

# Controle de Potência de Transmissão para Redes de Sensores em Cenários com Obstáculos

Sergio Kostin<sup>1,2</sup>, Claudio L. Amorim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Seção de Engenharia de Sistemas - Instituto Militar de Engenharia

<sup>2</sup>Programa de Engenharia de Sistemas e Computação (COPPE/UFRJ)

{kostin, amorim}@cos.ufrj.br

***Abstract.** The control of transmit power (TP) level in Wireless Sensor Networks (WSN) is aggravated in scenarios with obstacles due to multipath interference and limited range of the electromagnetic propagation. In this work, we developed a method that enables the TP control of each sensor node to also consider such phenomena. Through detailed simulation of a WSN deployed in a scenario of multiple offices, we showed the potentials of our method to better tuning of TP controls. Specifically, it enabled the TP control of each node to identify suitable TP for specific connectivity according to densities of WSN, and lowest TP level for overcoming propagation barriers, providing considerable time and energy savings for the sensor nodes.*

***Resumo.** O controle de potência de transmissão (CPT) em redes de sensores sem fio (RSSF) é agravado em cenários com obstáculos devido à interferência por multipercurso e ao alcance efetivo da propagação eletromagnética. Neste trabalho, nós desenvolvemos um método que permite o CPT de cada nó sensor considerar tais fenômenos. Através de simulação detalhada de uma RSSF colocada num cenário de múltiplos escritórios, mostramos o potencial de nosso método em escolher as potências de transmissão mais adequadas para alcançar desejados graus de conectividade segundo a densidade da RSSF e o nível mínimo de potência para superar barreiras de propagação, proporcionando economia de tempo e energia para os nós sensores.*

## 1. Introdução

Nos últimos anos, o desenvolvimento de redes de sensores sem fio (RSSF) estabeleceu um novo modelo de coleta e disseminação de informação com enorme potencial para novas aplicações em diversas áreas de monitoramento ambiental, na construção dos denominados ambientes inteligentes orientados para hospitais, edifícios e campi universitários, entre outras. Os elementos das RSSF são caracterizados como nós sensores, que possuem processador, memória, bateria e transceptor.

Entretanto, um dos principais problemas enfrentados para a utilização eficaz de RSSF é a limitada capacidade de energia das baterias dos nós sensores. Essa restrição tornou imperativo que cada nó sensor exerça um controle efetivo do nível de potência de transmissão de forma a garantir a conectividade da rede pelo máximo de tempo. Porém, minimizar o consumo de energia ao mesmo tempo em que se tenta maximizar o desempenho da comunicação sem fio são dois objetivos conflitantes que influenciam muitos aspectos da operação da rede [Kawadia 2005]. De fato, na camada física, afeta a qualidade do enlace e a relação Sinal-Ruído (SNR) que por sua vez influencia também o

correto funcionamento da camada de acesso ao meio. Na camada de rede, o nível de potência contribui para a descoberta de rotas, devido ao seu relacionamento direto com o alcance de transmissão. Na camada de transporte, a definição inadequada de níveis de potência pode causar congestionamento se for mal utilizada. Em suma, a escolha do nível de potência afeta a conectividade da rede [Xue 2003] e, conseqüentemente, a sua capacidade de transmissão.

Neste trabalho desenvolvemos um método original que permite o controle eficiente da potência de transmissão para aplicações de *RSSF* em cenários com obstáculos. É importante notar que a ocupação do cenário, bem como o conhecimento da área de atuação é parte fundamental do planejamento da instalação de uma *RSSF*. Esta ocupação pode ser aleatória, planejada ou se caracterizar por densidade de probabilidade específica [Loureiro 2003]. Assim nosso método se utiliza primeiro do fato comum a esses cenários que é possível se dispor, a priori, do seu mapa temático [Dent 1985], doravante denominado Mapa de Distribuição Espacial Probabilística (MDEP). Este MDEP contém informações concernente à propagação eletromagnética e à distribuição probabilística de transmissores e receptores no cenário com obstáculos. Segundo, o método apresenta duas métricas estatísticas originais formuladas matematicamente que permitem expressar quantitativamente para um dado MDEP, as características de ocupação e propagação do terreno em que a *RSSF* será empregada.

Para demonstrar o potencial do controle eficiente da potência de transmissão proposto, testamos a nosso método utilizando simulações detalhadas de propagação eletromagnética em um cenário de escritórios. Os resultados obtidos mostraram que o método proposto permitiu a identificação de perfis de potência de transmissão, potências mínimas para atravessar obstáculos, bem como os níveis mínimos de potências de transmissão que quando atingidos permitiram aos transceptores cobrir todo o cenário. Esses resultados preliminares mostram que os transceptores de uma rede de sensores podem se beneficiar das métricas propostas para ajustarem eficientemente o nível de potência de transmissão de acordo com o cenário em que forem empregados de forma a estender a vida útil de suas baterias e a conectividade da *RSSF*. Em resumo, este artigo apresenta as seguintes contribuições: propor e avaliar métricas formuladas matematicamente para o controle eficiente de potência de transmissão em cenários de *RSSF* com obstáculos, considerando atenuação e interferência por multipercurso; desenvolver um método de utilização dessas métricas; e demonstrar os potenciais benefícios que o método oferece e, em particular, a economia de energia que o uso dele permite até mesmo para um cenário simples de um conjunto de escritórios.

O restante deste trabalho está dividido da seguinte forma. Na seção 2 apresentamos os trabalhos relacionados. Na seção 3, definimos as métricas de suporte ao método. Na seção 4, simulamos a utilização do método para um cenário-teste, analisando os resultados obtidos e demonstramos os potenciais benefícios do uso da técnica. Por fim, na seção 5, apresentamos nossas conclusões e trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos relacionados

A maioria dos trabalhos de controle de potência encontrados na literatura [Kawadia 2005] adota uma das três seguintes estratégias. Na primeira, empregam-se modelos de roteamento que poupam energia (*Power-Aware Routing*) segundo um algoritmo do menor caminho, em geral o *Bellman-Ford* distribuído [Li 2001]. Na segunda, modificam-se a camada de acesso ao meio, com base na realimentação do sistema, de forma que os nós transmitam em níveis menores de potência [Pires 2005, Correia 2006].

Na terceira, como a adotada neste trabalho, procura-se encontrar uma potência ótima para controlar as propriedades de conectividade de toda ou parte de uma rede [Kawadia 2005].

