

## AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA REDE DE SENSORES SEM FIO eKo EM UMA CULTURA DE MILHO

MARCELO F. BARROS<sup>1</sup>, LUIZ O. L. A. SILVA<sup>2</sup>, CARLOS E. CUGNASCA<sup>3</sup>, JOSÉ P. MOLIN<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Engo Eletricista, Mestre em Engenharia, Pesquisador do Depto. de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo - SP, Fone: (11) 3091-5104, barros.mfb@gmail.com.

<sup>2</sup> Engo Eletricista, Mestrando em Engenharia, Pesquisador do Depto. de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo - SP, Fone: (11) 3091-5104, luiz.lamardo@gmail.com.

<sup>3</sup> Engo Eletricista, Mestre, Doutor e Livre-Docente em Engenharia, Professor Associado do Depto. de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo - SP, Fone: (11) 3091-5366, carlos.cugnasca@gmail.com.

<sup>4</sup> Engo Agrícola, Mestre, Doutor e Livre-Docente em Engenharia Agrícola, Professor Associado do Depto. de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, USP, Piracicaba - SP, Fone: (19) 3429-4165 Ramal: 212, jpmolin@esalq.usp.br.

Apresentado no  
Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão - ConBAP 2012  
24 a 26 de setembro de 2012- Ribeirão Preto - SP, Brasil

**RESUMO:** Entre os desafios para que se amplie a aplicação de tecnologias destinadas a Agricultura de Precisão está a proposição de um sensoriamento simples, econômico e eficiente, como as Redes de Sensores Sem Fio. Porém, tais redes ainda não podem ser caracterizadas como simples e econômicas frente ao padrão econômico e cultural do agricultor brasileiro. Entre as dificuldades para o uso intenso dessas redes na agricultura está sua suscetibilidade a intempéries, a exigência da presença de um especialista para configurá-las, programá-las e instalá-las e a necessidade de baixo consumo de energia, por operarem com baterias. Por isso, seu uso tem se aplicado principalmente em pesquisas e em ambientes controlados. No entanto, recentemente a empresa Memsic lançou no mercado a linha eKo de sensores sem fio, com robustez contra intempéries, maior alcance, operação por baterias recarregáveis por meio de células solares, e de fácil montagem e utilização. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de uma rede de sensores dessa linha, em uma cultura de milho. Um dos aspectos avaliados foi a comunicação entre os dispositivos da rede, que pode ser afetada devido à forte atenuação no alcance dos sinais de rádio provocados pelo crescimento das plantas. Para atingir este objetivo, diversos tipos de sensores sem fio da linha eKo foram utilizados, e o seu desempenho foi avaliado a distância por meio de um sistema de monitoração *on-line*, conectado à Internet. Os resultados obtidos foram bons, do ponto de vista de robustez, autonomia das baterias e alcance de comunicação, estimulando o uso dessa tecnologia em novas aplicações.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), Cultivo de milho, Desempenho de redes

## EVALUATION OF eKo WIRELESS SENSOR NETWORK PERFORMANCE IN A CORN CROP

**ABSTRACT:** One of the challenges that arise when using Precision Agriculture is to find a simple, economic and efficient sensing method. An alternative could be the Wireless Sensor Network, however it is not possible to characterize them as simple and economic solution for a common Brazilian farmer. Difficulties are because most of device in the market are recommended for applications in research or controlled environments, with specialists support to configure, program and install them. Recently Memsic Corp. launched in market a new devices line, called eKo line, a “plug-

&-play” series, with robustness, large radio reach and run on rechargeable solar panel batteries. The objective of this work is to evaluate the performance of this new technology in a crop that for its inherent characteristics, have low performances at the end of the cycle, mostly due to the radio attenuation caused by the plant growth. To reach this objective an application was developed with diverse kind of Wireless sensors installed in a corn fields. The network performance was monitored by an on-line system. Results were positive in terms of robustness, batteries autonomy, and communication reach, showing the possibility to use it in new applications.

