

Estudo Sobre a Influência dos Modelos de Mobilidade em Aplicações de Pulverização de Precisão Auxiliadas por Redes de Sensores sem Fio

Leandro B. L. Gonçalves¹, Fausto G. Costa², Leandro A. Neves¹,
Jó Ueyama², A. R. Pinto¹

¹DCCE – Universidade Estadual Paulista (UNESP),
15054-000, São José do Rio Preto, SP, Brasil

²Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC)
Universidade de São Paulo (USP) – São Carlos, SP, Brasil

leandroblg@acm.org, {leandro, arpinto}@ibilce.unesp.br

{fausto, joueyama}@icmc.usp.br

Resumo. *Aplicação de insumos com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) auxiliados por Redes de Sensores sem Fio (RSSF) é uma abordagem sobre o problema de pulverização em agricultura de precisão. A eficiência dessa abordagem está sujeita à eficiência da comunicação entre o VANT e a RSSF, que por sua vez é influenciada pelo modelo de mobilidade do VANT. O objetivo desse estudo é encontrar o modelo de mobilidade mais adequado para uso em pulverização de precisão, para isso foram feitas simulações com quatro modelos de mobilidade (Random Walk, Random Waypoint, Random Direction e Manhattan Grid) para distribuições de nodos sensores aleatória e em grade.*

1. Introdução

Agricultura de precisão (AP) visa aumentar a eficiência de gestão de recursos e produtividade de culturas agrícolas, o que resulta em produtos melhores e mais baratos [Lee et al. 2010]. Para sua adequada implementação existem alguns desafios a serem superados, como a intensiva demanda por informação, conhecimento detalhado da área cultivada e adequada distribuição de insumos. Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) têm sido utilizadas em abordagens para a solução desses problemas, por exemplo, no sensoria-mento de dados micrometeorológicos [Matese et al. 2009], coleta e transmissão de dados [Camilli et al. 2007] e auxílio na aplicação de insumos agrícolas [Costa et al. 2012].

Pulverização de precisão é de grande importância em AP, uma vez que influi diretamente na qualidade e rendimento da técnica. A aplicação excessiva ou insuficiente de insumos pode causar danos ao cultivo [Costa et al. 2012]. Uma abordagem sobre o problema de distribuição de insumos é o uso de Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANTs) para a tarefa. O VANT pode ser assessorado por uma RSSF, como em [Costa et al. 2012], coletando dados sobre a distribuição e enviando-os para o VANT a fim de que sejam feitas as correções necessárias em tempo real.

Nesse cenário, o VANT se comportaria como uma estação base móvel, por isso a comunicação entre o VANT e os nodos sensores está sujeita a problemas de diversas

causas, reduzindo a eficiência do sistema como um todo. Uma dessas causas é o modo de deslocamento, i.e. o modelo de mobilidade, do VANT no ambiente.

Em RSSF, assim como em redes ad-hoc, existem diversos modelos de mobilidades já consagrados na literatura, tais como: Random Walk, Manhattan-Grid, Random Waypoint e Random Direction. A fim de melhorar a eficiência da comunicação entre o VANT de pulverização e a RSSF faz-se necessário observar qual modelo de mobilidade tem melhor desempenho.

Neste artigo, são apresentados os resultados de diversas simulações baseadas em um modelo de VANT auxiliado por RSSF para AP visando encontrar o modelo de mobilidade que apresenta melhor desempenho de comunicação no sistema em questão.

O presente trabalho se estrutura do seguinte modo: na seção 2 é feita a fundamentação teórica do estudo, na seção 3 é apresentado o problema de pulverização de precisão, na seção 4 é descrito o modelo utilizado, na seção 5 são apresentados e discutidos os resultados, seguidos das conclusões.

2. Fundamentação Teórica

Nesta seção, é mostrado o fundamento teórico do estudo. São discutidas questões sobre AP e o uso desta de RSSF. Também são apresentadas questões sobre Data Mule (DM), os modelos de mobilidade utilizados e por fim os trabalhos relacionados a este.

2.1. Agricultura de Precisão e auxílio por RSSF

AP é um dos campos mais propícios para a aplicação de RSSF [Díaz et al. 2011]. A implementação da AP é baseada em uma grande quantidade de dados da região plantada, como as necessidades de água e nutricionais das plantas, suas condições de saúde e o estado do solo [Lee et al. 2010].

Para criar uma base ampla e confiável para AP deve-se prover informações com alta resolução espacial e temática [Lee et al. 2010]. Logo, dados de cultura podem ser obtidos por imagens aéreas ou de satélites, mas ainda assim o sensoriamento direto é fundamental. A fim de melhorar o entendimento das condições de variação de produtividade e qualidade pode-se utilizar RSSF [Camilli et al. 2007].

RSSF tem sido empregadas em diversas finalidades de sensoriamento a fim de auxiliar a AP. Alguns exemplos são seu uso para coleta de informações micrometeorológicas e de solo [Matese et al. 2009], condições de saúde da plantação (presença de insetos, ervas daninhas e doenças), monitoramento por imagem [Lee et al. 2010] e automatização da aplicação de insumos [Costa et al. 2012].