Os trabalhos mais próximos ao deste artigo focam em modelagem de propagação eletromagnética por computador, planejamento da instalação de RSSF e simulação de redes. Entretanto, não encontramos nenhum trabalho que proponha ou utilize métricas padronizadas que auxiliem o controle de potência de transmissão em RSSF com obstáculos, e menos ainda métricas que levassem em consideração aspectos de propagação, ocupação do terreno e características específicas do cenário como o que propomos neste artigo.

A propagação eletromagnética modelada por computador foi estudada utilizando-se desde modelos analíticos e elementares de traçado de raios (*ray-tracing*), até modelos mais sofisticados denominados *Site Specific Propagation* (SISP) [Seidel 1994, Neskovic 2000]. SISP são modelos baseados na análise de toda radiação eletromagnética existente entre o transmissor e o receptor, levando em conta a reflexão, difração e dispersão. Porém, SISP requer dados exatos do ambiente de operação. [Rappaport 2002] afirma que, futuramente, os sistemas de comunicação sem fio serão implementados utilizando ferramentas computacionais determinísticas, ao invés de modelos de predição estatística.

Os programas de simulação de redes trabalham com uma realidade restrita do cenário utilizado pelas redes. Parte significativa dos trabalhos considera cenários planos, rádios de alcances idênticos, simetria das telecomunicações (transmissão e recepção), onde a potência do sinal é uma simples função da distância. [Cavilla 2004, Zhou 2004, Souley 2005] mostram que a simplificação da camada física diminui significativamente o impacto dos resultados que utilizam esses modelos mais simples de propagação. Em contraposição, o presente trabalho segue a tendência de se considerar a maior complexidade dessa camada física, em especial, os efeitos dos obstáculos em cenários de RSSF.

Os simuladores de redes de comunicação mais utilizados [Kurkowski 2004] são o Network Simulator (NS-2) [ns2 2006] e o GlomoSim [glomosim 2006]. Ambos não permitem a inserção de cenários específicos [Cavilla 2004]. Para a simulação, não basta o cálculo das perdas médias de propagação, de modo que o modelo de perda de percurso incorpora uma variável aleatória assumida com distribuição log-normal (normal em dB). Nestes simuladores, os únicos parâmetros ajustáveis são o índice de decaimento da potência com a distância e o desvio padrão da perda.

Aspectos referentes ao desvanecimento por multipercurso voltado para RSSF tem sido recentemente abordados [Puccinelli 2006]. Trabalhos mais recentes tendem a descrever cenários mais realísticos, com a incorporação de obstáculos aos simuladores [Dicrot 2004, Souley 2005]. No aspecto de simulação, esses são os trabalhos que mais se aproximam do nosso. Porém, diferentemente desses, propomos e avaliamos novas métricas para o controle de potência de transmissão nesses cenários que efetivamente contabilizam o efeito da interferência por multipercurso.

### 3. Método para Controle Eficiente de Potência de Transmissão

Nosso método para controle eficiente de potência baseia-se em duas métricas, a Taxa de Bloqueio (*TB*) e a Taxa de Utilização (*TU*), que quantificam a porcentagem média da: emissão eletromagnética que foi bloqueada, a que foi irradiada para fora do cenário, a

que foi prejudicada por interferência por multipercurso, e a que foi efetivamente aproveitada para transmissão em relação à propagação total.

### 3.1. Perfil de ocupação do cenário

Para se calcular  $TB$  e  $TU$  é necessário que o cenário seja conhecido a priori e para o qual possa ser construído o MDEP dos nós sensores que comporão a rede. O princípio por trás de MDEPs é que equipamentos de computação móvel dentro de uma área tendem a formar um perfil de ocupação. Por exemplo, pedestres normalmente caminham em calçadas, praças públicas, jardins e parques. Carros circulam em ruas, avenidas e estradas. Assim, de acordo com as características de ocupação do cenário, é possível elaborar um modelo probabilístico de ocupação deste pelos dispositivos de telecomunicações que nele operem. Detalhes adicionais sobre MDEPs são encontrados em [Kostin 2004].

### 3.2. Taxa de Bloqueio ( $TB$ )

A Figura 1(a) ilustra uma situação típica onde um dado obstáculo é capaz de bloquear o sinal eletromagnético de um transmissor  $t$ , estabelecendo quatro áreas distintas em relação à qualidade de recepção do sinal: a área de receptores,  $AR$ ; a área de cobertura teórica não contida em  $AR$ ; a área de cobertura teórica contida em  $AR$ , porém bloqueada pelos obstáculo ( $E_b$ ); e a área não bloqueada ( $E_{nb}$ ). Conceitualmente, de forma simplificada,  $TB$  expressa a razão entre ( $E_b$ ) e a soma ( $E_b$ ) + ( $E_{nb}$ ).

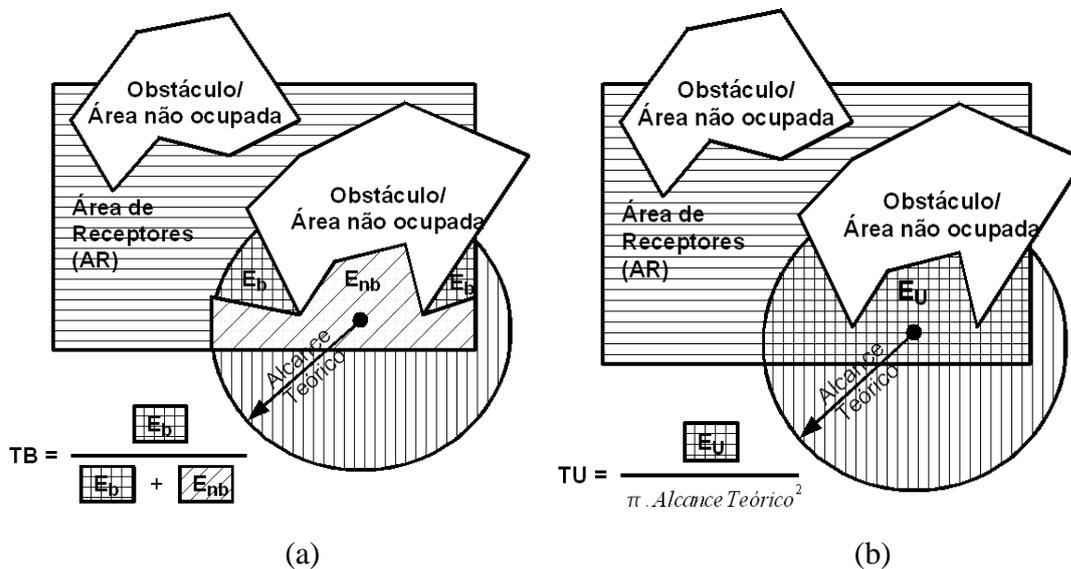


Figura 1 - Taxa de Bloqueio ( $TB$ ) e Taxa de Utilização ( $TU$ )

