Autômato Adaptativo para definição autônoma do intervalo de amostragem de dados em Rede de Sensores Sem Fio

I. M. Santos e C. E. Cugnasca

Resumo — Rede de Sensores Sem Fio é um tipo especial de rede ad hoc, formada por vários sensores capazes de coletar e processar informações do ambiente em que estão distribuídos. Essa tecnologia tem sido empregada em diversos tipos de problemas, com destaque para aplicações de monitoramento. Um dos principais desafios na utilização das redes de sensores está relacionado com o consumo de energia dos sensores. Este trabalho apresenta um Autômato Adaptativo a ser empregado nas Redes de Sensores Sem Fio para determinar dinamicamente o intervalo de amostragem dos nós sensores durante a coleta de dados. Quando as informações coletadas pelo sensor seguir um comportamento com baixa variação nos dados, o autômato irá determinar intervalos de amostragem mais longos, enquanto que a ocorrência de eventos com alta variação nos dados determina intervalos de amostragem mais curtos. Dessa forma, há economia de energia, pois o nó sensor irá coletar e transmitir menor número de dados enquanto o ambiente monitorado apresenta um comportamento esperado, sem que isso represente perda de eficiência, pois o sistema se adapta a situações que demandam maior atenção, reduzindo o intervalo entre as amostras de dados. A formalização dessa estratégia é feita por meio de um Autômato Adaptativo e sua Tabela de Decisão Adaptativa.

Palavras-chave – redes de sensores sem fio, conservação de energia, autômato adaptativo.

I. Introdução

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são um dos primeiros exemplos de computação pervasiva, é uma tecnologia emergente que promete revolucionar e ampliar o potencial de aplicações de monitoramento, instrumentação e controle. Uma RSSF é um tipo especial de rede ad hoc, formada por centenas ou milhares de sensores, densamente distribuídos, com comunicação sem fio e capazes de coletar e processar informações do ambiente em que estão distribuídos [1, 2, 3].

Uma típica RSSF possui pouca ou nenhuma infra-estrutura, consiste de um grande número de sensores que trabalham em conjunto monitorando um ambiente ou região para obter informações. As RSSF têm características e propriedades específicas, que as difere das redes de computadores tradicionais, principalmente quanto aos recursos disponíveis [4]. São aspectos das RSSF a limitação quanto a fonte de energia, processamento, alcance de comunicação, banda de transferência e armazenamento de dados. Um dos principais desafios na aplicação das RSSF é a limitação de energia dos nós sensores, de modo que o uso racional e otimizado desse recurso é fundamental, pois determina o tempo de vida útil da rede. Na rede de sensores, cada nó é autônomo e responsável por utilizar de maneira eficiente sua carga de energia disponível.

As RSSF podem ser aplicadas em diversas áreas, como por exemplo em sistemas de monitoramento ambiental, militar, na agropecuária, no monitoramento médico, em sistemas de suporte pessoal, mobilidade, segurança, controle logístico, processos industriais, sistemas embarcados, entre outros [1, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Em razão da autonomia dos sensores, do dinamismo da topologia das RSSF e do vasto conjunto de aplicações, com diferentes contextos e objetivos, não há um conjunto de protocolos e algoritmos computacionais amplamente eficiente para qualquer contexto de aplicação das RSSF. Dessa forma, diversos sistemas têm sido desenvolvidos com foco em demandas específicas de certas aplicações. Nesse sentido, pode-se destacar a utilização das RSSF no monitoramento agrícola, que consiste em observar continuamente uma área de plantio, com o objetivo de avaliar as mudanças ocorridas nesse ambiente. Geralmente, o foco desse monitoramento são as condições climáticas (temperatura, umidade, outros). Esse monitoramento é importante, pois fornece informações determinantes no processo de tomada de decisão do agricultor, sendo fundamental em procedimentos de prevenção de ataque de pragas e doenças e em procedimentos de manejo, como correção do solo e aplicação de insumos.