**KEYWORDS:**. Wireless Sensor Network, Corn Crop,

**INTRODUÇÃO:** Os sistemas de sensoriamento comumente utilizados na Agricultura de Precisão (AP), como fotografias aéreas, videografias e imagens de satélites, destinados principalmente à produção de mapas, possuem diversas limitações (MOLIN, 2000), dentre as quais a sua realização no final do ciclo de uma cultura. Isso representa uma avaliação tardia, uma vez que o agricultor somente poderá realizar correções para o próximo ciclo de produção. Um sensoriamento que pudesse oferecer informações ao agricultor durante o ciclo, de modo simples e eficiente, poderia eliminar essa limitação. Esta afirmação é corroborada pelo trabalho de Klein e Camara (2005) que evidenciam as vantagens do uso de informações sobre potencial hídrico de solo durante todo o ciclo de uma cultura de soja. No contexto da AP, outro fator relevante, segundo Molin (2002), é a possibilidade de monitoramento *on-line*. As Redes de Sensores sem Fio (RSSF) podem disponibilizar os dados da monitoração em tempo real na Rede Mundial - Internet, os quais podem ser acessados em qualquer lugar, podendo ser analisados por especialistas a distância. Apesar de as RSSF estarem disponíveis há algum tempo, o seu uso tem sido restrito especialmente a trabalhos científicos. Entre os fatores que dificultam a popularização das RSSF na agricultura destacam-se:

- **A alta densidade de nós:** para cobrir grandes distâncias, típicas de muitas propriedades agrícolas brasileiras, faz-se necessário um grande número de nós (SIQUEIRA et al, 2006), elevando os custos e muitas vezes inviabilizando a aplicação (MENEZES, MATEUS e NAKAMURA, 2004).
- **A baixa duração das baterias:** tipicamente as baterias de uma RSSF duram alguns meses, o que para certas culturas não é suficiente. A troca das baterias, ainda que possível, seria uma tarefa praticamente constante, uma vez que o consumo varia muito de um sensor para outro, ou seja, algumas baterias podem se esgotar em poucas semanas, enquanto outras podem durar todo o ciclo.
- **A dificuldade de propagação de sinais de rádio em meios vegetais:** os sinais de rádio que transmitem os dados de uma RSSF usam frequências cuja propagação é fortemente atenuada em meios com presença de líquidos. Na agricultura isto é uma limitação importante, uma vez que a constituição das plantas envolve razoável quantidade d'água. Relatos em trabalhos científicos mostram a relevância deste fator (BENAVENTE, CUGNASCA e SANTOS, 2010). Essa limitação pode causar problemas, em especial, na fase de crescimento das plantas. Algumas culturas como cana, milho, por exemplo, formam folhagem altamente adensada, podendo reduzir ou interromper o envio de informações dos sensores.
- **Necessidade de mão de obra especializada para instalação:** ainda que a maioria dos dispositivos das RSSF existentes no mercado seja de simples aplicação e configuração, esta tarefa não está ao alcance de um agricultor brasileiro típico.
- **Fragilidade dos dispositivos:** até pouco tempo, os dispositivos existentes no mercado eram destinados à pesquisa; por isso, não possuíam invólucro adequado à exposição a intempéries como chuvas, ventos, poeiras, altas temperaturas etc. Assim, para a maioria das aplicações, necessitavam ser envolvidos por um encapsulamento adequado, o que agravava as dificuldades para sua aplicação na agricultura.
- **Limitações de tipos de sensores:** em geral, os fabricantes de dispositivos para RSSF fornecem um conjunto de sensores compatíveis entre si e recomendados para determinados usos. Também fornecem suporte para a incorporação de outros sensores de mercado; porém, para isso exigem a participação de projetistas especializados.

