melhor indicador do que o coeficiente de  
 194 determinação.

195 A performance dos sensores estudados é satisfatória e podem ser recomendados para o  
196 manejo da irrigação nos solos em condições avaliadas.

### 197 **AGRADECIMENTOS**

198  
199 Os autores agradecem A Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF e  
200 ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola - CPEGEA pela oportunidade  
201 oferecida. A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB, financiadora do  
202 Projeto Pesquisa – Edital 011/2011, termo de outorga- nº APP0023/2011. A Companhia para  
203 o Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba – CODEVASF 6ª  
204 Superintendência Regional, localizada em Juazeiro-BA, pelo apoio.

### 205 **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 206  
207 ABBASI, A.Z. et al. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture.  
208 Computer Standards & Interfaces, v. 36, n. 2, p. 263-270, 2014.
- 209 ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration Guidelines  
210 for computing crop water requeriments. Rome: FAO – Irrigation and drainage, Paper 56,  
211 1998. 319 p.
- 212 BERNARDO, S. Manual de Irrigação. 6ed. Viçosa: UFV, 1996. 657p.
- 213 BRADY, N. C. Natureza e Propriedade dos Solos. 7ª ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.  
214 898 p.
- 215 BRITO, A. S. B.; LIBARDI, P. L.; MOTA, C. A.; MORAES, S. O. Desempenho do  
216 tensiômetro com diferentes sistemas de leitura. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.  
217 33, n. 1, p. 17-24, 2009.

- 218 CAMILLI, A. et al. From wireless sensors to field mapping: Anatomy of an application for  
219 precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 58, n. 1, p. 25-36,  
220 2007.
- 221 CARDENAS-LAILHACAR, B.; DUKES, M. D. Precision of soil moisture sensor irrigation  
222 controllers under field conditions. *Agricultural water management*, v. 97, n. 5, p. 666-  
223 672, 2010.
- 224 COX, S. Information technology: the global key to precision agriculture and sustainability.  
225 *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 36, n. 2, p. 93-111, 2002.
- 226 CUGNASCA, C. E. et al. Integração de redes de sensores sem fio com sistemas de  
227 informação para agricultura de precisão. XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia  
228 Agrícola. Vitória-ES. 2010.
- 229 EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro,RJ). Manual de análise  
230 química dos solos, plantas e fertilizantes. Embrapa Solos, 1999. 370p.
- 231 EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Centro Nacional de  
232 Pesquisas de Solos, 2006. 370p.
- 233 GENTIL, L.V.; FERREIRA, S.M. Agricultura de precisão: Prepare-se para o futuro, mas com  
234 os pés no chão. *Revista A Granja*, Porto Alegre, n 610, p12-17, 1999.
- 235 GONZÁLEZ, A. P.; ALVES, M. C. Armazenamento de água e densidade do solo sob três  
236 condições de superfície, em um Cambissol gleico de Lugo, Espanha. *Revista brasileira  
237 de engenharia agrícola e ambiental*, [online], v. 9, n. 1, p. 45-50, 2005.
- 238 HERNANDEZ, F. B. T. Manejo da Irrigação. UNESP - Ilha Solteira. 2003. Disponível em:  
239 <<http://www.agr.feis.unesp.br/curso3.htm> >. Acessado em: 19 Jun 2014.
- 240 IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades@, 2011.  
241 Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 11 Jun 2014

- 242 LEE, W. S. et al. Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers*  
243 *and Electronics in Agriculture*, v. 74, n. 1, p. 2-33, 2010.
- 244 LIMA, G. E. L.; SILVA, L. C.; NETO, P. F. R. WSN as a Tool for Supporting  
245 Agriculture in the Precision Irrigation. *International Conference on Networking*  
246 *and Services*. IEEE Computer Society, p. 137-142, 2010.
- 247 MACEDO, A. B. M.; DE MIRANDA, F. R.; GONDIM, R. S. Análise Econômica Da  
248 Bananeira ‘Pacovan Ken’ em Função de Diferentes Tensões de Água no Solo. *Irriga*, v.  
249 17, n. 3, 2012.
- 250 MACHADO, P. L. O. A. et al. Estudo de caso em agricultura de precisão: manejo de lavoura  
251 de soja na região de campos gerais, PR. MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C.  
252 C.; SILVA, C. A. *Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em*  
253 *sistema plantio direto*, Rio de Janeiro : Embrapa Solos, p. 93-113, 2004.
- 254 MORAIS, R. et al. A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing  
255 applications in precision viticulture. *Computers and electronics in agriculture*, vol. 62. p.  
256 94-106. 2008.
- 257 RAMYA, V; PALANIAPPAN, B.; GEORGE, B. Embedded System for Automatic Irrigation  
258 of Cardamom Field using Xbee-PRO Technology. *International Journal of Computer*  
259 *Applications*, vol. 53. p. 36. 2012.
- 260 RUIZ-ALTISENT, M. et al. Sensors for product characterization and quality of specialty  
261 crops—A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 74, n. 2, p. 176-194,  
262 2010.
- 263 STAFFORD, J. V. Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of*  
264 *Agricultural Engineering Research*, v. 76, n. 3, p. 267-275, 2000.
- 265 TEIXEIRA, C. F. A.; MORAES, S. O.; SIMONETE, M. A. Desempenho do Tensiômetro,  
266 TDR e Sonda de Nêutrons na Determinação da Umidade e Condutividade Hidráulica do

- 267 Solo. SEÇÃO I-FÍSICA DO SOLO. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 29, n. 2, p.  
268 161-168, 2005.
- 269 THOMPSON, R. B. et al. Using plant water status to define threshold values for irrigation  
270 management of vegetable crops using soil moisture sensors. Agricultural water  
271 management, v. 88, n. 1, p. 147-158, 2007.
- 272 THOMPSON, R.B.; GALLARDO, M.; AGÜERA, T.; VALDEZ, L.C., FERNÁNDEZ, M.D.  
273 Evaluation of the Watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. Irrig.  
274 Sci., v. 24, p. 185–202, 2006.
- 275 TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F.. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e  
276 vantagens. Ciência Rural, v. 32, n. 1, p. 159-163, 2002.
- 277 VILLWOCK, R.; TAVARES, M.H.F.; VILAS BOAS, M.A. Calibração de um equipamento  
278 TDR em condições de campo. Irriga , v.9, p.82-88, 2004.

1 **DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA REDE DE SENSORES SEM FIO**  
2 **PARA USO NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO<sup>(1)</sup>**

3 Fábio Nelson de Sousa Pereira <sup>(2)</sup> & Brauliro Gonçalves Leal<sup>(3)</sup>

4

5 **RESUMO**

6 Foi projetada e desenvolvida uma Rede de Sensores Sem Fio, baseada no XBee Pro  
7 S2. Foram utilizados doze nós sensores, em cada um destes nós foram instalados dois  
8 sensores de umidade do solo Watermark 200SS. Para monitorar essa rede foi desenvolvido  
9 um software na linguagem Java. Esta rede foi avaliada na região do Polo de Desenvolvimento  
10 Petrolina/Juazeiro e teve desempenho satisfatório, sendo capaz de ser utilizada no  
11 monitoramento da umidade do solo a 20 e 40 cm de profundidade. A RSSF desenvolvida  
12 funcionou a contento mesmo sob as condições climáticas do Semiárido Nordeste.

13 **Palavras-chave:** Agricultura de Precisão, XBee, Semi-árido.

14

15 **DESIGN, DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A WIRELESS SENSOR**  
16 **NETWORK FOR USE IN THE MANAGEMENT OF IRRIGATION**

17

18 **ABSTRACT**

19 Was designed and developed a Wireless Sensor Network based on the XBee Pro S2.  
20 Twelve sensor nodes were used, two Watermark 200SS soil moisture sensors were installed in  
21 each one of these nodes. Software was developed in Java to monitor this network. This  
22 network has been evaluated at the Petrolina / Juazeiro Development Center and had  
23 satisfactory performance, being able to be used to monitor soil moisture at 20 and 40 cm deep.  
24 The WSN developed functioned satisfactorily even under the climatic conditions of the  
25 Northeast Semi-arid.

26 **Keywords:** Precision Agriculture, XBee, Semi-árid.