Em aplicações nas quais os dados se modificam lentamente, como no contexto da aplicação em agricultura de precisão, pode-se esperar que os nós sensores utilizem intervalos de amostragem longos em situações de normalidade (com baixa variação) e adotem intervalos de amostragem curtos, maior frequência, caso sejam observados dados que representam fenômenos que merecem maior atenção (situações especiais, como frio ou calor excessivo). A utilização dessa estratégia pode proporcionar maior economia de energia na RSSF, já que o número de medições de dados e o envio de pacotes pelos nós sensores da rede é reduzido. Esse procedimento não deve, no entanto, significar perda de eficiência da RSSF no processo de monitoramento do ambiente.

Em sua pesquisa, [13] empregou uma estratégia que considerava dois intervalos de amostragem distintos, um curto

e outro longo. Em sua proposta foi determinada uma faixa limite de valor para a propriedade monitorada. Sempre que o dado registrado pela rede de sensores ultrapassasse esse limite o sistema passava a considerar o segundo valor de intervalo disponível. Já [14] apresentou um Autômato Adaptativo (AA) [15] que permite a RSSF definir dinamicamente o intervalo de amostragem a ser adotado. Em sua proposta foi considerado um intervalo de normalidade para a propriedade monitorada, sempre que o sensor registrava um dado com valor fora do intervalo de normalidade, o sistema passava a reduzir gradativamente o intervalo de amostragem por meio do AA. Entretanto, nessa proposta ocorrem algumas limitações, o sistema não é totalmente autônomo, pois depende da definição prévia do conceito de "intervalo de normalidade", do número de intervalos de amostragem, bem como seus respectivos valores de tempo de espera. Em razão dessa rigidez, caso o sistema seja mal configurado, o objetivo de economizar energia pode ser atingido parcialmente ou de maneira insatisfatória.

Este trabalho apresenta um AA para o ajuste dinâmico dos intervalos de amostragem dos nós sensores da RSSF, independente de definições prévias de intervalos ou faixas de normalidades.

Este trabalho apresenta na Seção II uma breve contextualização do monitoramento agrícola, as potencialidades de se empregar RSSF nesse contexto e descreve a estratégia adaptativa que será utilizada pelo AA. A Seção III discute e descreve o AA para o problema de definição autônoma do intervalo de amostragem em RSSF, além de apresentar a Tabela de Decisão Adaptativa e sua verificação. Finalmente na Seção IV são feitas as considerações finais do trabalho.

II. RSSF NO MONITORAMENTO AGRÍCOLA.

A agricultura de precisão consiste em dividir o terreno da área cultivada em parcelas e tratá-lo de modo diferenciado (específico), buscando atender as necessidades de cada parcela. Dessa forma, espera-se o aumento da produção, menor custo e menor impacto no meio ambiente [16]. A aplicação das RSSF na agricultura de precisão é uma alternativa promissora, possibilitando um melhor monitoramento da cultura e das propriedades do ambiente de cultivo [12].

No monitoramento agrícola, geralmente os dados (fenômenos monitorados) variam lentamente. Assim, uma RSSF não precisa monitorar o ambiente com uma alta frequência de amostragem de dados, pois isso representa desperdício de energia.

Uma possível estratégia é considerar um intervalo de valores como normais (faixa de normalidade) e então fazer com que a rede de sensores adote intervalos com tempos longos enquanto registrar dados pertencentes a este intervalo, conforme propõe [14]. Entretanto, nem sempre é possível definir um intervalo adequado, além do fato que este intervalo pode ser dinâmico durante o monitoramento. Como por exemplo, diferentes momentos em um dia ou estações climáticas no ano. Dessa forma, é coerente considerar o parâmetro do intervalo de amostragem mínimo e máximo, e permitir que cada nó sensor da rede seja autônomo em decidir quando e quanto alterar o seu intervalo de amostragem. Assim, espera-se que o sensor seja capaz de aumentar a frequência das amostras quando ocorrerem variações consistentes nos dados que estão sendo monitorados e reduzir essa frequência caso contrário, economizando energia.

