

Sistema de Medição Precisa do Consumo de Energia em Dispositivos Móveis de Comunicação Sem Fio

Alexandre Coser Monteiro
Ricardo Guerra Vianna
Renato de Castro Dutra
Laboratório de Computação Paralela
UFRJ
(coser,vianna,rcdutra)@lcp.coppe.ufrj.br

Luiz Maltar Castello Branco
UFRRJ
maltar@ufrj.br
Claudio Luis de Amorim
UFRJ
amorim@lcp.coppe.ufrj.br

Resumo

The battery time life of mobile wireless equipments such as palmtops, laptops, and celulares, depends strongly on the efficiency of their wireless communication devices to save energy when in operation. In this article, we describe the design of a new electronic device capable of measuring the energy cost of basic wireless communication events, including scan, connection, and data transport. We illustrate the potentials of our equipment by fine measuring the energy costs of the Bluetooth protocol operation in practical situations.

1 Introdução

A crescente disseminação de equipamentos portáteis sem fio incluindo celulares, palmtops e laptops, coloca o desafio de como conectá-los sem lhes sacrificar a mobilidade. A dificuldade está no fato que a mobilidade do equipamento é influenciada por vários fatores, incluindo o meio físico utilizado para conexão, o protocolo de transmissão de dados, a localização de outros dispositivos e sua autonomia, isto é, o impacto da mobilidade sobre o funcionamento dos dispositivos quando conectados.

Neste trabalho, propomos e avaliamos um novo sistema de controle de consumo de energia para dispositivos móveis, inspirado no trabalho apresentado em [3]. Nosso sistema é capaz de permitir o aumento da autonomia de um equipamento através do controle eficiente de uso da energia de bateria disponível. Esta vantagem pode ser aplicada em equipamentos como o MOTE-IV [6] para pesquisas de protocolos e em rede sensores utilizadas em computação de alto desempenho como para aplicações de monitoração ambiental. Mais especificamente, desenvolvemos um novo equipamento de medida direta de consumo (EMDC) que permite

converter a variação da corrente da fonte de dispositivos de comunicação sem fio em informação digital de consumo de energia por cada evento básico de comunicação. Os dados fornecidos em tempo real pelo equipamento servem de entrada para um novo modelo preciso de consumo de energia (En_{con}) que propomos. Esses dois componentes, EMDC e En_{con} , juntos formam um sistema que permite avaliar a eficiência de consumo de energia dos protocolos de transmissão, conexão e localização do dispositivo móvel. Para avaliar o potencial do sistema proposto, apresentamos um estudo sobre consumo de energia de equipamentos sem fio que utilizam o protocolo Bluetooth, em situações e cenários reais de operação, verificando a influência das variáveis ambientais e diferentes métodos de controle de consumo de energia utilizados por diferentes fabricantes e protocolos distintos. Os resultados mostram que o sistema proposto é de fato capaz de quantificar com precisão a diferença de consumo entre mestre e escravos nos regimes de funcionamento do Bluetooth cujo modelo não mede a variação dos fatores tais como número de conexões, retransmissões e geografia do ambiente. Mais importante, os resultados confirmam a importância em diferenciar estes ambientes em simulações ou técnicas que tentam prever o comportamento do consumo de energia desses tipos de equipamentos.

Este artigo é organizado da seguinte forma. Na seção 2 discutimos as principais características de consumo de energia do protocolo Bluetooth, além de métodos utilizados para o cálculo do consumo de energia nesse tipo de protocolo. Na seção 3, apresentamos o sistema para medição do consumo de energia para equipamentos sem fio. Na seção 4, descrevemos os experimentos realizados com o protocolo Bluetooth e os resultados obtidos. Na seção 5, apresentamos nossas conclusões.

2. Bluetooth

Neste artigo iremos apresentar somente as camadas do protocolo Bluetooth que tenham alguma relevância no controle do consumo de energia desses dispositivos, [1].

2.1 Estabelecimento de Conexão e Controle de Energia

Ao se ligar um dispositivo Bluetooth, ele entra em estado de *Espera* até que seus circuitos e programas sejam inicializados. Neste estado, o dispositivo pode seguir para os estados de *Page* ou *Inquiry* se o endereço do nó ao qual ele irá se conectar for conhecido, como mostrado na figura 1.