27

## 28 **INTRODUÇÃO**

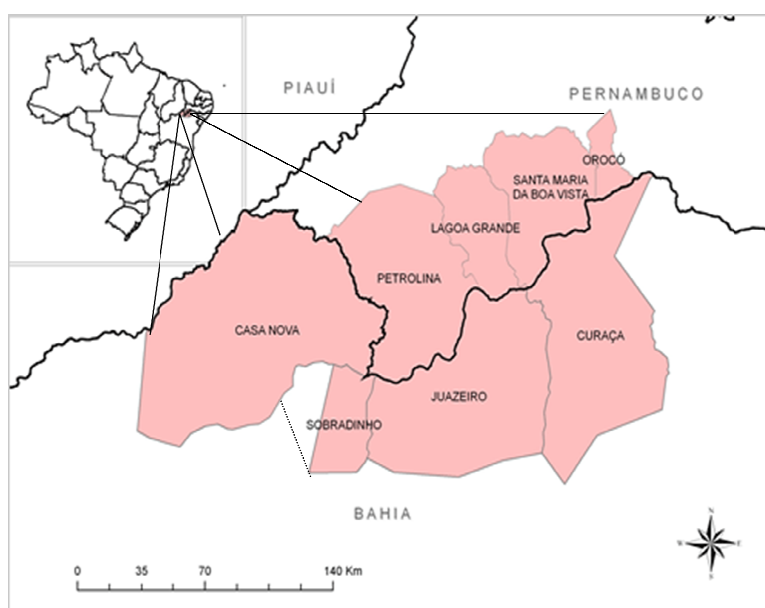
29       Recentemente as redes de sensores sem fio (RSSF) têm sido vistas como uma  
30 tecnologia promissora, sua utilização é diversificada, sendo utilizada em diversas áreas  
31 (RAMYA *et al*, 2014; AGGARWAL *et al*, 2012; BARONTI *et al*, 2007). Na agricultura, as  
32 RSSF's tem sido cada vez mais utilizadas (CUGNASCA *et al*, 2010; LIMA *et al*, 2010;  
33 BARONTI *et al*, 2007; BAGGIO, 2005), por não necessitarem de cabos para interconectá-las  
34 e por consumirem pouca energia e possuírem baixa ou nenhuma manutenção, não atrapalham  
35 o manejo da cultura (MORAIS *et al*, 2008; BARONTI *et al*, 2007). Cugnasca *et al*. (2010)  
36 ressalta que a utilização de RSSF's em Agricultura de Precisão possibilita a obtenção de dados  
37 de campo com boa cobertura espacial dentro do talhão, e ao longo de todo o ciclo da cultura.  
38 Dentre os dispositivos para RSSF's disponíveis, o XBee, que utiliza o padrão ZigBee, é um  
39 dos que vem sendo bastante utilizado por sua alta confiabilidade, segurança, simplicidade de  
40 protocolo, baixo custo e consumo de energia (RAMYA *et al*, 2014; MORAIS, 2008;  
41 BARONTI, 2007).

42       A Região Integrada de Desenvolvimento (RIDE), Polo Petrolina/PE - Juazeiro/BA  
43 (Figura 01), é um exemplo bem sucedido de políticas públicas (CODEVASF, 2012), o PIB do  
44 agronegócio dessas cidades vem se destacando no cenário nacional (TERRA, 2014; IBGE,  
45 2014). Segundo o ranking informado no sítio do TERRA (2014), a partir dos dados do IBGE  
46 (2014), Petrolina teve sua produção avaliada em R\$ 658,796 milhões, sendo a terceira cidade  
47 do país com o maior valor de produção agrícola. Neste mesmo ano, a produção de Juazeiro foi  
48 avaliada em R\$ 200,937 milhões (TERRA, 2014; IBGE, 2014). O PIB agrícola das duas  
49 cidades juntas soma R\$ 859,733 milhões, o maior dentre os municípios brasileiros

50 (TERRA, 2014; IBGE, 2014). Apesar da importância dessas duas cidades no setor agrícola do  
 51 Brasil, poucas pesquisas na aplicação de RSSF's na agricultura são encontrados.

52 Buscando suprir essa carência, propõe-se projetar, desenvolver e avaliar uma RSSF  
 53 para fins de manejo da irrigação.

54 **Figura 1:** Municípios integrantes da Região integrada de Desenvolvimento (RIDE) Polo  
 55 Petrolina/PE - Juazeiro/BA.



Fonte: [www.mi.gov.br](http://www.mi.gov.br)

## 56 MATERIAL E MÉTODOS

57 A princípio na rede proposta em cada nó sensor, foram conectados a dois sensores de  
 58 umidade de matriz granular (*Granular Matrix Sensor - GMS*). O sensor de umidade do solo  
 59 escolhido foi o da empresa Irrometer, *Watermark*, modelo 200SS, por ser bastante utilizado  
 60 em projetos de automação da irrigação (MACEDO *et al*, 2012; THOMPSON *et al*, 2006) e  
 61 pela relativa facilidade de calibração, manuseio e baixo custo, em comparação com outros  
 62 sensores do mercado. Para condicionamento do sinal, foi utilizado o circuito SMX.

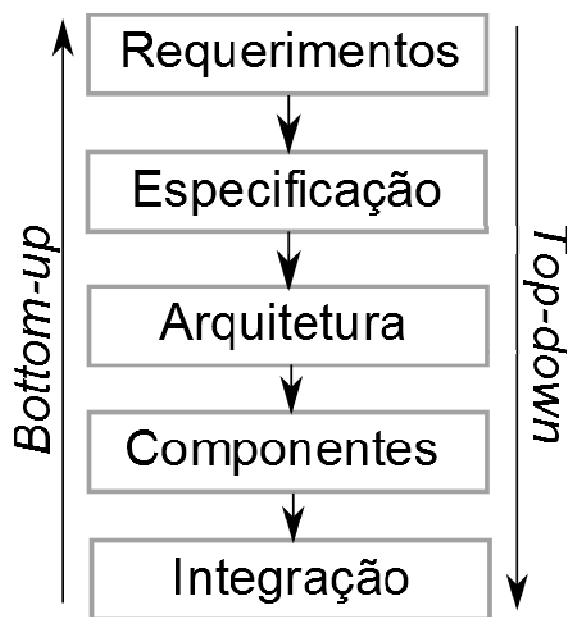
### 63 Esquema de desenvolvimento da Rede de Sensores Sem Fio

64 As abordagens mais tradicionais para desenvolvimento de sistemas são o *top-down* e o  
 65 *bottom-up* (Figura 02), ambos consistem na decomposição do sistema em subsistemas



66 interdependentes (SOARES, 2004; CRESPI *et al.*, 2008; RAMYA *et al.*, 2012). Para o  
 67 desenvolvimento da RSSF foi utilizado o método *top-down*, tomando como base o artigo de  
 68 Ramya et al (2012).

69 **Figura 2:** Metodologias de desenvolvimento *Bottom-up* e *Top-down*. Metodologias de  
 70 desenvolvimento mais comuns que consistem na separação do problema em etapas que vão de  
 71 um nível maior de abstração ao menor.



## 72 **Análise de Requerimentos**

73 Esta é a fase inicial do projeto, onde são feitos os levantamentos dos requerimentos  
 74 funcionais e não funcionais necessários para o desenvolvimento do projeto proposto.

75 **Requerimentos Funcionais:**

- 76 • Sensoriamento, no caso a umidade do solo;
- 77 • Monitoramento do nível de alimentação dos nós sensores;
- 78 • Condicionamento de sinal dos sensores;
- 79 • Dados a serem armazenados.

80 **Requerimentos Não Funcionais**

81 Os requerimentos não funcionais estão descritos na Tabela 01.

82 **Tabela 1:** Formulário de requerimentos para a RSSF.

<b>Requerimentos</b>	<b>Descrição</b>
Nome	Rede de sensores sem fio para fins de manejo da irrigação
Propósito	Monitorar a umidade do solo e com tais dados servir de ferramenta de apoio ao manejo da irrigação
Entrada	Sensor de umidade do solo
Saída	Dados da leitura feita pelo sensor de umidade
Funções	Informar a umidade do solo, não funcionamento do sensor e tensão de alimentação do nó sensor
Performance	Enviar dados de umidade do solo para a estação base a cada 20 minutos.
Custo de manufatura (nó sensor)	R\$ 1.000,00
Alimentação	3 Volts

83

84 **Nível de Especificação**

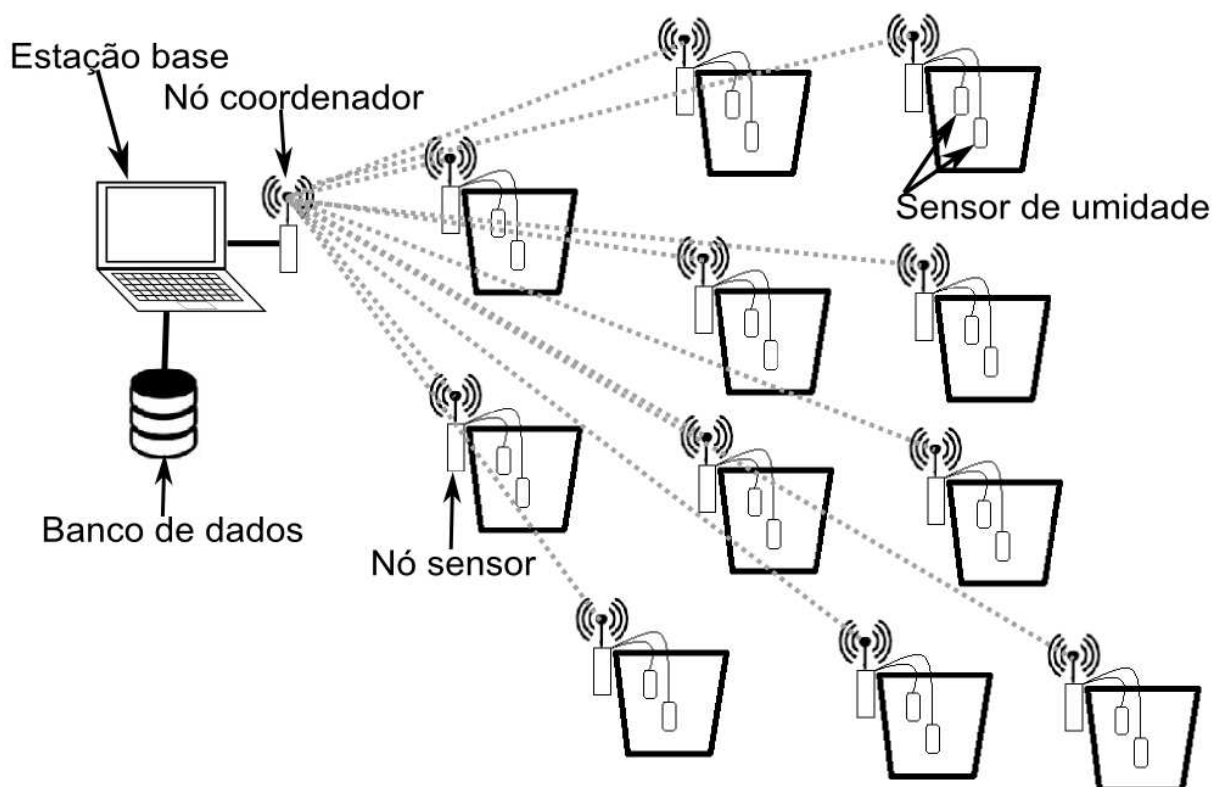
85 Refere-se aos requerimentos descritos no primeiro nível, não especifica como é feito e  
86 sim o que o sistema possui:

