

# Modelagem de Autômato Adaptativo para a definição dinâmica do intervalo de amostragem em Rede de Sensores Sem Fio

I. M. Santos, M. A. Dota e C. E. Cugnasca

**Resumo** — As Redes de Sensores Sem Fio têm potencial para diferentes aplicações, dentre elas destaca-se o monitoramento de ambientes. Este trabalho tem como objetivo apresentar a formalização de uma técnica para minimizar o gasto de energia dos nós sensores em uma Rede de Sensores Sem Fio durante a coleta de dados. Essa técnica considera a utilização de Autômatos Adaptativos e a possibilidade de a rede de sensores variar dinamicamente o intervalo (tempo) entre uma amostragem e outra. Dessa forma, espera-se que a rede de sensores utilize automaticamente intervalos longos enquanto estiver coletando informações dentro de um limite de valores considerado normal ou aceitável. Entretanto, quando os nós coletarem dados considerados fora da normalidade, espera-se que os intervalos de amostragem sejam reduzidos, de modo que a rede de sensores monitore o fenômeno com mais detalhe. Com a aplicação dessa estratégia ocorre uma economia no consumo de energia nos nós sensores da rede, sem que a rede perca eficiência no monitoramento dos fenômenos. A formalização da técnica é feita a partir da modelagem de um Autômato Adaptativo que possui ações adaptativas para adequar dinamicamente o intervalo de amostragem dos nós da rede de sensores.

**Palavras-chave** – Redes de Sensores Sem Fio, Conservação de Energia, Autômato Adaptativo.

## III. INTRODUÇÃO

Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) é um tipo especial de rede *ad hoc* com capacidade de coletar e processar informações de maneira autônoma, estando esses sensores distribuídos em uma determinada área [1, 2, 3]. Esse tipo de rede pode ser utilizado em um grande conjunto de aplicações, como por exemplo, no monitoramento ambiental, na agricultura de precisão, nos processos industriais, nos sistemas embarcados em automóveis e aeronaves, nos sistemas de segurança, entre outros [4, 5, 6].

Dentre as diversas aplicações, pode-se destacar o monitoramento agrícola, que envolve o acompanhamento e a observação contínua de uma área de plantio, com o objetivo de avaliar as mudanças ocorridas nesse ambiente. Esse monitoramento é importante no processo de tomada de decisão e auxilia na solução de problemas, como ataques de pragas e doenças, correção do solo, aplicação de insumos e mudanças climáticas que podem prejudicar a produtividade da plantação, entre outros aspectos. Entretanto, esse tipo de aplicação não necessita de um monitoramento com alta frequência de coleta de dados, pois as condições ambientais se modificam lentamente.

Um dos principais desafios na aplicação das RSSF é a economia de energia dos nós sensores, de modo a propiciar um maior tempo de vida útil da rede. Na prática, recarregar manualmente as baterias dos nós da rede é inconveniente, sendo cada nó responsável por utilizar de maneira eficiente sua carga de energia disponível.

Este trabalho apresenta uma proposta para o ajuste dinâmico dos intervalos entre amostragens efetuadas pelos nós da rede de sensores. Em aplicações nas quais os dados se modificam lentamente, ou o monitoramento esteja obtendo dados dentro de um padrão de normalidade (como na agricultura de precisão), espera-se que os nós utilizem intervalos longos e passem a adotar intervalos curtos caso sejam observados dados inesperados. Com a adoção dessa estratégia, pode-se obter uma maior economia no gasto de energia, visto que o número de medições e envio de dados pelos nós da rede é reduzido, sem que isso signifique perda de eficiência no monitoramento do ambiente pela RSSF.

Para controlar a dinamicidade dos intervalos, é proposto um Autômato Adaptativo (AA) [7] que será executado em cada nó sensor, de modo que cada nó da rede será autônomo na decisão do seu intervalo de amostragem, em função dos fenômenos que estão sendo monitorados.

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

## IV. MONITORAMENTO DE AMBIENTE AGRÍCOLA COM RSSF.

A agricultura de precisão consiste em um manejo específico da área cultivada, ou seja, consiste em dividir o terreno em parcelas e tratá-lo de modo diferenciado, dependendo das necessidades de cada parcela. Dessa forma, conseguem-se vantagens econômicas, aumento de produção e benefícios para o meio ambiente [8]. 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 [9].

