

Métricas para Controle Eficiente de Potência de Transmissão em Cenários de Redes de Sensores com Obstáculos

Sergio Kostin¹, Claudio L. Amorim¹

¹Laboratório de Computação Paralela

Programa de Engenharia de Sistemas e Computação (COPPE/UFRJ)

{kostin,amorim}@lcp.coppe.ufrj.br

Abstract. *The control of transmit power level (CPT) in Wireless Sensor Networks is aggravated in scenarios with obstacles due to the interference and blockage problems they cause to the communication, which in turn reduce the battery lifetime. In this work we propose two original metrics, namely Blockage Rate (TB) and Useful Rate (TU), to allow the CPT be more efficient within those scenarios. TB and TU express the interference and effective range of the electromagnetic wave propagation, respectively. Through detailed simulations of scenarios, we showed that TU and TB, in combination, can identify clustering, threshold power level for overcoming propagation barriers and reaching all over the scenario, enabling the CPT to save energy.*

Resumo. *O controle de potência de transmissão (CPT) em redes de sensores (RS) é agravado em cenários com obstáculos devido à interferência e ao bloqueio que eles causam na comunicação, que por sua vez reduz a vida útil da bateria. Neste trabalho, propomos duas métricas originais, denominadas Taxa de Bloqueio (TB) e Taxa de Utilização (TU), para permitir o CPT ser mais eficiente nesses cenários. TB e TU expressam a interferência e o alcance efetivo da propagação eletromagnética, respectivamente. Através de cenários simulados mostramos que TB e TU em conjunto conseguem identificar agrupamentos, potência crítica para superar barreiras de propagação e alcançar todo o cenário, permitindo que o CPT economize energia.*

1. Introdução

Em redes ad hoc (MANETs), especialmente em redes de sensores sem fio (RSSF), onde a capacidade finita das baterias é um fator limitante da eficácia e utilidade da rede, torna-se imperativo que cada nó sensor faça uso eficiente da energia da bateria que dispõe. Em particular, o controle cuidadoso do nível de potência de transmissão é decisivo para garantir o desempenho da rede. Entretanto, minimizar o uso de bateria ao mesmo tempo em que se tenta maximizar o desempenho da rede são dois objetivos conflitantes. Em geral, o nível de potência de transmissão determina tanto a qualidade do sinal recebido pelo receptor, como a extensão de alcance de transmissão e também a magnitude de interferência que ela ocasiona aos outros receptores. Em outras palavras, uma maior potência de transmissão contribui positivamente para a qualidade e alcance do sinal e negativamente para o grau de interferência entre sensores e a vida útil da bateria.

Em particular, o problema de controle de potência em MANETs e RSSF é que a escolha do nível de potência de transmissão para cada pacote não somente é feita de um modo distinto para cada nó participante da rede como também afeta fundamentalmente muitos aspectos da operação da rede [Kawadia 2005]. 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 pode causar congestionamento se for mal utilizada,. A escolha do nível de potência afeta a conectividade da rede [Gupta 1998, Xue 2003] e, conseqüentemente, a capacidade de transmissão da rede.

A maioria dos trabalhos de controle de potência encontrados na literatura [Kawadia 2003] 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, alterando, por exemplo, o procedimento de *handshake* do IEEE 802.11, para permitir que os nós transmitam em níveis menores de potência [Pires 2005]. Na terceira, adotada neste trabalho, procura-se encontrar uma potência ótima para controlar as propriedades de conectividade de toda ou parte de uma rede [Kawadia 2005].

Neste trabalho, propomos e avaliamos duas métricas que permitem o controle eficiente da potência de transmissão para aplicações de redes de sensores em cenários com obstáculos. Nossas métricas se baseiam no fato de que nesses cenários é comum se dispor a priori das características tanto de ocupação probabilística do terreno pelos sensores como da propagação eletromagnética do terreno que compõe o cenário de uma RSSF. Exemplos típicos são redes sem fio em *campi* universitários e aplicações de monitoramento ambiental. As métricas propostas são denominadas Taxa de Bloqueio (*TB*) e Taxa de Utilização (*TU*) que em conjunto permitem expressar quantitativamente as características de ocupação e propagação de um cenário de RSSF com obstáculos. *TB* está relacionada com a impedância do cenário, isto é, com a interferência que os obstáculos do ambiente ocasionam na propagação eletromagnética. *TU* está ligada à alcançabilidade da emissão eletromagnética, fornecendo a relação entre o que é efetivamente transmitido e o que se dispersa no ambiente.

As métricas *TB* e *TU* são formuladas matematicamente a partir do Mapa de Distribuição Espacial Probabilística (MDEP) que contém informação probabilística da distribuição de transmissores e receptores no terreno em que a rede de sensores será empregada.