2.2. Data Mule

Uma proposta de arquitetura de RSSF, segundo [Shah et al. 2003], é o conceito de DM. Inicialmente desenvolvido para coletar dados de RSSF esparsas, consiste no uso de um nodo com capacidade de armazenamento de dados e fonte energética melhoradas anexado a um agente de mobilidade em uma camada intermediária entre os nodos sensores e a estação base (BS), cuja função é coletar os dados da rede enquanto percorre um trajeto por entre a área sensoriada. Como agente de mobilidade, podem ser utilizados pessoas, animais, ou veículos. DMs têm sido aplicados no monitoramento de ambientes subaquáticos, estruturais [Sugihara and Gupta 2011] e em agricultura [Burrell et al. 2004].

Algumas desvantagens da técnica são: 1) elevada latência; 2) exigência de movimentação física do DM; e 3) No caso de falhas nos DMs a rede não é capaz de entregar dados [Shah et al. 2003].

Por outro lado, o uso de DMs oferece: 1) economia de energia no roteamento de dados; 2) menor necessidade de infraestrutura; 3) maior tolerância a falhas; e 4) módulo de transporte pode ser usado para outras aplicações [Shah et al. 2003].

2.2.1. Modelos de Mobilidade

Aqui são brevemente descritos os modelos de mobilidade utilizados nos experimentos que serão expostos adiante. Foram quatro modelos utilizados: Random Walk, Random Waypoint, Random Direction e Manhattan Grid.

a) Random Walk:

No modelo Random Walk um nodo móvel desloca-se partindo de sua posição inicial para uma nova, escolhendo aleatoriamente valores para a velocidade e direção no percurso. Cada movimento ocorre por um intervalo de tempo ou por espaço percorrido, ambos predefinidos. Caso o nodo móvel encontre uma borda, é refletido com o mesmo ângulo de incidência. Não considera os valores anteriores ao definir novos valores para direção e velocidade, o que gera movimentos não realistas, com paradas repentinas e viradas bruscas [Camp et al. 2002].

b) Random Waypoint

O modelo Random Waypoint faz com que o nodo móvel permaneça parado em um ponto no ambiente de simulação durante um período, uma vez este transcorrido o nodo escolhe uma posição aleatória no cenário como destino assim como uma velocidade, esta é escolhida de modo a ser uniformemente distribuída entre valores predefinidos. O processo é reiniciado quando o nodo chega ao ponto de destino [Camp et al. 2002].

c) Random Direction

Este modelo foi criado para superar o problema de ondas de densidade (i.e. a aglomeração de nodos que ocorre em uma parte do cenário), em relação ao que ocorre com o modelo Random Waypoint. No modelo Random Direction, quando o nodo móvel alcança a borda do ambiente escolhe uma nova direção entre 0 e 180 graus e uma velocidade dentro de uma faixa preestabelecida [Camp et al. 2002].

d) Manhattan Grid

Este modelo consiste na mobilidade do nodo móvel por caminhos predefinidamente estabelecidos em forma de grade, tais caminhos são igualmente espaçados entre os pertencentes ao mesmo eixo. A disposição dessas vias forma entre elas interseções nas quais um nodo pode alterar sua direção e o sentido de seu movimento, com $\frac{P}{2}$ chances de virar para algum lado perpendicular à direção de seu movimento e P chances de continuar em frente (a não ser que esteja na borda cenário), sendo P as chances de mudança de direção do movimento. Atualizações de velocidade ocorrem a cada n metros, no qual n é previamente definido¹. Além

¹ETSI Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS(UMTS 30.03 version 3.2.0), http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/101100_101199/101112/03.02.00_60/tr_101112v030200p.pdf, acessado em 03/03/2013

disso, pode-se definir um tempo de parada do nodo móvel e a probabilidade de sua ocorrência².

2.3. Trabalhos Relacionados

O conceito de DM é introduzido por [Shah et al. 2003], são utilizados nodos móveis para criar uma camada intermediária entre os nodos sensores estacionários e a BS fixa a fim de reduzir custos e aumentar a eficiência energética da rede.

Em [Sugihara and Gupta 2011] os autores dividem o problema de roteamento de DM em três subproblemas: 1) planejamento do caminho; 2) escalonamento de trabalho; e 3) seleção de velocidade. Aborda métodos de solução para o planejamento do caminho, utilizando algoritmos de aproximação.

O conceito de DM é expandido em [De Freitas et al. 2010] com a proposta do uso de uma rede de VANTs entre uma RSSF esparsa e a BS. Em [Vilela and Araujo 2012] é apresentado um novo protocolo de roteamento que faz uso de três níveis de rede: nodos sensores, robôs móveis terrestres, e VANTs, sendo esses os receptores finais das informações colhidas pelos nodos sensores. Esse trabalho foi validado por meio de simulações no qual foram utilizados como modelos de mobilidade Random Waypoint e Random Direction. Diversos modelos de mobilidade, como Random Walk, Random Waypoint e Random Direction, são descritos em [Camp et al. 2002], que faz uma análise de modelos de mobilidade para redes ad-hoc.

Uma RSSF estática é utilizada em [Camilli et al. 2007] para coleta de dados na AP a fim de aumentar a confiabilidade e o detalhamento das informações sobre a região de cultivo. Em [Lee et al. 2010] é feito um levantamento dos desenvolvimentos tecnológicos para sensoriamento de cultivos, como visão computacional, termografia e coleta de dados por RSSF. Além disso, identifica as necessidades de desenvolvimento de tecnologias para aplicação em agricultura. Um algoritmo para a melhoria da eficiência da aplicação de insumos agrícolas em áreas de cultivo é apresentado em [Costa et al. 2012]. A técnica usa uma RSSF que coleta os dados de distribuição do material aplicado e os retorna para a estação base móvel (VANT) que por sua vez faz as correções necessárias.