Formalmente,  $TB$  para uma determinada classe de transmissores, localizada na posição  $s$  e aplicando determinada potência de transmissão  $pw_i$ ,  $TB(t(s, pw_i))$ , é definida pela Equação 1:

$$TB(t(s, pw_i)) = \frac{\sum_{x \in AR} P(r_j(x)|t(s)) \cdot B_{CA}(t(s, pw_i), r_j(x))}{\sum_{x \in AR} P(r_j(x)|t(s)) \cdot B_{SA}(t(s, pw_i), r_j(x))} \quad (1)$$

$AR$  é a região onde os receptores podem estar localizados ( $x \in AR$ ).

O numerador  $P(r_j(x)|t(s))$  representa a probabilidade condicionada de um

receptor do tipo  $j$ ,  $r_j$ , ser encontrado na localização  $x$ ,  $r_j(x)$ , dado que um transmissor tipo  $t$  está na localização  $s$  ( $t(s)$ ). Serve, entre outros fatores, para acomodar condições de agrupamento de nós sensores (quando estes tendem a ficar próximos, formando agrupamentos [kawadia 2005]), quanto das de afastamento (quando os nós pressupõe uma distância mínima entre eles).

O símbolo  $r_j$  representa o tipo de receptor existente no cenário. No cálculo da métrica, deve-se considerar ganhos de transmissão e recepção (considerando seus ângulos de incidência) e a sensibilidade do equipamento.

A função  $B$  verifica a interação entre a transmissão emitida por  $t(s, pw_i)$  (transmissor  $t$ , localizado na posição  $s$ , emitindo com uma potência  $pw_i$ ) e  $r_j(x)$  (receptor  $r_j$  na posição  $x$ ), considerando ou não a atenuação que os obstáculos provocam no sistema. Os sub-índices  $CA$  e  $SA$  da função  $B$  significam “Com Atenuação” e “Sem Atenuação”.

$B_{CA} \in \{-1, 0, 1\}$ .  $B_{CA}$  retorna 0 caso o receptor destino ( $r_j(x)$ ) esteja dentro do alcance teórico e for alcançado pelo transmissor quando este aplica a potência  $pw_i$  e a interferência por multipercurso não possui nível suficiente para prejudicar a transmissão.  $B_{CA}$  retorna 1 caso o ponto destino ( $r_j(x)$ ) estiver dentro do alcance teórico, mas devido aos obstáculos, sua conexão é interrompida ou a taxa de erro decorrente do multipercurso é incompatível para a recepção.  $B_{CA}$  retorna  $-1$  quando o receptor originalmente não recebia o sinal, mas devido à configuração dos obstáculos permite que seja alcançado. Isto ocorre, por exemplo, em edificações com corredores [Porrat 2004].

$B_{SA} \in \{0, 1\}$ . A função  $B_{SA}$  considera os obstáculos existentes no cenário, ignorando os fenômenos de propagação, e retornando 1 para todos os receptores localizados em  $x$ ,  $r_j(x)$ , que estão dentro do alcance teórico de  $t(s, pw_i)$  e zero para os demais casos, ou seja, pontos que estejam dentro dos obstáculos ou além do alcance teórico.

Calculamos  $TB$  para uma determinada Área de Transmissores ( $AT$ ), que representa a região onde os transmissores estão localizados, computando-se a média ponderada (considerando o peso de cada nó sensor estar na posição  $s$ ) de todas as  $TB(t(s, pw_i))$ , conforme a Equação 2. São também agregadas informações estatísticas, especialmente desvio padrão, mediana, média, valores máximo e mínimo.

$$TB(AT, t(pw_i)) = \frac{\sum_{s \in AT} P(t(s)) \cdot TB(t(s, pw_i))}{\sum_{s \in AT} P(t(s))} \quad (2)$$

### 3.3. Taxa de Utilização ( $TU$ )

A Taxa de Utilização ( $TU$ ), ilustrada na Figura 1(b), expressa a razão entre a área teórica de cobertura do transmissor contida na área de receptores alcançada pelo transmissor, excluindo-se a área de obstáculos e outras regiões sem receptores do sinal, e a área teórica de cobertura propriamente dita. Consideramos, assim, apenas aspectos de propagação com a distância, desprezando demais efeitos eletromagnéticos.

A  $TU$  de uma determinada classe de transmissores  $t$ , localizada na posição  $s$  e aplicando uma potência de transmissão  $pw_i$ ,  $TU(t(s, pw_i))$ , é dada pela Equação 3:

$$TU(t(s, pw_i)) = \frac{\sum_{x \in AR} U_{CO}(t(s, pw_i), r_j(x))}{\sum_x U_{SO}(t(s, pw_i), r_j(x))} \quad (3)$$

A função  $U$  verifica a interação entre a área de cobertura teórica e os obstáculos do cenário. Os sub-índices  $CO$  e  $SO$  da função  $U$  significam “Com Obstáculos” e “Sem Obstáculos”.

$U_{CO} \in \{0, 1\}$ . A função  $U_{CO}$  verifica a interação entre a transmissão emitida por  $t(s, pw_i)$  (transmissor  $t$ , emitindo com uma potência  $pw_i$ ) e  $r_j(x)$  (receptor  $r_j$  na posição  $x$ ), considerando os obstáculos do cenário.  $U_{CO}$  retorna 1 quando o receptor  $r_j$  estiver dentro da área de alcance teórico e 0, caso contrário.

$U_{SO} \in \{0, 1\}$ . A função  $U_{SO}$  quantifica a quantidade de pontos que está dentro do alcance teórico considerando a sensibilidade do receptor  $r_j$ , retornando 1 quando está dentro da área de cobertura e 0 caso contrário. Este denominador é a área teórica (simplificada) de cobertura referente à emissão de potência  $pw_i$ .