Para demonstrar o potencial das métricas em controlar eficientemente a potência de transmissão, avaliamos a capacidade das duas métricas em discriminar um cenário onde há duas diferentes distribuições de probabilidades de ocupação. Através de simulação detalhada dos cenários, obtivemos resultados experimentais que mostraram que *TB* e *TU* permitiram identificar os agrupamentos e potências críticas para rompimento de barreiras de propagação, bem como com qual potência os transceptores seriam capazes de alcançar toda a área do cenário. Esses resultados preliminares mostram que os transceptores participantes de uma rede de sensores podem se beneficiar da *TB* e

da *TU* para ajustarem eficientemente o nível de potência de transmissão de acordo com o cenário de forma a economizar significativamente a energia de bateria que dispõem. Em resumo, este artigo apresenta as seguintes contribuições:

- Propõe e avalia duas métricas originais formuladas matematicamente para o controle eficiente de potência de transmissão em cenários de redes de sensores sem fio com obstáculos.
- Desenvolve um simulador de cenários de RSSF com obstáculos e apresenta resultados de propagação eletromagnética desses cenários na presença de obstáculos com e sem o uso das métricas.
- Demonstra os potenciais benefícios que as métricas propostas oferecem e em particular a economia de energia que o uso delas permitem mesmo num cenário básico.

O restante deste trabalho está dividido da seguinte forma. Na seção 2 apresentamos os trabalhos relacionados. Na seção 3, definimos as métricas Taxa de Bloqueio e Taxa de Utilização. Na seção 4, avaliamos experimentalmente as duas métricas. Finalmente, na seção 5 apresentamos nossa conclusão e trabalhos futuros.

2. Trabalhos relacionados

Os trabalhos relacionados com redes *ad-hoc*, e em particular sobre RSSF, mais próximos ao deste artigo focam em modelagem de propagação eletromagnética por computador, planejamento da instalação de RSSF e simulação de redes. Em geral, não encontramos nenhum trabalho que proponha ou utilize métricas padronizadas que auxiliem o controle de potência de transmissão em cenários de RSSF com obstáculos, e em particular, nenhum outro trabalho que levasse 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 *ray-tracing* até modelos mais sofisticados denominados *Site Specific Environment* (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.

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 totalmente aleatória, completamente planejada ou se caracterizar por densidade de probabilidade específica [Loureiro 2003]. Os programas de simulação de redes trabalham com uma realidade restrita do cenário utilizado pelas redes. Boa parte 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, Kotz 2004, Newport 2004, Zhou 2004, Souley 2005] mostram que a simplificação da camada física diminui significativamente o impacto dos artigos que consideram esses modelos mais simples de propagação. O nosso trabalho segue esta tendência de 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 2005] e o GlomoSim [glomosim 2005]. Ambos não permitem a inserção de cenários específicos [Cavilla 2004]. Em relação à obstrução da propagação, os dois simuladores somente permitem o ajuste da variável n na fórmula de perda por atenuação tradicional e de dispersão do desvio padrão.

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (1)$$

Trabalhos mais recentes tendem a descrever cenários mais realísticos, com a incorporação de obstáculos aos simuladores [Jardosh 2003, Dicrot 2004, Jardosh 2005, Souley 2005]. No aspecto de simuladores, esses são os trabalhos que se mais se aproximam do nosso, porém diferentemente desses, além de estarmos também utilizando uma maior realidade dos cenários, propomos e avaliamos novas métricas para o controle de potência de transmissão nesses cenários.

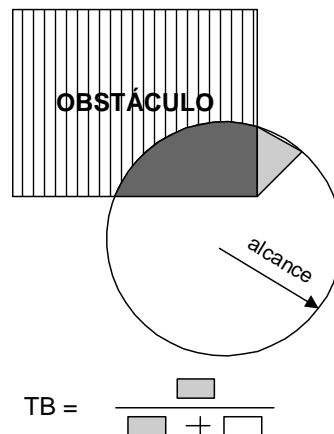


Figura 1 - Taxa de bloqueio (TB)

3. Métricas para Controle Eficiente de Potência de Transmissão

Dada a posição s de um transmissor localizada uma área A e a posição x de um receptor r_i localizados numa certa área AR (que pode ser idêntica ou não a A) de um cenário RSSF com obstáculos, o modelo de propagação de ondas eletromagnéticas tradicional (vide eq. (1)) fornece somente a atenuação ocorrida para o enlace entre os dois pontos em função da distância existente entre eles. Em contraste, o nosso modelo quantifica a porcentagem média da emissão eletromagnética que foi bloqueada e quanto foi efetivamente aproveitada para transmissão em relação à propagação total.

3.1 Taxa de Bloqueio

A figura 1 ilustra uma situação típica onde um dado obstáculo é capaz de bloquear o sinal eletromagnético de um transmissor t , estabelecendo três áreas distintas em relação à qualidade de recepção do sinal: área de alcance (cor branca), área de bloqueio (cor cinza) e área ocupada pelo obstáculo (cor preta). A taxa de bloqueio (TB) que propomos expressa a razão entre a área de bloqueio e a soma dessa área com a área de alcance. Dessa forma, TB permite expressar a porcentagem da transmissão que é bloqueada,

relativamente à que é efetivamente alcançada. A área ocupada pelo obstáculo não é computada nesta métrica, pois TB se refere somente à impedância do sistema para a qual o obstáculo não contribui.