3. Descrição do Problema

O uso apropriado de insumos agrícolas em um cultivo é muito importante para o rendimento da colheita. Assim, devido a sua velocidade e efetividade, o uso de aeronaves para a aplicação desse tipo de produto têm se tornado cada vez mais comum [Costa et al. 2012].

Como exposto em [Costa et al. 2012], RSSF podem ser utilizadas para auxiliar a automatização da aplicação de insumos de modo mais preciso, para isso utiliza-se um VANT que tem a função de aplicar tais produtos e uma distribuição de nodos sensores que tem papel de monitorar e reportar para o VANT o desempenho da aplicação efetuada.

Desse modo, a efetividade da técnica fica condicionada ao desempenho da comunicação entre o VANT e os nodos sensores. Com o objetivo de melhorar essa comunicação e atender outras necessidades do problema foi realizado este estudo sobre qual modelo de mobilidade oferece, *a priori*, o melhor desempenho na comunicação.

²Documentação do software BonnMotion, https://net.cs.uni-bonn.de/fileadmin/ag/martini/projekte/BonnMotion/src/BonnMotion_Docu.pdf, acessado em 03/03/2013

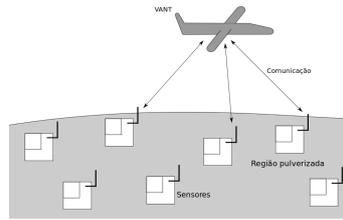


Figura 1. Exemplo de VANT percorrendo uma área de pulverização evidenciando a comunicação

4. Descrição do Modelo e Experimentos

Nesta seção são descritos o modelo, os experimentos, os parâmetros e as simulações utilizados nesse estudo.

4.1. Modelo

O modelo utilizado para esse estudo consiste em uma RSSF formada por nodos sensores e um VANT que se comporta como DM. Os nodos sensores utilizados foram distribuídos aleatoriamente ou em grade, como na figura 2, não tem a função de rotear informações entre si, mesmo estando dentro do alcance de outros nodos sensores. Consideram somente a comunicação com o VANT. Envia dados quando solicitados por este e não apresentam mobilidade. O VANT, por sua vez, se comporta como um DM, requiere e coleta dados dos nodos sensores, considera somente a comunicação com esses e apresenta mobilidade.

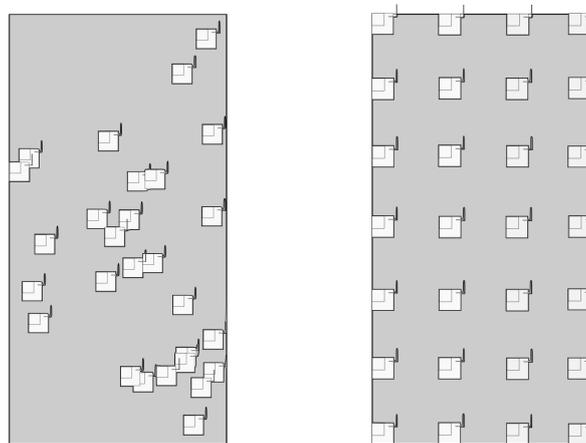


Figura 2. Exemplos de distribuição de nodos sensores. À esquerda nodos distribuídos aleatoriamente, à direita distribuídos em grade

O algoritmo de comunicação (figura 3) utilizado no modelo pelo VANT consiste em após sua inicialização, enviar periodicamente mensagens requisitando informações dos nodos sensores, em seguida escuta o meio por um período coletando as mensagens recebidas. As mensagens que forem provenientes de nodos sensores acrescentam 1 ao valor da variável *receivedFrames*, definida inicialmente com valor zero, e retorna a enviar as requisições para os nodos sensores. Se uma mensagem recebida não for enviada pelos nodos sensores é descartada.

O algoritmo de comunicação (figura 3) utilizado pelos nodos sensores consiste em fazer a inicialização, definindo duas variáveis, *frameCounter* e *backoffCounter*, com valor zero. Logo após, escuta o meio até receber uma mensagem, se não for uma requisição de informações vinda do VANT ela é descartada e o nodo volta a escutar o meio, caso contrário ele tenta enviar uma resposta. Caso a resposta tenha sido enviada com sucesso *frameCounter* é acrescentada em um, se não *backoffCounter* é acrescentada em um. Após isso o nodo sensor volta a escutar o meio.

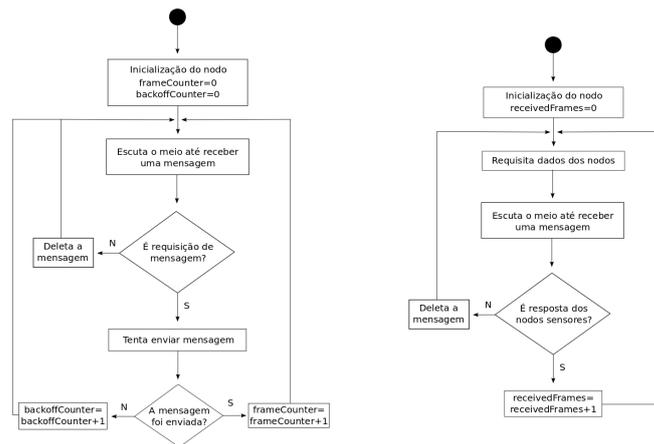


Figura 3. À esquerda o fluxograma do algoritmo de comunicação utilizado pelos nodos sensores, à direita o fluxograma do algoritmo de comunicação utilizado pelo VANT.