- 87 • Dados recebidos do nó-sensor (XBeeP);
- 88 • Interface do usuário;
- 89 • Dados do sensor para o nó-sensor (XBeeP).

90 **Nível de Arquitetura**

91 O nível de arquitetura tem uma representação abstrata do sistema, de forma que atenda  
92 os requisitos funcionais e não funcionais que foram levantados na etapa da Análise de  
93 Requisitos. As informações geradas neste nível serão utilizadas para determinar o  
94 funcionamento da rede e os componentes utilizados para a montagem da mesma. O diagrama  
95 esquemático da RSSF proposta é mostrado na Figura 03.

96 **Figura 3:** Esquema da RSSF proposta.



97

98 Foram feitas duas arquiteturas, uma de software (Figura 04) e outra de hardware

99 (Figura 05). A arquitetura de hardware mostra o funcionamento dos módulos que compõem o

100 hardware da RSSF, nela o nó sensor será um XBeeP, o qual irá discretizar os sinais dos

101 sensores de umidade do solo, através dos conversores Analógico/Digital (A/D), e os

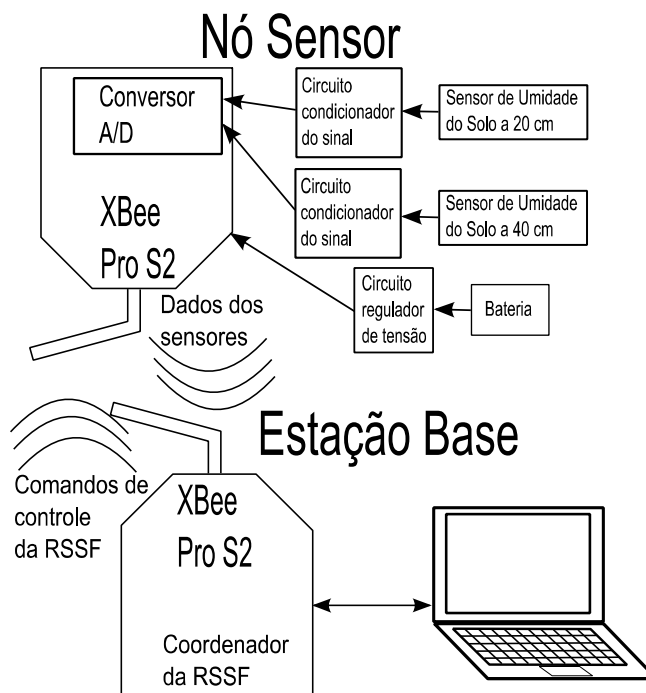
102 transmitirão ao nó coordenador da rede. Existe a necessidade de condicionar o sinal dos

103 sensores de umidade do solo para que possam ser corretamente discretizados pelo conversor

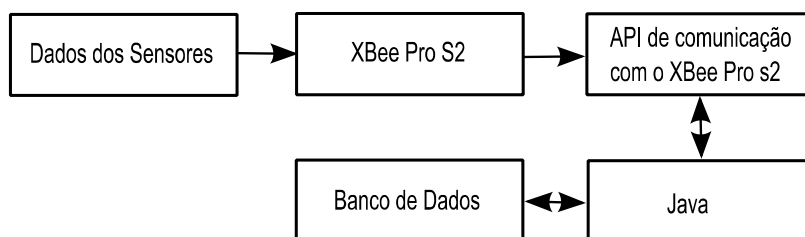
104 A/D. Os nós sensores serão alimentados por baterias e a tensão correta será fornecida através

105 de um circuito regulador de tensão.

106 **Figura 4:** Arquitetura do hardware da RSSF proposta.



107 **Figura 5:** Arquitetura de software da RSSF proposta.



108 A rede é controlada pela Estação Base (um computador responsável por processar os  
 109 dados recebidos da RSSF), através do coordenador da rede (Figura 3), solicitando a leitura  
 110 dos conversores A/D e o envio dos valores obtidos por estes. A arquitetura de software mostra  
 111 o funcionamento do software de controle e a sua comunicação com o hardware. O software  
 112 terá de fazer a interface com o coordenador, para enviar as solicitações de leitura dos sensores  
 113 e o recebimento dos valores encontrados. Esses dados serão armazenados em um banco de  
 114 dados na Estação Base e posteriormente serão analisados.

115

116 **Nível de componente**

117 Neste nível são determinados quais componentes de software e hardware são  
118 utilizados e as decisões de compra destes componentes. São analisadas algumas soluções  
119 oferecidas pelo mercado, o que pode facilitar o processo de montagem e diminuir a  
120 possibilidade de erros de desenvolvimento.

## 121 **Descrição dos componentes**

### 122 **Sensor de Umidade do solo**

123 O sensor utilizado é um sensor de matriz granular (*Granular Matrix Sensor - GMS*),  
124 modelo Watermark 200SS (Figura 06), fabricado pela Irrometer Company, Riverside –  
125 Califórnia. O GMS é um dispositivo sensor de resistência elétrica de estado sólido, o qual é  
126 utilizado para medir a tensão de água no solo, foi escolhido por ter sido utilizado em vários  
127 projetos de manejo e pelo seu baixo custo, comparando-o com outros sensores de umidade  
128 solo como os de Reflectometria no domínio do tempo (*Time Domain Reflectometry - TDR*). É  
129 composto por dois eletrodos inseridos em uma matriz granular. Quando a umidade do solo  
130 aumenta, a resistência entre os eletrodos diminui e vice-versa, portanto a resistência é  
131 inversamente proporcional a quantidade de umidade percebida pelo sensor. Possui uma  
132 proteção interna (pastilha de gesso) para diminuir os efeitos da salinidade do solo e foi  
133 desenvolvido para ser um sensor fixo, pois requer um bom contato com o solo para o seu  
134 perfeito funcionamento. (IRROMETER, 2011).

135 **Figura 6:** Sensor de umidade do solo Watermark 200SS.



Sensor de umidade do solo utilizado na RSSF. (fonte: IRROMETER, 2011)

136

### 137 **Circuito Condicionador de Sinal**

138 O circuito responsável por condicionar o sinal do sensor de umidade do solo é o SMX  
139 (Figura 07), versão OEM, fabricado pela EME Systems, Berkeley. O SMX é um circuito  
140 responsável por excitar e obter a leitura de sensores de umidade do solo de matriz granular e  
141 de bloco de gesso. O circuito envia uma tensão alternada (AC) ao sensor, cuja função é  
142 eliminar o efeito da galvanização (que ocorreria caso se utilizasse corrente contínua), essa  
143 tensão sofrerá influência da resistência entre os eletrodos (resultante da leitura do sensor de  
144 umidade), a qual variará de acordo com umidade no solo. Como resposta a variação da  
145 umidade do solo, podem-se obter três tipos de saída do mesmo circuito: corrente, tensão ou  
146 frequência. Para o sistema proposto, a saída a necessária é a tensão, pois a sua variação será  
147 discretizada pelo conversor Analógico/Digital (A/D) e enviada ao nó coordenador, como  
148 descrito no nível de arquitetura. A pinagem do SMX encontra-se na Figura 08. O esquema  
149 elétrico para a utilização do SMX na configuração desejada é mostrado na Figura 09, nesta  
150 configuração os pinos 3 e 4 são unidos, e a eles é conectado um capacitor de 100  $\mu\text{f}$  para  
151 diminuir a flutuação, a saída será um sinal DC que variará de 0,2 V (seco) a 1 V (umidade  
152 máxima).

