

Sobre o Consumo de Energia dos Mecanismos de Descoberta de Dispositivos em Redes Tolerantes a Atrasos e Interrupções

Tiago Souza Azevedo¹, Luís Felipe M. de Moraes¹

¹Laboratório de Redes de Alta Velocidade
COPPE/PESC - Universidade Federal do Rio de Janeiro
Caixa Postal 68511 - 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

tiago@ravel.ufrj.br, moraes@ravel.ufrj.br

Abstract. *One of the main challenges found in Delay and Disruption Tolerant Networks is the efficient consumption of energy. Many studies indicate that this consumption occurs mainly in the neighbour discovery process. There are many approaches to reduce the energy consumption and increase the lifetime of the network, however, all the approaches induce a decrease in number of contacts. In this sense, this work proposes to identify the tradeoff between the number of contacts and energy consumption during neighbour discovery process. Thus, a new metric, the probability of lose opportunities of contact, is defined and a new analytic model is proposed. Later, this model is evaluated and validated through simulated results, giving new insights into resolution of energy consumption problem.*

Resumo. *Um dos principais desafios encontrados em Redes Tolerantes a Atrasos e Interrupções é o consumo eficiente de energia. Trabalhos indicam que este consumo ocorre principalmente no processo de descoberta de dispositivos vizinhos. Diversas são as estratégias para reduzir o consumo e garantir um aumento no tempo de vida operacional da rede, contudo, estas abordagens trazem consigo uma redução do número de contatos. Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo identificar a relação custo/benefício do número de contatos entre dispositivos com o consumo de energia, durante o processo de descoberta de nós vizinhos. Para isso, uma nova métrica, a probabilidade de perder oportunidades de contato, é definida e um modelo analítico é proposto. Posteriormente este modelo é avaliado e validado a partir de resultados simulados, gerando novas ideias para a resolução do problema de consumo de energia.*

1. Introdução

A Internet vem crescendo de forma acelerada. Desde sua concepção até a rede atual, com aproximadamente 625 milhões de nós [ISC 2009], essa rede tem se tornado a infraestrutura principal de disseminação de conteúdos em escala mundial. Este sucesso é decorrente principalmente da Arquitetura TCP/IP [Postel 1981] na qual foi desenvolvida, concebida para operar de forma independente da tecnologia de subrede, permitindo assim maior flexibilidade, eficiência, robustez e capacidade de suportar diversas aplicações em diferentes cenários.

Contudo, é consenso entre os pesquisadores, que as premissas adotadas principalmente no desenvolvimento dos protocolos da camada de transporte, não são capazes de suportar novos modelos de comunicação como as Redes Móveis Ad Hoc [Toh 2002], as

Redes de Sensores [Akyildiz et al. 2002], as Redes Subaquáticas [Akyildiz et al. 2005], as Redes Veiculares [Luo and Hubaux 2004], dentre outras; gerando portanto um enorme desafio para compatibilizar as tecnologias existentes com as demandas atuais. Neste contexto encontramos as Redes Tolerantes a Atrasos e Interupções.

As Redes Tolerantes a Atrasos e Interupções (*DTN's*), tem por objetivo estender as capacidades do modelo Internet(TCP/IP), resolvendo os problemas oriundos da necessidade de se lidar com a disrupção de enlaces, recursos escassos como energia e poder computacional, armazenamento restrito, além de altas taxas de perda de pacote, inexistência de caminhos fim-a-fim e alta latência.

2. Trabalhos Relacionados

De forma a estudar a dinâmica de uma *DTN* e verificar a importância do subsistema de comunicação no consumo de energia, diversos estudos foram elaborados em [Feeney and Nilsson 2001]. Neste trabalho os autores executaram diversos testes em equipamentos com interfaces de rede sem fio em uma rede Móvel Ad Hoc e concluíram que o maior responsável pelo consumo de energia é o subsistema de comunicação, principalmente durante uma transmissão de dados.

Para resolver esse problema e aumentar a autonomia da bateria dos nós e o tempo de vida operacional da rede, foram propostas diversas técnicas. Tais técnicas fazem parte do que denomina-se *Gerenciamento de Energia* e podem ser classificadas segundo seu princípio de operação, sendo as principais: (i)técnicas baseadas em mobilidade, (ii) técnicas direcionadas por dados, (iii) técnicas baseadas em ciclos de trabalho e (iv) técnicas baseadas no ajuste do alcance do rádio.

A mobilidade permite que os dispositivos se comuniquem com vizinhos mais próximos através de potências de transmissão menores, utilizando desta forma menos energia. Entretanto, esta premissa pode nem sempre ser verdadeira uma vez que ao reduzir a potência de transmissão, o número de saltos necessários para que os dados cheguem ao destino, aumenta. As técnicas de conservação de energia baseadas em mobilidade tem por objetivo encontrar um equilíbrio nessa relação. Nesta classe encontram-se as redes *Mobile Ubiquitous LAN Extensions* (MULEs) [Shah et al. 2003] e *Message Ferries* [Zhao et al. 2004].

