

Comparativo entre duas estratégias adaptativas para definição dinâmica do intervalo de amostragem de dados em rede de sensores

I. M. Santos e C. E. Cugnasca

Resumo— As redes de sensores sem fio têm potencial para diferentes aplicações, dentre elas o monitoramento de ambientes para agricultura de precisão. Com objetivo de minimizar o consumo de energia dos nós da rede de sensores, são apresentadas duas estratégias baseadas em autômatos adaptativos, que determinam dinamicamente o intervalo (tempo) entre os registros e envios de dados pelos nós sensores. Essas estratégias consistem basicamente em assumir automaticamente intervalos longos enquanto os sensores estiverem coletando informações dentro de um conceito de normalidade, ou assumir intervalos curtos caso os nós sensores registrem informações consideradas atípicas ou fenômenos especiais, que demandam o registro mais detalhado de informações. Com a utilização dessa técnica há uma economia no consumo de energia nos nós sensores, sem que a rede perca eficiência no monitoramento dos fenômenos.

Palavras-chave— redes de sensores sem fio, autômato adaptativo, otimização do consumo de energia, agricultura de precisão.

I. INTRODUÇÃO

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são um dos principais exemplos de aplicação da computação pervasiva. Ela é uma tecnologia emergente, que promete revolucionar e ampliar o potencial de aplicações de monitoramento, instrumentação e controle [1].

Uma RSSF é um tipo especial de rede *ad hoc* com capacidade de coletar e processar informações de maneira autônoma [2, 3, 4]. Uma RSSF requer pouca ou nenhuma infraestrutura para a sua operação, consiste em um grande número de sensores que trabalham de forma colaborativa, monitorando um ambiente ou região para obter informações de interesse. Essas redes têm características e propriedades específicas, que as diferem das redes de computadores tradicionais, principalmente quanto aos recursos disponíveis [5]. 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.

Esse tipo de rede pode ser utilizado em muitas aplicações, como no monitoramento ambiental, agropecuária, processos industriais, sistemas embarcados em automóveis e aeronaves, sistemas de segurança, sistemas de suporte pessoal,

mobilidade, controle logístico, entre outros [2, 3, 6, 7, 8, 9].

Dentre essas diversas aplicações, o foco deste trabalho é 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.

Em aplicações nas quais os dados se modificam lentamente, como as relacionadas com a agricultura de precisão, pode-se esperar que os nós sensores utilizem intervalos dinâmicos de amostragem de dados, que podem ser longos, em situações de normalidade (com baixa variação da grandeza monitorada), e curtos, caso sejam observados dados que representam fenômenos que merecem maior atenção (situações de frio ou calor excessivo, ou variações repentinas nos dados monitorados).

A utilização de estratégias que consideram intervalos de amostragem de dados dinâmicos pode proporcionar 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. Cabe destacar que a comunicação é responsável pela maior parte do consumo de energia de um nó sensor. No entanto, esse procedimento não deve significar perda de eficiência da RSSF no processo de monitoramento do ambiente.

Este trabalho compara duas propostas adaptativas para o ajuste dinâmico do intervalo de amostragem de dados nos nós de uma RSSF. A primeira considera um “padrão de normalidade” previamente definido, impondo aos nós da rede de sensores a utilização de intervalos de amostragem mais longos para a coleta de dados quando os dados coletados estiverem dentro do padrão de normalidade e intervalos gradativamente mais curtos à medida que os dados registrados se distanciam do padrão de normalidade. A segunda proposta altera o intervalo de amostragem por meio da variação dos dados. Nesse caso, ocorrendo baixa variação nos registros dos dados monitorados, os nós da RSSF passam a considerar gradativamente intervalos mais longos, enquanto que caso ocorra alta variação dos dados, são adotados intervalos mais curtos.

Para controlar a dinamicidade dos intervalos de registro de dados em ambas as estratégias são propostos dois Autômatos Adaptativos (AA) [10]. Cada nó da RSSF irá executar seu AA

I. M. Santos, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, São Paulo, Brasil, ivairton@usp.br

C. E. Cugnasca, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, São Paulo, Brasil, carlos.cugnasca@poli.usp.br

de modo a garantir a autonomia individual na decisão do intervalo de amostragem de dados, em função dos fenômenos que estão sendo monitorados pontualmente.

Este trabalho apresenta na Seção 2 uma breve contextualização do monitoramento agrícola, as potencialidades de se utilizar RSSF nesse contexto e descreve as estratégias adaptativas que serão utilizadas pelos AA. A Seção 3 discute e apresenta os AA para o problema de definição dinâmica do intervalo de amostragem de dados em RSSF. Na Seção 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio das simulações computacionais e na Seção 5 são apresentadas as considerações finais.