A estratégia descrita é representada na Figura 1 por meio de um gráfico. O eixo *x* corresponde ao tempo, enquanto que o eixo *y* ao valor do dado registrado. Os pontos marcados no gráfico correspondem ao instante e valor registrado por um sensor da rede. A linha representa o comportamento da grandeza monitorada pela RSSF. Nota-se que enquanto ocorre uma baixa variação entre os dados registrados pelo sensor há um intervalo maior entre uma amostra e outra. Enquanto que, quando ocorre uma alta variação nos dados obtidos, aumenta-se a frequência das amostras.

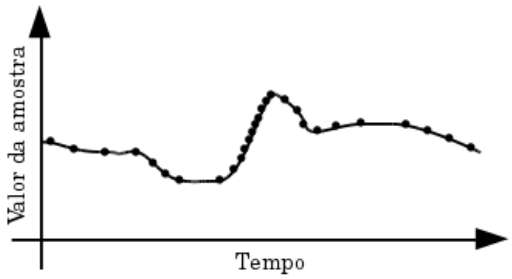

Fig. 1. Exemplo de uma sequência de medidas realizadas por um nó sensor ao longo do tempo. Quando há variação acentuada nos dados registrados o intervalo entre uma amostra e outra é reduzido.

Com essa estratégia, espera-se economizar energia enquanto o ambiente apresenta uma situação de baixa variação nas propriedades monitoradas e garantir a eficiência do monitoramento em situações de variação acentuada.

III. DESCRIÇÃO DO MODELO ADAPTATIVO

Um AA é uma máquina de estados a qual são impostas sucessivas alterações, resultantes da aplicação de ações adaptativas associadas às regras de transições executadas pelo autômato [15]. Estados e transições podem ser eliminados ou incorporados ao autômato em decorrência de cada um dos passos executados durante a análise da entrada. De modo geral, pode-se dizer que um AA é constituído por um dispositivo convencional (não-adaptativo) e um conjunto de mecanismos adaptativos responsáveis pela automodificação do sistema.

Para determinar a mudança nos intervalos de amostragem nos nós sensores da RSSF, é proposto um AA que assume as seguintes considerações:

- Cada estado do AA corresponde a um intervalo de amostragem para o nó sensor.
- O estado inicial corresponde ao intervalo de amostragem mais curto.
- Se o valor da amostra coletada pelo nó sensor

mantém-se estável, ou com baixa variação, então o AA altera seu estado por meio de uma função adaptativa, transitando para um estado que corresponde a um intervalo de amostragem maior.

- Se o valor da amostra coletada pelo nó sensor varia acentuadamente (acima de um limite), então o AA retorna para o estado inicial, para o menor intervalo de amostragem disponível.

Será considerado um parâmetro que corresponde à variação máxima que a grandeza monitorada pelo sensor pode sofrer. Neste trabalho ela será representada por *w*. Se a variação entre as amostras for superior a *w*, então o estado corrente do AA volta a ser o estado inicial. Caso contrário o AA transita para outro estado com intervalo de amostragem maior, que será definido dinamicamente. É importante destacar que um limite máximo para o valor do intervalo de amostragem deve ser determinado, para evitar um possível intervalo excessivamente longo, causando inconsistência no procedimento de registro dos dados pelo sensor.

O AA será executado em cada nó sensor da rede, de modo que cada nó é autônomo na decisão do seu intervalo de amostragem, em função dos fenômenos que estão sendo monitorados por ele.

A Figura 2 apresenta o AA proposto. No autômato, o símbolo = corresponde ao conjunto de amostras com baixa variação (inferior ao limite *w*), enquanto que o símbolo + corresponde ao conjunto de amostras com alta variação (superior ao limite *w*). Nota-se que quando ocorre uma leitura de um dado com baixa variação é executada uma ação adaptativa "pré". Essa ação irá criar um novo estado no autômato, que irá corresponder a um intervalo de amostragem maior que o estado atual e então o autômato irá transitar para esse novo estado.