153

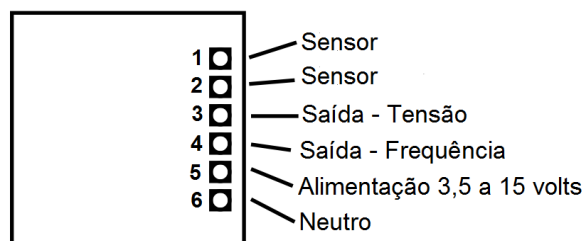
154 **Figura 7:** Circuito SMX.



Fonte: EME SYSTEMS, 2011.

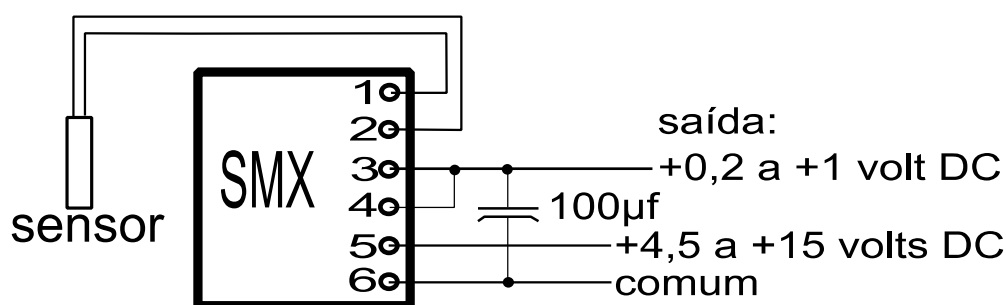
155

156 **Figura 8:** Esquema da pinagem do circuito SMX.



Fonte: EME SYSTEMS, 2011.

157 **Figura 9:** Esquema elétrico sugerido pelo fabricante para utilizar a saída de tensão como  
158 saída.



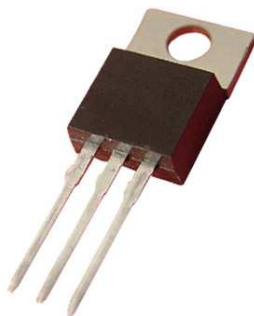
Fonte: EME SYSTEMS, 2011.

159

## 160 **Circuito Regulador de Tensão**

161 O circuito regulador de terá como regulador de tensão o circuito integrado (CI) LM  
162 1117 T – 3,3 V (Figura 10), um regulador de tensão com saída fixa em 3,3 V, com precisão de  
163 1%, proteção contra sobreaquecimento e limitador de corrente de saída (800 mA máxima).  
164 Sua aplicação é recomendada para instrumentos alimentados por bateria. Será utilizado no  
165 encapsulamento modelo TO-220 (Figura 11), cuja pinagem se encontra na Figura 10. O  
166 *datasheet* recomenda um esquema elétrico (Figura 12), com a adição de dois capacitores de  
167 10 µf, um da entrada para o terra (*Ground* - GND) e o outro da saída para GND, sendo  
168 necessário para melhorar a estabilidade e resposta a transientes (TEXAS INSTRUMENTS,  
169 2011).

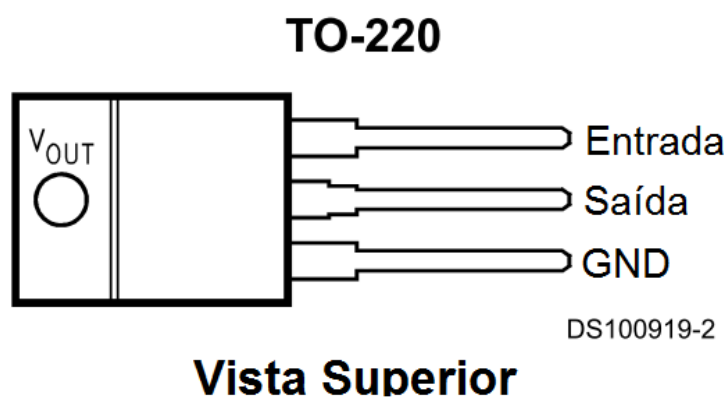
170 **Figura 10:** CI Regulador de tensão LM 1117 T – 3,3 V, encapsulamento TO-220.



Fonte: TEXAS INSTRUMENTS, 2011.

171

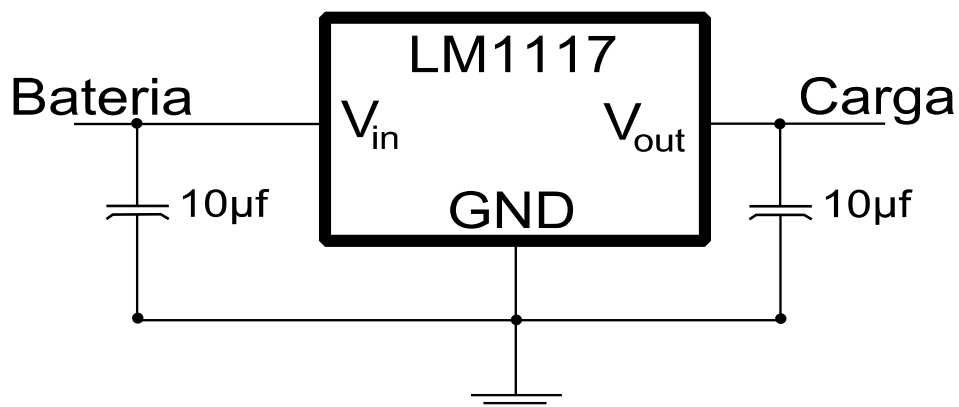
172 **Figura 11:** Pinagem do CI LM 1117 T.



Fonte: TEXAS INSTRUMENTS, 2011.

173

174 **Figura 12:** Esquema elétrico recomendado pelo fabricante.



Fonte: TEXAS INSTRUMENTS, 2011.

175

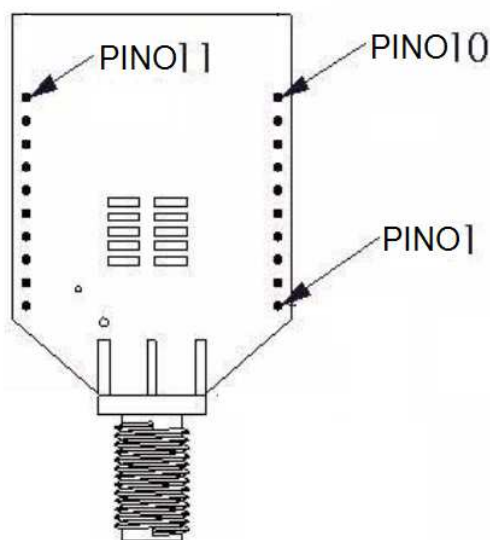
176 **XBee Pro S2**



177 O XBee Pro S2 (XBeeP) utilizado é o XBee Pro S2 ZB RF (Figura 13), é um  
178 dispositivo de envio e recebimento de dados via Radio Frequência (RF), fabricado pela Digi  
179 Internacional, baseado nos protocolos ZigBee/IEEE 802.15.4. O XBeeP opera na frequência  
180 de 2,4 GHz, potência de saída de +18 dBm, sensibilidade especificada pelo fabricante de 102  
181 dBm, com alcance de até 1,5 Km (com visada) e funções de um micro controlador. O XBeeP  
182 pode trabalhar nas topologias (Figura 14): estrela, malha e árvore. Na RSSF proposta a  
183 topologia utilizada é a estrela. As versões XBee Pro (Tabela 02) possuem maior potência,  
184 ocasionando em um alcance maior, em detrimento de um maior consumo no modo de  
185 transmissão/recepção. Para compensar esse consumo, optou-se por colocar o XBeeP no modo  
186 de economia de energia (inativo - modo *sleep*) por em média 19 minutos e passar 1 minuto  
187 ativo (transmitindo e recebendo), nesse tempo o nó sensor receberia a solicitação de envio das  
188 leituras e as enviaria, após passado o tempo de 1 minuto ativo, voltaria ao modo de economia  
189 de energia. Durante o tempo em que estiver inativo, o XBeeP, entra no modo de baixo  
190 consumo, desativando funções que consumam muita energia, como o envio e o recebimento  
191 de mensagens pela rede (Tabela 03). O XBee Pro S2 possui quatro conversores A/D (pinos 17  
192 a 20), podendo então serem utilizados até quatro sensores sem a necessidade de um  
193 multiplexador, no pino 1 é a alimentação de 3,3 V e no pino 10 o GND (DIGI  
194 INTERNATIONAL INC, 2011). O conversor A/D é responsável por discretizar uma tensão,  
195 ou seja, converter essa tensão, de natureza analógica, em um número (digital). A conversão é  
196 feita comparando a tensão a ser convertida, com uma tensão de referência (VREF). A tensão  
197 de referência serve para determinar o valor máximo que pode ser reconhecido pelo conversor  
198 A/D. No caso do XBee Pro S2, a VREF é de 1,2 volts (Tabela 02). A precisão da conversão é  
199 dada pela quantidade de bits utilizada pelo conversor para informar o valor da tensão  
200 discretizada. O conversor do XBee Pro S2 possui 10 bits, podendo assim subdividir a VREF  
201 em 1024 partes ( $2^{10} = 1024$  combinações), sendo 0 o valor mínimo (0 volts) e 1023 o valor

202 máximo (1,2 volts). Ao comparar a tensão a ser discretizada com a VREF, o conversor irá  
 203 encontrar o valor (entre 0 e 1023), mais próximo para representar a tensão a ser discretizada.