Possivelmente para fazer frente a tantas dificuldades, recentemente a Memsic Corporation (MEMSIC, 2012) lançou comercialmente uma linha de sensores denominada eKo, com robustez contra

intempéries, maior alcance, operação por baterias solares e de fácil montagem e utilização. Com vistas a identificar o potencial de uso de tais sensores em condições reais é que se realizou o presente trabalho, cujo objetivo foi avaliar o desempenho de uma RSSF constituída por diversos tipos de sensores da linha eKo, em uma cultura experimental de milho que, em princípio, tende a dificultar o sensoriamento devido à forte atenuação na propagação dos sinais de rádio, reduzindo o alcance da comunicação dos dispositivos à medida que as plantas crescem.

### **MATERIAL E MÉTODOS:**

Os sensores da linha eKo utilizados diferenciam-se dos atualmente utilizados para essa finalidade por: terem encapsulamento a prova d'água, poeira e intempéries; utilizarem carregamento automático das baterias com energia solar; terem nós com capacidade de incorporar até quatro sensores de uso corriqueiro na agricultura; serem providos da tecnologia *plug-and-play*, ou seja, os dispositivos são pré-configurados na fábrica, exigindo poucos conhecimentos específicos para a sua implantação; incorporarem ferramenta de monitoração de fácil utilização, com possibilidade de acesso por meio da Internet.

A aplicação da rede se deu na fase inicial de crescimento de uma cultura experimental de milho, no Campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da USP, em Piracicaba, interior do Estado de São Paulo. A rede foi montada com 11 nós, com até 4 sensores externos cada um, além do sensor de tensão da bateria interno a cada um dos nós, uma estação meteorológica no nó 5 e equipamento receptor (*gateway*), que inclui uma página WEB pré-configurada para acesso às informações coletadas pela RSSF. Foi usado também um roteador para conexão à Internet.

### **Avaliação da Densidade de Nós.**

A densidade de nós está relacionada diretamente a dois fatores: o alcance dos sensores, uma vez que a informação coletada é enviada de sensor a sensor até chegar ao nó coletor; e à variação espacial da variável que se deseja monitorar.

Quanto ao alcance dos sensores o fabricante especifica 400 m em condições ideais. Nos testes realizados os sensores foram alocados a distâncias que variam de 6,5 a 177 m. Em especial os sensores 1, 5 e 11 foram dispostos formando um triângulo (Figura 1) de modo a permitir que os dados do sensor 1 pudessem chegar ao nó coletor diretamente (distância máxima sem repetidor de 177 m) ou passando pelos nós 5 e 11 (usado como repetidor).



FIGURA 1 – Possibilidades de Rota dos Dados do Sensor 1 até a Base.

Quanto à variação espacial das variáveis a serem monitoradas, foram tomados por base trabalhos de Gonçalves, Folegatti e Silva (1999) e de Gomes et al. (2007) para variáveis físico-hídricas do solo; e de Santos (2006), para molhamento foliar. Os sensores de temperatura foram posicionados de modo a refletir variações referentes a áreas de pleno sol, sombra pela manhã e sombra à tarde. Uma estação meteorológica capaz de gerar dados de chuva (precipitação pluviométrica), velocidade e direção do vento e radiação solar foi alocada em uma posição central da cultura do milho. A Figura 2 mostra o posicionamento relativo dos nós e a Tabela 1 os sensores associados a cada um deles, assim como a distância ao nó mais próximo.