II. MONITORAMENTO DE AMBIENTES AGRÍCOLAS COM RSSF

A Agricultura de Precisão (AP) consiste em um manejo específico da área cultivada, tratando de modo diferenciado as parcelas de terreno de acordo com suas necessidades. Com uso desse modelo, algumas vantagens podem ser obtidas, com destaque para o aspecto econômico, com maior produção a menor custo, além do menor impacto ambiental, ocorrendo menor desgaste ambiental com o manjo (por exemplo, com a irrigação e empobrecimento do solo) e menor índice de contaminação com defensivos agrícolas [11]. A aplicação das RSSF na AP é uma alternativa promissora, possibilitando um monitoramento da cultura e das propriedades do ambiente de cultivo mais detalhado e contínuo [12].

No monitoramento agrícola, geralmente os dados (fenômenos) variam lentamente. Nesse contexto uma RSSF não precisa monitorar o ambiente com alta frequência de registro de dados, pois isso representa desperdício de energia e registro redundante de dados.

Há diferentes maneiras de implementar a variação do intervalo de amostragem de dados. Uma possível estratégia é considerar um “padrão de normalidade” (valores esperados) fazendo com que a rede de sensores adote intervalos de amostragem de dados longos enquanto as informações obtidas corresponderem ao padrão. Quando ocorrer a leitura de dados fora do padrão de normalidade, então os nós da rede devem reduzir o intervalo de amostragem, de modo a registrar os dados mais frequentemente. Essa estratégia será denominada de “Estratégia 1”.

Entretanto, dependendo do contexto nem sempre é possível definir um padrão de normalidade, ou esse padrão pode ser dinâmico durante o monitoramento. Dessa forma, pode-se considerar outra estratégia que permite ao nó da rede decidir de maneira autônoma quando e quanto alterar o intervalo de amostragem de dados, com base na variação dos dados monitorados. Quando ocorrer variações consistentes nos dados o intervalo será reduzido, aumentando a frequência do registro de dados, enquanto que baixas variações determinam intervalos maiores. A grandeza da variação dos dados irá influenciar na determinação do intervalo de amostragem. Essa estratégia será denominada de “Estratégia 2”.

A Fig. 1 ilustra as duas estratégias por meio de gráficos. O eixo x corresponde a um intervalo de tempo, enquanto que o eixo y ao valor do dado monitorado pela rede de sensores. Os pontos representam um registro efetuado por um nó da rede e

a linha corresponde ao comportamento da grandeza monitorada. O gráfico da Fig. 1(a) ilustra a Estratégia 1 que considera um padrão de normalidade representado pelo intervalo a, b . Observa-se que enquanto os dados obtidos estão dentro do intervalo de normalidade a frequência entre um registro e outro é menor do que quando ocorre uma medição fora do padrão. O gráfico da Fig. 1(b) ilustra a Estratégia 2 que considera a estratégia baseada na variação dos dados. Nota-se que enquanto ocorre uma baixa variação entre os dados registrados pelo sensor há um intervalo maior entre um registro e outro. Ao ocorrer uma variação acentuada nos dados aumenta-se a frequência das amostras.

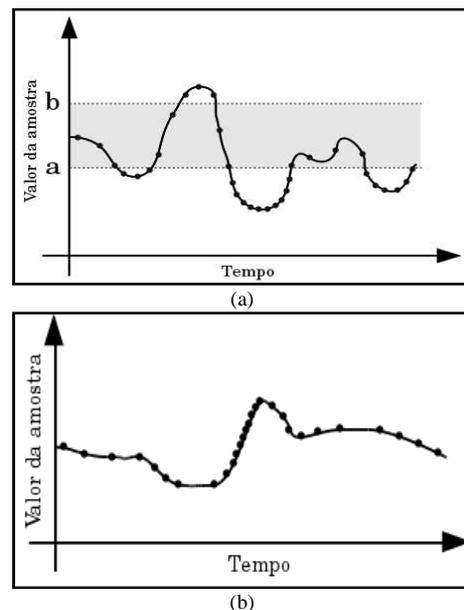


Figura 1. Exemplo de seqüências de medidas realizadas por um nó sensor ao longo do tempo, empregando duas estratégias distintas. Em (a), quando ocorrem medidas fora do padrão de normalidade (limite a, b) o intervalo entre as amostras é reduzido. Em (b), quando há variação acentuada entre os dados registrados o intervalo entre as amostras é reduzido.