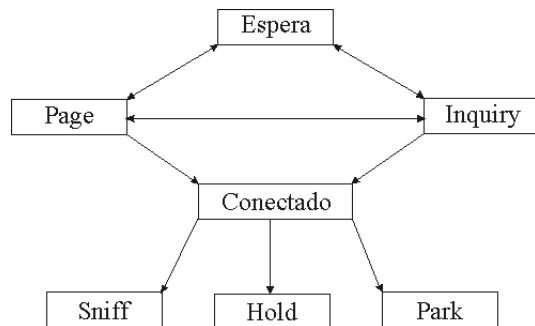


Figura 1: Estabelecimento de conexão

O procedimento de *inquiry* possibilita ao dispositivo, descobrir se há outro(s) dispositivo(s) em seu raio de alcance, seu(s) endereço(s) e "clock(s)". Ao receber uma mensagem desse tipo, um dispositivo deve enviar como retorno um pacote contendo além de sua identidade, informação para sincronismo entre eles. Para evitar colisões, quando vários dispositivos estiverem respondendo, eles utilizam uma temporização aleatória para a comunicação. Somente o endereço é necessário para estabelecer uma conexão. Numa conexão ponto-multiponto, o canal é compartilhado entre várias unidades Bluetooth. Quando duas ou mais unidades compartilham o mesmo canal, elas formam uma *piconet*. Após realizar um *inquiry*, o dispositivo pode retornar ao estado de *espera* ou realizar um *page* para tentar estabelecer uma conexão *piconet* com a unidade escrava. Nesta situação os transceptores estão ligados e com um alto consumo de energia.

Para o procedimento de *page*, vários esquemas podem ser aplicados. Porém existe um esquema imperativo que é utilizado quando duas unidades se encontram pela primeira vez e neste caso o procedimento de *inquiry* é seguido pelo procedimento de *page*. No estado de *Page*, o dispositivo transmite dois pedidos de conexão seguidos, em diferentes portadoras a cada 1, 25 ms e verifica também duas vezes se há respostas.

Após realizada a conexão os dispositivos mestre e escravo podem combinar a utilização de algum esquema de *page* opcional ou negociar algum dos três regimes de baixo consumo: *sniff*, *hold* ou *park*. Neste trabalho foram investigados experimentalmente o regime de consumo *sniff* e *hold*.

Para economizar energia, os dispositivos ociosos entram no estado de *Espera*, porém periodicamente eles devem "acordar" para verificar se existe algum dispositivo tentando estabelecer conexão. Esse evento que ocorre periodicamente é chamado de *Scan*, dura 10 ms e cada vez que este dispositivo desperta, ele verifica uma portadora diferente.

A banda Básica Bluetooth também dispõe de técnicas de retransmissão de pacotes e de correção de erros para fornecer robustez e confiabilidade ao Bluetooth.

O Bluetooth disponibiliza os valores de alguns parâmetros utilizados para controlar as conexões, entre eles estão o RSSI, LQ e TPL.

O Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (RSSI) é um parâmetro opcional do Bluetooth. Para que um transceptor possa fazer parte de um canal com potência controlada, ele deve ser capaz de medir a própria intensidade de sinal no receptor e determinar se o transmissor no outro lado da conexão deve aumentar ou diminuir seu nível de potência de saída.

Este parâmetro indica a diferença entre a intensidade do sinal medido na recepção e os limites que compõem o *Golden Receiver Power Range* (GRPR). Um valor positivo indica quantos dB's este sinal tem, acima do limite máximo do GRPR e um sinal negativo, quantos dB's abaixo do limite mínimo da faixa de GRPR.

O Nível de Potência de Transmissão (TPL) se refere ao sinal de transmissão do circuito de rádio do Bluetooth, para um canal de comunicação específico. Este valor é mostrado na escala de dBm e pode variar de -30 dBm a 20 dBm, onde $P(dBm) = 10 * \text{Log}(P(mW))$.

O parâmetro Qualidade do Link (LQ) indica o valor da qualidade de conexão de um dispositivo em um canal. Ele varia de 0 a 255 e quanto maior o valor medido, melhor é a qualidade de comunicação. Cada fabricante de equipamentos Bluetooth utiliza um algoritmo diferente para medir este índice, porém todos eles usam a Taxa de Erro de Bit (BER) como parâmetro deste cálculo.