A classe de técnicas direcionadas por dados está baseada na ideia de que em geral, a transmissão de dados é mais dispendiosa em energia do que o processamento [Schurgers et al. 2002] e que o consumo de energia está diretamente ligado a quantidade de bits transmitidos. Por isto, esta classe tem como objetivo evitar a aquisição e principalmente a transmissão de dados desnecessários, através da compressão ou codificação [Wang et al. 2005]. Contudo, ao codificar a mensagem no nó fonte e decodificá-la no destino, é necessário um maior processamento dos dados e portanto busca-se um equilíbrio entre codificação e consumo de processamento.

A classe de técnicas baseada em ciclos de trabalho, segue o princípio de que uma parcela considerável de energia pode ser economizada ao colocar os dispositivos em modo de conservação de energia. Nesta abordagem, o principal problema está em como balancear os períodos de atividade e inatividade de modo a não degradar a performance da rede.

É consenso entre os pesquisadores que o consumo de energia do subsistema de

comunicação é uma função da potência do sinal empregado na transmissão. Portanto, ajustar o alcance dos rádios dos dispositivos é uma alternativa na conservação de energia. Fundamentadas nesta premissa encontram-se as técnicas baseadas no ajuste do alcance do rádio. Ajustar o alcance dos rádios garante não apenas a conservação da energia, como também, uma otimização no reuso espacial, gerando menos ruído e interferências. Entretanto, quanto menor a potência do sinal transmitido, menores serão as oportunidades de contato entre dispositivos. Isto resulta em altos retardos e baixa capacidade de transmissão.

3. Consumo de energia na descoberta de dispositivos vizinhos

Em [Wang et al. 2007], os autores verificaram que durante a dinâmica de uma DTN, o mecanismo de descoberta de dispositivos vizinhos, feito através da transmissão de mensagens de descoberta (*probes*) é em conjunto com a transmissão de dados, um dos principais processos consumidores de energia. Desta forma, neste trabalho, o termo *consumo de energia* irá referir-se ao consumo durante o processo de descoberta de dispositivos vizinhos. Formalmente, seja $C(p)$ a potência consumida na transmissão de uma mensagem de descoberta(*probe*) com a intensidade de sinal p , de forma que:

$$C(p) = ap + b \quad (1)$$

Portanto, é assumido que o consumo de energia para a transmissão de um *probe* com a potência de sinal p é uma função linear de p . Assim, quanto maior for a intensidade do sinal sendo transmitido, maior será o consumo do dispositivo. Tal relação está de acordo com dispositivos reais, como pode ser visto na Figura 1. A figura apresenta dados de consumo de um dispositivo de comunicação CC1000, obtidos de sua especificação [CC1000].

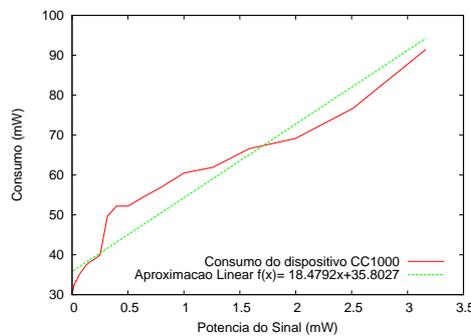


Figura 1. Consumo do dispositivo CC1000[CC1000] em função da potência do sinal de transmissão. Os valores foram obtidos utilizando voltagem de 3.6 V e frequência do sinal de 868 MHz.

De forma a simplificar o modelo, suponha que o tempo de transmissão de um *probe* seja de 1 segundo e que portanto, o consumo de energia da transmissão de uma mensagem de descoberta, dado em joules, seja igual a $C(p)$. Seja t um instante de tempo qualquer durante a evolução de uma rede e suponha que durante o intervalo $[0, t]$, foram executados P *probes* pelo dispositivo n . O consumo total de n até o instante t será dado por:

$$C_{n,t} = \sum_{i=1}^P C(p_i) \quad (2)$$

Desta forma, o consumo total é função da quantidade de *probes* executados no período de análise, como também da intensidade do sinal utilizado para transmitir tais

mensagens de descoberta. Desta forma, existem três possibilidades para reduzir o consumo: (i) diminuir o número de *probes* aumentando o intervalo de tempo entre estes, (ii) diminuir a intensidade do sinal transmitido ou, (iii) uma combinação destas.

Nestas abordagens, como não é assumido nenhum conhecimento sobre a rede, reduzir o consumo implica em perder oportunidades de contato, ou seja, nós próximos podem deixar de estabelecer uma conexão pois não são capazes de identificar-se mutuamente, seja porque um *probe* não foi realizado no momento correto ou porque a potência dessa mensagem de descoberta não é compatível com a distância entre estes dispositivos. Entender a relação entre o consumo de energia e as oportunidades de contato é o principal objetivo deste trabalho.

4. Suposições e Modelos

São vários os modelos necessários para representar a dinâmica de uma Rede Tolerante a Atrasos e Interupções. Neste trabalho identificamos como principais: o modelo de propagação do sinal e o modelo de contato entre dispositivos.

4.1. Modelos de Propagação do Sinal

Modelar de forma correta a propagação de um sinal é um fator crítico ao analisar redes sem fio, uma vez que determinar quando uma comunicação é realizada com sucesso é dependente de fatores como umidade, obstáculos, multipercurso, mobilidade entre outros. Contudo, como cada enlace de comunicação pode encontrar condições diferentes, seria intratável definir em uma única equação toda a atenuação durante o caminho (*path loss*). Por isso, são encontrados na literatura [Sarkar et al. 2003] diferentes modelos, para diferentes tipos de canais, sob diversas condições.