Com essas estratégias espera-se economizar energia dos nós sensores enquanto o ambiente apresenta uma situação de normalidade ou baixa variação de dados e garantir a eficiência do monitoramento do ambiente em situações de maior interesse.

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 [10]. Dessa forma, estados e transições podem ser eliminados ou incorporados ao autômato em decorrência de cada um dos passos executados durante a análise da entrada. Pode-se dizer que um AA é formado por um dispositivo convencional (não-adaptativo) e um conjunto de mecanismos adaptativos responsáveis pela auto-modificação do sistema.

Para determinar a mudança nos valores dos intervalos de amostragem de dados nos nós da RSSF é proposto um AA para cada estratégia, onde cada estado do autômato corresponde a um valor para o intervalo de amostragem de

Considerando o diagrama do AA proposto na Fig. 2 a Tabela I apresenta sua respectiva TDA.

Validação da TDA: Visando verificar a TDA da Tabela I, foi utilizado o software AdapTools [14], que permite representar, implementar e simular o comportamento de um AA a partir da sua TDA.

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

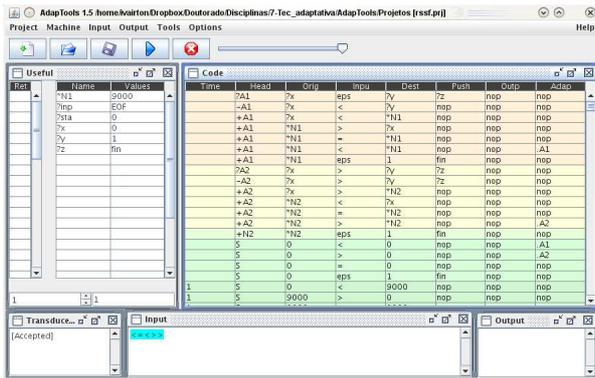


Figura 4. Representação do AA no software AdapTools.

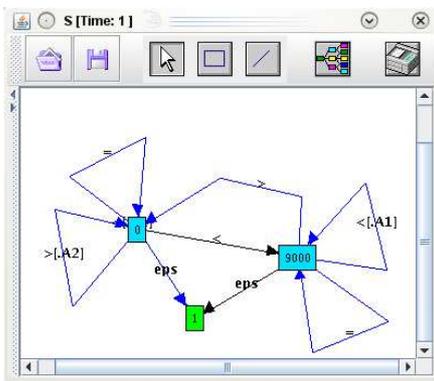


Figura 5. Representação gráfica do AA durante a simulação computacional.

B. Autômato Adaptativo para definição do intervalo de amostragem de dados com base na variação dos dados

Para determinar a mudança nos intervalos de amostragem de dados nos nós sensores da RSSF a partir da variação dos dados das amostras é proposto um AA que assume as seguintes condições:

- O estado inicial do AA corresponde ao intervalo de amostragem de dados mais curto;
- Se o dado coletado 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 com intervalo de amostragem de dados maior, definido dinamicamente;
- Se o dado coletado pelo nó sensor varia acentuadamente, acima de um limite aqui denominado de w , então o AA retorna para o estado inicial, para o menor intervalo de

amostragem de dados disponível.

É importante destacar que deve ser determinado um limite máximo para o valor do intervalo de amostragem de dados, isso evitar uma possível definição de um intervalo excessivamente longo, o que poderia causar inconsistência no registro de informações pela rede de sensores.

A Fig. 6 apresenta o AA correspondente. O símbolo “=” corresponde ao conjunto de amostras com baixa variação (inferior a w), enquanto que o símbolo “+” corresponde ao conjunto de amostras com alta variação (superior a w). Nota-se que quando ocorre uma leitura de um dado com baixa variação é executada uma ação adaptativa que cria um novo

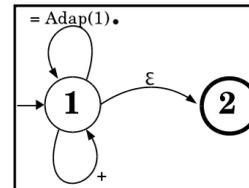


Figura 6. AA para determinação do intervalo de amostragem de dados baseado na variação dos dados registrados pelo nó sensor.

estado no autômato, com valor de intervalo de amostragem de dados maior, e adiciona-se a transição para este novo estado.