4.2. Experimentos e Parâmetros

Os experimentos foram realizados por meio de simulações. Utilizou-se o simulador de redes OMNet++ [Varga 1999] com o pacote MiXiM³. Para a geração dos modelos de mobilidade utilizou-se o software BonnMotion [Aschenbruck et al. 2010].

Neste trabalho foram tomadas como pressupostas as seguintes afirmações: O VANT tem velocidade constante, não tem capacidade de planar estaticamente sobre uma determinada região, pode se movimentar por toda a área definida para simulação independentemente da presença de nodos sensores no alcance. Todos os nodos foram implantados em um mesmo plano. As fontes energéticas tanto do VANT quanto dos nodos sensores foram consideradas infinitas, o buffer de ambos é infinito. Não existiam elementos que pudessem afetar o sinal em partes localizadas do cenário (e.g. árvores e construções).

Foram tomados como métricas: número de backoffs, número de frames enviados, número de frames recebidos e eficiência de comunicação (EC). A EC é calculada de acordo com a equação 1.

$$EC = \frac{\text{número de frames recebidos}}{\text{número de frames enviados}} \quad (1)$$

³Projeto MiXiM, <http://mixim.sourceforge.net/>, acessado em 03/03/2013

O estudo foi dividido em dois experimentos: 1) o número de nodos é alterado, mantendo a área do cenário fixa; 2) a área do cenário é alterada, mantendo o número de nodos fixo.

No experimento 1 a área foi considerada fixa de $300\text{m} \times 600\text{m}$, altera-se o número de nodos sensores entre 28, 45, 66, 91 e 120. A densidade de nodos sensores no cenário é exposta na tabela 1. A escolha desses valores se deu pela satisfação das equações 2 e 3 a seguir.

$$w = \frac{-(P + 1) + \sqrt{(P + 1)^2 + 4P(n - 1)}}{2P} \quad (2)$$

$$h = wP \quad (3)$$

Considerando P correspondente à proporção da área (retangular) de testes, i.e. maior lado dividido pelo menor; w correspondente ao número de nodos no lado maior e n o número de nodos total. O número de nodos do lado menor (h) foi encontrado pela equação 3. As variáveis n , w e h devem pertencer aos números naturais. Essas equações foram deduzidas a partir de um sistema formado pelas equações 3 e $n = (w + 1)(h + 1)$, formulado a partir da análise de grafos em grade, semelhantes à imagem da distribuição de nodos em grade, Figura 2.

Tabela 1. Densidade de nodos sensores no ambiente de simulação para cada número de nodos no experimento 1

Número de Nodos	Densidade(<i>Nodos</i> / m^2)
28	$1,55 \times 10^{-4}$
45	$2,50 \times 10^{-4}$
66	$3,67 \times 10^{-4}$
91	$5,06 \times 10^{-4}$
120	$6,67 \times 10^{-4}$

No experimento 2 o número de nodos é fixo em 66 (mediana dos valores de números de nodos do experimento 1), a área do ambiente de simulação é alterada de acordo com a tabela 2 de modo a manter a densidade de nodos presente no experimento 1. A definição de densidade de nodos segue a equação 4.

$$densidade = \frac{Número\ de\ Nodos}{Área\ do\ Cenário} \quad (4)$$

Os modelos de mobilidade foram parametrizados de modo que seus movimentos fossem parecidos, i.e. de modo que tivessem comportamentos semelhantes, como feito em [Camp et al. 2002]. Todos os modelos de mobilidade tiveram a velocidade do VANT definida em 30m/s, sem variações. Seus tempos de parada, quando aplicáveis, foram

Tabela 2. Áreas de ambiente de simulação no experimento 2 e suas densidades de nodos sensores relacionadas

Densidade($Nodos/m^2$)	Área de simulação (m^2)
$1,55 \times 10^{-4}$	424163,33
$2,50 \times 10^{-4}$	263999,94
$3,67 \times 10^{-4}$	180000,00
$5,06 \times 10^{-4}$	130537,25
$6,67 \times 10^{-4}$	98922,62

definidos em 0s para que o VANT não permaneça estático. O modelo Random Walk teve atualizações de movimentos a cada 100m, o modelo Manhattan Grid teve o cenário dividido em 4 caminhos na horizontal por 6 na vertical, com atualizações de movimento a cada 5m. Os demais parâmetros dos modelos de mobilidade foram seus respectivos parâmetros padrões.

5. Resultados e Discussões

Observando os gráficos de backoffs dos nodos sensores no experimento 1, apresentados na Figura 4, nota-se que o número de backoffs apresenta uma leve tendência de alta a medida que a densidade de nodos aumenta. Isso explica a tendência de queda das curvas dos gráficos de frames enviados pelos nodos sensores, Figura 5, uma vez que o algoritmo CSMA-CA⁴ limita as tentativas de envio de mensagens. Assim, devido ao elevado número de tentativas no mesmo período, a quantidade de envios bem-sucedidos tende a cair.