A 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 (2):

$$TB(t(s, pw_i)) = \frac{\sum_{x \in AR} P(r_i(x) | t(s)) \cdot B_{CA}(t(s, pw_i), r_i(x))}{\sum_{x \in AR} P(r_i(x) | t(s)) \cdot B_{SA}(t(s, pw_i), r_i(x))} \quad (2)$$

A notação AR (Área de Receptores) refere-se à região onde os *receptores* podem estar localizados ($x \in AR$). A notação A refere-se à região onde os *transmissores* estão localizados ($s \in A$). Esta separação de regiões, permite o gerenciador da rede determinar as áreas que devem ser consideradas em termos de planejamento para o uso da TB e da TU . Para simplificar o entendimento das métricas, podemos considerar as duas regiões idênticas ($AR=A$), o que não é necessariamente verdade para todos os casos. Para efeitos de correteza matemática, o termo posição utilizado neste texto deve ser entendido como microrregião e não como um ponto.

O somatório de $x \in AR$ representa todos os pontos que estão dentro da área onde podem existir receptores. O numerador $P(r_i(x) | t(s))$ representa a probabilidade condicionada de um receptor do tipo $i - r_i -$ ser encontrado na localização $x - r_i(x) -$ dado que um transmissor tipo t está na localização $s (t(s))$.

O símbolo r_i representa o tipo de receptor que temos no ambiente. Ao se montar uma rede MANET ou RSSF, é possível estimar a sensibilidade de recepção dos equipamentos participantes da rede. Por exemplo, a rede pode ser constituída por 50% de receptores do tipo r_1 (equipamentos com sensibilidade de recepção de portadora de sinais de até -60dBm) e por outros 50% receptores do tipo r_2 (equipamentos com sensibilidade de até -70dBm). As antenas de recepção de r_1 podem ter, por suposição, um ganho de 10dBm. Tais informações são de grande importância para o transmissor quando da escolha da potência de sinal que irá aplicar. Nas equações da TB e da TU , esse efeito será considerado ao se quantificar a variável $P(r_i(x) | t(s))$ e também na função B que veremos posteriormente.

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 $r_i(x)$ (receptor r_i 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 ($r_i(x)$) estiver dentro do alcance teórico e for alcançado pelo transmissor quando este aplica a potência pw_i . B_{CA} retorna 1 caso o ponto destino ($r(x)$) estiver dentro do alcance teórico, mas devido aos obstáculos, sua conexão é interrompida. 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 [Morrow 2002, Porrat 2004].

$B_{SA} \in \{0, 1\}$. B_{SA} é a função que considera que os obstáculos existentes no cenário não causassem interferência alguma na propagação, retornando 1 para todos os receptores, localizados em $x - r(x)$ – que estão dentro do alcance teórico de $t(s, pw_i)$ e zero para os demais casos, ou seja, pontos que estivesse dentro dos obstáculos ou além do alcance teórico.

Com TB calculada para cada posição, deve se fazer a média ponderada de todos as TB s obtidos considerando o peso de cada um estar na posição especificada, conforme a fórmula (3). Esta formula representa a TB da posição estendida para a área A , onde os transmissores do tipo t podem estar localizados, e onde $P(t(s))$ é a probabilidade do transmissor t ocupar a posição s . Além do valor médio ponderado, são também levantadas informações estatísticas, especialmente desvio padrão, mediana e média.

$$TB(A, t(pw_i)) = \frac{\sum_{s \in A} P(t(s)) \cdot TB(t(s, pw_i))}{\sum_{s \in A} P(t(s))} \quad (3)$$

3.2 Taxa de Utilização

A taxa de utilização, ilustrada na figura 2, expressa a razão entre a área que é alcançada pelo transmissor, considerando a atenuação dos obstáculos, dividido pela soma da área de transmissão teórica sem os obstáculos.

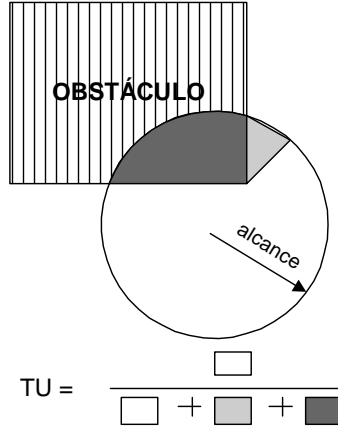


Figura 2 - Taxa de Utilização

A TU de uma determinada classe de transmissores t , localizada na posição s e aplicando determinada potência de transmissão $pw_i - TB(t(s, pw_i))$ – será dada por (4):

$$TU(t(s, pw_i)) = \frac{\sum_{x \in AR} U_{CO}(t(s, pw_i), r(x))}{\sum_{x \in AR} U_{SO}(t(s, pw_i), r(x))} \quad (4)$$

A função U verifica a interação entre a transmissão emitida por $t(s, pw_i)$ (transmissor t , emitindo com uma potência pw_i) e $r_i(x)$ (receptor r_i na posição x),

considerando ou não a existência dos obstáculos no cenário. Os sub-índices CO e SO da função U significam “Com Obstáculo” e “Sem Obstáculo”.