A determinação do valor do intervalo de amostragem de dados 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 é proposta a Equação 1 para esse cálculo:

$$t' = t + t_{min} \times (1 - \Delta v/w) \times z \quad (1)$$

onde:

t é o valor do intervalo de amostragem de dados do estado atual;

t_{min} corresponde ao valor do intervalo de amostragem de dados mínimo;

Δv é a variação entre os dados registrados pelo sensor;

w corresponde à variação máxima permitida;

z é um fator multiplicador adimensional para ajustes.

A Fig. 7 ilustra um exemplo de execução do AA. Considere uma aplicação em que a RSSF está monitorando a temperatura ambiente de uma cultura. Assuma os seguintes parâmetros para o exemplo: o intervalo de amostragem de dados inicial e mínimo (t_{min}) é de 5 minutos, a variação máxima (w) é de 0,5 °C e o fator multiplicador (z) é igual a 1. Na Fig. 7(a) o AA encontra-se em seu estado inicial, o estado 1 corresponde ao intervalo de amostragem de dados de 5 minutos. Supondo um

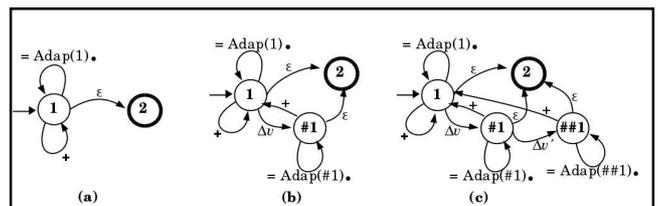


Figura 7. Exemplo de execução do AA baseado na variação dos dados. Em (a) o autômato está em seu estado inicial. Em (b) ocorre uma ação adaptativa no estado 1. Em (c) ocorre uma nova ação adaptativa no estado #1.

novo registro do nó sensor com variação menor que w ($0,1^{\circ}\text{C}$ por exemplo), é executada a função adaptativa que cria um novo estado no autômato (#1). Esse novo estado é alcançado com a variação Δv conforme demonstra a Fig. 7(b). Considerando os dados do exemplo e a Equação 1, o valor do intervalo de amostragem de dados do estado #1 será de 9 minutos. Ao imaginar novamente um novo registro do sensor, supondo uma variação de $0,4^{\circ}\text{C}$, a função adaptativa é executada criando um novo estado no autômato (##1), conforme ilustra a Fig. 7(c). Considerando a variação dos dados ($0,4^{\circ}\text{C}$) e o estado atual do autômato, o novo estado (##1) terá o intervalo de amostragem de dados igual a 10 minutos (incremento em 1 minuto).

Em qualquer estado do AA, se for registrado um novo dado cuja variação seja superior a w o autômato retorna ao seu estado de entrada (estado 1).

Tabela de decisão adaptativa: Considerando o diagrama do AA apresentado na Fig. 6, a Tabela II apresenta a TDA que descreve as suas respectivas ações adaptativas. Nesta TDA ocorrem somente ações adaptativas de adição (+).

Na execução da função adaptativa, a variação Δv obtida pelo nó sensor deve ser retirada do conjunto representado por “=”, se tornando a entrada que corresponde à transição para o novo estado criado. Isso é importante para evita ambigüidade

TABELA II

TDA referente ao AA para determinação do intervalo de amostragem baseado na variação dos dados.

Label	Tag	Condições			Ações		Funções Adaptativas	Parâmetros	Geradores
		Estado =	Entrada =	Estado ↓	Consome	Aceita ↓			
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					

no autômato.

Validação da TDA: Para verificar a TDA apresentada na Tabela II, também foi utilizado o software AdapTools. As simulações executadas demonstraram o comportamento esperado do AA, portanto, a correta construção da TDA. A Fig. 8 corresponde à representação da TDA no AdapTools e a Fig. 9 ilustra a representação gráfica do AA em um determinado instante da simulação.

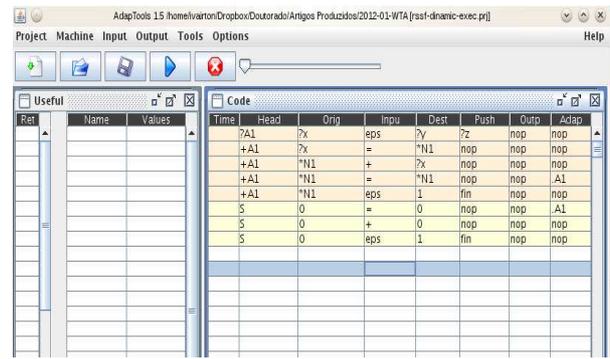


Figura 8. Representação do AA no software AdapTools.