204 **Figura 13:** Dispositivo XBee Pro S2 conector RPSMA – visão superior.



Fonte: DIGI INTERNATIONAL INC., 2011

205 **Tabela 2:** Algumas características do XBee Pro S2.

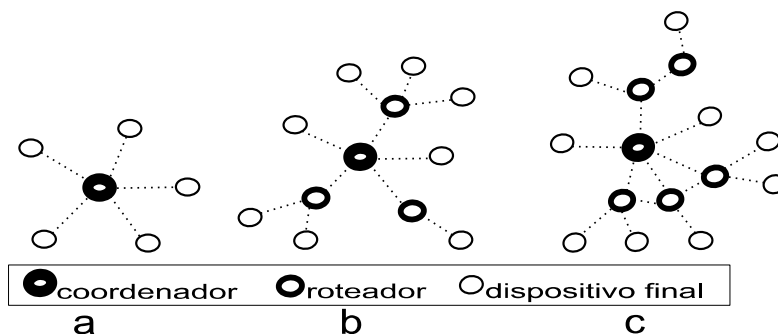
Descrição	Valor
Alcance (Campo aberto) “Teórico”	3,2 Km
Alcance (Ambientes internos)	90 m
Frequência de operação	2,4 GHz
Taxa de transmissão	250 Kbps
Portas de Entrada/Saída Gerais:	11
Conversores A/D (10 bits)	Até 4 (VREF máximo 1,2 V)
Entradas/Saídas Digitais	Até 11

fonte: DIGI INTERNATIONAL INC., 2011.

206 **Tabela 3:** Consumo de energia do XBee Pro.

Descrição	Valor
Alimentação	3,0 a 3,4 V
Transmitindo	295 mA a 3,3 V
Recebendo	45 mA a 3,3V
Sem transmitir ou receber	15 mA
Modo de economia de energia	Aprox. 3,5 µA

207 **Figura 14:** Topologias adotadas pelo padrão ZigBee.



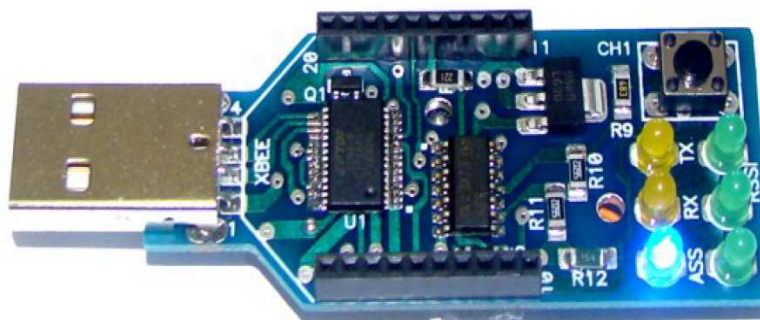
Topologia estrela (a), árvore (b) e em malha (c) (fonte: DIGI INTERNATIONAL INC., 2011).

208

### 209 **Adaptador Serial/USB**

210 Foi utilizado o adaptador CON-USBBEE XPlus (figura 15), um adaptador USB/Serial  
211 utilizado para conectar os módulos XBee/XBee Pro ao computador. O adaptador pode ser  
212 utilizado para atualizar o *firmware*, configurar os módulos ou coleta de dados. Na RSSF  
213 proposta, o adaptador foi utilizado para conectar o coordenador da RSSF a estação base, para  
214 através do software controlar a rede e receber os dados dos nós sensores. O Adaptador foi  
215 utilizado para configurar cada componente da rede, o coordenador e os nós sensores, pois é  
216 necessário indicar a função do XBeeP a ser assumida na RSSF, assim como informar a rede a  
217 qual faz parte, inclusive cada XBeeP com a função de nó sensor, recebeu um "nome" que o  
218 identificasse.

219 **Figura 15:** Adaptador CON-USBBEE XPlus.



Fonte: ROGERCOM, 2011.

220

## 221      **Integração**

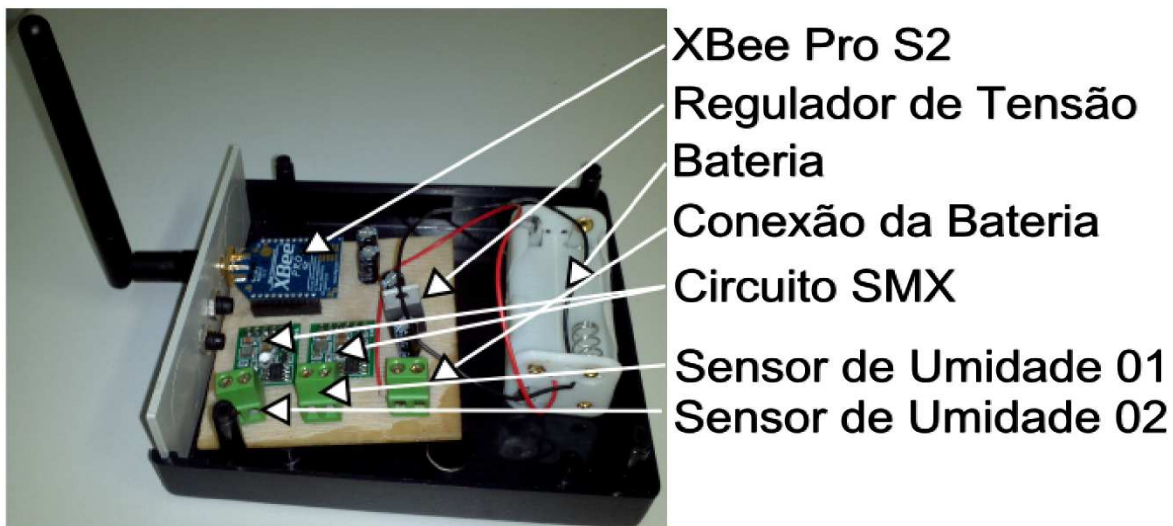
222            A integração dos componentes é uma parte crucial, pois é necessário que seja possível  
223 colocar os componentes antes descritos para trabalharem em conjunto. Para alimentação do nó  
224 sensor, optou-se por utilizar uma bateria de 4 pilhas AA. No caso da RSSF proposta, houve a  
225 necessidade de vários testes e simulações para termos a rede funcionando de acordo com o  
226 esperado. A rede possui uma estação base com o coordenador (Figura 16) e doze nós sensores  
227 (Figura 17). Na Figura 18, temos o esquema elétrico criado através do Cadsoft Eagle (a) e um  
228 dos primeiros protótipos do nó sensor da rede (b). A Estação Base, através do coordenador,  
229 solicita aos nós sensores a leitura dos sensores de umidade do solo e aguarda o recebimento  
230 desses dados. O Nó Sensor ao receber a solicitação de envio dos dados de umidade do solo,  
231 discretiza a tensão enviada pelo circuito SMX e a envia ao Coordenador da RSSF. Além de  
232 cada XBeeP ter um endereço único para a sua identificação, o "nome" dado a cada XBeeP, na  
233 sua configuração é mostrado no software para facilitar a identificação da origem dos dados e  
234 de uma possível falha de funcionamento.

235      **Figura 16:** Estação base com o coordenador da RSSF.

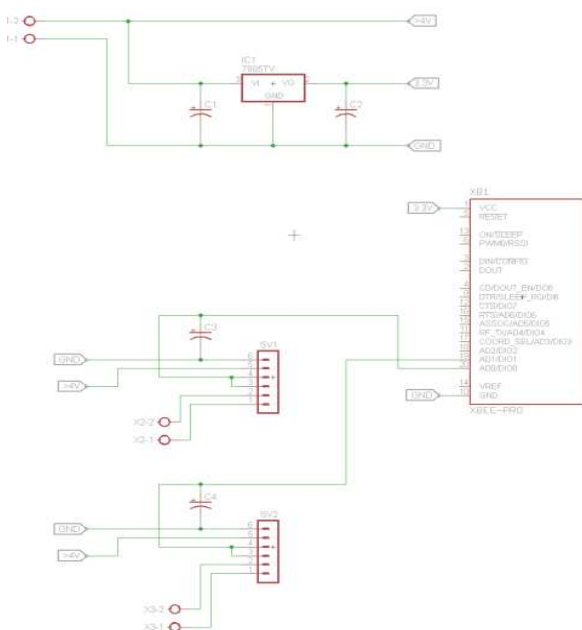


236

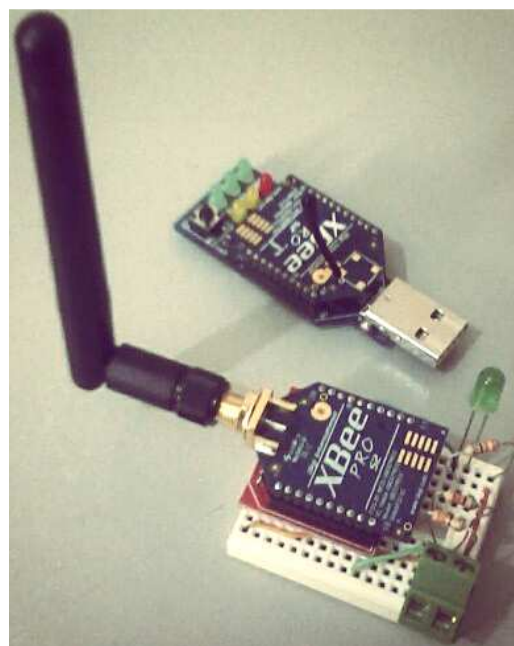
237      **Figura 17:** Nó Sensor na caixa de acrílico.