No monitoramento agrícola, geralmente os dados

(fenômenos monitorados) variam lentamente. Assim, uma RSSF não precisaria monitorar o ambiente constantemente em intervalos considerados curtos, pois isso representaria desperdício de energia. Outro aspecto inerente ao monitoramento agrícola é o fato de que se um fenômeno que está sendo monitorado apresenta valores dentro de um intervalo considerado normal (a faixa de normalidade é definida sob a orientação de um agrônomo e de acordo com o objetivo do monitoramento), então o sistema de monitoramento continua acompanhando o ambiente, avaliando se ocorre alguma variação que esteja fora desse intervalo de normalidade, para só então atuar no sistema. Dessa forma, pode-se considerar uma estratégia em que os nós da rede de sensores adotem intervalos longos para a coleta de dados enquanto as informações obtidas corresponderem a um padrão de normalidade. Quando ocorrer a obtenção de informações fora do padrão de normalidade, então os nós da rede de sensores deverão reduzir o intervalo de amostragem de dados, de modo a intensificar o monitoramento e registrar os dados da variação.

A Figura 1 ilustra a estratégia, sendo “a” correspondente ao valor mínimo, enquanto que “b” corresponde ao valor máximo do intervalo de valores considerados como medições normais. No decorrer do tempo (eixo x), cada instante de coleta de informação de um sensor é representado por um ponto. Observa-se que enquanto os dados obtidos estão dentro do padrão de normalidade, o intervalo entre uma amostragem e outra é maior do que quando ocorre uma medição fora da normalidade.

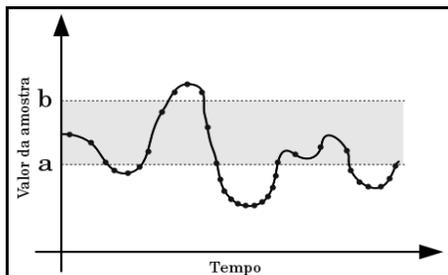


Fig. 1. Exemplo de uma sequência de medidas de um nó sensor ao longo do tempo. Quando ocorrem medidas fora da normalidade (limites a e b) o intervalo entre uma amostragem e outra é reduzido.

Com essa estratégia, espera-se economizar energia enquanto o ambiente apresentar uma situação de normalidade e garantir a eficiência do monitoramento do ambiente em situações de anormalidade [10].

## V. DESCRIÇÃO DO MODELO ADAPTATIVO

Um AA é uma máquina de estados à qual são impostas sucessivas alterações resultantes da aplicação de ações adaptativas associadas às regras de transições executadas pelo autômato [7]. Dessa maneira, estados e transições podem ser eliminados ou incorporados ao autômato em decorrência de cada um dos passos executados durante a análise da entrada. De maneira geral, pode-se dizer que o AA é formado 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, é proposto um AA que assume as seguintes considerações:

- Cada estado do AA corresponde a um intervalo de amostragem distinto para o nó sensor.
- Se o valor da amostra coletada pelo nó sensor mantém-se estável, então o AA permanece no mesmo estado.
- Se o valor da amostra coletada pelo nó sensor “piorar”, ou seja, extrapolar o padrão de normalidade, então o AA transita para um estado que corresponda a um intervalo de amostragem menor (aumento da frequência das amostras), por meio de uma função adaptativa.
- Se o valor da amostra “melhorar”, então o autômato transita para um estado que corresponde a um intervalo de amostragem maior (redução da frequência das amostras).

À medida que os dados obtidos pelos nós sensores atingem o intervalo de normalidade, o AA deve transitar de volta ao estado que corresponde ao maior intervalo, reduzindo, portanto, a frequência de coleta e envio de dados na rede.

Uma proposta de um AA é apresentada na Figura 2. Na figura o símbolo < corresponde a uma leitura de uma amostra com valor abaixo do padrão de normalidade, com variação superior a um limite mínimo, que aqui será referenciado como k%. O símbolo > representa uma leitura superior ao padrão de normalidade. Portanto, espera-se que ocorra uma ação adaptativa, gerando um novo estado no autômato que corresponda a um intervalo mais curto, para o caso de uma leitura abaixo ou superior ao padrão de normalidade.

