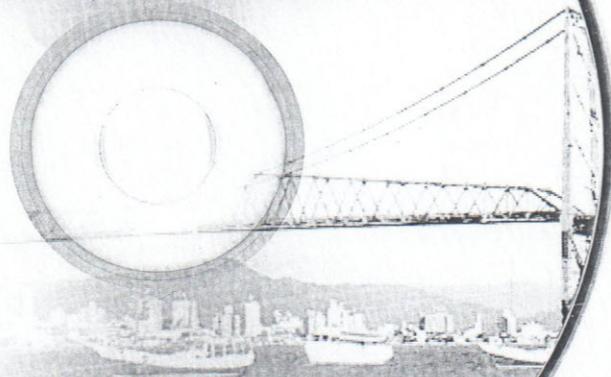


**SBAI** VIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente

**CBRN** VIII Congresso Brasileiro de Redes Neurais

**SBIC** I Simpósio Brasileiro de Inteligência Computacional

**CBR** 2007 **Competição Brasileira de Robótica**



**8 a 11 de outubro de 2007**

**Florianópolis - Santa Catarina**

## REDE DE SENSORES E ATUADORES SEM FIO PARA IRRIGAÇÃO COM TAXA VARIÁVEL

ANDRÉ TORRE-NETO<sup>1</sup>, EVANDRO L. L. RODRIGUES<sup>2</sup>, RAFAEL A. FERRAREZI<sup>2</sup>, EDUARDO A. SPERANZA<sup>1,2</sup>, ALEXANDRE C. N. OLIVEIRA<sup>1</sup>

*Laboratório de Eletrônica e Desenvolvimento, CNPDIA, EMBRAPA<sup>1</sup>  
Caixa Postal 741, 13560-970 São Carlos, SP, BRASIL*

*Departamento de Engenharia Elétrica, EESC, USP<sup>2</sup>  
Av. do Trabalhador São-carlense, 400, Centro, 13566-590 São Carlos, SP, BRASIL*

*E-mails: [andre@cnpdia.embrapa.br](mailto:andre@cnpdia.embrapa.br), [evandro@sel.eesc.usp.br](mailto:evandro@sel.eesc.usp.br), [ferrarezi@gmail.com](mailto:ferrarezi@gmail.com), [speranza@cnpdia.embrapa.br](mailto:speranza@cnpdia.embrapa.br), [carbone@cnpdia.embrapa.br](mailto:carbone@cnpdia.embrapa.br)*

**Abstract** — Brazil has the most important citrus production area in the world. The largest part of it is not yet irrigated. To increase productivity and to combat recent spreading of diseases, like sudden death, this scenario will change and most of the groves will have to be irrigated. Therefore, water source conservation methods must be developed, avoiding waste of water and lowering the cost with energy consumption to drive pumps for irrigation. This is possible if the producer uses a site-specific irrigation system. In the present paper we present the development of a wireless fixed instrumentation (sensor and actuator network) and the related software tools to irrigate perennial crops site-specifically. Citrus crop production is the first goal, and may be easily adjusted to other crops that use irrigation.

**Keywords** — Precision agriculture, electronic instrumentation, soil moisture mapping, site-specific irrigation system, wireless sensor and actuator network.

**Resumo** — O Brasil possui a mais importante área de produção de citros do mundo. A maior parte dela ainda não é irrigada. Para aumentar a produtividade e combater a recente propagação de doenças, como a morte súbita, este cenário será modificado e a maioria das plantações deverá ser irrigada. Assim, métodos para conservação de recursos hídricos devem ser desenvolvidos, evitando o desperdício de água e diminuindo o custo com o consumo de energia para operação das bombas de irrigação. Isto é possível se o produtor utilizar um sistema de irrigação espacialmente diferenciado. Neste artigo, é mostrado o desenvolvimento de uma instrumentação fixa sem fio (rede de sensores e atuadores) e suas respectivas ferramentas de software para irrigação de culturas perenes de maneira espacialmente diferenciada. A primeira meta é a produção de citros, e o sistema deverá ser facilmente ajustado para outras culturas que utilizam irrigação.

**Palavras-chave** — Agricultura de precisão, instrumentação eletrônica, mapeamento da umidade do solo, sistema de irrigação espacialmente diferenciado, rede de sensores e atuadores sem fio.