Neste trabalho será utilizado o modelo de Friis [Friis 1946], não com o objetivo de caracterizar completamente a propagação, mas sim, determinar o alcance do sinal transmitido por um dispositivo, permitindo desta forma calcular quando dois ou mais nós são capazes de estabelecer um enlace de comunicação.

A atenuação em espaço-livre é a única prevista no modelo de Friis. Neste modelo, a potência do sinal recebido a uma distância d do ponto emissor pode ser calculada por:

$$P_{rx}(d) = P_{tx} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3)$$

Onde P_{rx} e P_{tx} são respectivamente as potências de recepção e transmissão medidas em Watts (w) e λ é o comprimento de onda em metros (m). Este modelo ainda supõe: (i) a existência de uma linha de visão entre as antenas (*line-of-sight*), (ii) que não existe o efeito de multi-caminho, (iii) que as antenas estejam devidamente alinhadas e polarizadas e (iv) antenas isotrópicas.

Uma vez determinada a forma com a qual se propaga o sinal, é necessário verificar se este alcança o nível de serviço ou nível de sinal necessário na recepção. O limiar de audição β , representa o menor valor para a relação Sinal-Ruído, a partir da qual é possível distinguir o sinal recebido do ruído ambiente e geralmente é expresso em função da taxa de erro de bits (BER), da frequência de operação e da modulação utilizada. Este valor pode ser também encontrado nas especificações dos dispositivos de comunicação na forma de

menor potência de sinal distinguível de ruído, usualmente denominada de *sensitividade* e dada em mW.

Portanto, o modelo de propagação de Friis, em uma superfície bidimensional, basicamente representa a potência do sinal em função da distância, através de zonas circulares equipotentes centradas no dispositivo emissor. Quando maior a distância em relação ao dispositivo emissor, menor será a potência recebida. Desta forma, é possível estabelecer uma *área de transmissão máxima* para um dispositivo n_i , $A_{n_i,max}$, determinada pela sensitividade β e pela máxima potência de transmissão empregada pelo rádio $P_{tx,max}$:

$$A_{max} = \pi R_{max}^2 \quad (4)$$

onde R_{max} é dado por:

$$R_{max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{tx,max}}{\beta}} \quad (5)$$

Além da área de transmissão máxima, é possível estabelecer também a área de transmissão efetiva para um dispositivo n_i , $A_{n_i,ef}(p)$, que pode ser obtida de forma semelhante a área de cobertura, através da utilização das equações 4 e 5, substituindo apenas a máxima potência de transmissão $P_{tx,max}$ pela potência p efetivamente empregada em um dado instante.

4.2. Modelo de Contatos entre Dispositivos

Um dos principais processos a ser avaliado em uma Rede Tolerantes a Atrasos e Interupções é o processo de contato entre dois dispositivos. É a partir desse processo, que são obtidas diversas métricas importantes na avaliação de desempenho de tais redes.

Por se tratar de um tema recente, ainda não existe consenso quanto a definição de contato. Em sua forma mais usual, encontrada em [Chaintreau et al. 2007], o termo *contato* é definido como o intervalo de tempo no qual os dispositivos trocam mensagens ou são capazes de identificar seus pares. Embora diversos trabalhos adotem esta abordagem, são encontrados na literatura definições variadas.

Em [Srinivasan et al. 2006], os autores definem contato como a coexistência de inscrições de alunos em disciplinas em uma universidade, desta forma, se dois ou mais alunos estão matriculados em cursos no mesmo horário, estes estarão em contato. Em [Kim et al. 2006], os autores utilizam *traces* de dispositivos em uma rede 802.11 com infraestrutura, obtidos em um campus da Universidade de Dartmouth para identificar o processo de contato entre os nós e definem que dois dispositivos estão em contato caso estejam simultaneamente conectados ao mesmo ponto de acesso.

Neste trabalho, o termo *contato* terá uma nova abordagem. Seja $N = n_1, n_2, \dots, n_k$ o conjunto de dispositivos em estudo, de forma que $|N| = k$ seja a quantidade total dispositivos. Suponha que os dispositivos sem fio n_i estejam dispostos segundo uma distribuição uniforme na área em estudo S e que a densidade de nós por área seja ρ .

Seja $Pos(n_i, t)$ a posição do dispositivo n_i no instante de tempo t . Suponha ainda que o movimento dos dispositivos é definido por um modelo de mobilidade que mantenha esta distribuição uniforme. Assuma que todo dispositivo explora o ambiente segundo algum algoritmo de descoberta. Quando um dispositivo n_i envia uma mensagem de descoberta (um *probe*), todos os demais dispositivos que recebem esta mensagem respondem

com outra mensagem, de reconhecimento. Baseado nesta troca de dados, os dispositivos decidem se devem estabelecer uma conexão.