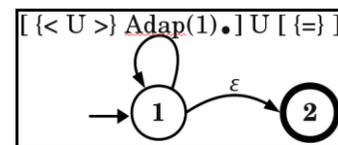


Fig. 2. Proposta de AA para determinar o intervalo de amostragem em RSSF.

A Figura 3 ilustra um possível exemplo de execução do AA proposto. Na Figura 3(a), o AA se encontra em seu estado inicial. Considerando uma suposta leitura, pelo sensor, de um valor abaixo do padrão de normalidade estabelecido, ocorre uma ação adaptativa, criando um novo estado (#1). A nova configuração do AA pode ser observada na Figura 3(b). O novo estado corresponde a um intervalo de amostragem menor do que o intervalo estabelecido pelo estado 1. Nessa nova configuração, caso o nó sensor volte a executar uma nova leitura e a obter um dado “pior”, ou seja, com um valor ainda menor (<), irá ocorrer uma nova ação adaptativa, criando um novo estado com intervalo de amostragem menor que o atual. Caso ocorra uma amostragem “melhor”, então o autômato transita para um estado com intervalo de amostragem maior (retornando no exemplo para o estado 1).

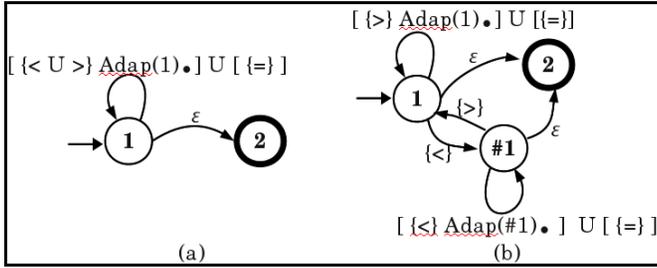


Fig. 3. Exemplo de execução da primeira ação adaptativa, considerando a leitura de um valor abaixo do limite inferior.

O comportamento do AA é análogo para o caso da leitura de dados acima do padrão de normalidade.

A. Tabela de Decisão Adaptativa

Durante a execução de uma transição 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 apareça, no lugar da anterior, caracterizando a execução de um passo adicional [7].

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 pelo “?”), eliminar (representado pelo “-”) e adicionar (representado pelo “+”) 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 de maneira intuitiva.

Considerando o AA, apresentado no diagrama da Figura 2, para o problema de determinação autônoma do intervalo de amostragem em uma RSSF, propõe-se a respectiva TDA apresentada na Tabela I.

B. Validação da TDA

Visando verificar a TDA apresentada na Tabela I, foi utilizado o *software* AdapTools [11], que permite representar, implementar e simular o comportamento de um AA a partir da sua TDA, em função de uma entrada pré-determinada. O sistema inclui recursos de depuração, visualização de variáveis, animação gráfica, bem como mecanismo para controle de projetos e execução simultânea de múltiplos dispositivos.

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 à simulação gráfica do AA em um determinado instante.

VI. CONCLUSÕES

As RSSF têm apresentado potencial de aplicação em diversas áreas. Entretanto, um dos seus principais desafios é a economia de energia sem que isso signifique perda de eficiência da rede de sensores. Para aplicações que não exigem um monitoramento com alta frequência de coleta de dados, como no monitoramento ambiental e na coleta de dados em

agricultura de precisão, pode-se considerar uma estratégia em que o intervalo entre as amostragens dos dados seja longo enquanto as informações obtidas estiverem dentro de um padrão esperado. Ao ocorrer fenômenos fora desse padrão, então a rede se ajusta, de maneira autônoma, de modo a monitorar o evento com mais acurácia. Essa estratégia representa uma importante economia de energia e significa um maior tempo de vida útil da RSSF.

TABELA I

Tabela de Decisão Adaptativa referente ao AA proposto para a determinação do intervalo de amostragem em uma RSSF

Label	Tag	Condições		Ações		Funções Adaptativas		Parâmetros				Geradores		
		Estado =	Entrada =	Estado ←	Consome	Aceita ←	R1	R2	P1	P2	P3	P4	G1	G2
1	S			1	✓									
2	R	1	=	1	✓									
3	R	1			x									
4	R	1	ε	2										
5	R	1	<	1		✓		1	1					
6	R	1	>	1			✓			1	1			
7	R	2				✓								
8	E													
	H						✓		✓	✓				✓
	-	P1	<	P2			✓		P1	P2				
	+	P1	<	G1	✓									
	+	G1	>	P1	✓									
	+	G1	=	G1	✓									
	+	G1	<	G1			✓		G1	G1				
	+	G1	ε	2										
	H							✓			✓	✓		✓
	-	P3	>	P4				✓		P3	P4			
	+	P3	>	G2	✓									
	+	G2	<	P3	✓									
	+	G2	=	G2	✓									
	+	G2	>	G2				✓			G2	G2		
	+	G2	ε	2										

Este trabalho apresentou como proposta um AA capaz de modificar, de maneira autônoma, a configuração do tempo de intervalo entre uma amostra e outra em um nó sensor em uma RSSF.