## 1 Introdução

A produção brasileira de frutos foi de aproximadamente 41.2 milhões de toneladas em 2005, o que significa a terceira posição em todo o mundo (FAO Statistical, 2005). A produção de citros tem uma grande contribuição neste número (44%) e o suco de laranja representou 0.67% do total de exportação do Brasil neste mesmo ano. Mesmo assim, a maioria da área de produção de laranja no país não é irrigada. Diante da necessidade de controlar doenças, como por exemplo a morte súbita, e para aumentar a produtividade, sistemas de irrigação instalados expandiram de 1.5% em 1999 para 10.2% do total da área de produção de citros no país em 2004.

No Brasil, como em outros países, são cobradas tarifas das propriedades pela utilização da água para irrigação. Além disso, seu uso é limitado em determinados períodos do ano, devido à sua escassez. Algumas experiências com mapeamento de produtividade têm convencido muitos agricultores sobre a importância da disponibilidade de água como sendo o principal fator na sua variação (Schüller, 1997).

Assim, a conservação dos recursos hídricos implica na necessidade de se desenvolverem métodos para maximizar o uso eficiente da irrigação, como um sistema de irrigação espacialmente diferenciado (Fraise *et al.*, 1995) (Sadler *et al.*, 1996), onde somente áreas com deficiência hídrica são irrigadas, evitando assim o desperdício de água e também diminuindo o custo com o consumo de energia para acionamento de bombas para irrigação.

Alguns esforços em trabalhos de irrigação com taxa variada vem sendo realizados por Torre-Neto, *et al.* desde 2001.

O objetivo deste trabalho é apresentar os primeiros resultados destes esforços, utilizando a tecnologia de redes sem fio. Foi desenvolvido e implementado um sistema de irrigação espacialmente diferenciado, baseado em uma rede sem fio de sensores e atuadores. O sistema foi idealizado para ser de baixo custo, confiável e compatível com as práticas locais de produção de citros e outras culturas perenes, como o café. O foco do artigo é descrever o desenvolvimento da instrumentação e as ferramentas de software relacionadas.

## 2 Materiais e Métodos

As redes de sensores e atuadores sem fio disponíveis no mercado ainda são, em sua maioria, utilizadas para aplicações industriais e prediais, com características não totalmente favoráveis para utilização em campo agrícola. Sendo assim, uma rede proprietária de sensores e atuadores sem fio foi desenvolvida para monitoramento e controle remoto de áreas agrícolas. O sistema é constituído de “nós sensores e atuadores”, uma ou mais Estações de Campo (EC), uma Estação Base (EB) e um Kit de Instalação. A Figura 1 ilustra a arquitetura do sistema. Cada Estação de Campo cobre uma área de 100 hectares. A Estação Base é um computador pessoal localizado no escritório da fazenda para gerenciamento global da rede.

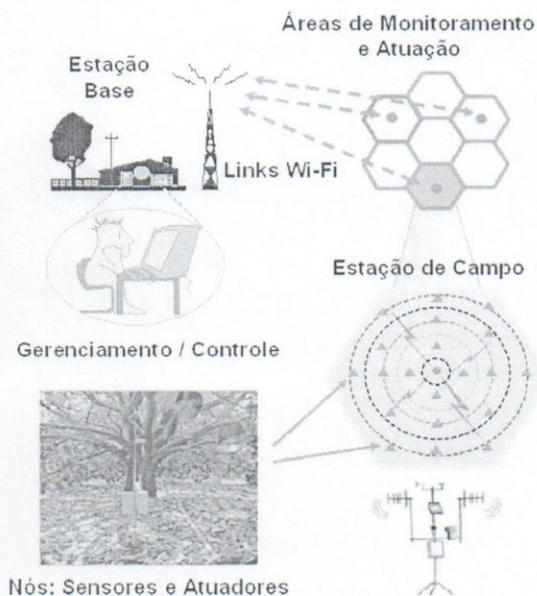


Figura 1. Arquitetura do Sistema de Irrigação a Taxa Variável

Os nós sensores e atuadores foram desenvolvidos para irrigação por gotejamento à taxa variável, baseados em parâmetros do solo. Existe um nó sensor que mede a umidade e temperatura numa profundidade específica e um nó atuador que controla válvulas solenóides. Os nós foram desenvolvidos seguindo as seguintes premissas:

- Os nós sensores devem ser distribuídos em uma grade fixa padrão, com espaçamento de 40 metros entre eles, e posicionados sob a copa das árvores;
- Os nós sensores devem ser alimentados por baterias não-recarregáveis e devem durar pelo menos doze meses;
- Os nós atuadores devem ser alimentados por baterias recarregáveis e equipados com painéis solares, e devem ser posicionados para receber a luz solar diretamente;
- Todos os nós devem ser resistentes a insumos químicos.