Com  $TU$  calculada para cada localização, à semelhança de como foi feito com  $TB$ , computa-se o valor médio da  $TU(AT, t(pw_i))$ , ou seja,  $TU$  para a região  $AT$ , considerando a potência  $pw_i$ , conforme a Equação 4.

$$TU(AT, t(pw_i)) = \frac{\sum_{s \in AT} U_{CO}(t(s), pw_i)}{\sum_{s \in AT} 1} = \frac{\sum_{s \in AT} U_{CO}(t(s), pw_i)}{\text{somatório de } s \in AT} \quad (4)$$

A intenção da  $TU$  é computar a área de aproveitamento efetivo da propagação, não sendo necessário computar a probabilidade específica do receptor (exceto nos casos onde este é igual a zero, o que pode ser também um obstáculo). A probabilidade de ocupação espacial de cada receptor já é considerada no cálculo da  $TB$ , tornando-se desnecessário (e equivocado) aplicar-se novamente este ponderador. As mesmas informações estatísticas referentes à  $TB$  são agregadas à métrica  $TU$ .

## 4. Simulação

Nesta seção avaliaremos os benefícios que as métricas  $TB$  e  $TU$  oferecem ao método de controle de potência de transmissão tradicional. Mais especificamente, simulamos uma hipotética RSSF em ambiente fechado, calculando  $TB$  e  $TU$ , e utilizando os resultados para determinar as potências de transmissão mais eficientes.

### 4.1. Simulação de Propagação Eletromagnética em Cenários com Obstáculos

Desenvolvemos uma ferramenta SISP por traçado de raios (método das imagens) [Valenzuela 1994], denominada *Zerkalo* (espelho em russo), que simula a propagação eletromagnética em um cenário. Os fenômenos eletromagnéticos atualmente presentes no software, além da propagação no espaço livre, são a reflexão e a refração. O software calcula a interferência positiva que ocorre nos entre as componentes de multipercursos no cenário, e pode ser configurado para realizar considerar reflexões de qualquer ordem. A complexidade do algoritmo que calcula a propagação é  $O(n^r)$ , onde  $r$  é a ordem da reflexão utilizada e  $n$  é o número de obstáculos do cenário. As informações obtidas de *Zerkalo* são utilizadas no cálculo da  $TB$  e da  $TU$ .

*Zerkalo* computa a perda de espaço livre e mais as perdas e alterações de fase do sinal que ocorrem nas reflexões e refrações (com base nos coeficientes de Fresnel), à

medida que a onda se propaga pelo cenário. O software assume a chamada “*hipótese faixa-estreita*” para o sinal que se propaga, ou seja, assume um sinal com conteúdo espectral estreito o suficiente ao redor da portadora (dezenas ou centenas de kHz, dependendo das condições) para que o desvanecimento por multipercursos possa ser considerado plano [Rappaport 2002]. Os pontos mais afetados por este tipo de desvanecimento são aqueles próximos de paredes e, especialmente, os localizados em cantos [Puccinelli 2006]. *Zerkalo* utiliza a biblioteca de computação geométrica CGAL 3.2.1 [cgal 2006]. A CGAL, além de permitir realizar operações de interação entre figuras geométricas, possui recursos de mapeamento espacial de objetos, o que permitiu a otimização do código, no caso de muitos obstáculos.

#### 4.2. Cálculo da $TB$ e da $TU$ para um cenário-teste

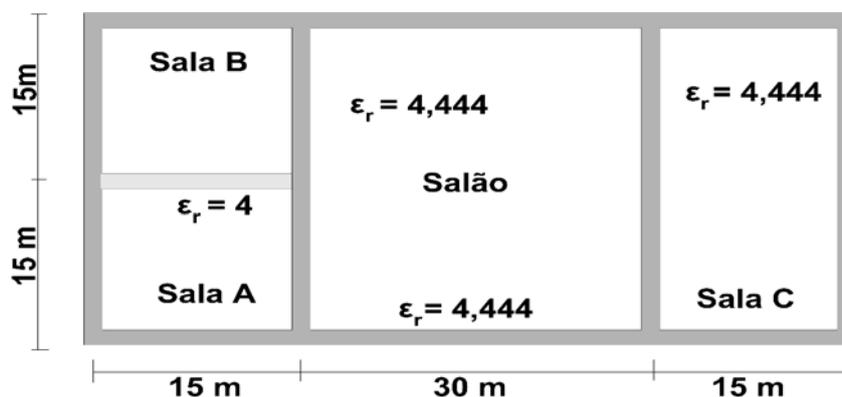


Figura 2 – Cenário-teste para obtenção da  $TU$  e da  $TB$

Tabela 1 - Dados da  $TU$  e da  $TB$  para a sala A do cenário teste

$P_w$	Alcance (m)	$TU$	$\sigma(TU)$	Área $m^2$	$TB$	$\sigma(TB)$	$TB'$	$TB''$	$TBMP$	$\sigma(TBMP)$	$TBMP/TB$
-20	3,1	0,873	0,171	26	0,030	0,072			0,034	0,075	1,133
-18	3,9	0,841	0,189	40	0,039	0,085	0,009		0,056	0,098	1,436
-16	5,0	0,807	0,193	63	0,053	0,101	0,014	0,005	0,078	0,116	1,472
-14	6,2	0,750	0,191	91	0,068	0,102	0,015	0,001	0,113	0,118	1,662
-12	7,9	0,686	0,185	134	0,090	0,117	0,022	0,007	0,146	0,130	1,622
<b>-10</b>	9,9	0,616	0,157	190	0,111	0,114	0,021	<b>-0,001</b>	0,187	0,124	1,685
-8	12,5	0,524	0,118	257	0,154	0,109	0,043	0,022	0,259	0,106	1,682
-6	15,7	0,419	0,083	324	0,224	0,086	0,070	0,027	0,333	0,075	1,487
-4	19,8	0,314	0,046	387	0,288	0,040	0,064	-0,006	0,384	0,069	1,333
<b>-2</b>	24,9	0,222	0,014	432	<b>0,269</b>	0,095	<b>-0,019</b>	<b>-0,083</b>	<b>0,366</b>	0,124	1,361
<b>0</b>	31,3	0,146	0,001	449	<b>0,167</b>	0,117	<b>-0,102</b>	-0,083	<b>0,286</b>	0,153	1,713
<b>2</b>	39,4	0,104	0,015	507	<b>0,144</b>	0,120	<b>-0,023</b>	0,079	<b>0,291</b>	0,148	2,021
4	49,6	0,097	0,015	749	0,388	0,100	0,244	0,267	0,506	0,083	1,304
<b>6</b>	62,5	0,073	0,000	895	<b>0,501</b>	0,002	0,113	<b>-0,131</b>	<b>0,595</b>	0,050	1,188
<b>8</b>	78,6	0,046	0,000	900	<b>0,496</b>	0,011	<b>-0,005</b>	-0,118	<b>0,592</b>	0,048	1,194
<b>10</b>	99,0	0,029	0,000	900	<b>0,402</b>	0,092	<b>-0,094</b>	-0,089	<b>0,523</b>	0,093	1,301
12	124,6	0,018	0,000	900	0,141	0,105	-0,261	-0,167	0,358	0,126	2,539
<b>14</b>	156,9	0,012	0,000	900	0,027	0,058	-0,114	0,147	<b>0,296</b>	0,095	<b>10,963</b>
<b>16</b>	197,5	0,007	0,000	900	0,025	0,059	-0,002	0,112	<b>0,295</b>	0,094	<b>11,800</b>
<b>18</b>	248,7	0,005	0,000	900	0,018	0,040	-0,007	-0,005	<b>0,291</b>	0,090	<b>16,167</b>