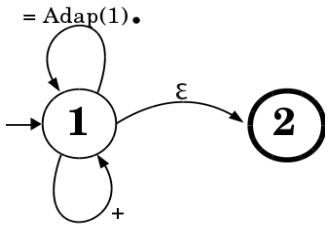

Fig. 2. Autômato Adaptativo para determinação autônoma do intervalo de amostragem em RSSF.

O novo valor para o intervalo de amostragem, a ser definido para o novo estado do AA, será inversamente proporcional à variação do dado. Portanto, quanto menor a variação, maior será o incremento no intervalo. Diferentes funções podem ser adotadas nesse processo, aqui será proposto a Equação 1 para determinação do valor do intervalo de amostragem:

$$t' = t + s \times (1 - k/w) \times z \quad (1)$$

onde:

t é o valor do intervalo de amostragem do estado atual em minutos;

s corresponde ao valor do intervalo de amostragem mínimo (em minutos);

k é a variação entre os dados registrados pelo sensor;

w corresponde à variação máxima permitida;

z é um fator multiplicador adimensional, que permite aumentar ou reduzir a grandeza da variação do intervalo.

A Figura 3 ilustra um exemplo de execução do AA proposto. Para melhor exemplificar o funcionamento do autômato, considere uma suposta aplicação em que a RSSF está monitorando a temperatura ambiente de uma cultura. Considere os seguintes parâmetros para o exemplo: o intervalo de amostragem inicial e mínimo (*s*) é de 5 minutos, a variação máxima (*w*) é de 0,5 ºC e o fator multiplicador (*z*) é 1. Na Figura 3(a) o AA se encontra em seu estado inicial, portanto o estado 1 do autômato corresponde ao intervalo de amostragem de 5 minutos. Supondo um novo registro do sensor, onde a variação entre os dados tenha sido de 0,1ºC, portanto menor que *w*, deverá ser executada uma ação adaptativa. Nesta ação será criado um novo estado no autômato (#1) que poderá ser alcançado com a variação entre os dados registrados (*k*), conforme demonstra a Figura 3(b). Considerando os dados do exemplo e a Equação 1, o valor do intervalo de amostragem do estado #1, será de 9 minutos. O novo estado criado também possui uma ação adaptativa. Ao imaginar um novo registro do sensor, supondo agora uma variação de 0,4 ºC, uma nova ação adaptativa é executada, criando um novo estado no autômato (##1), conforme ilustra a Figura 3(c). Considerando a variação de 0,4 ºC, o valor do intervalo do estado #1 (9 minutos) e os parâmetros iniciais, o novo estado do autômato (##1) terá o intervalo de amostragem igual a 10 minutos (incremento em 1 minuto).

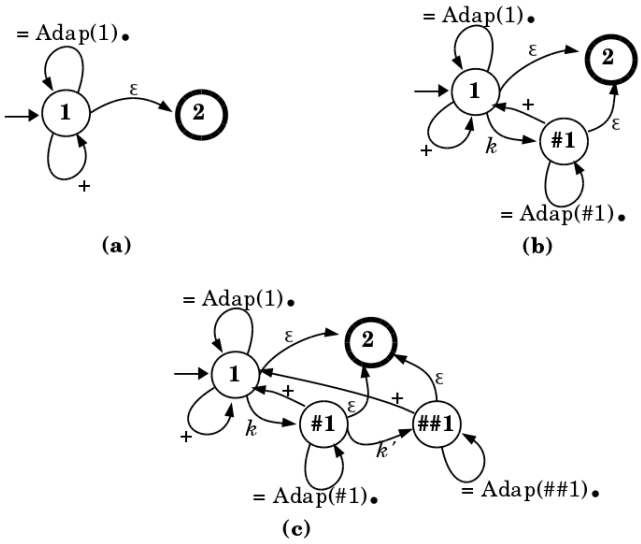

Fig. 3. Exemplo de execução do Autômato Adaptativo. Em (a) o autômato está em seu estado inicial. Em (b) ocorreu uma ação adaptativa no estado 1. Em (c) ocorreu uma nova ação adaptativa, agora no estado #1.