238 **Figura 18:** Esquema elétrico (a) e protótipo do nó sensor (b).



a) modelo esquemático desenvolvido com auxílio do aplicativo Cadsoft Eagle.



b) Um dos primeiros protótipos do nó sensor da RSSF.

239

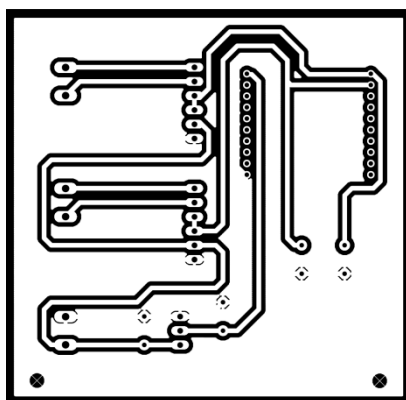
## 240 Descrição do Software

### 241 Cadsoft Eagle

242 É uma aplicação de Automação de Projetos de Eletrônica (*Electronic Design*  
 243 *Automation* - EDA) e criação de *layout* de Placas de Circuito Impresso (PCI), desenvolvida

244 pela CadSoft Computer GmbH, Alemanha. Uma ferramenta muito utilizada por pequenas  
 245 empresas de projetos de circuitos elétricos. Foi utilizado para a criação do esquema elétrico  
 246 (Figura 18a) e do *layout* utilizado na criação da PCI (Figura 19) (CADFSOFT EAGLE,  
 247 2012).

248 **Figura 19:** Modelo do circuito (a) a ser impresso na placa de fenolite e processo de  
 249 impressão (b).



(a) modelo de circuito impresso utilizado na construção das placas.



(b) impressão do circuito nas placas de fenolite através do processo de serigrafia e postas para secar, antes de serem submergidas no percloro de ferro para a corrosão das partes expostas

250

### 251 **Labcenter ISIS Proteus (Proteus)**

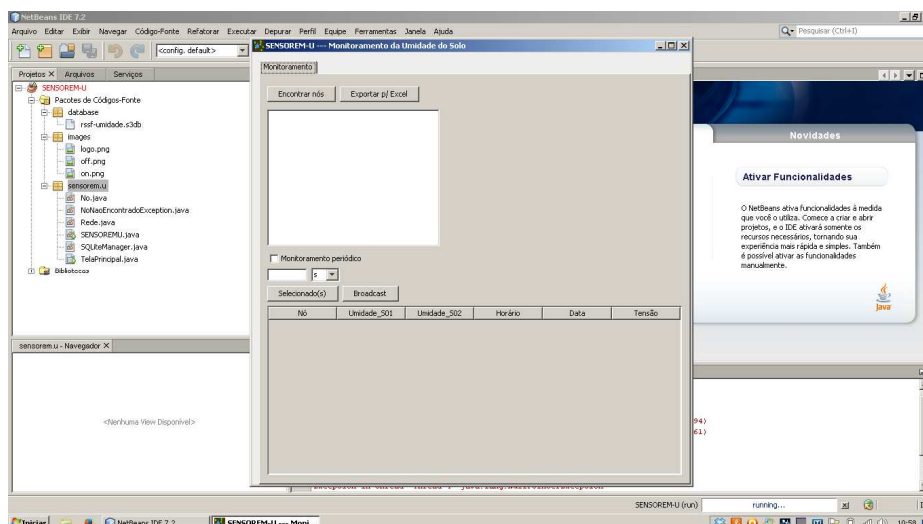
252 O Proteus é uma suíte de softwares desenvolvido pela Labcenter Electronics,  
 253 Inglaterra, que permite a criação de projeto de esquema elétrico, a simulação do  
 254 funcionamento de microcontroladores (inclusive programando os microcontroladores  
 255 simulados) e a criação de placas de circuito impresso. No projeto, o Proteus foi utilizado para  
 256 realizar simulações de comportamento de alguns sinais do circuito concebido, antes de  
 257 darmos início aos primeiros protótipos (Figura 18-a) (LABCENTER PROTEUS, 2012).

### 258 **NetBeans IDE - Java**

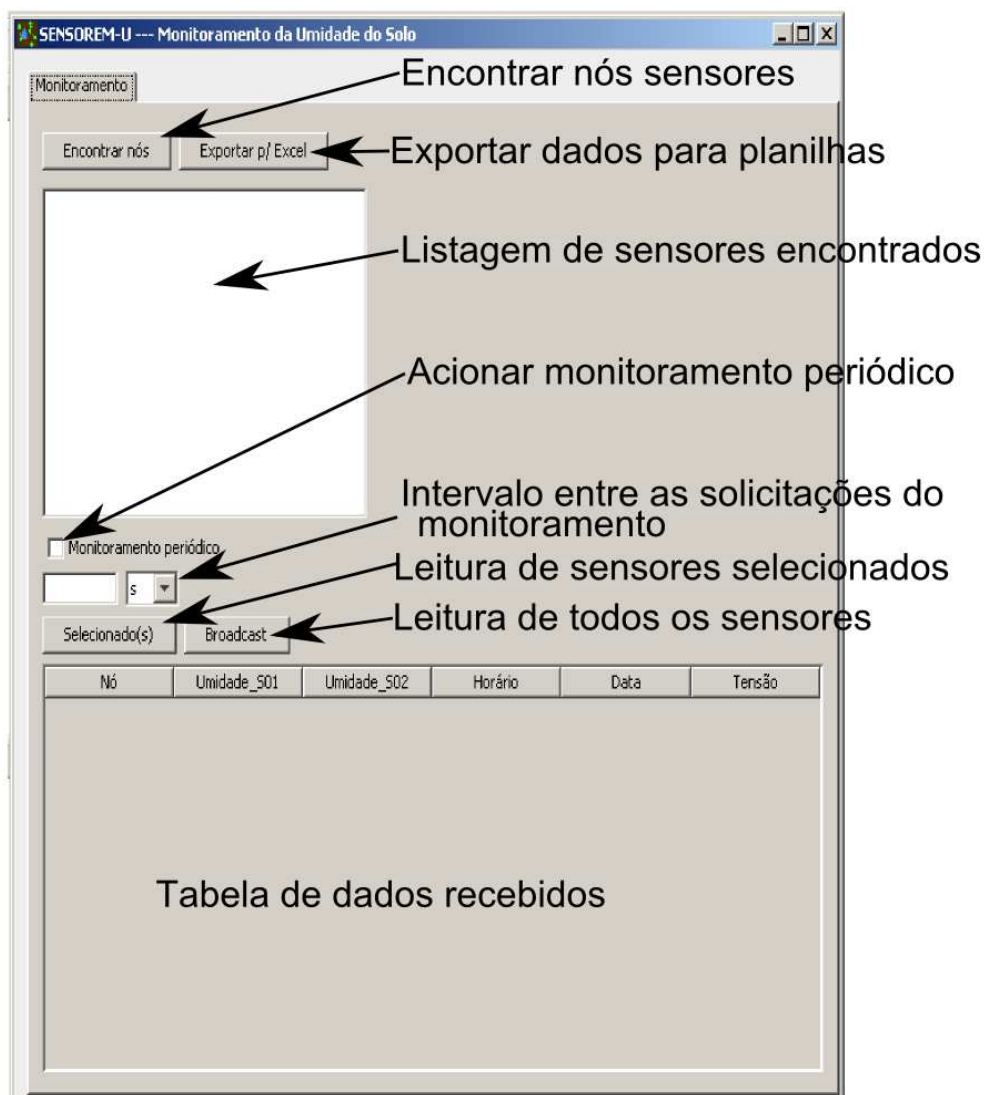
259 O NetBeans é um ambiente de desenvolvimento integrado (*Integrated Development*  
260 *Environment* - IDE), disponível para diversas plataformas, desenvolvido pela Oracle  
261 Corporation, Estados Unidos. É uma IDE de código aberto e uma plataforma de aplicações  
262 permitindo criação de softwares de forma mais rápida. A principal linguagem para a qual o  
263 NetBeans é utilizado é Java, mas também pode-se utilizar com PHP, JavaScript, Ajax,  
264 Groovy e Grails e C/C++. O NetBeans com a linguagem de programação Java (Figura 20),  
265 foram utilizados no projeto para desenvolvimento do software que gerencia a rede através do  
266 XBee coordenador (Figura 21), a escolha da linguagem se deu por ser de fácil portabilidade  
267 para outros Sistemas Operacionais e é a mesma da Interface de Programação de Aplicativo  
268 (*Application Programming Interface* - API) utilizada para fazer a interface entre o XBeeP e o  
269 *software* desenvolvida por RAPP (2012), a Xbee-api é uma biblioteca de código livre  
270 possuindo funções para comunicação com o XBeeP, todas as operações de envio e  
271 recebimento de mensagens entre o software e a RSSF é feito através desta API. O software  
272 desenvolvido é responsável por identificar os componentes da rede e fazer as solicitações  
273 (individuais ou de todos os nós sensores) de leitura da umidade do solo, essas solicitações  
274 podem ser feitas de forma pontual ou contínua (Figura 21). Após o recebimento, os dados são  
275 exibidos em uma tabela na interface com o usuário e são armazenados em um banco de dados.  
276 Esses dados podem ser exportados para arquivos com valores separados por vírgula (*Comma-*  
277 *separated values* - CSV) ou ".csv", sendo aceitos pela maioria das planilhas eletrônicas.