- A instalação, operação e manutenção dos nós devem ser o mais simples possível, dispensando uma equipe especializada.

Na implementação da rede de sensores e atuadores sem fio, foram tomados os devidos cuidados para evitar problemas como o consumo de energia, redução no alcance de transmissão dos nós e a colisão de pacotes de transmissão. Para isto, o modo de operação dos nós e o protocolo de comunicação foram otimizados para serem energeticamente eficientes, além de seguirem algumas regras como as descritas abaixo:

- O protocolo de comunicação utiliza relações assimétricas do tipo mestre e escravo, que operam no modo de comunicação *pool / response*, ou seja, os nós somente transmitem uma mensagem como resposta a um comando da EC;
- Todos os nós são capazes de receber comandos da EC a qual estão associados, pois esta tem maior potência de transmissão;
- Os nós que não conseguirem transmitir diretamente para a EC enviarão os dados para outros nós (por rotas fixas e/ou alternativas) de seu subconjunto, que irão retransmiti-los para a EC correspondente;
- Os pacotes (mensagem + campos de controle) poderão ser divididos em pedaços menores para atender limitações do rádio e/ou da memória disponível.

Os módulos que fazem parte do sistema serão descritos em seguida.

### 2.1 Nó Sensor

O nó sensor é o módulo que realiza aquisição de dados referentes aos parâmetros do solo, que serão utilizados para modelar as zonas de manejo. Estes dados são de fundamental importância para a tomada de decisão do sistema de irrigação. Com uma programação pré-determinada os nós se comunicam com a Estação de Campo, enviando dados dos sensores nele instalados e assim, proporcionam a criação de mapas de umidade do solo espacialmente variados.

A montagem básica do nó sensor é constituída por um sensor capacitivo para a medida da umidade do solo, sensores para as medidas da temperatura do solo e do ar (circuitos integrados LM35DZ), uma caixa de alumínio com uma antena instalada na parte superior, e hardware acondicionado no interior da caixa. Seu circuito eletrônico é composto de um microcontrolador (PIC16F88 da Microchip) que coleta, processa e armazena os dados dos sensores, e um transceptor (transmissor + receptor) para comunicação sem fio por radiofrequência em 916MHz (DR-

3000 da RF Monolithics), responsável por enviar dados e receber comandos, além de outros componentes discretos secundários. A alimentação do sistema é feita por uma bateria de Lítio de 3.6V cuja autonomia é de 12 meses. Optou-se pela escolha de componentes com tecnologia "nanowatt" (baixo consumo), priorizando a economia de energia.

## 2.2 Nó Atuador

Os nós atuadores possuem hardware, software e construção similares aos nós sensores. A principal diferença é que possuem um circuito de interface para válvulas solenóides e medidores de fluxo. Uma ponte H é utilizada para abrir e fechar as válvulas, devido às mesmas serem do tipo *latching*, e um circuito é utilizado para condicionar o sinal do medidor de fluxo, que é conectado a um pino contador de pulsos do microcontrolador. Os nós atuadores são alimentados com quatro células de bateria NiCd de 1.2V, com capacidade de carga de 1000mAh, e por consumirem mais energia que os nós sensores, são equipados com um painel solar foto-voltaico de 1 watt para recarga das baterias. O ciclo de funcionamento, o intervalo de aquisição e a comunicação de dados dos nós atuadores são os mesmos dos nós sensores.

## 2.3 Estação de Campo (EC)

As Estações de Campo são os elementos concentradores de dados da rede de sensores sem fio. Exercem as funções de receber, processar e enviar dados para a Estação Base. O envio é feito por meio de conexões JDBC (*Java Database Connectivity*), mantendo o banco de dados da Estação Base sempre atualizado. Elas também têm a função de repassar comandos para configurar a operação e atuação dos nós e realizar o roteamento da rede de comunicação. A área de cobertura do sinal de rádio de cada Estação de Campo é de aproximadamente 100 hectares, cobrindo aproximadamente 400 nós sensores com espaçamento de 40 metros. O protocolo de comunicação de dados está preparado para monitorar 65 mil nós.

As Estações de Campo são compostas por uma CPU, uma mini-estação climatológica, uma interface de rede sem fio (WLAN) e um *driver* de comunicação com os nós. Além disso, são alimentadas por um conjunto de duas baterias automotivas de 55Ah, recarregadas por um painel solar de 70 watts.