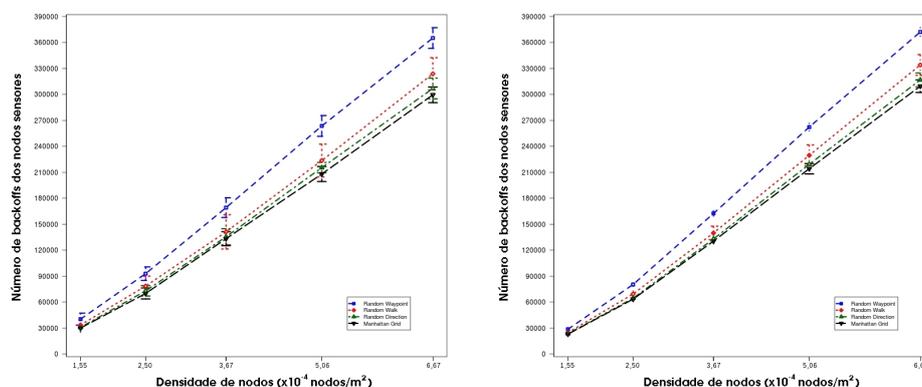


Figura 4. Número de backoffs dos nodos sensores para cada modelo de mobilidade no experimento 1, à esquerda com distribuição aleatória dos nodos sensores e à direita com distribuição em grade

Como nos gráficos de frames enviados (Figura 5) não existe um número ϵ de frames enviados que limite inferior e superiormente as curvas, como visto pelos valores crescentes para o “Experimento 1” na Tabela 3, pode-se afirmar que os nodos não atingiram o limite de envios permitido pelo meio no intervalo e portanto não ocorreu a saturação do meio de comunicação.

⁴Padrão IEEE 802.15.4, <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=11161>, páginas 170-172, acessado em 03/03/2013

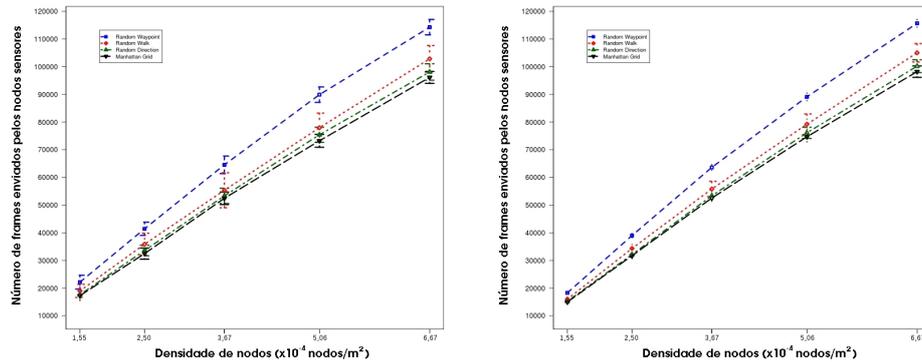


Figura 5. Número de frames enviados pelos nodos sensores para cada modelo de mobilidade no experimento 1, à esquerda com distribuição aleatória dos nodos sensores e à direita com distribuição em grade

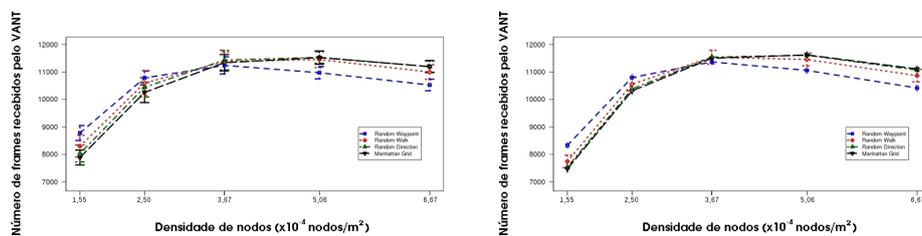


Figura 6. Número de frames recebidos pelo VANT para cada modelo de mobilidade no experimento 1, à esquerda com distribuição aleatória dos nodos sensores e à direita com distribuição em grade

Contudo, observando as curvas dos gráficos de frames recebidos pelo VANT, Figura 6, pode-se notar que tais curvas são crescentes entre $1,55$ e $3,67 \times 10^{-4}$ nodos/m², a partir de $3,67 \times 10^{-4}$ nodos/m² tendem a se manter estáveis ou com leve queda, dependendo do modelo de mobilidade, genericamente apresentam recebimento em torno de 11000 frames. A Tabela 4 apresenta numericamente esse comportamento. Como o número de frames enviados no período foi crescente, essa estabilização do número de frames recebidos pelo VANT representa a saturação da capacidade de recepção de dados.

Modelos de mobilidade que apresentaram maior número de envio de frames foram os que tiveram maior queda de número de frames recebidos, este comportamento ocorre pela interferência na comunicação. No caso mais evidente, na densidade $6,67 \times 10^{-4}$ nodos/m², o envio foi da ordem de 10^5 e o recebimento na ordem de 10^4 .

O aumento do número de envios por parte dos nodos sensores e a estabilização do recebimento por parte do VANT explica o comportamento das curvas nos gráficos de EC, Figura 7, uma vez que essa é dada pela equação 1. Para ambas as distribuições o comportamento das curvas de EC foi semelhante.

As curvas de backoffs do experimento 2, Figura 8, são bastante proporcionais às curvas de envios de frames pelos nodos sensores. Diferentemente do que ocorre no experimento 1, as curvas de backoff do experimento 2 não tendem ao crescimento, mas à estabilidade. Esse comportamento também pode ser explicado pela quantidade fixa de nodos e pelas diferentes proporções desses requisitados simultaneamente.