Considere a configuração de um conjunto de escritório com obstáculos mostrada na Figura 2. O conjunto é composto de 3 salas e um salão. A divisória de vidro de 2 cm que separa as salas A e B possui permissividade relativa igual a 4, sendo que os demais obstáculos do cenário-teste são paredes de tijolos de 15 cm de espessura com permissividade relativa igual a 4,444 [Rappaport 2002].

No cenário-teste da Figura 2, por hipótese, o salão tem uma densidade ocupacional igual a 0 sensor por metro quadrado, o que pode ser interpretado como se fosse um corredor de passagem. As salas A, B e C compartilham uma RSSF.

**Tabela 2 – Número de nós sensores alcançados - Média, Pior e Melhor caso**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Pw dBm	TU. (1-TB) (med) (2)	$\sigma$ (TU(1-TB)) (3)	(3)/(2)	PC	MC	PCE	MCE	MP med	$\sigma$ (MP)	(10)/(11)	PC MP	MC MP	PC MPE	MC MPE
<b>-20</b>	<b>24</b>	<b>5</b>	<b>0,21</b>	14	34	10	28	<b>24</b>	5	<b>0,21</b>	14	34	<b>10</b>	<b>28</b>
-18	35	8	0,23	19	51	14	44	35	9	0,26	17	53	10	44
-16	52	13	0,25	26	78	21	68	51	14	0,27	23	79	14	68
-14	83	21	0,25	41	125	36	120	80	24	0,3	32	128	24	120
<b>-12</b>	118	31	0,26	56	180	55	192	112	34	0,3	44	<b>180</b>	34	<b>192</b>
<b>-10</b>	161	33	0,2	95	227	84	220	<b>149</b>	40	0,27	69	229	48	213
-8	211	27	0,13	157	265	134	256	187	39	0,21	109	265	77	246
<b>-6</b>	247	29	<b>0,12</b>	189	305	199	314	214	38	<b>0,18</b>	138	290	117	285
-4	273	43	0,16	187	359	223	374	238	51	0,21	136	340	134	343
-2	316	56	0,18	204	428	230	433	275	66	0,24	143	407	140	399
<b>0</b>	374	53	0,14	268	480	270	449	321	68	0,21	<b>185</b>	457	<b>160</b>	426
<b>2</b>	<b>428</b>	27	0,06	374	482	349	449	<b>354</b>	56	0,16	242	466	196	430
<b>4</b>	<b>448</b>	3	0,01	442	454	431	449	<b>363</b>	46	0,13	271	455	238	430
<b>6</b>	<b>449</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	445	453	437	449	<b>364</b>	<b>45</b>	<b>0,12</b>	274	454	243	430
<b>8</b>	<b>453</b>	10	0,02	433	473	441	492	<b>367</b>	43	0,12	281	453	243	430
10	538	83	0,15	372	704	449	746	428	83	0,19	262	594	243	587
12	772	94	0,12	584	960	573	899	578	114	0,2	350	806	305	772
<b>14</b>	875	52	0,06	771	979	690	899	<b>633</b>	85	0,13	463	803	409	779
<b>16</b>	876	53	0,06	770	982	690	899	<b>634</b>	84	0,13	466	802	409	779
<b>18</b>	883	36	0,04	811	955	771	899	<b>637</b>	81	0,13	475	799	442	779

As métricas *TU* e *TB* foram calculadas para nós sensores localizados na sala A e a área de receptores composta pelas salas A, B e C, considerando-se reflexões de até segunda ordem, para transceptores similares (entretanto não idênticos) ao *Bluetooth*, padrão 1.1, classe 1. Consideramos as seguintes hipóteses: os transmissores trabalham com comprimento de onda de 0,122m; a sensibilidade dos receptores para detecção de portadora é da ordem de -70dBm; as antenas são dipolo de meia onda (ganho de 1,64 dB) para transmissão e recepção [Rappaport 2002]. Para efeitos de simplificação, consideraremos que estas antenas estão com seu eixo perpendicular ao solo e sobre o piso da sala, em altura intermediária com relação ao teto, de modo a simular o ambiente em 2D, desprezando a polarização paralela. Em relação ao cenário, o MDEP considera que os receptores têm probabilidade de ocupação homogênea, não privilegia nenhum tipo de receptor, nem localização, exceto o salão, que não tem receptores participando da rede. Consideramos bloqueados os enlaces cuja potência da interferência por multipercursos foi, no máximo, metade da potência da componente do sinal principal. Os

dados obtidos para  $TB$  e  $TU$ , seus desvios padrão, suas primeira e segunda derivadas, bem como a taxa de bloqueio por multipercurso ( $TBMP$ ) estão discriminados na Tabela 1. Os valores em negrito e sublinhados serão referenciados posteriormente.

### 4.3. Cálculo da potência para um determinado grau de conectividade

Suponhamos que temos, a priori, conhecimento da densidade de nós sensores por área. Nós participantes de uma RSSF, no intuito de economizar energia, passam significativa parte de seu tempo de operação em estado *sleep*, prejudicando sistemas baseados em realimentação de dados. Assim, pode-se afirmar, que as comunicações em RSSF baseiam-se em mensagens de difusão [Akyildiz 2002]. Para tal, o conhecimento da densidade pode minimizar esta deficiência.