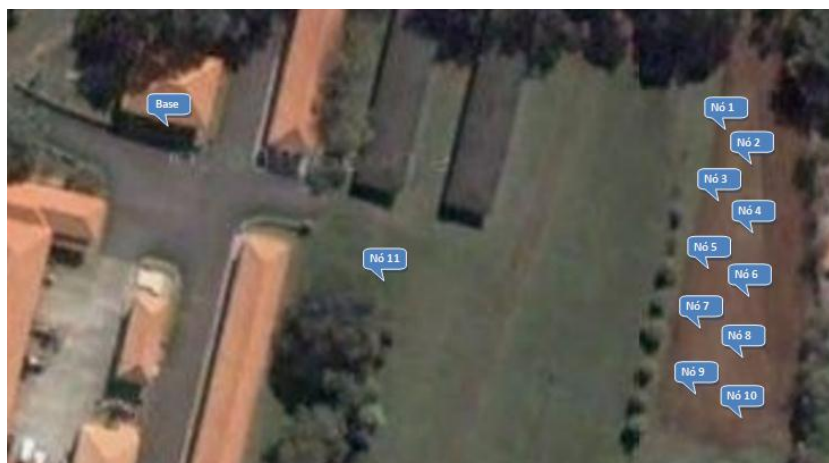


FIGURA 2 Posicionamento dos 11 nós e do “gateway” (Base).

TABELA 1 Posição e tipos de sensores em cada nó.

Nó	Latitude (graus)	Longitude (graus)	Sensores*	Nó mais Próximo	Distância (m)
1	-22,71322	-47,628849	TB, HS, CH,TA	2	6,5
2	-22,71363	-47,628299	HS, HA, MF, CH, TB, PO, TA	3	19,4
3	-22,71372	-47,628168	HS, TB, CH	4	12,7
4	-22,7135	-47,628164	HS, RS, CH, TB	5	23,3
5	-22,7133	-47,628136	HS, HA, RS, TA, BA, PL, DV, VV, MF, TB, PO	11	61,6
6	-22,7131	-47,628124	HS, TB, MF, CH	5	14,7
7	-22,71288	-47,628114	HS, TB, CH	5	25
8	-22,71283	-47,628144	TB, HS	7	9,9
9	-22,713	-47,628189	HA, TB, PO, TA	7	21,9
10	-22,71322	-47,62825	HS, TB, MF, CH	9	17,6
11	-22,71344	-47,628232	TB	Base	109,7

\*Tipos de Sensores: TB = Tensão da bateria; HS = Umidade do solo; CH = Potencial hídrico do solo; TA = Temperatura ambiente; HA = Umidade do ar; MF = Molhamento foliar; PO = Ponto de orvalho; RS = Radiação Solar; BA = Barômetro; PL = Pluviômetro; DV = Direção do vento; VV = Velocidade do vento



FIGURA 3 - Nó instalado em hastes a 2,7 m do solo.

Os sensores de solo foram colocados a 20 cm de profundidade e conectados aos nós por cabos (Figura 4); os sensores de temperatura foram alocados em hastes a aproximadamente 1,5 m do solo. Na mesma posição foram colocados os sensores para molhamento foliar (em ângulos de 45° aproximadamente). A estação meteorológica foi alocada em uma haste a aproximadamente 1,5 m do solo. Os nós sensores foram alocados em hastes a 2,7 m do solo (Figura 3).



FIGURA 4 Cabos de conexão dos sensores de solo enterrados a 20 cm de profundidade.

**Avaliação da Duração das Baterias** - Como as baterias dos nós sensores da linha eKo são carregadas automaticamente por células solares instaladas nos próprios nós, foi feita apenas monitoração da tensão das baterias de cada um dos nós durante todo o período de avaliação.

**Avaliação da Redução do Alcance devido ao bloqueio Causado pela Vegetação Local** - Alguns dos nós foram posicionados de modo que a vegetação natural pudesse bloquear parcial ou totalmente a comunicação de alguns dos nós sensores, porém de modo que a rede pudesse encontrar um caminho e que as informações alcançassem o nó coletor.

**Dificuldades na Instalação** - Em cada uma das etapas - instalação da rede, monitoração e desmontagem final - foi feita uma avaliação das dificuldades para realizar o trabalho e da qualificação exigida da mão de obra.

**Fragilidades dos Sensores** - Durante todo o ciclo foi observada a ocorrência de alterações no comportamento da rede ou dos sensores, as quais poderiam vir a ser provocadas pela sua exposição a intempéries. Ao final do experimento e após a desmontagem os nós, os sensores foram avaliados visual e operacionalmente em laboratório.