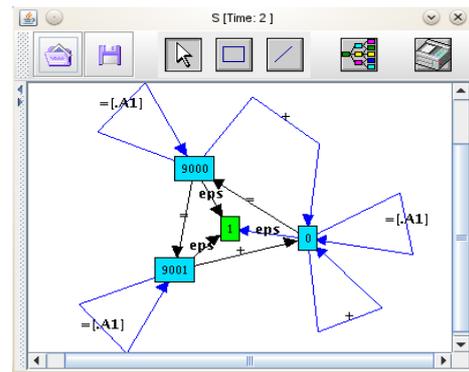


Figura 9. Representação gráfica do AA durante a simulação computacional.

IV RESULTADOS

Buscando avaliar e comparar a economia de energia em uma RSSF proporcionada pela utilização dos AA propostos, foi desenvolvido um sistema computacional que simula seu funcionamento. O sistema foi implementado em linguagem de programação Java e simula o consumo de energia dos nós sensores quando registram dados, enviam pacotes de dados e quando estão em modo de espera (*stand-by*). O sistema não implementa algoritmos de roteamento de dados, limita-se a simular o funcionamento dos sensores (registro, envio/recebimento de dados e modo de espera), o consumo de energia de suas baterias e o reenvio de pacotes de dados por razão de falha (de acordo com parâmetros definidos).

O sistema de simulação considera uma aplicação de monitoramento de temperatura. Como referência, foi utilizada uma série histórica real de temperatura registrada pelo CPTEC INPE (<http://www.cptec.inpe.br/>) da região do município de Bento Gonçalves/RG. A escolha dessa área se deu pelo número relevante de parreirais presentes nessa região e da importância de se monitorar a temperatura nessas culturas, especialmente em épocas frias por conta da ocorrência de geadas.

Para simular a temperatura ambiente, adotou-se uma temperatura simulada “global” (gerada por meio de métodos pseudo randômicos). Os dados gerados neste processo são tendenciosos, seguindo como parâmetro os registros de temperatura determinados pela série histórica. Cada nó da rede “registra” (simula o registro por meio da geração de dados

psudo randômicos) temperaturas que correspondem a variações da temperatura “global”. Dessa forma mantém-se a tendência em seguir a temperatura global e permite simular diferentes microrregiões na área onde a rede de sensores está instalada. O funcionamento dos dois AA apresentados foram simulados nesse ambiente, empregando os mesmos parâmetros.

Em todas as simulações foi considerada a mesma configuração para os nós da rede, assumindo como limite mínimo do intervalo de amostragem de dados o valor de 3 minutos e o máximo de 30 minutos. Para o AA correspondente à Estratégia 1 foi determinado o padrão de normalidade com intervalo entre 20 e 28 °C. O valor para o limite de variação mínimo (k) foi de 1% em relação à temperatura corrente registrada pelo sensor.

As simulações da Estratégia 1 objetivaram verificar o desempenho energético com a variação no número de intervalos de amostragem de dados disponíveis para os sensores. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela III.

TABELA III

Tabela das configurações utilizadas nas simulações do AA da Estratégia 1.

Nº de intervalos	Duração dos intervalos (em minutos)
2	{30,3}
4	{30,20,10,3}
6	{30,24,18,13,8,3}
8	{30,26,22,18,14,10,6,3}
10	{30,26,23,20,17,14,11,9,6,3}
12	{30,27,24,21,19,17,15,13,11,9,6,3}
14	{30,27,25,23,21,19,17,15,13,11,9,7,5,3}

Nas simulações da Estratégia 2 o objetivo foi verificar o desempenho energético da rede investigando o valor para a variação máxima permitida (w). As simulações consideraram valores para w de 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5% e 3,0% do valor da temperatura registrada pelo nó sensor.

O gráfico na Fig. 10 demonstra os resultados obtidos em um conjunto de simulações. O eixo x corresponde à sequência de simulações, enquanto que o eixo y à quantidade de dias que a rede funcionou (segundo a simulação). As simulações que empregaram a Estratégia 1 estão representadas por linhas tracejadas, enquanto que as simulações baseadas na Estratégia 2 estão em linhas contínuas. Observa-se no gráfico que no