Em um instante de tempo t , um dispositivo n_i estabelece uma *Oportunidade de Contato* com outro dispositivo qualquer n_j , quando n_j encontra-se na máxima área de cobertura de n_i , $A_{n_i, max}$, definida pela utilização da máxima potência de transmissão $P_{n_i, max}$. Posto de outra forma, seja $Op_t(n_i, n_j)$ a variável aleatória que representa a oportunidade de contato do nó n_i com outro nó qualquer n_j no instante t :

$$Op_t(n_i, n_j) = \begin{cases} 1 & \text{se } Pos(n_j, t) \in A_{n_i, max}; \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (6)$$

Para um dado par (n_i, n_j) , seja τ_i e v_i os instantes em que uma oportunidade de contato é respectivamente iniciada e finalizada. Os intervalos, $\Delta_i = v_i - \tau_i$, são denominado *intervalos de contato*. Suponha que as durações desses intervalos Δ_i sejam variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas, com *Função de Distribuição Cumulativa (FDC)*, $F_\Delta(x) = P[\Delta < x] = \int_0^x f_\Delta(x)dx$ e média $\mathbb{E}[\Delta] = \frac{1}{\mu}$.

Portanto, um *Contato* ou *Oportunidade de Contato*, indica quando uma comunicação pode ocorrer. Para que os dispositivos realmente estabeleçam um enlace de comunicação é necessário que durante esta oportunidade, troquem mensagens de descoberta utilizando potências de transmissão compatíveis com a distância na qual estão seus pares.

Desta forma, um nó n_k identificará uma oportunidade de contato com o nó n_j , se durante esta oportunidade, Δ_i , uma mensagem de descoberta com potência de transmissão p for enviada e $Pos(n_j, t) \in A_{n_k, ef}(p)$. Neste caso também é possível definir uma variável aleatória $D_{t,p}(n_k, n_j)$, que representa este evento de descoberta dado que n_k e n_j estejam em um intervalo de contato:

$$D_{t,p}(n_k, n_j) = \begin{cases} 1 & \text{se } Pos(n_j, t) \in A_{n_k, ef}(p); \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (7)$$

Seja ainda Θ_i o intervalo de tempo entre dois contatos consecutivos, Δ_i e Δ_{i+1} , ou seja, $\Theta_i = \tau_{i+1} - v_i$. Estes intervalos são denominados *tempo entre contatos*. Suponha que as durações destes intervalos sejam também variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas, com FDC $F_\Theta(x) = P[\Theta < x] = \int_0^x f_\Theta(x)dx$ e média $\mathbb{E}[\Theta] = \frac{1}{\nu}$.

É importante notar que por serem variáveis *independentes e identicamente distribuídas (i.i.d)*, os índices i de Δ_i e Θ_i podem ser desconsiderados sem perda de generalidade. Para um par de dispositivos quaisquer, (n_i, n_j) , durante um intervalo de contato Δ , se nenhum dispositivo enviar um *probe*, este contato não será identificado e a *Oportunidade de Contato* será perdida. Além disso, mesmo que um *probe* seja enviado, é necessário que esta mensagem de descoberta seja transmitida com uma potência suficiente para que seja recebida.

Existem diversas formas de executar *probes* em um intervalo de tempo. Dentre todas as estratégias de descoberta, considere aquela em que os *probes* são executados em intervalos de tempos constantes T . Além disso, suponha que cada *probe* seja transmitido com uma potência $0 \leq p \leq P_{max}$.

Seja Γ a variável aleatória que indica a probabilidade de perder uma oportunidade de contato. Para encontrar $P[\Gamma]$, é preciso determinar a quantidade de *probes* que ocorrem em um intervalo de contato. Sob a política de *probes* constantes, seja Ω a variável aleatória

$$P[\Gamma] = P[\Gamma | \Omega = 0]P[\Omega = 0] + \sum_{n=1}^{\infty} P[\Gamma | \Omega = n]P[\Omega = n] \quad (13)$$

A probabilidade de perder uma oportunidade de contato, dado que nenhum *probe* é executado, $P[\Gamma | \Omega = 0] = 1$, ou seja, se não houver um *probe*, o contato sempre será perdido. Caso $\Omega \geq 1$, o contato não será detectado se em cada *probe* a potência de transmissão não for suficiente para alcançar o dispositivo vizinho. Desta forma $P[\Gamma | \Omega = n] | n \geq 1$ é dado por:

$$P[\Gamma | \Omega \geq 1] = \sum_{n=1}^{\infty} \binom{n}{0} P[D = 1]^0 P[D = 0]^{n-0} P[\Omega = n] \quad (14)$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} P[D = 0]^n P[\Omega = n] \quad (15)$$

Portanto a probabilidade de perder uma oportunidade de contato, será igual a:

$$P[\Gamma] = P[\Omega = 0] + \sum_{n=1}^{\infty} P[D = 0]^n P[\Omega = n] \quad (16)$$

Para encontrar $P[D = 0]$ é necessário observar que, dado que os dispositivos estão em um intervalo de contato, uma mensagem de descoberta do dispositivo n_i não alcançará o nó n_j se e somente se $Pos(n_j, t) \notin A_{n_i, ef}(p)$. Como a distribuição dos dispositivos pela área de estudo S é considerada uniforme, a probabilidade de uma descoberta de n_i não ocorrer é dada por:

$$P[D_{t,p} = 0] = 1 - \frac{A_{n_i, ef}(p_t)}{A_{n_i, max}} \quad (17)$$

$$= 1 - \sqrt{\frac{p_t}{P_{max}}} \quad (18)$$

Este modelo é uma generalização do modelo proposto em [Wang et al. 2007]. Nesse trabalho os autores também calculam a probabilidade de perder uma oportunidade de contato P_{miss} , contudo, em seu cenário, não é possível variar a potência de transmissão utilizada na descoberta de um dispositivo vizinho. Comparando-se os dois modelos e restringindo-se a variação da potência de transmissão à potência máxima, a probabilidade de não haver descoberta $P[D_{t,p} = 0]$ passa a ser zero e portanto $P[\Gamma] = P[\Omega = 0] = P_{miss}$.