**Avaliação da Comunicação** - A comunicação foi monitorada em dois locais distintos. O primeiro a poucos metros da cultura experimental, no laboratório da ESALQ, onde estava instalado o nó coletor (base) que enviava a informação a um *gateway* que continha um dispositivo de memória móvel tipo *pen-drive* e também disponibilizava os dados na WEB por meio de um aplicativo embarcado no próprio *gateway*. Um servidor da ESALQ foi utilizado para que o aplicativo pudesse disponibilizar os dados na rede mundial. O segundo local ficava no laboratório da Escola Politécnica, em São Paulo, a aproximadamente 200 km do local do experimento, e o aplicativo embarcado no *gateway* (eKoView) era acessado diariamente. As Figuras 5 e 6 mostram algumas das páginas do aplicativo. Por meio do qual foi possível do laboratório em São Paulo monitorar as leituras dos sensores, o status da rede e de cada nó em tempo real.

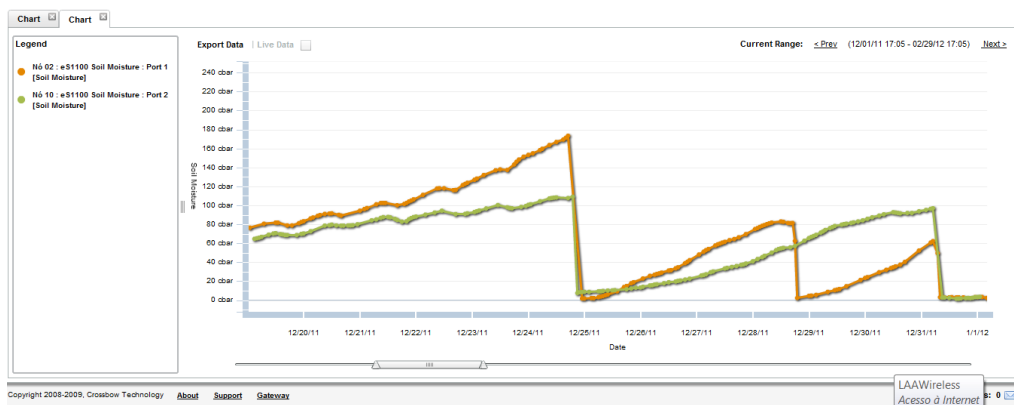


FIGURA 5 – Página do aplicativo eKoView, mostrando a variação da umidade do solo em dois pontos.