Pela Figura 1, infere-se que a área útil é igual a multiplicação da  $TU$  pela área de cobertura teórica ( $\pi r^2(pw_i)$ ). Dentro desta área útil, deve-se utilizar apenas a percentagem que não é bloqueada ( $1-TB$ ). Multiplicando todos estes valores pela densidade de nós sensores por área ( $D$ ), obtemos o número médio de nós cobertos (Equação 5).

$$D \cdot \pi r_j^2(pw_i) \cdot TU \cdot (1-TB) = \text{Nr de Sensores Alcançados} \quad (5)$$

Considerando  $TU \cdot (1-TB)$  de cada ponto como variável aleatória, podemos adotar como heurística, a teoria probabilística de estimar 95% dos casos com base no desvio padrão. No caso de uma política onde se busca a conectividade como primeira prioridade, devemos trocar os sinais dos desvios padrões especificados anteriormente. Com essa estratégia, garantimos com 95% de certeza que obteremos o grau de conectividade desejado. Por outro lado, teremos um consumo maior de energia, sendo que este maior nível de potência de transmissão possui um limite inteligente. O número médio de nós alcançados para cada potência, bem como o mínimo e máximo estão especificados na Tabela 2. A segunda coluna representa o produto  $\pi r^2(pw_i) \cdot TU \cdot (1-TB)$ . A terceira representa o desvio padrão desta variável aleatória. A quarta coluna é a razão entre o desvio padrão e a média. A quinta e a sexta colunas indicam os mínimos e máximos com base naquela heurística. A sétima e a oitava colunas representam o mínimo e o máximo efetivamente encontrados. As demais colunas dizem respeito a mesma abordagem considerando o efeito de interferência por multipercurso (MP)

### 4.4. Discussão

Os dados da Tabela 2 permitem a escolha de potências de transmissão que sejam mais adequadas, de acordo com o grau de conectividade desejado, considerando a política de custo (consumo de bateria) - benefício (conectividade alcançada).

A literatura científica apresenta diversos requisitos associados à conectividade para a operação da rede [Xue 2003, Xing 2005], bem como a densidade da rede [Akyildiz 2002, Loureiro 2003]. Mostramos um caso específico, onde utilizamos a densidade de 1 sensor por metro quadrado. A Tabela 2 pode ser trivialmente modificada para outras densidades de rede, considerando uma distribuição relativamente homogênea dos nós sensores. Por exemplo, se a densidade for de 0,1 nós por metro quadrado, deve-se dividir todas as células da Tabela 2 por 10.

Pode-se também adaptar a Tabela 2 para a porcentagem de tempo que um sensor fica no estado de escuta. Digamos, por hipótese, que os nós ficam, em média, 20% do tempo escutando a rede (considerando não haver sincronismo deste estado). Neste caso,

teríamos que dividir os valores da Tabela 2 por 5. Combinando-se as duas assertivas anteriores, densidade de 0,1 nós por  $m^2$  e 20% de tempo de escuta, dividiríamos os valores da Tabela 2 por 50.

Quando iremos escolher o nível de potência necessário para alcançarmos determinado grau de conectividade, não sabemos nossa posição exata dentro da AT. Os obstáculos podem prejudicar significativamente ou interferir de forma atenuada

As abordagens podem ser classificadas como otimista, pessimista ou adequada. Uma abordagem otimista seria aquela que, com a utilização de um nível de potência mínimo, conseguiríamos ter uma área de cobertura com o grau de conectividade desejado. Neste caso, o nó sensor estaria em um ponto da AT em que a TU é alto e/ou TB é baixo, aumentando o valor da  $TU(1-TB)$ . Em uma analogia com a equação log-normal de perda por percurso, seria o caso quando utilizamos o desvio padrão para decrementar o valor da perda. Já a abordagem pessimista, seria o caso quando o nó sensor pode estar em um ponto da AT onde TU é baixo e/ou TB é alto, diminuindo o valor da  $TU(1-TB)$ , ou seja, quando o ambiente prejudica a conectividade em função da configuração dos obstáculos, conjugado com a posição onde está o nó sensor. Nesta hipótese, seria necessário a aplicação de maiores níveis de potência para manter determinado grau de conectividade. Por fim, a abordagem média (ou adequada) seria aquela onde os pontos da AT que possuem  $TU(1-TB)$  próximo da média (e/ou mediana, não utilizada neste artigo), onde o nível de potência necessário para alcançarmos o grau de conectividade seria maior que a abordagem otimista e menor que a pessimista, contemplando o caso médio (ou mediano).

Pela Tabela 2, analisando o valor médio da  $TU(1-TB)$ , considerando o multipercurso, ele escolheria a potência de transmissão de -10dBm. Em uma abordagem pessimista, para fins de conectividade, a escolha mais adequada seria 0 dBm, e para uma otimista seria -12dBm.

Considere um algoritmo conservador em termos de consumo de energia, onde um nó sensor deseja conectar-se a 3 nós, enviando um *probe* (ou SYNC) com o nível mais baixo de energia disponível (no nosso caso -20dBm), computando o número de respostas recebidas. Denominaremos esta tentativa de *rodada*. Ao final de cada *rodada*, caso não atinja a conectividade desejada, o nó sensor aumentar-se-ia a potência de transmissão, nível a nível (-20 dBm, -18 dBm, -16 dBm, etc.), até se atingir o objetivo desejado. Seja 1 *ue* a unidade de energia gasta em uma transmissão de -20 dBm multiplicada pelo tempo de transmissão de um *probe*. A Equação (6) calcula o total de energia gasto por este algoritmo conservador até que se atinja o grau de conectividade desejado.

$$\sum_{pot=-20dBm}^{-10dBm} (10^{(0.2)^{((20+pot)/10)}}) ue = \sum_{i=0}^{alvo} 1,585^i ue \quad (6)$$

Para alcançarmos o grau de conectividade 3, considerando o caso médio, este algoritmo conservador consumiria um total de 25,387 *ue*, até alcançar o objetivo. Aplicando-se o nosso método, no caso médio, gastaríamos 10 *ue* e apenas uma rodada. O algoritmo conservador gastaria 25,387 *ue* e 6 *rodadas* para alcançar a conectividade desejada, levando em conta apenas o gasto energético do nó sensor mestre. Assim, a aplicação do método permite a economia média de 15,387 *ue* e 5 *rodadas*. A economia é ainda maior se considerarmos a energia gasta pelos nós sensores que enviam a resposta e a ocorrência de eventuais casos de colisão. Aplicando-se a política conservadora do nosso método (-12 dBm = 6,310 *ue*) para a primeira tentativa, ainda

economizariamos 9,078ue e 4 rodadas. Priorizando a conectividade (considerando uma abordagem pessimista), partindo do nível de potência mais alto disponível (18 dBm), o custo inicial seria de 6310 ue. Nosso método transmitiria a 0 dBm, com custo de 100 ue.