A função $U_{CO}(t(s, pw_i), r_i(x))$ na verdade faz a mesma interação existente em B_{CA} , com a diferença nos casos em que B_{CA} retorna -1 , U_{CO} retornará $+1$, pois a transmissão está se beneficiando de características de propagação do cenário. Assim, $U_{CO} \in \{0, 1\}$.

Em U_{SO} fazemos o cômputo do aproveitamento teórico de transmissão. O denominador não é função direta de IR^2 , onde R seria o alcance teórico da potência de transmissão pw_i , pois a região AR onde ficam os receptores pode ser limitada, como é, por exemplo, o caso que apresentaremos mais adiante neste artigo.

Assim, U_{SO} é a função que considera o cenário sem obstáculos, retornando 1 para todos os pontos que estão dentro da área A do alcance teórico, inclusive aqueles ocupados por obstáculos e zero para os demais pontos.

Com TU calculado para cada localização, faz-se o cálculo da média delas, obtendo-se (5)

$$TU(A, t(pw_i)) = \frac{\sum_{s \in A} TU(t(s), pw_i)}{\sum_{s \in A} 1} = \frac{\sum_{s \in A} TU(t(s), pw_i)}{nr \text{ total de microrregiões de } A} \quad (5)$$

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, assemelhando-se a um obstáculo). A importância de cada receptor já é considerada no cálculo da TB , tornando-se desnecessário aplicar-se novamente este ponderador.

Assim como no caso da TB , agregamos também à métrica TU informações estatísticas referentes a desvio padrão, mediana e média.

3.3 Perfil de ocupação do cenário

Um outro dado que deve ser levado em conta no planejamento de emprego da rede de sensores é a ocupação do cenário pela mesma. A ocupação pode ser completamente aleatória ou satisfazer a um determinado perfil de trabalho, porém ela poderá ser previamente conhecida pelos gerenciadores da rede. Ainda assim, os obstáculos existentes na rede influenciam não somente a propagação eletromagnética, mas também a própria ocupação do cenário pela rede. Assume-se que o obstáculo não é ocupado, eliminando o cálculo da relação T-R (Transmissor-Receptor) para as posições da área que ele ocupa.

Para se calcular TB e TU é necessário que o cenário onde a rede de sensores será instalada, seja conhecido a priori e para o qual possa ser construído um mapa de distribuição espacial probabilística (MDEP). Um MDEP é um mapa que fornece a informação probabilística da distribuição de transmissores e receptores em uma determinada área. MDEPs são frequentemente utilizados em sistemas de localização, principalmente aqueles baseados em filtros de *Kalman* [Fox 2003]. 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 do cenário pelos dispositivos de telecomunicações que o represente. Mais detalhes sobre MDEPs podem ser encontrados em [Kostin 2004].

4. Avaliação Experimental

Nesta seção avaliaremos os benefícios que as métricas *TB* e *TU* oferecem ao método de controle de potência de transmissão tradicional. Mais especificamente, através de simulação do emprego de uma RSSF em ambiente fechado de salas de escritórios, iremos medir os efeitos da *TB* e da *TU* no planejamento da rede e no controle de consumo de energia.

4.1 Simulação de Propagação Eletromagnética em Cenários com Obstáculos

Desenvolvemos um programa que permite que se calcule a perda por atenuação em um ambiente em duas dimensões, assim como admite a inserção de obstáculos, quantificando a atenuação específica deles em termos de obstrução e reflexão. O simulador é um modelo SISP [Rappaport 2001] simplificado, onde é possível se obter a atenuação da propagação eletromagnética entre quaisquer dois pontos do cenário. Os fenômenos eletromagnéticos considerados são o Linha de Visada (*Line-of-Sight*), Linha de Visada Obstruída (*Obstructed Line-of-Sight*) e as reflexões de primeira ordem (as reflexões de ordem superior a 1 normalmente têm pouca influência na propagação de ondas de frequência superior a 1 GHz [Rappaport 2001, Morrow 2002]). As informações obtidas pelo programa são utilizadas no cálculo da *TB* e da *TU*, bem como na elaboração dos gráficos de perda por atenuação.

O simulador utilizou a biblioteca de computação geométrica CGAL 3.1 [cgal 2005]. A CGAL, além de permitir realizar operações de interação entre figuras geométricas, ela possui recurso de mapeamento espacial de objetos, o que permitiu a otimização do código, no caso de muitos obstáculos. Além disso, forneceu outras funções como saber se uma figura geométrica encontra-se contida dentro de outra, auxiliando nas funções do MDEP. Entretanto, programamos separadamente o algoritmo de Ray-Tracing de primeira ordem, pois a CGAL não fornece esta funcionalidade.