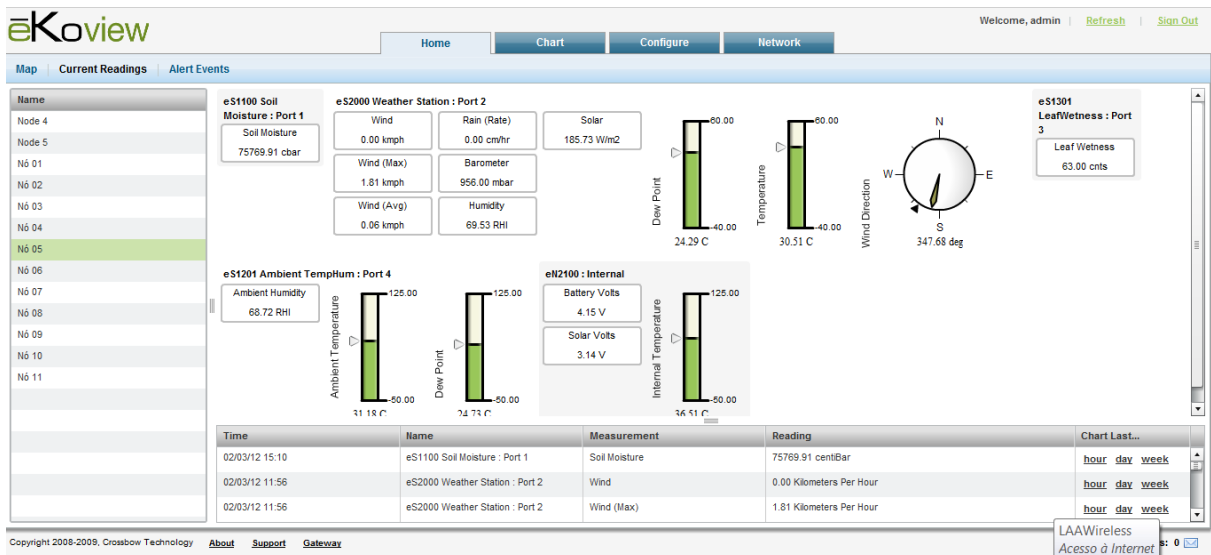


FIGURA 6 – Página do aplicativo eKoview, monitorando Sensores em tempo real.

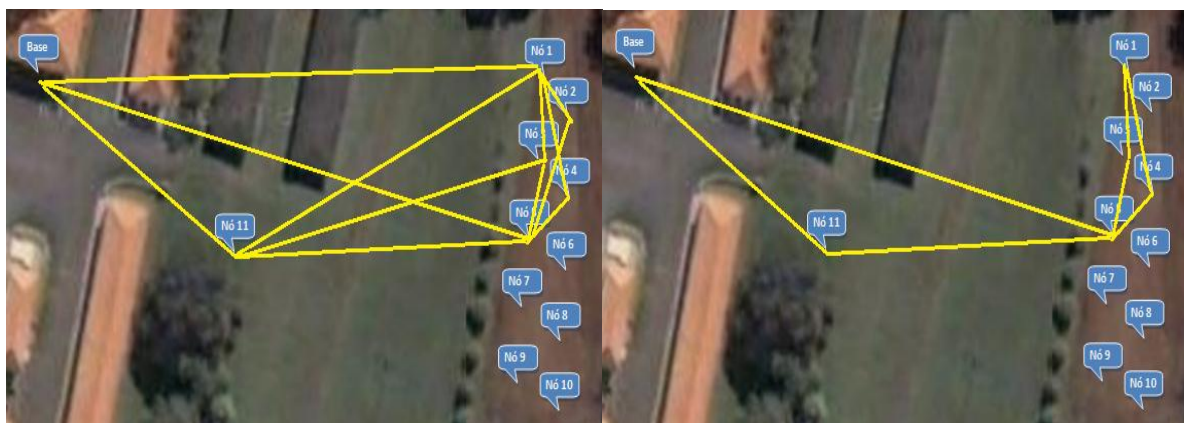
## RESULTADOS

**Comunicação** - Cada nó enviou dados referentes aos sensores acoplados a este. Na primeira hora os dados são enviados a cada 25 s, nas demais horas a cada 15 min. O tempo de teste foi de 1896 horas consecutivas. A Tabela 3 mostra a porcentagem de sucesso de um dado gerado por um sensor em um determinado nó alcançar o “gateway”, sem repetição e com uma repetição.

TABELA 3 Porcentagem de sucesso no envio de um dado de um sensor até o gateway.

No. do Nó	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 tentativa	69,79%	70,18%	70,25%	70,21%	69,38%	70,40%	70,51%	70,86%	71,21%	69,58%
2 tentativas	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

As Figuras 7 e 8 representam as rotas estabelecidas pela rede para que o nó 1 envie dados ao “gateway” (base), no início dos testes e no final dos testes respectivamente.



FIGURAS 7 e 8 – Rotas dos dados do nó 1 no início dos testes (à esquerda) e no final dos testes (à direita).