278 **Figura 20:** Ambiente de desenvolvimento e o software sendo executado.





279 **Figura 21:** Descrição da interface do software.





## 280       **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

281           A RSSF (Figura 22) foi utilizada em dois períodos, de 10 a 20 de março e de 24 de  
282 outubro a 28 de novembro de 2013, no período de uso foram observados a duração das  
283 baterias utilizadas e a resistência do nó sensor as intempéries (Figura 23).

284       **Figura 22:** Experimento sendo testado na Área Experimental do Curso de Engenharia  
285 Agrícola, no campus Juazeiro da UNIVASF.



286       **Figura 23:** Nó sensor em operação.



287           Estudos preliminares foram feitos no sentido de avaliar o XBeeP, Oliveira *et al* (2013)  
288 fez estudos sobre a qualidade do sinal versus a distância, em campo aberto foi alcançada a  
289 distância de 1.150 metros (36% do especificado pelo fabricante) sem perda do sinal; Em um  
290 vinhedo foi alcançada a distância de 550 metros com visada, sem perda do sinal e perda de  
291 pacotes transmitidos (não foi possível avaliar distâncias maiores por ter encontrado o limite  
292 da plantação), por outro lado a transmissão com obstáculos (as videiras) dentro do vinhedo  
293 (na diagonal) a distância máxima alcançada foi de 195 metros, após essa distância houve

294 perda do sinal. Correia *et al* (2014) fez um estudo da perda de sinal em plantações de uva, o  
 295 mesmo observou que vários fatores do ambiente influenciam a intensidade do sinal percebida  
 296 no receptor e que os mesmos devem ser considerados na implantação de uma RSSF, na sua  
 297 dissertação os fenômenos de propagação foram identificados e interpretados para o ambiente  
 298 estudado, assim como foram realizados ajustes dos parâmetros dos modelos matemáticos de  
 299 propagação.

300 Durante o primeiro período de testes, a RSSF funcionou da forma esperada, sem sofrer  
 301 influência das intempéries comuns da região, na Tabela 04 encontram-se os principais dados  
 302 meteorológicos observados durante o funcionamento da rede.

303 **Tabela 4:** Dados meteorológicos do período da primeira instalação da Rede de Sensores Sem  
 304 Fio.

Data	Temperatura (°C)		Umidade (%)		Pressão (hPa)	Radiação (kJ/m <sup>2</sup> )	Chuva (mm)
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.			
13/3	31,8	29,4	49	43	969,8	2097,0	0,0
14/3	30,7	28,3	55	48	970,4	1432,0	0,0
15/3	28,6	26,8	54	48	971,5	997,1	0,0
16/3	29,0	26,9	53	46	971,5	1423,0	0,0
17/3	27,1	26,2	61	58	972,1	632,5	0,0
18/3	31,0	28,3	54	45	970,4	2148,0	0,0
19/3	29,1	27,6	51	46	970,6	1522,0	0,0
20/3	29,9	28,2	50	45	971,2	1844,0	0,0

305 Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia ([www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br)).

306 Durante os testes da RSSF proposta, observou-se que a bateria dos nós sensores tiveram  
 307 uma duração média de uma semana, o que foi considerada pequena, mesmo com os XBee's  
 308 estando no modo de economia de energia durante a maior parte do tempo. Uma das possíveis  
 309 causas do alto consumo de energia seriam os dois circuitos SMX, pois os mesmos eram  
 310 alimentados constantemente, mesmo no momento em que o XBeeP estava inativo. Uma  
 311 possibilidade de solução para o problema seria a adição de placas solares para o sistema,  
 312 possibilitando assim a recarga de uma bateria durante os momentos em que haja incidência

313 solar (MINAMI *et al*, 2005; MORAIS *et al*, 2008; PENG *et al*, 2010). Uma outra alternativa e  
314 alimentar os circuitos SMX apenas durante o tempo em que forem utilizados.

## 315 **CONCLUSÕES**

316 É possível montar uma RSSF com o XBeeP sem a necessidade de um  
317 microcontrolador adicional, simplificando a montagem, diminuindo o consumo de energia no  
318 nó sensor e o custo do mesmo.

319 A RSSF criada teve funcionamento satisfatório, não apresentou erros e se mostrou  
320 confiável, podendo ser utilizada para monitoramento de variáveis de ambiente na agricultura  
321 de precisão.

## 322 **TRABALHOS FUTUROS**

323 Adicionar um sistema gerador de energia com painéis solares para estender de forma  
324 significativa o funcionamento do nó sensor sem a necessidade de manutenção.

325 Desenvolver um sistema supervisor para ser utilizado com a RSSF.

326 Integrar a RSSF criada com um sistema de irrigação.

## 327 **AGRADECIMENTOS**

328 Os autores agradecem A Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF e  
329 ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola - CPEGEA pela oportunidade  
330 oferecida. A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB, financiadora do  
331 Projeto Pesquisa – Edital 011/2011, termo de outorga- nº APP0023/2011. A Companhia para  
332 o Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba – CODEVASF 6ª  
333 Superintendência Regional, localizada em Juazeiro-BA, pelo apoio.

334

## 335 **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

336 AGGARWAL, A.; JOSHI, R. C. WSN and GSM based Remote Home Security System.  
337 International Journal of Computer Applications, v.2, iRAFIT, p. 41-45. 2012

- 338 BAGGIO, A. Wireless sensor networks in precision agriculture. ACM Workshop on Real-  
339 World Wireless Sensor Networks, Stockholm, Sweden, 2005.
- 340 BARONTI, P. et al. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.  
341 4 and ZigBee standards. Computer communications, v. 30, n. 7, p. 1655-1695, 2007.
- 342 CADFSOFT EAGLE, disponível em: <<http://www.cadsoftusa.com>>. Acesso em 05 Abr  
343 2012.
- 344 CODEVASF. Pólo de Desenvolvimento Juazeiro/Petrolina. Disponível em:  
345 <<http://www.codevasf.gov.br/principal/perimetros-irrigados/polos-de-desenvolvimento-1/juazeiro-petrolina>>. Acesso em: 26 Jul 2012.
- 347 CORREIA, F. P. ALENCAR, M. S. LOPES, W. T. A. Modelagem de Propagação para Redes  
348 de Sensores sem Fio Aplicadas à Viticultura. Dissertação de Mestrado. Universidade  
349 Federal de Campina Grande. 2014.
- 350 CRESPI, V.; GALSTYAN, A.; LERMAN, K. Top-down vs bottom-up methodologies in  
351 multi-agent system design. Autonomous Robots, v. 24, n. 3, p. 303-313, 2008.
- 352 CUGNASCA, C. E. et al. Integração de redes de sensores sem fio com sistemas de  
353 informação para agricultura de precisão. XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia  
354 Agrícola. Vitória-ES. 2010.
- 355 DIGI INTERNATIONAL INC. XBee/XBee-PRO ZB RF Modules. Disponível em:  
356 <<http://www.digi.com/support/>>. Acesso em 07 de Abr de 2011.
- 357 EME SYSTEMS. SMX - Electrical Interface for Moisture Sensors and Watermark.  
358 Disponível em: <[http://www.emesystems.com/smx/smx\\_documentation.html](http://www.emesystems.com/smx/smx_documentation.html)>.  
359 Acesso em 10 de Mai de 2011.
- 360 IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades@, 2011.  
361 Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 19 Jun 2014.