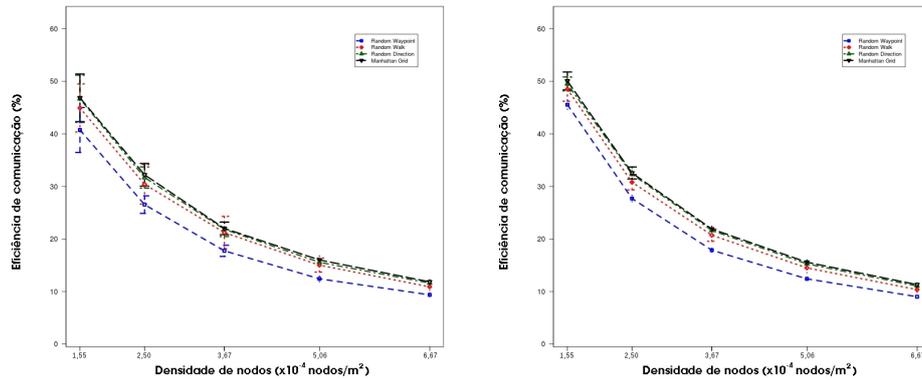


Figura 7. Eficiência de comunicação (EC) para cada modelo de mobilidade no experimento 1, à esquerda com distribuição aleatória dos nodos sensores e à direita com distribuição em grade

Tabela 3. Tabela de número médio de frames enviados pelos nodos sensores nos experimentos 1 e 2

Densidade	Experimento 1				
	1,55	2,50	3,67	5,06	6,67
Distribuição aleatória	22734,03	42530,59	66268,50	92306,97	117350,40
Distribuição em grade	18285,59	38985,78	63620,88	89098,69	115693,80
Densidade	Experimento 2				
	1,55	2,50	3,67	5,06	6,67
Distribuição aleatória	34702,12	52479,62	66268,50	75279,53	83454,47
Distribuição em grade	33086,16	50853,38	63620,88	73820,81	79759,41

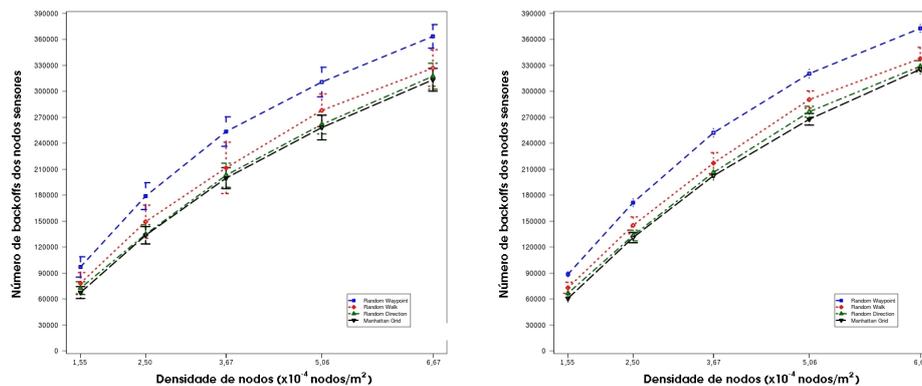


Figura 8. Número de backoffs dos nodos sensores para cada modelo de mobilidade no experimento 2, à esquerda com distribuição aleatória dos nodos sensores e à direita com distribuição em grade

No experimento 2, o comportamento geral das métricas se assemelha com as do experimento 1 com algumas diferenças a serem notadas. Observando os gráficos de frames enviados pelos nodos sensores, Figura 9, nota-se que o envio cresce com o aumento da densidade, porém ao contrário do seu comparativo esse tende à estabilização.

Isso ocorre pelo número de nodos do experimento 2 ser fixo em 66, portanto, com a redução da área uma maior proporção desses nodos passa a estar no alcance do rádio do

Tabela 4. Tabela de número médio de frames recebidos pelo VANT nos experimentos 1 e 2

Densidade	Experimento 1				
	1,55	2,50	3,67	5,06	6,67
Distribuição aleatória	8823,66	10836,03	11294,12	11025,75	10577,50
Distribuição em grade	8328,06	10794,94	11361,91	11055,41	10415,47
Densidade	Experimento 2				
	1,55	2,50	3,67	5,06	6,67
Distribuição aleatória	10036,00	10957,03	11294,12	11595,84	11640,94
Distribuição em grade	9886,44	10862,06	11361,91	11419,84	11623,72

VANT, elevando o número de nodos sensores requisitados pelo VANT e o consequente aumento do número de envios. O limite superior do número de envios pelos nodos sensores é o somatório do número de envios máximo de cada nodo no experimento em um mesmo período.