Em qualquer estado do AA se for registrado um novo dado cujo a variação seja superior a *w*, o autômato retorna para seu estado inicial, que corresponde ao menor intervalo de amostragem.

A. *Tabela de Decisão Adaptativa*

Durante a execução de uma ação adaptativa, o AA sofre alguma mudança em sua configuração (eliminando, acrescentando, ou simplesmente modificando estados e transições). Isto faz com que uma nova máquina de estados ocupe o lugar da anterior, caracterizando a execução de um passo adicional [15].

Uma função adaptativa é formada por um conjunto de ações adaptativas, que podem ser executadas em sequência na ocasião da aplicação da função. Há três ações elementares que podem ser usadas para compor as ações adaptativas, que permitem: consultar (representado por "?"), eliminar (representado por "-") e adicionar (representado por "+") transições no autômato. Uma Tabela de Decisão Adaptativa (TDA) permite representar as regras de uma função adaptativa e consequentemente representar toda a lógica do AA.

Considerando o AA apresentado no diagrama da Figura 2, para o problema de determinação autônoma do intervalo de amostragem em uma RSSF, a Tabela I apresenta a respectiva TDA, que descreve as ações adaptativas. Nesta TDA ocorrem somente ações adaptativas de adição (+). Após a aplicação da função adaptativa, é importante lembrar que a variação *k* obtida pelo nó sensor deve ser retirada do conjunto de entradas do estado atual, conjunto representado por "=". De modo a evitar ambiguidade no autômato.

TABELA I
Tabela de Decisão Adaptativa referente ao AA para determinação autônoma do intervalo de amostragem em RSSF

Label	Tag	Condições		Ações			Funções Adaptativas	Parâmetros	Geradores
		Estado =	Entrada =	Estado ↓	Consome	Aceita ↓	R1	P1	G1
1	S			1	√				
2	R	1	+	1	√				
3	R	1				x			
4	R	1	ε	2					
5	R	1	+	1			√	1	
6	R								
7	R	2				√			
8	E								
	H						√	√	√
	+	P1	=	G1	√				
	+	G1	+	P1	√				
	+	G1	=	G1			√	G1	
	+	G1	ε	2					

B. *Validação da TDA*

Visando verificar a TDA apresentada na Tabela I, foi utilizado o *software* AdapTools [17], que permite representar, implementar e simular o comportamento de um AA a partir da sua TDA. O sistema inclui ainda recursos de depuração, visualização de variáveis e representação gráfica.

As simulações executadas demonstraram o comportamento esperado do AA, portanto, a correta construção da TDA. A Figura 4 corresponde à representação da TDA no *software* AdapTools e a Figura 5 demonstra a representação gráfica do AA em um determinado instante da simulação.

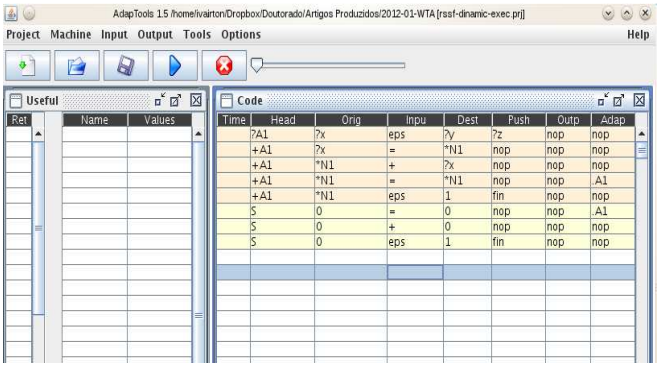

Fig. 4. Parte da tela principal do *software* AdapTools com o AA proposto representado.