O simulador foi implementado em ANSI C++, utilizando o QT [trolltech 2005] como interface gráfica de apoio para confecção de cenários, obstáculos e suas características de atenuação e perfil de ocupação do ambiente. O algoritmo que calcula a atenuação é de ordem exponencial proporcional ao número de obstáculos. Uma vez a atenuação entre os pontos do cenário calculada, o cálculo da *TB* e da *TU* é de ordem $\Theta(\text{dimensão do cenário})$, onde a dimensão do cenário tem sua ordem de grandeza determinada em função de sua granularidade.

4.2 Cenário-teste

Considere a configuração de um conjunto de escritório com obstáculos mostrada na figura 3. O conjunto é composto de 4 salas e um salão. Os valores de atenuação dos obstáculos também são mostrados na figura 3.

No cenário-teste da figura 3, o salão tem uma densidade de ocupação igual a 0, como se fosse um corredor de passagem e as salas A, B, C e D compartilham uma rede de sensores. Os valores de atenuação de obstrução da figura 3 procuram representar valores próximos dos encontrados na literatura. Por exemplo, as paredes que dividem o salão e as salas tendem a ser de concreto ou alvenaria. A divisão entre as salas normalmente possui uma atenuação de obstrução menor, devido a menor robustez do material. Os outros obstáculos foram colocados aleatoriamente, simulando o mobiliário existente numa sala de escritório. Para efeito de simplificação deste artigo, adotamos o mesmo valor de atenuação para o fenômeno da reflexão e consideramos a interferência entre esse fenômenos sempre construtiva.

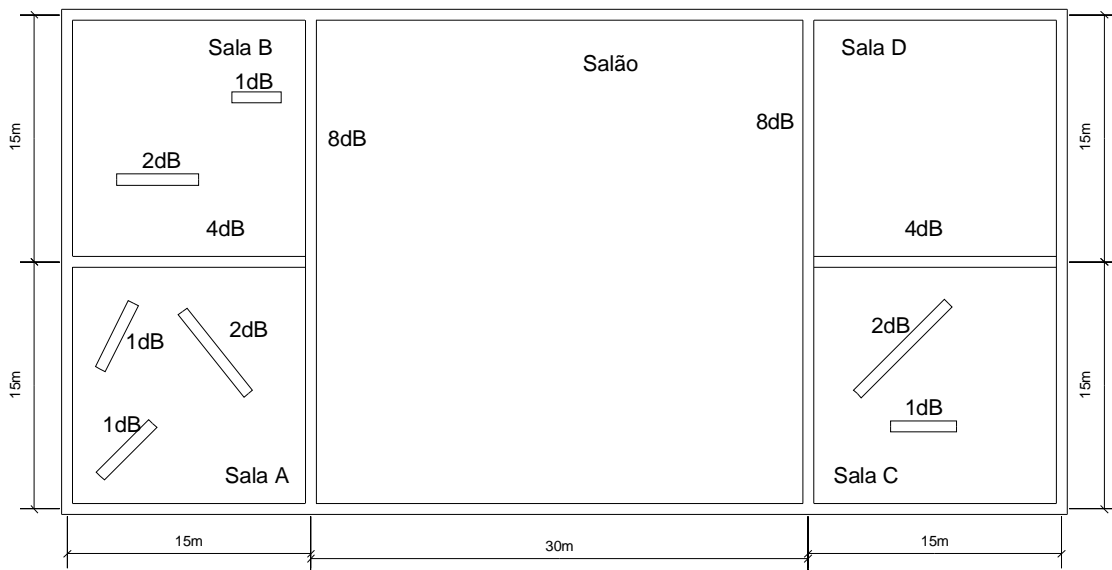


Figura 3 – Cenário-teste de um conjunto de escritórios com obstáculos e valores de atenuação.

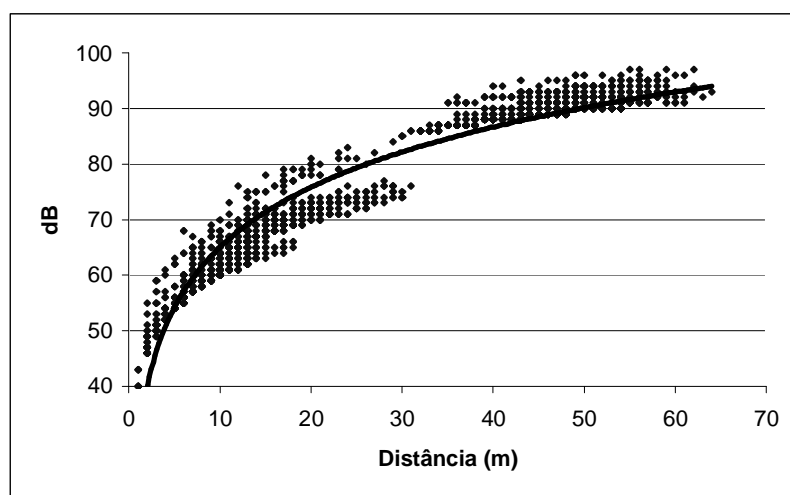


Figura 4 - Perda por atenuação do cenário-teste.