O total economizado seria função da posição do nó sensor, mas saberíamos previamente quais seriam os parâmetros de contorno, ou seja, poderíamos aplicar o pior ou melhor caso efetivo, ou utilizar medidas associadas ao desvio padrão da  $TU(1-TB)$ .

Dado que considerável parte das RSSF utiliza o protocolo de acesso ao meio S-MAC [Ye 2002], B-MAC [Polastre 2004] ou assemelhado, operando parte substancial do tempo em modo *sleep*, o controle de potência de transmissão de um sensor após ele acordar é significativo para o tempo de vida útil da bateria. Nesta situação, os benefícios potenciais da  $TU$  e da  $TB$  serão expressivos quando desejamos alcançar, em uma única rodada, determinado grau de conectividade de forma rápida e simples.

Nosso método permite também a identificação de potências críticas. A parede existente entre a sala A e a sala B faz com que  $TB$  cresça continuamente até o nível de potência de -10 dBm (obtido da  $TB''$ ), quando a barreira que ela causa começa efetivamente a ser superada.  $TB'(-2$  dBm), da Tabela 1, mostra a inversão da taxa de bloqueio, o que significa que emissões de potência desta magnitude irão efetivamente ultrapassar o obstáculo que separa a sala A da sala B. Esta tendência pode ser confirmada observando os dados da Tabela 2. Para efeito de contenção de colisões, infere-se que seria adequado utilizar potências inferiores a -2dBm.

A barreira representada pelas paredes que separam o salão das demais salas faz com que o ganho de conectividade para as potências de transmissão entre 2 e 8 dBm seja muito pequeno, o que faria com que nosso nó sensor escolhesse a primeira opção como potência de transmissão.

Analisando  $TB'(8$  dBm), verifica-se o ponto de inflexão, onde o sinal começa a romper a barreira que separa a sala A da sala C, o que ocorre efetivamente com o nível de potência igual a 10 dBm.

Em relação à interferência por multipercurso, nota-se que o ganho de conectividade ao se utilizar a potência de 14 dBm é o mesmo que ao se usar 18 dBm. Os nossos dados confirmam que o efeito de bloqueio devido ao multipercurso agrava significativamente, principalmente com o aumento da distância entre transmissor e receptor [Puccinelli 2006]. Desta forma, o aumento da potência seria desperdiçado, pois não iria causar nenhum ganho de conectividade.

$TU(1-TB)$  permite também que se faça a inferência da densidade de nós sensores, caso a mesma não seja fornecida preliminarmente. A estratégia mais conservadora, em termos de energia, seria realizar um *probe* com potência mínima e receber a quantidade de resultados. Pela Tabela 2, considerando o multipercurso, a área atingida estaria entre  $10m^2$  e  $28m^2$ , com média em  $24m^2$ . A unidade que forneceria a precisão deste dado é a razão  $\sigma(TU(1-TB))/TU(1-TB)$ , colunas 4 e 11, sendo a potência de 6 dBm, que atinge as salas A e B, a mais adequada para esta inferência. Uma outra alternativa seria -6dBm, com o sinal preponderantemente localizado na sala A.

Na prática, a sensibilidade dos equipamentos não é igual e as antenas não estão necessariamente colocadas com seu eixo perpendicular ao solo. Entretanto, há médias e desvios padrões associados à qualidade de fabricação do equipamento, sendo aparentemente viável fazer este mesmo cálculo baseado nesses dados, utilizando critérios probabilísticos. No caso de diferentes alturas dos transmissores, a onda

incidente, resultante da reflexão no solo, não será, via de regra, o componente principal (com exceções – exemplo: efeito corredor com a reflexão de uma parede), agindo como componente do desvanecimento plano, atuando primordialmente em *TBMP* (em tese, *TU* permaneceria inalterada e *TB* pouco variaria). Para alturas significativas (ordem de dezenas de comprimentos de onda), o ganho de transmissão/recepção (*tx/rx*) da antena dipolo de meia onda é na forma próxima a de um toróide, fazendo com que *TBMP* varie pouco. Entretanto, para alturas menores (com deformação do supracitado toróide, alterando o ganho de *tx/rx*), haveria, sim, mudanças significativas para os valores de *TBMP*.

A disponibilidade dos valores das métricas pode ser feita previamente, por meio da pré-programação dos dispositivos dos nós sensores, por meio da difusão da informação, por exemplo, através por nós sensores que também participam de uma rede infra-estruturada adequadamente localizadas no cenário, ou ainda por elementos participantes da rede com capacidade de localização. O cálculo de *TU* e *TB* é feito por computadores pessoais ou *clusters*. Os nós sensores precisariam apenas de uma tabela (com cerca de 12 colunas) para fazer a escolha da potência mais adequada, dado uma densidade específica e o grau de conectividade desejado. A complexidade da escolha é de  $O(n)$ , onde  $n$  é o número de potências discretas a serem utilizadas. Em termos de memória, considerando as hipóteses do cenário-teste, com 20 potências discretas e 4 bytes de armazenamento para cada dado da tabela, precisaríamos de menos de 1KB de espaço de endereçamento de dados.

As métricas propostas neste artigo devem ser utilizadas de forma planejada. A aplicação não-criteriosa da *TU* e da *TB*, em ambientes de propagação heterogênea, dificilmente trará benefícios em termos de controle de potência. O ideal é o uso destas métricas em pequenos agrupamentos, os quais podem ser detectados automaticamente quando do seu processamento, utilizando técnicas de *clustering*, em especial o *k-Medoid Method*, onde os pontos com menores *TBs* poderiam ser os centros de agrupamentos [Han 2001].

## 5. Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho, propusemos um método para controle de potência em um ambiente com obstáculos. Foram apresentadas e avaliadas duas métricas originais para o controle eficiente de potência nestes cenários: Taxa de Bloqueio (*TB*) e Taxa de Utilização (*TU*). *TB* é capaz de quantificar a “impedância” do cenário, isto é, a interferência que os obstáculos do ambiente ocasionam na propagação eletromagnética. *TU* calcula a interferência do terreno no sinal teórico, levando em conta primordialmente a ocupação.