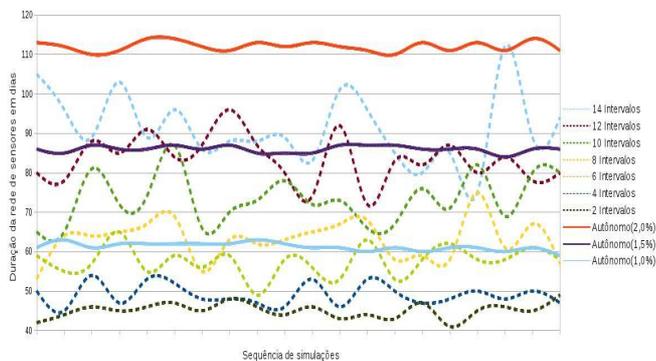


Figura 10. Resultados das simulações dos AA baseados na Estratégia 1 (linhas tracejadas) e na Estratégia 2 (linhas contínuas).

caso da Estratégia 1 quanto maior o número de intervalos pré-definidos melhor o desempenho da rede (maior duração em dias). Entretanto os resultados obtidos por essa estratégia apresentaram variação acentuada, tendo ocorrido resultados superiores a 30 dias de diferença, em um mesmo contexto. Já os resultados obtidos com a Estratégia 2 demonstraram um comportamento mais estável, sendo a simulação com valor para a variação máxima (w) igual a 2% a de maior eficiência.

Os resultados das simulações para a Estratégia 2 com valor de w igual a 2,5% e 3,0% não aparecem no gráfico da Fig. 10 em razão das simulações com esses parâmetros terem apresentado um comportamento indesejado. Pelo fato do limitante da variação estar alto, os nós apresentaram tendência em manter o intervalo de amostragem de dados em seu valor máximo. O gráfico apresentado na Fig. 11 demonstra essa tendência nas simulações com w igual a 2,0%, 2,5% e 3,0%. O eixo x corresponde aos intervalos de amostragem de dados adotados pelo nó sensor durante a simulação, variando de 3 a 30 minutos. O eixo y corresponde ao número de vezes que o intervalo ocorreu durante a simulação. Em razão do comportamento tendencioso, as simulações com valor de w acima de 2,0% foram descartadas.

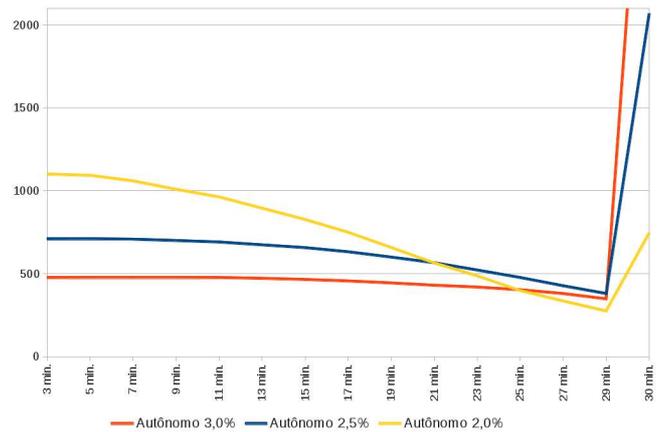


Figura 11. Tendência em manter o intervalo de amostragem de dados em seu valor máximo nas simulações da Estratégia 2 com valor de w superior a 2% do valor da temperatura.

A variação nos resultados obtidos pela Estratégia 1 é melhor visualizada na Fig. 12. O exemplo que melhor

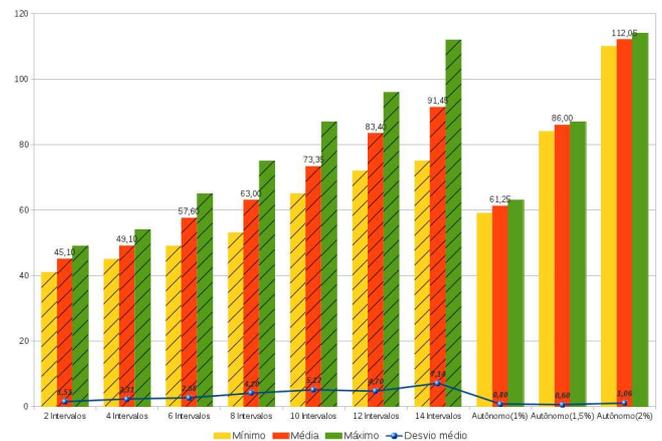


Figura 12. Resultado mínimo, médio e máximo das simulações das duas estratégias com suas respectivas configurações e desvio médio obtido em cada contexto.

demonstra esse comportamento é a simulação que adota 14 intervalos pré-definidos. Nesse caso os resultados obtidos em diferentes simulações variaram entre 75 e 112 dias, sendo o desvio médio de 7,14. Em contra partida, a Estratégia 2 apresentou uma baixa variação em seus resultados, apresentando no máximo um desvio médio de 1,06 para as simulações que consideraram $w = 2\%$. Esse comportamento pode estar associado à função que determina dinamicamente o valor do intervalo de amostragem de dados, o que faz crer que uma função que propicie maior amplitude nos resultados obtidos pela estratégia venha a interferir nesse comportamento.