A probabilidade de perder uma oportunidade de contato é uma métrica importante na avaliação de desempenho de redes tolerantes a atrasos e interrupções, principalmente, no estudo da redução do consumo de energia. Pela Equação 16, verifica-se que a probabilidade de perder uma oportunidade de contato está relacionada com a distribuição dos tempos de contato Δ , com a potência de transmissão efetiva e com o intervalo entre *probes*.

Além disso, analisando o modelo proposto, é nítida a existência de uma relação custo/benefício entre a probabilidade de perder uma oportunidade de contato e o consumo de energia. Quando o consumo é máximo, ou seja, a potência de transmissão utilizada é a máxima, a probabilidade de não haver descobertas é zero, $P[D = 0] = 0$ e portanto a probabilidade de perder uma oportunidade de contato é mínima $P[\Gamma] = P[\Omega = 0]$, ocorrendo apenas para contatos com durações menores que o intervalo entre *probes*.

Por outro lado, quando o consumo é mínimo, ou seja, a potência de transmissão utilizada é zero, a probabilidade de não ocorrer descoberta é máxima, $P[D = 0] = 1$, e a probabilidade de perder uma oportunidade de contato será máxima $P[\Gamma] = P[\Omega = 0] + \sum_{n=1}^{\infty} P[\Omega = n] = 1$.

5. Aplicação do Modelo Proposto

Nesta seção, serão analisados os resultados da aplicação do modelo proposto na Seção 4.2, ao supor uma distribuição exponencial para o intervalo de contato entre dispositivos. Além disso, os resultados do modelo analítico serão comparados aos resultados obtidos por simulação, com o objetivo de testar sua acurácia.

A distribuição exponencial tem sido adotada para representar o tempo de contato e entre contatos em diversos estudos, [Grossglauser and Tse 2002] e [Groenevelt et al. 2005], principalmente por tornar os modelos e cálculos mais tratáveis. Além disso, essa suposição é suportada por simulações numéricas, com o modelo de mobilidade *Random Waypoint*, realizados em [Sharma et al. 2007].

Supondo que o intervalo de contato entre dispositivos seja distribuído exponencialmente, teríamos que $F_{\Delta}(x) = P[\Delta < x] = 1 - e^{-\mu x}$. Utilizando a Equação 16, a probabilidade de perder uma oportunidade de contato $P[\Gamma]$ seria dada por:

$$P[\Gamma] = \frac{e^{-\mu T} - 1 + \mu T}{\mu T} + \frac{2(\cosh(\mu T) - 1)}{\mu T} \frac{e^{-\mu T} (1 - \sqrt{\frac{p}{P_{Max}}})}{1 - (e^{-\mu T} (1 - \sqrt{\frac{p}{P_{Max}}}))} \quad (19)$$

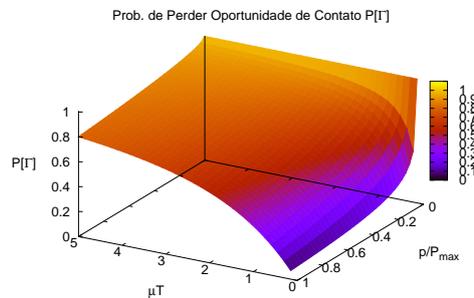


Figura 3. Probabilidade de perder uma oportunidade de contato $P[\Gamma]$ em função de μT e $\frac{p}{P_{max}}$

Como discutido na Seção 2, a diminuição do consumo de energia durante a descoberta de nós vizinhos possui três abordagens principais, (i) diminuir o número de *probes* aumentando o intervalo de tempo entre estes ou, (ii) diminuir a intensidade do sinal transmitido ou (iii) uma combinação destas. Isto é evidenciado pela Equação 19 em que é possível verificar que a probabilidade de perder uma oportunidade de contato $P[\Gamma]$ é uma função de μT e da relação entre a potência efetiva p e potência máxima P_{max} .

Pela abordagem (i), o consumo de energia poderia ser reduzido, aumentando-se o intervalo entre *probes* T . Para uma taxa de contatos μ constante, isto implica em aumentar a relação μT , que representa o número médio de contatos que ocorre em um intervalo entre *probes*, e conseqüentemente, implica também em aumentar a probabilidade de perder um contato. Na Figura 4-(a), é possível observar o comportamento de $P[\Gamma]$ em função de

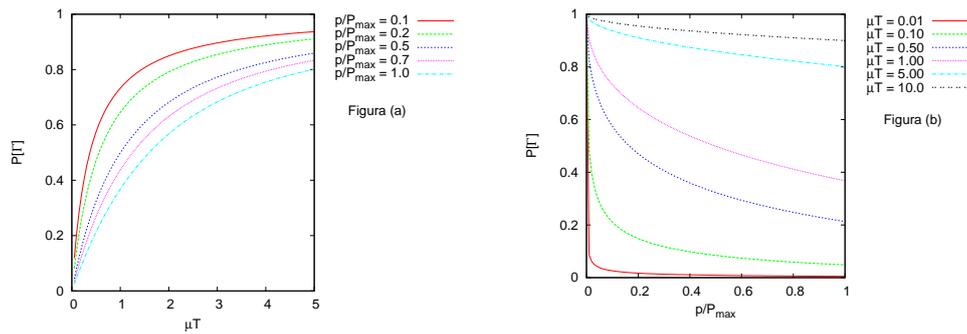


Figura 4. Probabilidade de perder oportunidade de contato $P[\Gamma]$ em função de (a) μT para diferentes valores de $\frac{p}{P_{max}}$ e (b) $\frac{p}{P_{max}}$, para diferentes valores de μT .