Utilizando um mapa temático MDEP, podemos caracterizar o perfil de ocupação do cenário pelos transeptores da RSSF e a localização dos obstáculos, e assim definir matematicamente as métricas de referência *TB* e *TU*.

Para demonstrarmos o potencial das métricas, simulamos detalhadamente a propagação eletromagnética de um cenário-teste de RSSF com obstáculos. Os resultados mostraram que as métricas *TB* e *TU*, quando operadas em conjunto, conseguiram identificar pontos de agrupamento e potências críticas para rompimento de barreiras, bem como o número de conexões para determinadas potências de transmissão.

Aproveitando o código de *Zerkalo*, implementamos a camada física no NS-2 semelhantemente à [Souley 2005], de forma que esta considere a presença de obstáculos, bem como as características realísticas das antenas de transmissão e

recepção. Atualmente, estamos modificando as camadas MAC e PHY das redes WPAN deste simulador, para avaliar o comportamento das métricas em redes 802.15.4, considerando o benefício da realimentação do sistema, ocorrência de colisões, o problema do terminal oculto e o comportamento das métricas para alturas distintas. Pretendemos, ainda, incorporar à ferramenta *Zerkalo* o desvanecimento por multipercurso seletivo em frequência, viabilizando o estudo em ambientes com maiores taxas de transmissão de dados.

Os experimentos realizados sugerem que o estudo detalhado das métricas permitirá elaborar modelos heurísticos de controle de potência que permitam satisfazer propriedades de conectividade, diminuição da contenção na camada de acesso ao meio e aspectos de qualidade do sinal, como a SNR e a taxa de erros.

### **Agradecimentos**

Agradecemos a Maurício Henrique Costa Dias, Leonardo Bidese de Pinho e Alexandre Coser pela atenção dispensada na revisão deste artigo.

### **Referências**

- Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E. (2002) “Wireless sensor network: a survey”, *Computer Networks* 38.
- Cavilla, A. L., Baron, G., Hart, T.E., Litty L. and Lara. E. (2004) “Simplifies Simulation Models for Indoor MANET Evaluation are not Robust”, in *Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, October.
- cgal (2006) *Computer Geometric Algorithm Library*; <http://www.cgal.org>; acesso em dezembro 2006.
- Correia, L., Macedo, D., Santos, A., Loureiro, A., Nogueira Marcos (2006) “Ajustando a Potência de Transmissão em Protocolos MAC para Redes de Sensores Sem Fio” SBRC'2006, Curitiba, PR, Brasil, Junho
- Dent, B (1985). “Principles of Thematic Map Design”, Addison-Wesley Publishing Company.
- Dricot, J. and De Doncker P. (2004) “High-accuracy physical layer model for wireless network simulations in NS-2”, *Proceedings of the International Workshop on Wireless Ad-hoc Networks*, 2004.
- glomosim (2006) <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>, acesso em dezembro de 2006.
- Han, J., Kamber, M., (2001), “Data Mining: concepts and techniques”, pages 348-353, Morgan Kaufman Publishers.
- Kawadia, V. and Kumar, P.R. (2005) “Principles and Protocols for Power Control in Wireless Ad Hoc Networks”; *IEEE Journal on Wireless Ad Hoc Networks*.
- Kostin, S., Branco, L., Pinho, L. and Amorim, C. (2004) “Transceptores Inteligentes para Cenários com Obstáculos” Relatório Técnico do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, UFRJ. Disponibilizado em <http://www.cos.ufrj.br>.
- Kurkowski, S., Camp, T. and Colagrosso, M. (2004) “A Visualization and Analysis Tool for NS-2 Wireless Simulations”, *International Symposium on Modeling, iNSpect*.

- Li, Q., Aslam, J. and Rus, D. (2001) "Online power-aware routing in wireless ad-hoc networks," in Proceedings of the Seventh Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, July.
- Loureiro, A.A.F. (2003) "Redes de Sensores Sem Fio"; Texto do Minicurso apresentado no Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Natal, RN, Março.
- Neskovic, A., Neskovic, N. and Paunovic, G. (2000), "Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment," IEEE Communications Surveys, Third Quarter.
- ns (2006) [www.isi.edu/nsnam/ns/](http://www.isi.edu/nsnam/ns/); acesso em dezembro.
- Pires, A. A., Rezende, J.F. and Cordeiro, C. (2005)"FN-ALCA: Esquema de Controle de Potencia para Economia de Energia e Aumento de Capacidade de Redes Ad Hoc" - SBRC'2005, Fortaleza, CE, Brazil, Maio.
- Polastre, J., Hill, J., and Culler, D. (2004). Versatile low power media access for wireless sensor networks. In Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, pages 95–107. ACM Press.
- Porrat, D. and Cox, D. (2004), "UHF Propagation in Indoor Hallways"; IEEE Transaction on Wireless Communication.
- Puccinelli, D. and Hanegi (2006), M., "Multipath fading in wireless sensor network: measurements and interpretation", Proceedings of the 2006 International Conference on Communications and Mobile Computing.
- Rappaport, T.S. (2002), Wireless Communication: Principles and Practice (2nd Edition), pages 107, 115-116, 138, 167, 178, 205-208, Prentice Hall
- Seidel, S. and Rappaport, T.S. (1994) "Site-specific propagation prediction for wireless in-building personal communication system design"; IEEE Trans. Veh. Technol., 1994
- Souley, A. K. H. and Cherkaoui, S. (2005) "Realistic Urban Scenarios Simulation for Ad Hoc Networks, The Second International Conference on Innovations in Information Technology (IIT'05) October.
- Valenzuela, R.A. (1994) "Ray Tracing Prediction of Indoor Radio Propagation" 5th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1994. Volume 1, Issue , 18-23 Sep Page(s):140 - 144 vol.1
- Xing, G., Wang, X., Zhang, Y. Lu, C. (2005), "Integrated Coverage and Connectivity Configuration for Energy Conservation in Sensor Networks", ACM Transactions on Sensor Networks, Vol. 1, No. 1, August, Pages 36–72.
- Xue, F. and Kumar, P.R. (2003) "The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks"; Wireless Networks 2003
- Ye, W., Heidemann, J. and Estrin, D. (2002) "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM).
- Zhou, G., He, T., Krishnamurthy, S. and Stankovic, J.A. (2004) "Impact of radio irregularity on wireless sensor networks" Proceedings of the 2nd international conference on Mobile Systems, applications.