**Tensão das Baterias** - Todos os nós apresentaram variação da tensão das baterias semelhante à do gráfico da Figura 9, relativo ao nó 1:

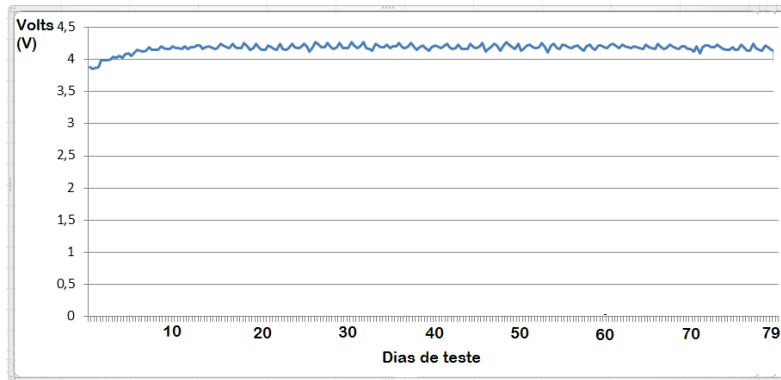


FIGURA 9 – Variação da Tensão da bateria do nó 1, durante os 79 dias de teste.

**Relatórios de atividades** - Os relatórios de atividades mostraram poucos problemas durante o período de testes, os quais foram superados pela equipe responsável pelo experimento, sendo aqui destacados:

- Falha na inicialização de um dos *gateways*. Problema resolvido com apoio do fornecedor do produto que indicou a troca do seu software interno.
- Um dos nós não fora inicializado durante a instalação. Problema percebido no primeiro dia de monitoração em São Paulo e resolvido com o auxílio de um dos técnicos do laboratório da ESALQ.

**Relatório Operacional** - Durante todo o teste nenhum dispositivo deixou de funcionar e executar as funções para as quais foi configurado, exceto o pluviômetro da estação meteorológica, o que foi verificado pela monitoração feita a partir do laboratório, em São Paulo, no dia 26/12. O problema foi causado pelo entupimento do pluviômetro por “pelos” típicos da folhagem do milho que se acumularam dentro do sensor, impedindo a passagem da água da chuva.

## DISCUSSÃO:

Os resultados obtidos e resumidos na Tabela 3 mostram que a rede atingiu o seu objetivo, uma vez que o maior intervalo de tempo para se obter um valor confiável foi de 30 min. (2 tentativas), também pode-se observar que foi possível a troca de dados em distâncias de até 177 m (maior distância entre dois nós testada), o que resulta em uma densidade de 0,56 nós por ha. Trabalhos futuros que confrontem os benefícios que podem ser obtidos com o sensoriamento em tempo real, com o custo de uma RSSF com esta densidade devem ser realizados, para mostrar a viabilidade econômica no Brasil desta tecnologia.

Apesar de existir uma barreira de árvores nos limites da área em teste, a comunicação dos sensores com o nó base (*gateway*) não impossibilitou a operação da rede, sendo que durante todo o experimento todos os dados gerados pelos sensores foram recebidos e armazenados. Pelas Figuras 7 e 8 percebe-se que algumas rotas foram eliminadas nos últimos dias do experimento. Isto ocorreu porque o milho atingiu alturas superiores às previstas (2,7 m). Isto porém não impossibilitou a comunicação de todos os nós sensores com o nó base.

O sistema de recarregamento automático das baterias por células solares mostrou-se eficiente (Figura 9). Pelo gráfico pode-se observar que as baterias durante o dia, não só recuperavam totalmente a carga perdida no período noturno, como recarregaram as baterias que estavam com pouca carga no início do experimento. O sistema não apresentou falhas durante o período de teste. Trabalhos específicos precisam ser realizados em culturas de maiores duração.

Analisando os relatórios das tarefas, a única atividade que demandou mão de obra especializada foi a conexão do *gateway* com a Internet, ainda que seja uma atividade simples, esta atividade é a única que não poderia ser realizada com facilidade por um agricultor típico no Brasil.