A CPU é um PC104 baseado no processador NS Geode GX1, de 300 MHz e *chipset* NS CS5530A (PCM-3550 da Advantech), com 256 Megabytes de memória RAM e uma memória *Compact Flash* de 1 Gigabyte funcionando como disco de sistema. Foi instalado nessa memória o sistema operacional Linux, distribuição Slackware 10.2, com *kernel* 2.4, e todo software foi desenvolvido utilizando as linguagens de programação ANSI C e Java. A estação cli-

matológica é uma WMR-918 da Oregon Scientific, conectada em uma das duas portas seriais RS-232 do PC104. A interface de rede sem fio é um *Access Point* da Level-One, modelo WAP-0003, conectado ao PC104, e que por sua vez está conectado a uma antena externa direcional com 18 dBi de ganho, a fim de estabelecer o *link* Wi-Fi com a Estação Base. Os serviços mais comuns do protocolo TCP/IP como FTP, SMTP e SSH são utilizados para enviar e receber dados, arquivos e comandos para e da Estação Base. Os arquivos de configuração são gerados no formato XML.

O *driver* de comunicação de dados é o único componente não comercial da EC. Ele foi desenvolvido com um microcontrolador, conectado a um módulo de rádio DR-3000 para transmissão e outro para recepção de dados dos nós, além de uma interface serial RS-232 para comunicação com a CPU do PC104. Ele executa a porção de mais baixo nível do protocolo de comunicação de dados. O nível de potência de transmissão é aumentado para 20 dB para que a Estação de Campo possa ter um raio de abrangência de aproximadamente 750 metros.

## 2.4 Estação Base

A Estação Base é utilizada para centralizar todas as operações e dados do sistema. É composta por um computador pessoal e um *Access Point* externo para acesso à rede sem fios (WLAN) da Level-One, modelo WAB-1000A, conectado a uma antena externa omni-direcional que realiza a comunicação com as Estações de Campo.

Uma base de dados espaço-temporal foi desenvolvida juntamente com um software de gerenciamento com funcionalidades de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), para operar sobre o sistema e auxiliar na tomada de decisão para a irrigação à taxa variada.

Essa base de dados, que utiliza o servidor PostgreSQL, de código livre e com extensão espacial (PostGIS), possui todas as informações referentes às entidades do sistema, tais como coordenadas geográficas de posicionamento global dos nós, modos de configuração e operação, bem como informações sobre a própria propriedade em que o sistema esteja implantado.

O software de gerenciamento foi desenvolvido em C++ e as funcionalidades de SIG utilizadas fazem parte da biblioteca TerraLib, também de código livre, desenvolvida pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Por meio desse software, é possível realizar programações da irrigação em dois modos distintos: convencional e inteligente.

No primeiro modo, as regiões que constituem as unidades de irrigação são fixadas na instalação do sistema e não devem ser modificadas. Este modo possibilita apenas a automação do acionamento de válvulas.

Já no segundo modo, essas regiões são definidas de acordo com a observação de seqüências de mapas de umidade do solo, gerados pelo mesmo software, permitindo a caracterização de zonas de manejo pelo próprio usuário do sistema. A partir desta caracterização, a malha hidráulica da irrigação na área em questão deve ser reajustada ou projetada (no caso de início de cultivo irrigado), para que as zonas formadas possam ser irrigadas de maneira espacialmente diferenciada. Assim, o sistema permite que o usuário opere sabendo onde, quando e quanto irrigar, mantendo cada região irrigada o mais próximo possível da umidade do solo ideal, minimizando o consumo de água e energia elétrica sem afetar a produtividade.

### 2.5 Kit de Instalação

O Kit de Instalação tem como função a configuração dos nós da rede sem fio - sejam eles sensores ou atuadores - no ato da instalação, na manutenção ou ainda para realizar coletas imediatas de dados.

Ele consiste em um conjunto de softwares, que usam comunicação Bluetooth com GPS e um *driver* para comunicação com os nós via radiofrequência. Estes softwares proporcionam a coleta de dados geográficos e alfanuméricos, acesso às configurações e funções do nó, juntamente com a navegação por pontos georreferenciados.

Os softwares foram desenvolvidos na linguagem de programação SuperWaba com a plataforma Eclipse, visando a utilização pelos usuários finais.

## 3 Resultados e Discussão

Uma unidade piloto de seis hectares foi instalada e colocada em operação para avaliação da operabilidade do sistema em condições de campo. Foi selecionada uma plantação de laranja de 10 anos de vida, com árvores de 3 metros de altura. Há 25 nós sensores e uma Estação de Campo em operação desde janeiro de 2006. O sistema foi programado para aquisição de dados a cada 15 minutos, e transmissão dos dados à Estação de Campo a cada hora. A Figura 2 mostra um mapa de umidade do solo obtido pela interpolação de dados dos 25 sensores em um momento arbitrário. Por meio de mapas desse tipo, que fornecem informações espaço-temporais instantâneas de disponibilidade de água no solo, pode-se verificar que o sistema é viável para mapeamento e controle da irrigação.