μT , para diferentes valores de p/P_{max} . Para pequenos valores de μT , quando o intervalo de contato é maior que o intervalo entre *probes*, $P[\Gamma]$ está próximo de zero. Isto ocorre pois serão executados diversos *probes* em um intervalo de contato e portanto, a probabilidade de perder essa oportunidade diminui. É possível notar ainda que quando maior a relação $\frac{p}{P_{max}}$ menor a probabilidade de perder um contato.

Pela abordagem (ii), o consumo de energia pode ser reduzido, diminuindo-se a potência efetiva de transmissão do sinal de uma mensagem de descoberta e utilizando-se apenas uma fração da potência máxima P_{max} . Quanto menor for essa relação, menor o consumo e maior a probabilidade de perder uma oportunidade de contato. Na Figura 4-(b), é possível verificar tal fato. Também é possível ver que para pequenos valores de μT , a curva $P[\Gamma]$ apresenta um 'joelho' acentuado que vai sendo desfeito a medida que os valores μT aumentam. Este comportamento possibilita reduzir o consumo de energia sem que a probabilidade de perda aumente demasiadamente. Na Figura 5 verifica-se que para um valor de $\mu T = 0.10$, em que o tempo médio de contato é dez vezes o intervalo entre *probes*, uma redução da potência efetiva para 0.8 de seu valor total, o que equivale a redução do consumo em 20%, aumentaria a probabilidade de perder novas oportunidades de contato em apenas 1%. Quando μT possui um valor de 1.00, um redução de consumo de 20% aumenta a probabilidade de perder novas oportunidades em aproximadamente 5%.

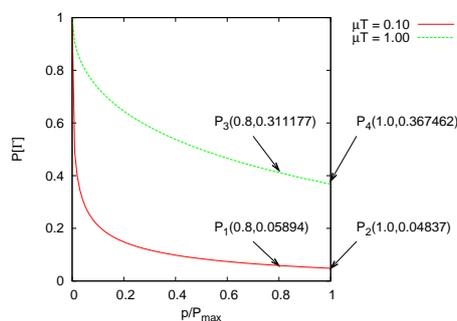


Figura 5. Probabilidade de perder uma oportunidade de contato $P[\Gamma]$ em função de $\frac{p}{P_{max}}$, quando $\mu T = 0.10$. É possível observar que uma redução de consumo de 20% implica em um aumento da probabilidade de perder novas oportunidades de contato em apenas 1%. Quando μT possui um valor de 1.00, um redução de consumo de 20% aumenta a probabilidade de perder novas oportunidades em aproximadamente 5%.

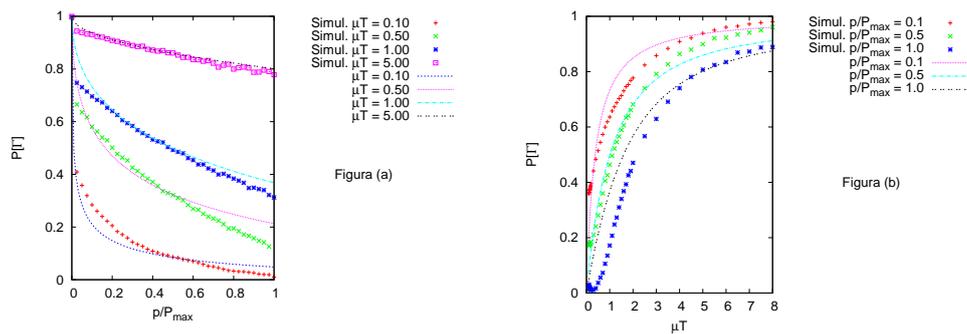


Figura 6. Probabilidade de perder oportunidade de contato $P[\Gamma]$ em função de (a) $\frac{p}{P_{max}}$ para diferentes valores de μT e (b) μT , para diferentes valores de $\frac{p}{P_{max}}$.

6. Validação do Modelo por Simulação

Com o objetivo de validar o modelo proposto, um simulador orientado a eventos discretos foi desenvolvido. A implementação deste novo simulador foi necessária, pois os simuladores já existentes, NS-2[NS-2] e *The ONE*[Keränen et al. 2009], não suportam as variações nas potências de transmissão de seus dispositivos durante a descoberta de nós vizinhos, característica essencial ao estudo.