2.2 Regimes de Economia de Energia *Sniff* e *Hold*

No regime *Sniff*, o ciclo de trabalho para escuta ou recepção da unidade escrava pode ser reduzido. Dentro deste intervalo o dispositivo estaria em modo *sleep*. O slot de tempo em que o mestre pode começar uma transmissão para uma escrava específica é reduzido, isto é, o mestre só pode começar uma transmissão em intervalos de tempo pré-estabelecidos com a unidade escrava e esta, por sua vez,

reduz o tempo dedicado para escutar esta transmissão e aumenta o intervalo de tempo para o próximo instante onde ela irá novamente escutar o mestre. Estes intervalos são chamados de *sniff attempt* ($t_{sniff\ attempt}$) e *tempo de sniff* (T_{sniff}), respectivamente.

No regime Hold o dispositivo entra em modo de baixo consumo, desliga seu receptor e transmissor de maneira a não executar qualquer função Bluetooth durante esse período neste determinado canal, restando somente atividades dentro dos demais intervalos de tempo definidos para outros canais aos quais ele já tenha se conectado. O dispositivo entra neste estado por tempo determinado e é acordado pelo mestre, não perde seu endereço lógico na rede, mas perde o sincronismo com o mestre, que ao terminar o tempo de *hold* é recuperado.

3 Sistema de Medida de Consumo de Energia em Equipamentos sem Fio

3.1 Trabalhos Relacionados

O Modelo de Perda no Espaço Livre, conforme mostrado em [9], é uma alternativa para uma melhor modelagem do consumo de energia. Porém ele se torna impreciso quando for necessário considerar as diferenças e perdas provocadas pelas modificações do ambiente e a topologia da rede formada pelos equipamentos sem fio.

Outros modelos [4, 7, 9, 10], conseguem uma boa aproximação ao modelar as variações dos estados de transmissão e recepção durante a montagem de uma piconet ou seja, a transferência de informação entre nós, a adição de novos nós e a eventual perda e recuperação de uma conexão e até o comportamento de alguns regimes de baixo consumo. Porém estes modelos enfrentam dificuldades para representar o comportamento das variáveis físicas, especialmente Reflexão, Difração e Espalhamento impostas pelo cenário onde o equipamento irá operar e que são responsáveis por provocar atrasos, retransmissões e consequentemente elevar o consumo de energia.

Em contraste, nosso sistema supera tais dificuldades através do uso da informação de variação da corrente de alimentação do equipamento sem fio, como principal mecanismo de observação das variações de consumo gerados pelos diferentes tipos de cenários e ambientes onde ele se localiza, independente do tipo de protocolo usado para comunicação ou tipo de equipamento. É uma modelagem simples que usa uma aproximação semelhante a [7, 4], porém captura a interação complexa entre os componentes de *hardware*, *software*, o meio ambiente e as transições entre os modos de consumo. Desta maneira, o sistema de medida oferece ao pesquisador uma ferramenta simples para várias aplicações em ambiente de comunicação sem fio, incluindo

o desenvolvimento de algoritmos para redução de consumo de energia e dimensionamento da bateria, taxa de aquisição e formação dos dados para comunicação.

3.2 Equipamento de Medida Direta e Modelo de Consumo

O sistema desenvolvido em [5] para Medição do Consumo de Energia em Equipamentos Sem Fio é composto pelo Equipamento de Medida Direta de Consumo (EMDC) e o modelo de consumo de energia En_{con} , descritos a seguir.

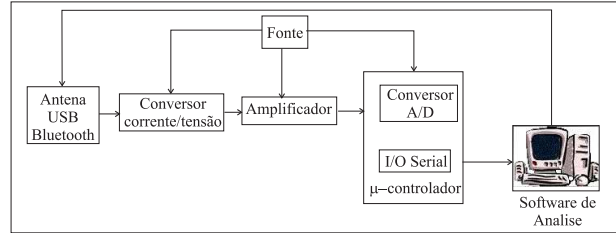


Figura 2: Diagrama de Blocos do EMDC

No sistema mostrado na Figura 2, o computador armazena as informações de variação de consumo e controla o equipamento de comunicação sem fio que está conectado ao barramento USB. Isso permite que exista um sincronismo entre os eventos de comunicação bluetooth e a captura pelo conversor corrente/tensão da variação de consumo num determinado instante que é repassada ao computador via porta serial. Este sistema também pode ser replicado para outros nós escravos ou mestres, sem a necessidade de implementar qualquer modificação do sistema.