Os próximos passos incluem a expansão desta unidade piloto para 25 hectares, com 100 nós sensores instalados nesta área, além da instalação dos nós atuadores que estão em fase final de testes em laboratório.

Seqüências de mapas de umidade do solo podem ser obtidas para cada área. O resultado esperado pela análise destes mapas é ter a área dividida em

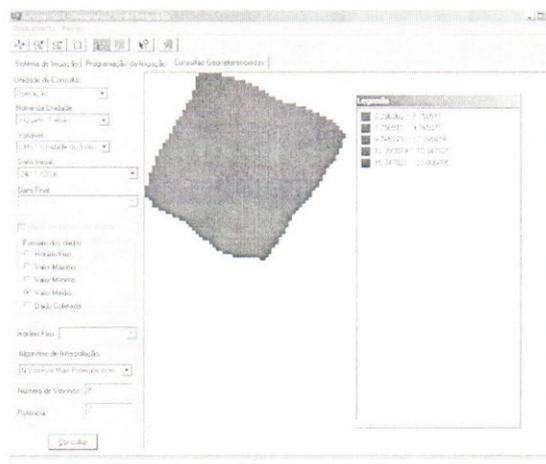


Figura 2. Mapa de umidade do solo em um momento arbitrário

cinco ou mais zonas de manejo com diferentes necessidades de irrigação. Estas zonas podem refletir a variabilidade espacial para a combinação de diferentes fatores como: textura do solo, topologia do solo e necessidades individuais de cada árvore. O sistema de irrigação poderia ser modificado para irrigar locais específicos na plantação, de acordo com estas zonas de manejo. Para cada zona seria endereçada uma válvula automática estabelecendo um laço de controle com seu próprio ponto de ajuste. Este ponto de ajuste seria comparado com a média de umidade do solo na zona, obtida pelo conjunto da rede de sensores condizentes com a mesma. O consumo da água seria avaliado por um medidor de fluxo automático na entrada da área e comparado ao consumo das áreas convencionais automatizadas.

## 4 Conclusão

Nesse trabalho foi descrito um sistema automatizado para controle espacialmente diferenciado da irrigação por gotejamento. O sistema foi construído com componentes de baixo custo para mapear a umidade do solo, monitorando temperaturas e controlando válvulas solenóides de acordo com a necessidade específica de agrupamentos pré-determinados de árvores de um pomar de 25 hectares. O sistema pode ser remotamente controlado, e o comportamento de seus vários componentes mostrou-se confiável.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fischer S/A Agropecuária pela disponibilidade da área para instalação da unidade piloto; ao FUNDECITRUS, à UNB e à UNICAMP pela colaboração científica; e à FAPESP, pelo financiamento do projeto PIPE "Desenvolvimento de plataforma tecnológica para irrigação de precisão em culturas perenes", processo n.º 04/05464-6.

## Referências Bibliográficas

FAO Statistical Databases. (2005). <http://apps.fao.org>

Fraisse, C. W., Heermann, D. F., Duke, H. R. (1995). Simulation of variable water application with linear-move irrigation systems. *Trans. ASAE* v.38, n.5, p.1371-1376.

Sadler, E. J., Camp, C. R., Evans, D. E., Usrey, L. J. (1996). Irrigation system for coastal plain soils. *Precision Agriculture: Proceedings of the 3rd International Conference*. Minneapolis v.1, p.827-834.

Schüller, J. K. (1997). Technology for precision agriculture. *European Conference on Precision Agriculture*. v.1 p.33-44.

Torre-Neto, A., Schüller, J. K., Haman, D. Z. (2001). Automated System for Variable Rate Microsprinkler Irrigation in Citrus: A Demonstration Unit. *Proc. Third European Conference on Precision Agriculture*. Montpellier, France June 18-20. p.725-730. CD-ROM.

Torre-Neto, A., Ferrarezi R. A., Razera, D. E., Speranza, E. A., Lopes, W. C., Lima, T. P. F. S., Rabelo, L. M., Vaz, C. M. P. (2005). Wireless Sensor Network for Variable Rate Irrigation in Citrus. In: *7<sup>th</sup> Fruit, Nut and Vegetable Production Engineering Symposium*. Montpellier, França.