Outro problema encontrado foi o posicionamento da estação meteorológica no meio da plantação. Nos últimos dias o milho cobriu a pequena estação, fazendo sombra nos sensores de radiação solar e entupindo o pluviômetro com “pelos” típicos da folhagem do milho. Ambos dos sensores passaram a enviar falsos valores.

## CONCLUSÕES:

Os resultados obtidos mostram um desempenho satisfatório da rede durante todo o período de testes. Em algumas situações o alcance dos dispositivos superou as expectativas: frequentemente os nós mais distantes se comunicavam diretamente com o nó receptor, sem necessitar do nó repetidor, mesmo sem visada; apesar de o milho cobrir por completo as antenas dos nós sensores, estes continuaram operacionais, sem prejuízo para a comunicação. Os dispositivos da RSSF operaram por quase três meses durante toda a fase de teste, sem apresentar falhas. Segundo o relatório de atividades, a rede foi instalada com muita facilidade, não requerendo operação que demandasse o auxílio de especialistas. A monitoração *on-line* (única operação que exigiu especialista) mostrou-se útil, permitindo que a equipe em São Paulo pudesse acompanhar o desempenho durante todos os dias, inclusive com a recuperação dos dados armazenados. A RSSF da linha eKo mostrou-se adequada a aplicação em todos os aspectos avaliados para monitoração em tempo real, porém o trabalho precisa ser complementado com estudos econômicos que confrontem os custos da RSSF com os benefícios da monitoração em tempo real por ela oferecidos.

**AGRADECIMENTOS:** Os autores agradecem a Finep que suportou as atividades desse trabalho (contrato 01.08.0566.00).

## REFERÊNCIAS

BENAVENTE, J.C.C.; CUGNASCA, C.E.; SANTOS, H.P. Um estudo da variabilidade microclimática em um vinhedo cultivado sob cobertura plástica mediante o uso de uma rede de sensores sem fio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO - CONBAP 2010, **Anais ...** 2010, Ribeirão Preto, 2010. v.1. p.1-9.

GOMES, N.M.; SILVA, A.M.; MELLO, C.R. & FARIA, M.A. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira Ci. Solo**, 31: p.435-443, 2007.

GONÇALVES, AC.A.; FOLEGATTI, M.V.; SILVA, A.P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.23, p.155-164, 1999

KLEIN, V.A. e CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira Ci. Solo**, 31: p.221-227, 2007.

MEMSIC. **Site da Empresa**. <http://www.memsic.com/>. Acesso em 17 de maio de 2012.

MOLIN, J.P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, v.22, p.83-92, 2002.

MOLIN, J.P. Geração e interpretação de mapas de produtividade para agricultura de precisão. In: BOREM, A.; GIÚDICE M.P.; QUEIROZ, D.M.; MANTOVANI, E.C.; FERREIRA, L.R.; VALLE, F.X.R.; GOMIDE, R.L. **Agricultura de Precisão**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000. p.237-258.

MENEZES G.; MATEUS G. R.; NAKAMURA F. G.; Uma abordagem lagrangeana para os problemas de densidade, cobertura e conectividade em uma rede de sensores sem fio. In: WORKSHOP DE COMUNICAÇÃO SEM FIO E COMPUTAÇÃO MÓVEL, 6. **Anais ...** 2004, Fortaleza. 2004, vol.1, p. 192-201.

SANTOS, E.A. Duração do Período de molhamento foliar: medida com sensores eletrônicos, variabilidade espacial em culturas e estimativas com modelos empíricos. **Dissertação** de Mestrado apresentada a Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz ESALQ-USP, (2006)

SIQUEIRA, I. G.; FIGUEIREDO, C. M. S.; LOUREIRO, A. A. F.; NOGUEIRA, J. M. S. E RUIZ, L. B. An integrated approach for density control and routing in wireless sensor networks. In: IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'06), 20. **Proceedings ...** 2006, Rhodes Island, Greece, 2006.