- 362 IRROMETER. Watermark Soil Moisture Sensor — Model 200SS. Disponível em:  
363 <<http://www.irrometer.com/downloads.html#sensor>>. Acesso em: 03 Abr 2011.
- 364 LABCENTER PROTEUS, disponível em: <<http://www.labcenter.com/index.cfm>>. Acesso  
365 em 10 Mai 2012.
- 366 LIMA, G. E. L.; SILVA, L. C.; NETO, P. F. R. WSN as a Tool for Supporting Agriculture in  
367 the Precision Irrigation. International Conference on Networking and Services. IEEE  
368 Computer Society, p. 137-142, 2010.
- 369 MACEDO, A. B. M.; DE MIRANDA, F. R.; GONDIM, R. S. Análise econômica da  
370 bananeira ‘pacovan ken’ em função de diferentes tensões de água no solo. Irriga, v. 17,  
371 n. 3, 2012.
- 372 MINAMI, M. et al. Solar biscuit: A battery-less wireless sensor network system for  
373 environmental monitoring applications. In: Proc. 2nd International Workshop on  
374 Networked Sensing Systems (INSS2005), San Diego, CA, USA. 2005.
- 375 MORAIS, R. et al. A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing  
376 applications in precision viticulture. Computers and electronics in agriculture, vol. 62. p.  
377 94-106, 2008.
- 378 OLIVEIRA, E. A.; CARVALHO, F. B. S.; LEAL, B. G. Análise da Propagação em Redes de  
379 Sensores Sem Fio Aplicada à Agricultura Irrigada. XXXI Simpósio Brasileiro de  
380 Telecomunicações - SBrT, p. 1-4, 2013.
- 381 PENG, Y. et al. Prolonging sensor network lifetime through wireless charging. In: Real-Time  
382 Systems Symposium (RTSS), 2010 IEEE 31st. IEEE, p. 129-139, 2010.
- 383 RAMYA, V; PALANIAPPAN, B.; GEORGE, B. Embedded System for Automatic Irrigation  
384 of Cardamom Field using Xbee-PRO Technology. International Journal of Computer  
385 Applications, vol. 53,. p. 36, 2012.

- 386 RAPP, A. Xbee-api: A Java API for Digi XBee/XBee-Pro OEM RF Modules. Disponível em:  
387 <<http://code.google.com/p/xbee-api/>>. Acesso em 01 Abr 2012.
- 388 ROGERCOM. Manual do adaptador CON-USBBEE XPlus. Disponível em:  
389 <<http://www.rogercom.com/>>. Acesso em 10 Abr 2011.
- 390 SOARES, M. S. Comparação entre metodologias Ágeis e tradicionais para o desenvolvimento  
391 de software. INFOCOMP Journal of Computer Science, v. 3, n. 2, p. 8-13, 2004.
- 392 Terra. 100 Maiores PIBS da Agropecuária. Disponível em:  
393 <<http://www.terra.com.br/economia/infograficos/pib-agropecuario>>. Acesso em: 19 Jun  
394 2014.
- 395 TEXAS INSTRUMENTS. Lm1117 - 800mA Low-Dropout Linear Regulator Datasheet.  
396 Disponível em: <<http://www.futurlec.com/Linear/LM1117T-3pr.shtml>>. Acesso em  
397 15 Mai 2011.
- 398 THOMPSON, R. B. et al. Evaluation of the Watermark sensor for use with drip irrigated  
399 vegetable crops. Irrigation science, v. 24, n. 3, p. 185-202, 2006.

### 3. CONCLUSÃO GERAL

A RSSF na área agrícola se mostra como um impulsionador da Agricultura de Precisão, pois com ela é possível monitorar e obter dados instantâneos. O seu uso com sensores de umidade do solo pode ser um aliado no combate ao desperdício de água, auxiliando na sustentabilidade da agricultura. Nos experimentos feitos, pôde-se comprovar a robustez e confiabilidade de uma RSSF e a possibilidade de seu uso no auxílio à tomada de decisão.

Nos experimentos executados pôde-se concluir que:

- É possível montar uma RSSF com o XBeeP sem a necessidade de um microcontrolador adicional.
- A RSSF criada teve funcionamento satisfatório, não apresentou erros e se mostrou confiável, podendo ser utilizada para monitoramento de variáveis de ambiente na agricultura de precisão.
- A performance dos sensores estudados é satisfatória e podem ser recomendados para o manejo da irrigação nos solos em condições avaliadas.
- O erro relativo percentual mostrou-se um melhor indicador do que o coeficiente de determinação.

## 4. AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola - CPEGEA.

Ao Colegiado de Engenharia da Computação da UNIVASF.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB pelo financiamento do Projeto de Pesquisa intitulado “Desenvolvimento e avaliação de uma rede de sensores sem fio para fins de manejo da irrigação em plantios no Pólo de Desenvolvimento Petrolina-Juazeiro”, Termo de Outorga- nº APP0023/2011 do Edital 011/2011.

A Companhia para o Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba – CODEVASF 6ª Superintendência Regional, localizada em Juazeiro-BA, pela disponibilização dos solos dos Distritos Irrigados do Mandacaru e do Salitre.



## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKYILDIZ, I. F. et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, v. 38, n. 4, p. 393-422, 2002

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO – Irrigation and drainage, Paper 56, 1998. 319 p.

BAGGIO, A. Wireless sensor networks in precision agriculture. *ACM Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks*, Stockholm, Sweden, 2005. Disponível em <[www.sics.se/realwsn05/papers/baggio05wireless.pdf](http://www.sics.se/realwsn05/papers/baggio05wireless.pdf)>. Acesso em: 05 Mar 2011.

BARONTI, P. et al. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and ZigBee standards. *Computer communications*, v. 30, n. 7, p. 1655-1695, 2007.

BENEDÍ, J. A.; MUÑOZ-CARPENA, R. *Soil-water-solute process characterization: an integrated approach*. Florida: CRC Press, 2005. 787 p.

BERNARDO, S. *Manual de Irrigação*. 6ed. Viçosa: UFV, 1996. 657p.

BRADY, N. C. *Natureza e Propriedade dos Solos*. 7ª ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 898 p.

BRAGA, P. F. Gestão de águas no Brasil. *Scientific American Brasil*, Março 2008, n.70, p.38-41.

CARDENAS-LAILHACAR, B.; DUKES, M. D. Precision of soil moisture sensor irrigation controllers under field conditions. *Agricultural Water Management*, v. 97, n. 5, p. 666-672, 2010.

CHANDRASEKARAN, B.; ANNADURAI, K.; SOMASUNDARAN, E. A Textbook of Agronomy. New Delhi: New Age International Limited Publishers, 2010. 835 p.

DIGI INTERNATIONAL INC. XBee/XBee-PRO ZB RF Modules. Disponível em: <<http://www.digi.com/support/>> Acesso em 07 de abril de 2011.

HUANG, H. et al. A remote home security system based on wireless sensor network and GSM technology. In: Networks Security Wireless Communications and Trusted Computing (NSWCTC), 2010 Second International Conference on. IEEE, p. 535-538, 2010.

IBGE. Manual técnico de Pedologia – 2ª edição. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316 p.

IRROMETER. Moisture sensor agricultural irrigation design manual. Disponível em: < <http://www.irrometer.com/downloads.html#sensor> > Acesso em: 03 Abr 2011.

LEPSCH, I. F. Formação e Conservação dos solos. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178 p.

LIMA, G. E. L.; SILVA, L. C.; NETO, P. F. R. WSN as a Tool for Supporting Agriculture in the Precision Irrigation. International Conference on Networking and Services. IEEE Computer Society, 2010, pp. 137-142.

LÓPEZ RIQUELME, J. A.; SOTO, F.; SUARDÍAZ, J.; SÁNCHEZ, P.; IBORRA, A.; VERA, J. A. Wireless sensor networks for precision horticulture in Southern Spain. Computers and Electronics in Agriculture, v. 68, n. 1, p. 25-35, 2009.

LOUREIRO, A. A. F. et al. Redes de sensores sem fio. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC). p. 179-226. 2003.

MELLO, B. A. e CAIMI, L. L. Simulação na validação de sistemas computacionais para a agricultura de precisão. Rev. bras. eng. agríc. ambient. [online]. vol.12, n.6, p. 666-675, 2008.

MORAIS, R. et al. A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture. *Computers and electronics in agriculture*, v. 62, n. 2, p. 94-106, 2008.

PEREIRA, A. R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. *Bragantia*, v. 64, n. 2, p. 311-313, 2005.

PREVEDELLO, C. L. Física do Solo com problemas resolvidos. Curitiba: SAEAFS, 1996. 446 p.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; SANO, E. E. Calibração e validação de sensor dielétrico para estimativa de teor de água em solos do Cerrado. *Boletim de pesquisa e desenvolvimento*. 223. Planaltina: Embrapa Cerrado, 2008. 32 p.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A. e SILVA, D. D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v. 15, n. 7, p. 670-679, 2011.

SBC – Sociedade Brasileira de Computação. *Grandes Desafios da Pesquisa em Computação no Brasil 2006-2016*. São Paulo, 2006. 26 p. Disponível em <[www.sbc.org.br](http://www.sbc.org.br)>. Acesso em: 29 jul. 2010.

SHU-MING, X. et al. Application Research of WSN in Precise Agriculture Irrigation. *Environmental Science and Information Application Technology 2009 (ESIAT 2009)*, International Conference on. IEEE, p. 297-300, 2009.

SILVA, D. O. M. Avaliação da influência da salinidade do solo no sensoriamento da umidade do solo para o manejo da irrigação. *Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Vale do São Francisco - Campus Juazeiro - BA*. 2013.

SOHRABY, K. et al, *Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications*. Wiley, 2007.

STAFFORD, J. V. Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 76, n. 3, p. 267-275, 2000.

SUN, D.; JIANG, S.; WANG, W. e TANG, J. WSN design and implementation in a tea plantation for drought monitoring. *Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC)*, 2010 International Conference on. IEEE, p. 156-159, 2010.

ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and electronics in agriculture*, v. 36, n. 2, p. 113-132, 2002.