4.3 Medidas Eletromagnéticas do Cenário

A curva de perda de atenuação (PL) no cenário-teste mostrada na figura 4 foi obtida considerando as seguintes premissas:

- A distância mínima entre dois nós é de 1 metro;
- PL é calculado para um comprimento de onda igual a 0,122m;
- Os enlaces são simétricos, isto é, a atenuação é idêntica em ambos os sentidos;
- Os valores de dB são inteiros;
- A granularidade do ambiente é 1x1.

Como o corredor não é ocupado, consideram-se as interações entre as salas adjacentes com 450 (15x30) posições, combinadas 2 a 2, (multiplicando-se por 2, pois são conjuntos distintos) e entre as salas opostas (15x30x15x30), totalizando 404.550 enlaces. A distância máxima entre duas posições é de 67 metros. A dispersão da curva logarítmica de perda por atenuação (PL) é apresentada na figura 4.

4.4 Cálculo da *TB* e da *TU* para o Cenário-teste

As métricas *TU* e *TB* foram calculadas para transceptores *Bluetooth*, padrão 1.1, classe 1 [Morrow 2002], ou seja, levando em consideração as seguintes hipóteses:

- Os transmissores trabalham com comprimento de onda de 0,122m;
- Os receptores têm probabilidade de ocupação homogênea, não se privilegia nenhum tipo de receptor, nem localização, exceto o salão, que não tem receptores participando da rede;
- A sensibilidade dos receptores para detecção de portadora é da ordem de -70dBm;
- As antenas são consideradas isotrópicas, por simplicidade.

TB e *TU* se comportaram segundo o gráfico da figura 5.

4.5 Análise dos Resultados

Assumindo como referência um transmissor na sala A, o aumento inicial da taxa de bloqueio (*TB*) significa a dificuldade da propagação eletromagnética em superar a parede de 4 dB para a sala B. A taxa de utilização (*TU*), por sua vez segue o seu caminho natural de decréscimo, pois a utilização da propagação eletromagnética diminui em função da distância, e em função da presença de obstáculos.

As transmissões com potência superior a -6dBm conseguem superar o obstáculo de 4 dB que separa as salas adjacentes (A-B e C-D), fazendo com que a taxa de bloqueio diminua. Além disso, nesse nível de potência, os receptores localizados entre salas opostas não estão entrando no cômputo de *TB*. *TU*, por sua vez, continua diminuindo, pois a área de alcance teórico avança sobre a área do salão vazio.

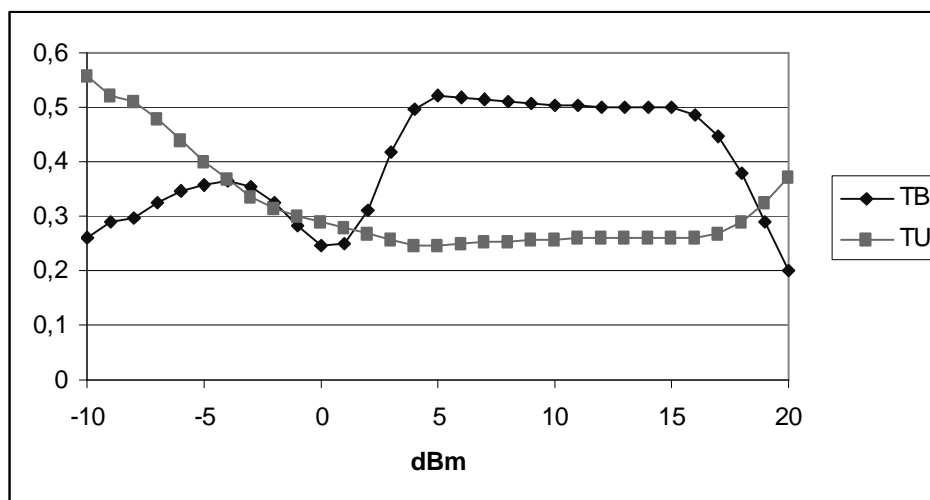


Figura 5 - TB e TU

Com potência de 2 dBm, a propagação eletromagnética, em tese, começaria a alcançar a área referente às salas opostas. Entretanto, as duas paredes de 8 dB constituem obstáculos consideráveis. A partir de 6 dBm, *TU* para de diminuir e exibe um comportamento especial. Neste caso, *TU* indica uma área onde ou n é inferior a 2 (vide eq. (1)) ou se está atingindo o limite da barreira eletromagnética de uma área, que é o caso em questão. Isto é confirmado pelo valor da *TB* igual a 0,51 (7dBm), ou seja, 51% dos possíveis enlaces estão bloqueados. Em outras palavras, quase todos os enlaces das salas adjacentes tornaram-se possíveis mas não existem enlaces para as salas opostas. O valor 0,25 da *TU* indica que a utilização da transmissão somente ocorre na área correspondente às salas adjacentes em relação à área total.