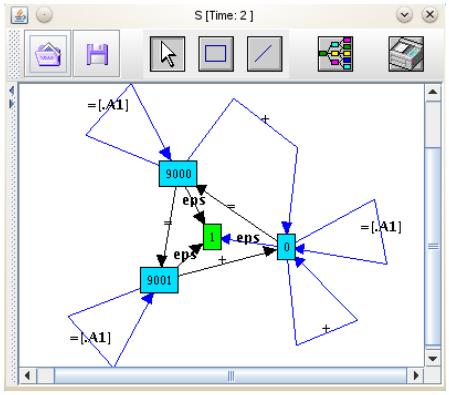

Fig. 5. Tela com a representação gráfica do AA durante a simulação no *software* AdapTools.

IV. Conclusões

As RSSF têm apresentado potencial de aplicação em diversas áreas. Um dos seus principais desafios é a economia de energia, sem que isso signifique perda de eficiência na utilização da rede de sensores. Para aplicações que não exigem um monitoramento com alta frequência de coleta de dados, como na agricultura de precisão, pode-se adotar uma estratégia em que o intervalo entre as amostras dos dados seja longo, enquanto as informações obtidas pelos sensores apresentarem baixa variação. Ao ocorrer variações acima de um limite pré definido, a rede de sensores se ajusta, de maneira autônoma, buscando monitorar o evento com maior frequência, reduzindo o intervalo entre as amostras de dados. Essa estratégia representa economia de energia nos nós sensores e significa maior tempo de vida útil da RSSF.

Este trabalho apresentou um AA capaz de modificar, de maneira autônoma, a configuração dos intervalos de amostragem dos nós sensores em uma RSSF. Esse processo

ocorre sem depender de definições prévias de intervalos de normalidade, ou quantidade de intervalos de amostragem e seus valores. O autômato proposto é capaz de definir dinamicamente a quantidade de intervalos de amostragem a serem utilizados pela rede de sensores e os seus respectivos valores. Essa autonomia da rede pode representar melhor desempenho da RSSF em diferentes condições, ampliando o contexto de aplicação. Sendo desnecessária a reconfiguração da RSSF.

Nos trabalhos futuros, a eficiência e a economia de energia promovida pelo AA devem ser exploradas, verificadas e mensuradas em um ambiente de simulação computacional. Pretende-se verificar também o comportamento do AA em situações onde os nós sensores registram baixas variações por longos períodos, seguido de variações bruscas. Nesse contexto o registro de dados pode ficar comprometido. É importante que o AA seja capaz de prever tal situação e evitá-la, determinando um limite máximo adequado para o intervalo de amostragem. Além disso, espera-se elaborar uma métrica que qualifique os valores gerados para os intervalos de amostragem, de modo que o AA possa escolher por intervalos mais apropriados e "aprender" durante sua execução, segundo os padrões encontrados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso – FAPEMAT – pelo apoio a este trabalho via projeto de pesquisa Nº 465450/2009 e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

REFERÊNCIAS

[1] I. F. AKYILDIZ, W. SU, Y. SANKARASUBRAMANIAM, E. CAYIRCI. "Wireless sensor networks: a survey", Computer networks. 38, p.393-422, 2002.

[2] M. TUBAISHAT, S. MADRIA. "Sensor networks: an overview". IEEE Potentials. 22 (2), 2003.

[3] P. GAJBHIYE, A. MAHAJAN. "A survey of architecture and node deployment in Wireless Sensor Network." In: Applications of Digital Information and Web Technologies, ICADIWT, p.426-430, 2008.

[4] T. CAMP, J. BOLENG, V. DAVIES. A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research. Wireless Communications e Mobile Computing (WCMC), v. 2, p. 483-502, 2002.

[5] D. ESTRIN, L. GIROD, G. POTTIE, M. SRIVASTAVA. "Instrumenting the world with wireless sensor networks." In: International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Salt Lake City, USA, 2001.

[6] G. J. POTTIE, W. J. KAISER. "Wireless integrated network sensors." Communications of the ACM 43, p.51–58, 2000.