Ao simular a dinâmica de uma DTN, diversos parâmetros são necessários para caracterizar o cenário, como número de dispositivos móveis, dimensões da região de estudo, o modelo de mobilidade dos nós, características do rádio como potência máxima de transmissão, sensibilidade do rádio, ruído do ambiente etc. Estes parâmetros devem ser escolhidos cuidadosamente pois podem comprometer os resultados obtidos. Para escolher os parâmetros do cenário, de forma que estes estejam o mais próximo de um cenário real, foi aplicada a técnica de ajuste de parâmetros desenvolvida em [Carlos A. V. Campos 2009a], em dados de movimentação reais obtidos em [Carlos A. V. Campos 2009b]. Os parâmetros de caracterização do rádio foram retirados da especificação[CC2420] do transmissor CC2420 utilizado em diversos dispositivos móveis. Todos os parâmetros utilizados nas simulações podem ser visualizados na Tabela 1.

Parâmetros da Simulação			
Característica do Cenário		Características do Rádio e Sinal	
Modelo de mobilidade:	RandomWaypoint	Potência Máxima de Tx.:	0.1 dBm
Velocidade Máxima:	1,52 m/s	Sensibilidade da antena:	-85 dBm
Velocidade Mínima:	1,58 m/s	Frequência:	2,4 GHz
Tempo de Pausa:	0 s	Comprimento de Onda:	0,125 m
Dimensões da região:	600x800 m ²		
Número de Dispositivos:	100		

Tabela 1. Parâmetros utilizados na simulação. Estes parâmetros foram obtidos através da técnica de ajuste de parâmetros desenvolvida em [Carlos A. V. Campos 2009a], em dados de movimentação reais obtidos em [Carlos A. V. Campos 2009b]. Os parâmetros de caracterização do rádio foram obtidos das especificações do transmissor [CC2420].

É importante notar que para simplificar a análise, supomos que os dispositivos possuíam durante toda a simulação, a mesma potência máxima de transmissão e utilizavam a mesma potência efetiva. Nas Figuras 6-(a) e 6-(b), podem ser observadas as projeções de $P[\Gamma]$ sobre os eixos $\frac{p}{P_{max}}$ e μT . É possível verificar que os resultados obtidos por simulação são semelhantes aos resultados do modelo proposto.

Os pequenos erros em relação ao modelo advêm das suposições realizadas. Por

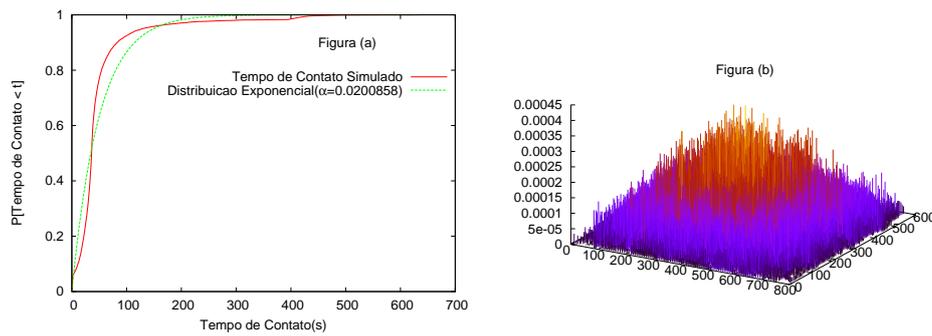


Figura 7. Probabilidade de perder oportunidade de contato $P[\Gamma]$ em função de (a) $\frac{p}{P_{max}}$ para diferentes valores de μT e (b) μT , para diferentes valores de $\frac{p}{P_{max}}$.

exemplo, embora a escolha dos parâmetros tenha sido feita de forma a ajustar o *trace* sintético ao *trace* real, não foi possível determinar *a priori* a distribuição dos tempos de contato entre dispositivos, sendo esta avaliação feita após a simulação. Para tal avaliação foram obtidos o tempo médio de contato e a Função de Distribuição Cumulativa Empírica dos tempos de contato. O tempo de contato médio foi de 49.7863 segundos, tendo portanto, taxa de 0.0200858 contatos por segundo.

A Função de Distribuição Cumulativa Empírica obtida é semelhante a distribuição exponencial, como pode ser visto na Figura 7-(a). Contudo, uma das diferenças observadas entre a Distribuição Exponencial e a distribuição empírica é que esta última, apresenta probabilidades maiores para contatos de pequena duração. Tal fato implicando em um aumento da probabilidade de perda para grandes intervalos entre *probes* e uma redução desta probabilidade para pequenos intervalos. O que é confirmado pela Figura 6-(b).

Além da suposição de tempos de contatos com distribuições exponenciais, outra hipótese importante do modelo é a de uma distribuição espacial uniforme dos nós pela área de simulação. Em conformidade com outros estudos [Alexandre M. da Silva 2004], a distribuição espacial obtida com o modelo de mobilidade *Random Waypoint*, apresentou uma concentração no centro da região de simulação, como pode ser visto na Figura 7-(b). Tal fato também serve para explicar as variações encontradas entre os resultados analíticos e simulados. Contudo, tais variações não chegam a invalidar o modelo proposto.

7. Conclusão

O problema de conservação de energia é um dos principais desafios encontrados em Redes Tolerantes a Atrasos e Interupções. Desta forma, entender como ocorre o consumo em tais redes é de fundamental importância.

Em [Wang et al. 2007] foi verificado que o mecanismo de descoberta de dispositivos vizinhos, que emprega a transmissão de mensagens de descoberta é um dos principais processos consumidores de energia. Portanto modelar esse processo de forma correta é essencial para entender a relação custo/benefício entre o consumo de energia e as oportunidades de contato.