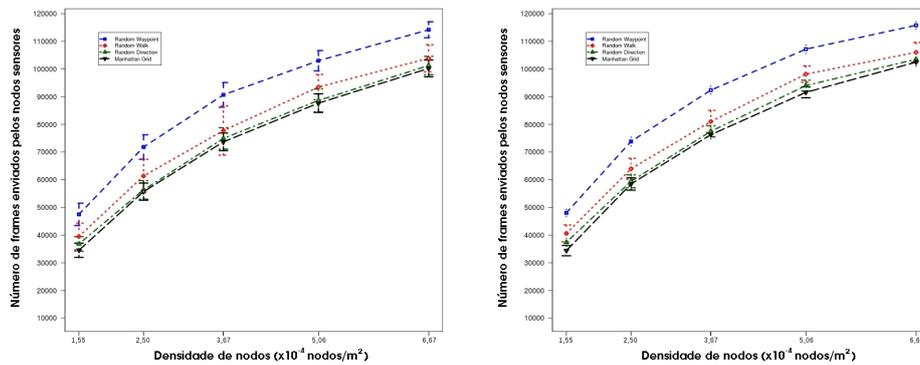


Figura 9. Número de frames enviados pelos nodos sensores para cada modelo de mobilidade no experimento 2, à esquerda com distribuição aleatória dos nodos sensores e à direita com distribuição em grade

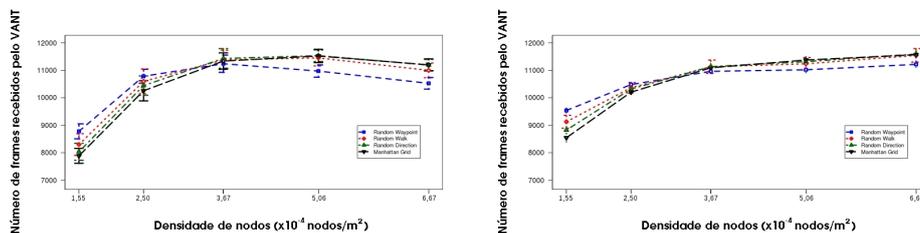


Figura 10. Número de frames recebidos pelo VANT para cada modelo de mobilidade no experimento 2, à esquerda com distribuição aleatória dos nodos sensores e à direita com distribuição em grade

Observando as curvas dos gráficos de recebimento de frames pelo VANT no experimento 2 (Figura 10), nota-se que tais curvas são crescentes entre $1,55 \times 10^{-4}$ e $3,67 \times 10^{-4} \text{ nodos}/m^2$. A partir de $3,67 \times 10^{-4} \text{ nodos}/m^2$ as curvas passam a ter crescimento mais baixo, ficando na ordem de 11000 frames recebidos, como evidenciado em “Experimento 2” da Tabela 4, a mesma ordem de recebimentos limitante do experimento 1, o que indica uma saturação da capacidade de recebimentos de frames pelo

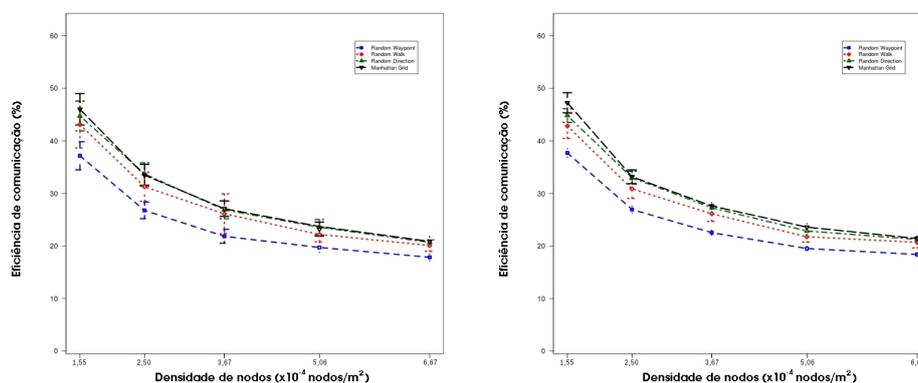


Figura 11. Eficiência de comunicação (EC) para cada modelo de mobilidade no experimento 2, à esquerda com distribuição aleatória dos nodos sensores e à direita com distribuição em grade

VANT também no experimento 2. Diferentemente do experimento 1, o número de frames enviados não foi suficiente para causar perdas significativas por interferência. No caso mais claro, em $6,67 \times 10^{-4} \text{ nodos}/\text{m}^2$, o número médio de envios foi em torno de 7×10^4 e o de recebimentos foi próximo de $1,1 \times 10^4$

As curvas de EC do experimento 2, figura 11 são parecidas com as do experimento 1, devido às semelhanças das outras métricas. Contudo, em um extremo, a diferença das médias das curvas de EC dos experimentos 1 e 2 para $1,55 \times 10^{-4} \text{ nodos}/\text{m}^2$ é de 12.91%, sendo o experimento 1 com maior média. Já no outro extremo, $6,67 \times 10^{-4} \text{ nodos}/\text{m}^2$, a diferença é de 5.26%, sendo o experimento 2 com maior média. O que significa que a EC decai mais com o aumento do número de nodos do que com a variação da área do cenário para as mesmas densidades de nodos no modelo utilizado.

Tabela 5. Tabela da média da EC dos experimentos 1 e 2

Densidade	Experimento 1					Experimento 2				
	1,55	2,50	3,67	5,06	6,67	1,55	2,50	3,67	5,06	6,67
Distrib. aleatória	39,24	25,56	17,09	11,96	9,02	29,08	20,94	17,09	15,42	13,96
Distrib. grade	45,56	27,70	17,86	12,41	9,00	29,90	21,37	17,86	15,47	14,58

5.1. Comparação dos Modelos de Mobilidade

A seguir são comparados os modelos de mobilidade a fim de encontrar o mais recomendado para aplicação de insumos em agricultura de precisão.

O modelo Random Walk teve desempenho intermediário dentre os modelos. Em ambos os experimentos sua EC não apresentou destaques positivos ou negativos, tendo sempre no mínimo um outro modelo com EC superior e com EC inferior a sua.