TU e *TB* mantêm esse comportamento até o valor de 15 dBm, quando começam a aumentar e diminuir, respectivamente, completando as conexões existentes entre as salas separadas pelo corredor.

Outra informação importante que podemos deduzir através dos gráficos de *TB* e *TU* é o caso onde mesmo que o equipamento pudesse transmitir a potências superiores a 20 dBm, o valor da *TU* para essas potências nunca seria superior a 0,5 dado que a soma da área não ocupada com a área referente às paredes e outros obstáculos é superior a 50% da área total.

4.6 Discussão

A análise do cenário-teste mostrou que, em geral, as métricas que propomos para o controle eficiente de potência de transmissão conseguiram combinar de forma ponderada a importância da configuração de obstáculos do cenário, como elemento determinante da propagação eletromagnética, com a importância da ocupação do cenário por parte dos transmissores e receptores.

Em contraste com modelos existentes de perda por atenuação como, por exemplo, o *Ericsson Multibreakpoint Model* [Rappaport 2001], as métricas *TB* e *TU* permitem fácil identificação dos três agrupamentos importantes no cenário testado. O primeiro agrupamento refere-se à tendência de diminuição de utilização e aumento do bloqueio do

sinal. O segundo agrupamento refere-se ao fenômeno de diminuição de ambas as curvas, utilização e bloqueio, e o último agrupamento refere-se ao aumento da utilização e a diminuição do bloqueio do sinal.

Outra vantagem é que o uso conjunto da *TB* e da *TU* permite a escolha de potências de transmissão que sejam mais adequadas, caso a caso. Cenários de RSSF com obstáculos podem se beneficiar da utilização dessas métricas, quando operando no modo broadcast, ou mesmo em dispositivos onde a realimentação pelo indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI: *Receiver Signal Strength Indicator*) não é disponível. Por exemplo, dispositivos *Bluetooth* classe 2 e classe 3 não vêm necessariamente equipados com circuitos RSSI [Morrow 2002], sendo opcional.

A literatura científica apresenta diversos requisitos associados à conectividade para a operação da rede [Gupta 1998, Xue 2003]. No exemplo de nosso cenário-teste, verifica-se que deve haver alguns elementos da rede operando com níveis de potências de transmissão com níveis superiores a 15 dBm para que a rede esteja completamente conectada. As RSSF normalmente estão associadas a parâmetros específicos, como de densidade da rede [Akyildiz 2002, Loureiro 2003]. A informação da densidade de rede, associada à *TU* e à *TB*, pode permitir que o transceptor escolha um alcance de transmissão que permita manter a funcionalidade da rede, sem necessitar de um mecanismo de realimentação. Mais importante, dado que considerável parte das redes de sensores utiliza o protocolo de acesso ao meio S-MAC [Ye 2002] 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 *TB* serão expressivos.

Um outro aspecto importante é que *TB* e *TU* permitem identificar barreiras. Particularmente, *TB* permitiu verificar que existe uma barreira entre 7 dBm e 15 dBm. Esse resultado revela que o controle de potência de transmissão tradicional desperdiçaria energia e tempo ao ajustar o nível de potência de 7 dBm até ultrapassar 15 dBm, pois nesta faixa de potência as transmissões seriam completamente inócuas. O conhecimento da existência de barreiras no sistema pode também ser explorado em seu benefício para aumentar a vazão da rede. Por exemplo, sabendo-se que existe uma barreira, poder-se-á aumentar a intensidade do sinal até um determinado nível, de forma a aumentar a vazão na rede, melhorar a relação sinal-ruído, sem interferir em outros agrupamentos, que ficarão protegidos por aquela barreira.

A entrega dos valores das métricas pode ser feita previamente, por meio da pré-programação dos dispositivos, através da difusão da informação por estações rádio-base (ERBs) adequadamente localizadas no cenário, ou por elementos participantes da rede com capacidade de localização (por exemplo, equipados com Sistemas de Posicionamento Global – GPS).

As métricas propostas neste artigo devem ser utilizadas de forma planejada e cautelosa. A aplicação indiscriminada de *TU* e *TB*, em ambientes de propagação heterogênea, dificilmente trará benefícios em termos de controle de potência. No exemplo do cenário-teste identificam-se dois padrões de propagação: as das salas e a do salão. Considerando, por hipótese, que o salão também estivesse ocupado, deveria calcular novamente $TB(salas, pw_i)$ e $TU(salas, pw_i)$, considerando agora a ocupação do salão e

também o cálculo de $TB(sal\tilde{a}o, pw_i)$ e $TU(sal\tilde{a}o, pw_i)$. Caso os elementos participantes da RSSF soubessem sua localização relativa, ou apoiados por difusores das métricas (ERBs e/ou dispositivos equipados com GPS), esses poderiam utilizar os valores das métricas referentes a sua área, melhorando o controle de potência, de forma análoga ao cenário-teste.