A Fig. 12 também demonstra o resultado médio das simulações das duas estratégias. Como esperado, na Estratégia 1 a utilização de 14 intervalos pré-definidos propiciou maior tempo de vida da RSSF. Isso ocorre em razão da utilização de intervalos de amostragem de dados com valores maiores, o que não ocorre (ou em menor quantidade) em outros contextos que possuem poucas opções de intervalos de amostragem.

Nas simulações com a Estratégia 2, o melhor resultado ocorreu com o parâmetro $w = 2\%$. Os resultados obtidos por esta estratégia estão diretamente associados ao valor de w . Um valor muito baixo determina uma inflexibilidade ao autômato e portanto um constante retorno ao estado inicial. O que corresponde ao uso freqüente do intervalo de amostragem de dados mais curto. Em contra partida, conforme tendência notada na Fig. 11, um valor de w muito alto leva o autômato a atingir facilmente o valor máximo para o intervalo de amostragem de dados, prejudicando a eficiência do monitoramento executado pela rede de sensores. Esse contexto revela a necessidade de uma calibração adequada para o valor de w .

O comportamento estável do AA em diferentes simulações na Estratégia 2 leva à outra análise quanto a função de cálculo do valor para o intervalo de amostragem. Acredita-se que há margem para melhorias nesta função, de modo a ampliar as combinações de valores para os intervalos e dar melhor oportunidade ao AA de gerar resultados melhores.

O gráfico na Fig. 13 demonstra a quantidade de vezes que um intervalo de amostragem de dados foi determinado durante a simulação, por meio de curvas de tendência logarítmica.

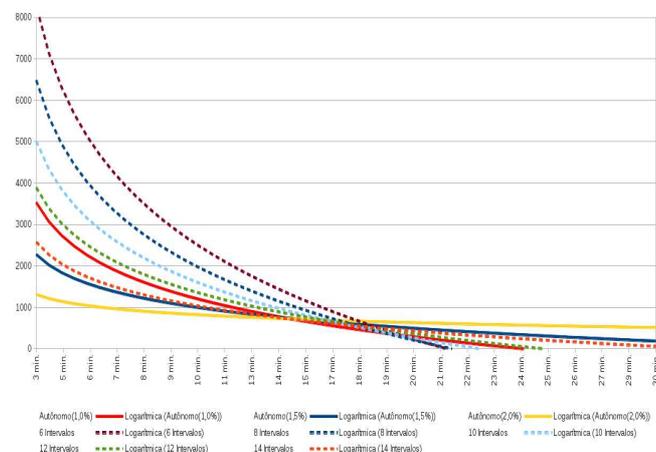


Figura 13. Linha de tendência de utilização dos intervalos de amostragem durante a simulação.

Com esse gráfico é possível notar a distribuição da ocorrência de cada intervalo de amostragem de dados durante a simulação. Inicialmente observa-se que em todas as simulações os intervalos de amostragem mais curtos são mais frequentes, enquanto que aqueles intervalos mais longos ocorrem com menor frequência. Isso demonstra que a rede mantém um monitoramento mais detalhado a maior parte do tempo. Ainda assim, durante as simulações não foram feitas análises quanto a possíveis falhas no monitoramento de eventos considerados importantes, o que pode ser explorado em trabalhos futuros.

No gráfico observa-se que em algumas simulações há uma utilização deficiente dos intervalos disponíveis, com baixa utilização ou mesmo nula de alguns intervalos, como no caso das simulações da Estratégia 1 com 2, 4, 6, 8, 10 e 12 intervalos pré-definidos e na Estratégia 2 com w igual a 1%. Como o intervalo de amostragem de dados poderia assumir valores entre 3 e 30 minutos, o gráfico da Fig. 13 demonstra que em algumas simulações esse intervalo não foi plenamente utilizado. Isso mostra que o AA pode ser melhor ajustado de modo a explorar de maneira mais plena o intervalo disponível.