O modelo Random Waypoint teve comportamento diferente dos outros três modelos comparados. Apresentou alta taxa de envio pelos nodos sensores e, decorrente disso, um elevado número de backoffs. O recebimento de frames pelo VANT foi maior do que nos demais modelos em baixas densidades e mais baixo em densidades mais altas. O desempenho da eficiência de comunicação cai em ambos os experimentos para as duas

distribuições com a elevação da densidade. A EC é constantemente inferior aos demais modelos devido ao semelhante recebimento de frames e o elevado envio de frames.

Os modelos Random Direction e Manhattan Grid tiveram desempenho em geral muito semelhante. Ambos apresentaram números de envios pelos nodos sensores relativamente baixos, entretanto com menor redução da taxa de envio pela elevação de densidade. Os números de backoffs desses modelos foram proporcionais aos seus números de envios, adequadamente ao comportamento das curvas. O número de frames recebidos dos modelos Random Direction e Manhattan Grid têm um desempenho inferior aos demais modelos em densidades mais baixas e superior em densidades mais altas. Assim, visto as proximidades das métricas, ambos os modelos tem desempenho semelhante.

Os modelos Random Direction e Manhattan Grid diferem muito na forma de trajeto que realizam, como exposto em 2.2.1 o modelo Random Direction tem movimentação errática pelo cenário, enquanto o modelo Manhattan Grid se movimenta seguindo um padrão de grade, esse padrão de movimentação é muito mais manipulável para uso em aplicação de insumos agrícolas devido a possibilidade de maior controle oferecida.

Desse modo, o modelo de mobilidade mais indicado para o uso em aplicação de insumos em agricultura de precisão é o modelo Manhattan Grid, por apresentar uma EC alta comparada aos outros modelos testados e padrão de mobilidade em grade. O melhor tipo de distribuição de nodos é o em grade por apresentar, em geral, maior EC do que a distribuição aleatória.

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste artigo foram apresentados resultados de simulações de comunicação sobre um modelo de RSSF com DM com o objetivo de encontrar o modelo de mobilidade que apresentasse melhor EC entre nodos sensores e DM. Baseado nos gráficos de EC, pode-se concluir que o modelo de mobilidade com melhor desempenho e mais adequado para o caso é o Manhattan-Grid, uma vez que, em geral, teve a melhor curva de eficiência de comunicação e apresenta mobilidade em grade, que oferece maior possibilidade de controle. Também pode-se concluir que a melhor disposição dos nodos é em grade uma vez que a média da EC nessa distribuição variou entre 0,3% e 3,57% a mais que seus comparativos de distribuição aleatória, além de oferecer maior controle da disposição dos nodos. Como trabalho futuro é indicado o desenvolvimento de uma abordagem de definição de caminho que otimize a rota do VANT durante a pulverização de insumos.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP, CNPq e INCT-SEC, processos 573963/2008-9 e 08/57870-9 pelo apoio a este trabalho.

8. Referências

Referências

Aschenbruck, N., Ernst, R., Gerhards-Padilla, E., and Schwamborn, M. (2010). Bonn-motion: a mobility scenario generation and analysis tool. In *Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques, SIMUTools '10*, pages 51:1–51:10, ICST, Brussels, Belgium, Belgium. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).

- Burrell, J., Brooke, T., and Beckwith, R. (2004). Vineyard computing: sensor networks in agricultural production. *Pervasive Computing, IEEE*, 3(1):38 – 45.
- Camilli, A., Cugnasca, C. E., Saraiva, A. M., Hirakawa, A. R., and Corrêa, P. L. (2007). From wireless sensors to field mapping: Anatomy of an application for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 58(1):25 – 36. Precision Agriculture in Latin America.
- Camp, T., Boleng, J., and Davies, V. (2002). A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2(5):483–502.
- Costa, F., Ueyama, J., Braun, T., Pessin, G., Osorio, F., and Vargas, P. (2012). The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor network in agricultural applications. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International*, pages 5045 –5048.
- De Freitas, E., Heimfarth, T., Netto, I., Lino, C., Pereira, C., Ferreira, A., Wagner, F., and Larsson, T. (2010). Uav relay network to support wsn connectivity. In *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2010 International Congress on*, pages 309 –314.
- Díaz, S. E., Pérez, J. C., Mateos, A. C., Marinescu, M.-C., and Guerra, B. B. (2011). A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2):252 – 265.
- Lee, W., Alchanatis, V., Yang, C., Hirafuji, M., Moshou, D., and Li, C. (2010). Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(1):2 – 33.
- Matese, A., Gennaro, S. D., Zaldei, A., Genesio, L., and Vaccari, F. (2009). A wireless sensor network for precision viticulture: The nav system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 69(1):51 – 58.
- Shah, R. C., Roy, S., Jain, S., and Brunette, W. (2003). Data mules: modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 1(2-3):215 – 233. Sensor Network Protocols and Applications.
- Sugihara, R. and Gupta, R. K. (2011). Path planning of data mules in sensor networks. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 8(1):1:1–1:27.
- Varga, A. (1999). Using the omnet++ discrete event simulation system in education. *Education, IEEE Transactions on*, 42(4):11 pp.
- Vilela, M. and Araujo, R. (2012). Rahmon: Routing algorithm for heterogeneous mobile networks. In *Critical Embedded Systems (CBSEC), 2012 Second Brazilian Conference on*, pages 24 –29.