No caso de sensores móveis ou de sensores fixos que não conhecem sua localização, operando sem o apoio de difusores das métricas, a solução se tornaria mais complicada. Uma solução alternativa seria a distribuição de todos os conjuntos de métricas e o seu peso de área relativo, que, no caso de uma eventual realimentação, poderia tentar inferir em que área o dispositivo está localizado. Entretanto, o ganho nesta situação é claramente menor do que em ambientes planejados, além de depender de realimentação, o que nem sempre está disponível, ressaltando-se, assim, a necessidade de planejamento do uso das métricas.

5. Conclusão e trabalhos futuros

Neste trabalho propomos e avaliamos duas métricas originais para o controle eficiente de potência em cenários de redes de sensores sem fio com obstáculos: 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 mede à alcançabilidade da emissão eletromagnética, fornecendo a relação entre o que é efetivamente transmitido e o que se dispersa no ambiente.

Utilizando o Mapa de Distribuição Espacial Probabilística para caracterizar o perfil de ocupação do cenário pelos transceptores da RSSF e a localização dos obstáculos, definimos matematicamente as métricas de referência TB e TU .

Para demonstramos 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 barreira, bem como com qual potência se alcançaria todo o cenário em questão, de forma a beneficiar efetivamente o controle de potência de transmissão para se economizar energia.

Nossos trabalhos em futuros e em andamento são: o estudo mais aprofundado do comportamento das métricas, a implementação das camadas físicas, em particular na extensão da classe *Propagation* do NS-2 semelhante a [Souley 2005], e identificação de padrões e adaptação das métricas em ambientes heterogêneos, citados de forma sucinta na seção anterior.

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.

A implementação dos fenômenos apresentados neste artigo (linha de visada, linha de visada obstruída e as reflexões de primeira ordem) no NS-2, comparando-a com os resultados obtidos em [Dicrot 2004, Jardosh 2005, Souley 2005], permitirá, após a

validação desses resultados, quantificar, de forma relativamente precisa, os benefícios que as métricas podem oferecer em ambientes de RSSF com obstáculos.

Referências

- Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramanian, 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 (2005) *Computer Geometric Algorithm Library*; <http://www.cgal.org>; acesso em dezembro 2005
- Dricot, J. and De Doncker P. (2004) "High-accuracy physical layer model for wireless network simulations in NS-2", *IWWAN*
- Fox, D., HighTower, J., Liao, L., Schulz, D. and Borriello, G. (2003) "Bayesian Filtering for Location Estimation"; *IEEE Pervasive Computing*, March
- glomosim (2005) <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>, acesso em dezembro de 2005
- Gupta, P. and Kumar, P.R. (1998); "Critical Power for Asymptotic Connectivity in Wireless Networks"; in *Stochastic Analysis Control, Optimization and Application*
- Jardosh, A., Belding-Royer, E.M., Almeroth, K.C. and Suri, S. (2003) "Towards Realistic Mobility Models for Mobile Ad hoc Networks"; *Mobicom*
- Jardosh, A., Belding-Royer, E.M., Almeroth, K.C. and Suri, S. (2005) "Real-World Environment Models for Mobile Network Evaluation"; *IEEE Journal on Wireless Ad Hoc Networks* Volume 23, Number 3, March
- 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*.
- Kawadia, V. and Kumar, P.R. (2003), "Power Control and Clustering in Ad Hoc Networks", *IEEE InfoCom*
- 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. Está disponibilizado em <http://www.cos.ufrj.br>
- Kotz, D., Newport, C., Gray, R., Liu, J., Yuan, Y. and Elliott, C. (2004) "Experimental evaluation of wireless simulation assumptions"; *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*
- Kurkowski, S., Camp, T. and Colagrosso, M. (2004) "A Visualization and Analysis Tool for NS-2 Wireless Simulations", *International Symposium on Modeling, iNSpect*
- leda (2005) <http://www.mpi-sb.mpg.de/LEDA/> acesso em dezembro de 2005
- 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
- Morrow, R. (2002) "Bluetooth operation and use", McGraw-Hill
- Narayanaswamy, S., Kawadia, V., Sreenivas, R.S. and Kumar, P.R. (2002), "Power control in ad-hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol," in European Wireless Conference
- Newport, C. (2004) "Simulating mobile Ad Hoc networks: a quantitative evaluation of common MANET simulation models", Dartmouth college Computer Science Technical Report TR2004-504
- Neskovic, A., Neskovic, N. and Paunovic, G. (2000), "Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment," IEEE Communications Surveys, Third Quarter
- ns (2005) 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" - XXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC'2005, Fortaleza, CE, Brazil, May.
- Porrat, D. and Cox, D. (2004), "UHF Propagation in Indoor Hallways"; IEEE Transaction on Wireless Communication
- Rappaport, T.S. (2001), Wireless Communication: Principles and Practice (2nd Edition), 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
- trolltech (2005), <http://www.trolltech.com>, acesso em dezembro
- 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