As deficiências encontradas com a análise dos resultados demonstram que as pesquisas podem evoluir nos trabalhos futuros. É importante destacar o potencial dos AA que, em simulação computacional, permitiram uma RSSF comum com duração média de 40 dias pudesse alcançar uma duração até 112 dias (Estratégia 1 com 14 intervalos) ou 114 dias (Estratégia 2 com $w = 2\%$), o que equivale dizer que praticamente triplicou sua capacidade de duração de funcionamento sem necessariamente perder eficiência no monitoramento de variáveis ambientais de interesse da aplicação.

IV. CONCLUSÕES

A AP é um exemplo entre as diversas áreas que pode tirar proveito do potencial das RSSF para aprimorar ou desenvolver novos processos de aplicação.

As RSSF têm como um dos seus principais desafios a necessidade de economizar energia dos seus nós sensores, de modo a prolongar ao máximo o tempo de duração da rede. Na AP não há a demanda por um monitoramento com alta frequência de coleta de dados, pois eles se alteram lentamente. Pode-se empregar uma estratégia que adota intervalos de amostragem de dados dinâmicos, longos enquanto as informações obtidas estiverem em um contexto de normalidade e curtos para eventos que demandam um monitoramento mais detalhado. Esse processo pode ser baseado em dois aspectos, na adoção de um padrão de normalidade para os dados e na variação entre os dados monitorados.

Neste trabalho foram apresentados dois autômatos adaptativos para explorar essas estratégias por serem estruturas computacionais que podem ser implementadas individualmente nos nós da rede de sensores mantendo sua autonomia. Por meio de simulação computacional a aplicação dos AA demonstrou melhor desempenho energético da RSSF. Economia de energia que significa maior tempo de vida útil da

rede de sensores, podendo chegar a cerca de três vezes o tempo original.

A continuidade deste trabalho prevê a utilização de novos parâmetros para melhor ajuste dos autômatos, além da verificação de novas formulações para a definição do valor do intervalo de amostragem de dados na Estratégia 2. Além disso, espera-se verificar a eficiência do monitoramento de diferentes fenômenos pela rede de sensores e elaborar uma métrica que qualifique os valores gerados para os intervalos de amostragem de dados, 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 projetos de pesquisa e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) via programa Doutorado Interinstitucional Escola Politécnica da USP e Universidade Federal de Mato Grosso (EPUSP-UFMT).

REFERÊNCIAS

- [1] WEISER, M., The computer for the 21st century. Disponível em <<http://www.ubiq.com/hypertext/weiser/SciAmDraft3.html>>, 1991. Acesso em: Agosto de 2009.
- [2] AKYILDIZ, I. F., SU, W., SANKARASUBRAMANIAM, Y., CAYIRCI, E., Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38, pp. 393-422, 2002.
- [3] TUBAISHAT, M., MADRIA, S., Sensor networks: an overview, *IEEE Potentials*, 22 (2), 2003.
- [4] GAJBHIYE, P., MAHAJAN, A., A survey of architecture and node deployment in Wireless Sensor Network. *Applications of Digital Information and Web Technologies*, pp. 426-430, 2008.
- [5] ESTRIN, D., GIROD, L., POTTIE, G., SRIVASTAVA, M., Instrumenting the world with wireless sensor networks. *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, USA, 2001.
- [6] POTTIE, G. J., KAISER, W. J., Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, 43, pp. 51–58, 2000.
- [7] YICK, J., MUKHERJEE, B., GHOSAL, D., Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52, (12), pp. 2292-2330, 2008.
- [8] SOHRABY, K., MINOLI, D., ZNATI, T., *Wireless Sensor Networks – Technology, Protocols, and Applications*. Ed. Wiley, 2007.
- [9] SIKKA, P., Wireless ad hoc sensor and actuator networks on the farm. *ACM*, pp. 492-499, 2006.
- [10] NETO, J. J., Adaptive rule-driven devices – general formulation and case study, *International Conference on Implementation and Application of Automata*, pp. 234-250, ISBN 3-540-00400-9, 2002.
- [11] MOLIN, J. P., Tendências da agricultura de precisão no Brasil, *Anais do Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão 2004*, Ribeirão Preto/SP, pp. 1-10, 2004.
- [12] SANTOS, I. M., DOTA, M. A., CUGNASCA, C. E., 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 2010*, Ribeirão Preto/SP, 2010.
- [13] ROCHA, R. L. A., NETO, J. J., Uma proposta de linguagem funcional com características adaptativas, *CACIC 2003*, 2003.
- [14] JESUS, L. D., SANTOS, D. G. D., CASTRO, A. A. D., PISTORI, H., AdapTools 2.0: Implementation and Utilization Aspects, *IEEE Latin America Transactions*, 5, pp. 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).