[7] D. ESTRIN, R. GOVINDAN, J. HEIDEMANN, S. KUMAR. "Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks." In: Proceedings of the Fifth Annual International Conference on Mobile Computing and Networks (MobiCom'99), Seattle, Washington, USA, ACM Press, 1999.

[8] J. YICK, B. MUKHERJEE, D. GHOSAL. Wireless sensor network survey. Computer Networks, v. 52, n. 12, p. 2292-2330, 2008.

[9] K. SOHRABY, D. MINOLI, T. ZNATI. Wireless Sensor Networks – Technology, Protocols, and Applications. Wiley, 2007.

[10] F. ZHAO, L. GUIBAS, Wireless Sensor Networks – An information processing approach. Elsevier, 2004.

[11] P. SIKKA, Wireless adhoc sensor and actuator networks on the farm. Nashville-USA: ACM. 2006. p. 492-499.

[12] I. M. SANTOS, M. A. DOTA, C. E. CUGNASCA. "Visão Geral da Aplicabilidade de Redes de Sensores Sem Fio no Monitoramento Agrícola no estado de Mato Grosso". Anais do Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão – ConBAP 2010. Ribeirão Preto/SP, Setembro de 2010.

[13] J. C. C. BENAVENTE, C. E. CUGNASCA, H. P. SANTOS. "Um Estudo da Variabilidade Microclimática em um Vinhedo Cultivado sob Cobertura Plástica Mediante o uso de uma Rede de Sensores Sem Fio". Anais do Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão- ConBAP 2010. Ribeirão Preto – SP. Setembro de 2010.

[14] I. M. SANTOS, M. A. DOTA, C. E. CUGNASCA. Modelagem de Autômato Adaptativo para a definição dinâmica do intervalo de amostragem em Rede de Sensores Sem Fio. In: V Workshop de Tecnologia Adaptativa, 2011, São Paulo. 2011.

[15] J. J. NETO. "Adaptive rule-driven devices – general formulation and case study" CIAA'01: Revised Papers from the 6th International Conference on Implementation and Application of Automata, London, UK: Springer-Verlag, 2002, pp. 234-250, ISBN 3-540-00400-9.

[16] J. P. MOLIN, "Tendências da agricultura de precisão no Brasil". In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 2004. Anais do Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão - ConBAP 2004. Piracicaba, p. 1-10, 2004.

[17] L. D. JESUS, D. G. D. SANTOS, A. A. D. CASTRO, H. PISTORI. WTA 2007 - II.2 - "AdapTools 2.0: Implementation and Utilization Aspects." IEEE Latin Am. Trans. 5, 527-532 (2007).

Ivairton Monteiro Santos é graduado em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Mato Grosso (2002) e mestre em Ciência da Computação pela Universidade Federal Fluminense (2005). Atualmente é aluno de doutorado da Escola Politécnica da USP, sob a orientação do Prof. Dr. Carlos Eduardo Cugnasca. É membro do Laboratório de Automação Agrícola da Escola Politécnica da USP e professor da Universidade Federal de Mato Grosso, no Campus Universitário do Araguaia. Tem experiência na área de Ciência da Computação e seus interesses em pesquisa concentram-se em Redes de Sensores Sem Fio e otimização combinatória.

Carlos Eduardo Cugnasca é graduado em Engenharia de Eletricidade (1980), mestre em Engenharia Elétrica (1988) e doutor em Engenharia Elétrica (1993). É livre-docente (2002) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Atualmente, é professor associado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e pesquisador do LAA - Laboratório de Automação Agrícola do PCS - Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais da EPUSP. Tem experiência na área de Supervisão e Controle de Processos e Instrumentação, aplicadas a processos agrícolas e Agricultura de Precisão, atuando principalmente nos seguintes temas: instrumentação inteligente, sistemas embarcados em máquinas agrícolas, monitoração e controle de ambientes protegidos, redes de controle baseados nos padrões CAN, ISO11783 e LonWorks, Redes de Sensores Sem Fio e computação pervasiva. É editor da Revista Brasileira de Agroinformática (RBIAgro).