O principal objetivo deste trabalho foi de analisar o processo de descoberta de dispositivos vizinhos e avaliá-lo com relação ao consumo. Para isso foi definida uma nova métrica, a *Probabilidade de Perder uma Oportunidade de Contato*, calculada através de um modelo analítico. Também foram realizadas diversas simulações com o objetivo de

validar o modelo proposto e testar sua acurácia.

Os resultados obtidos pela aplicação do modelo a uma distribuição exponencial dos tempos de contato confirmaram a relação custo/benefício entre o consumo de energia e as oportunidades de contato. Estes também mostraram-se semelhantes aos resultados obtidos por simulação para o mesmo cenário, validando o modelo. Além disso, como visto na Figura 5, o modelo sugere que é possível reduzir significativamente o consumo de energia, evitando um aumento demasiado da probabilidade de perder novas oportunidades de contato.

Referências

- Akyildiz, I. F., Pompili, D., and Melodia, T. (2005). Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 3(3):257–279.
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002). A survey on sensor networks. *Communications Magazine, IEEE*, 40(8):102–114.
- Alexandre M. da Silva, Bruno A. Nunes, L. F. M. d. M. (2004). Uma avaliação dos efeitos das regras de borda e dos modelos de mobilidade no comportamento dos nós em redes ad hoc. In *VI Workshop de Comunicação Sem Fio e Computação Móvel - WCSF*.
- Carlos A. V. Campos, Rafael L. Bezerra, L. F. M. d. M. (2009a). Uma proposta de técnica para o ajuste de modelos de mobilidade em redes ad hoc e questionamentos sobre a adequação dos parâmetros envolvidos com base em dados reais. In *27 Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC - Refice/PE*.
- Carlos A. V. Campos, Rafael L. Bezerra, T. S. A. L. F. M. d. M. (2009b). An analysis of human mobility using real traces. In *EEE Wireless Communications and Networking Conference - WCNC*.
- CC1000. Cc1000 datasheet - single chip very low power rf transceiver.
- CC2420. Cc2420 datasheet - 2.4 ghz ieee 802.15.4 / zigbee-ready rf transceiver.
- Chaintreau, A., Hui, P., Crowcroft, J., Diot, C., Gass, R., and Scott, J. (2007). Impact of human mobility on opportunistic forwarding algorithms. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 6(6):606–620.
- Feeney, L. M. and Nilsson, M. (2001). Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment. In *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1548–1557 vol.3.
- Friis, H. T. (1946). A note on a simple transmission formula. *Proceedings of the IRE*, 34(5):254–256.
- Groenevelt, R., Nain, P., and Koole, G. (2005). Message delay in manet. *SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.*, 33(1):412–413.
- Grossglauser, M. and Tse, D. N. C. (2002). Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 10(4):477–486.
- Grout, V. (2001). Measuring network traffic: The hidden distribution. In *Mathematics Today: Bulletin of the Institute of Mathematics and its Applications*, volume 6, pages 86–97.

- ISC (2009). Isc domain survey: Number of internet hosts.
- Keränen, A., Ott, J., and Kärkkäinen, T. (2009). The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation. In *SIMUTools '09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*, New York, NY, USA. ICST.
- Kim, M., Kotz, D., and Kim, S. (2006). Extracting a mobility model from real user traces. In *Proceedings of the 25th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, Barcelona, Spain. IEEE Computer Society Press.
- Luo, J. and Hubaux, J. (2004). A survey of inter-vehicle communication. Technical report, School of Computer and Communication Sciences, EPFL.
- NS-2. The Network Simulator NS-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- Postel, J. (1981). RFC 791: Internet Protocol.
- Sarkar, T., Ji, Z., Kim, K., Medouri, A., and Salazar-Palma, M. (2003). A survey of various propagation models for mobile communication. *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, 45(3):51–82.
- Schurgers, C., Kulkarni, G., and Srivastava, M. B. (2002). Energy-aware wireless sensor networks. *IEEE Signal Processing*, 19:40–50.
- Shah, R. C., Roy, S., Jain, S., and Brunette, W. (2003). Data mules: modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. In *Sensor Network Protocols and Applications, 2003. IEEE International Workshop on*, pages 30–41.
- Sharma, G., Mazumdar, R., and Shroff, N. B. (2007). Delay and capacity trade-offs in mobile ad hoc networks: a global perspective. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 15(5):981–992.
- Srinivasan, V., Motani, M., and Ooi, W. T. (2006). Analysis and implications of student contact patterns derived from campus schedules. In *MobiCom '06: Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 86–97, New York, NY, USA. ACM.
- Toh, C.-K. (2002). *Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems*. PTR Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Wang, W., Srinivasan, V., and Motani, M. (2007). Adaptive contact probing mechanisms for delay tolerant applications. In *MobiCom '07: Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile computing and networking*, pages 230–241, New York, NY, USA. ACM.
- Wang, Y., Jain, S., Martonosi, M., and Fall, K. (2005). Erasure-coding based routing for opportunistic networks. In *WDTN '05: Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, pages 229–236, New York, NY, USA. ACM.
- Zhao, W., Ammar, M., and Zegura, E. (2004). A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks. In *MobiHoc '04: Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 187–198, New York, NY, USA. ACM Press.