Em trabalhos futuros, a eficiência e a economia de energia promovida pelo AA devem ser verificadas em um ambiente de simulação de uma RSSF (como o NS2). Além disso, outros aspectos podem sofrer adaptabilidade, como o padrão de normalidade, que pode, por exemplo, oscilar durante um determinado período. Essas perspectivas demonstram que a tecnologia adaptativa apresenta potencial em ser aplicada à área de RSSF.

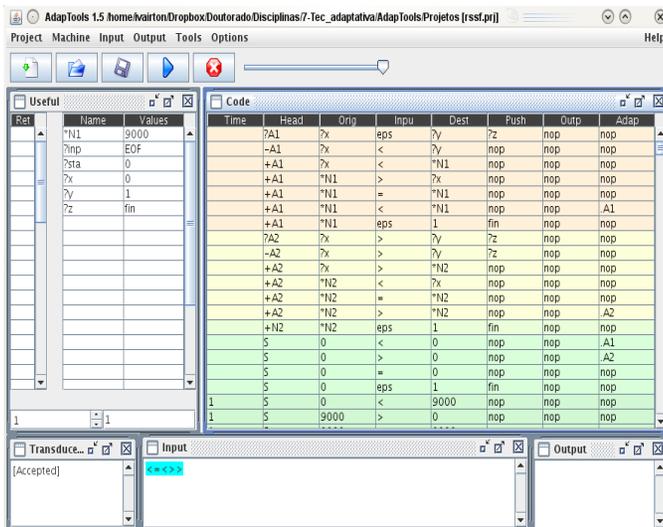


Fig. 4. Tela principal do software AdapTools com o AA proposto representado.

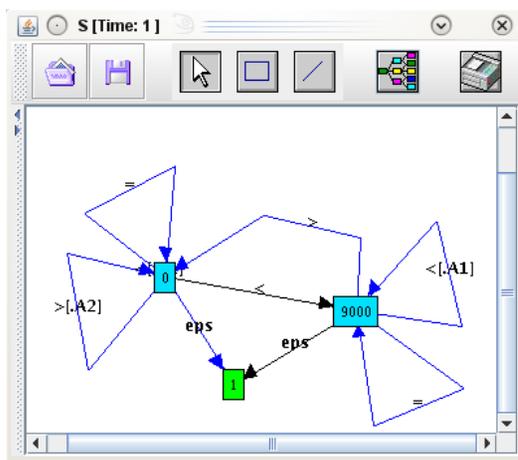


Fig. 5. Tela com a representação gráfica da simulação do AA apresentado.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso – FAPEMAT – pelo apoio a este trabalho via projetos de pesquisa N° 465450/2009 e N° 278718/2010.

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

[7] 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.

[8] 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.

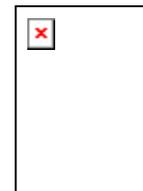
[9] I. M. SANTOS, M. A. DOTA, C. E. CUGNASCA. “Visão Geral da Aplicabilidade de Redes de Sensores Sem Fio no Monitoramento Agrícola no estado de Mato Grosso”. Anais do Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão – ConBAP 2010. Ribeirão Preto/SP, Setembro de 2010.

[10] 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.

[11] 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.



**Mara Andrea Dota** é graduada em Ciência da Computação pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (1998) e mestre em Ciências da Computação e Matemática Computacional pela Universidade de São Paulo (2001). Atualmente é aluna 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 professora da Universidade Federal de Mato Grosso no Campus Universitário de Rondonópolis/MT. Tem experiência na área de Ciência da Computação e seus interesses em pesquisa concentram-se em Redes de Sensores Sem Fio, avaliação de desempenho e Sistemas Distribuídos.



**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 (RBIaAgro).