Observando o funcionamento interno de um equipamento de comunicação sem fio podemos afirmar:

- A corrente consumida varia de acordo com as mudanças de estados pelos quais o equipamento passa para realizar uma conexão e consequentemente uma comunicação.
- A Potência Consumida pelo dispositivo de comunicação sem fio é a soma das potências consumidas, quando ele está no estado ativo sem conexão, mais a potência do estado *scan*, *page* e *inquiry*, mais a potência consumida no estado ativo e conectado, no estado de transmissão e no estado de recebimento.

Podemos traduzir estas afirmações na equação 3.2.

$$En_{con} = I(f) * (t_{at.s.con} + t_{scan} + t_{ativo} + t_{sniff} + t_{hold} + t_{park} + En_{base}),$$

onde En_{con} é o consumo de energia total do dispositivo, $I(f)$ representa a variação da corrente consumida em função das variações de estados e ambiente do equipamento sem fio, $t_{at.s.con}$, t_{scan} , t_{ativo} , t_{hold} e t_{park} indicam o tempo em

milisegundos de duração de cada estado, ativo sem conexão, scan, ativo conectado, hold, sniff e park respectivamente. O nível de consumo mínimo inerente a cada equipamento, que varia para cada tipo, modelo e fabricante é representado por En_{base} .

Deste modo o valor de En_{con} é capaz de perceber as variações definidas pelo estado de mestre e escravo, distância, número de conexões ativas, ambientes fechados e abertos. O que torna possível verificar também, atrasos nas trocas de mensagens e reflexões causados pela geografia do ambiente.

A figura 3, é o resultado dos sinais capturados pela EMDC e enviados para o computador de análise, ela representa a variação do consumo em relação aos eventos de comunicação, ou seja, é a curva característica de cada estado pelo qual o dispositivo sem fio passa, desde o seu estado de Espera até o estabelecimento de conexão e transmissão da mensagem.

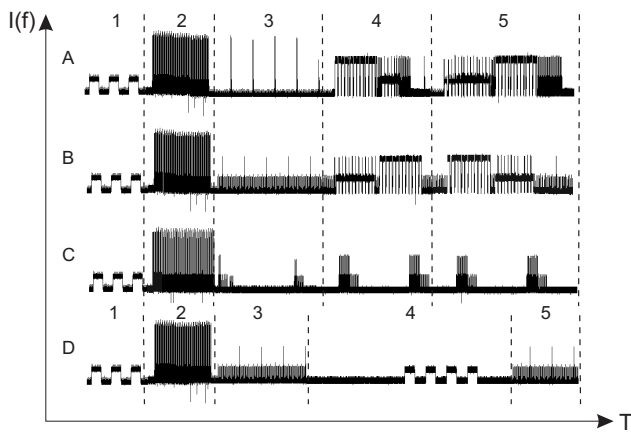


Figura 3: Curvas de variação de corrente $I(f)$ em mA capturadas pela UMDC

A curva A da figura 3 trecho A-1, apresenta o mestre no estado de Espera. No trecho A-2, realizando um "Scan", no trecho A-3 conectado com um escravo e no trecho A-4 e A-5, enviando uma mensagem e recebendo uma mensagem, respectivamente. A curva B da mesma figura mostra os mesmos estados relativos a um escravo, porém no trecho B-4 ele recebe uma mensagem e no trecho B-5 ele envia uma mensagem e o trecho B-3 representa apenas o estado de conexão com o mestre. A curva C da figura 3 no trecho C-3 representa este escravo em estado de "Sniff" e o trecho C-4 e C-5, indicam seu comportamento quando esta enviando e recebendo uma mensagem sob o estado de Sniff, respectivamente.

A curva D da figura 3 trecho D-4, representa este mesmo escravo em estado de "Hold". Todas as funções param e o dispositivo passa apenas a ligar seu rádio dentro de uma janela de tempo de $10\ ms$ a cada $1,25\ sg$ para escutar in-

formações de outros canais.

4 Experimentos

Todos os experimentos consistiram em realizar medidas de consumo de energia utilizando a EMDC e programas auxiliares desenvolvidos para coleta dos dados, passando a fornecer informações suficientes para uma análise da potência total consumida pelo dispositivo, da potência de transmissão fornecida pelo parâmetro TPL, da indicação de qualidade da conexão mostrada no valor de LQ e da potência de recepção calculada através de RSSI.

Como o parâmetro RSSI disponibilizado pelo Bluetooth não indica o valor absoluto da potência de recepção, mas a diferença entre a potência recebida e a faixa *Golden Receive Power Range*, neste artigo ele será chamado de dRSSI, para que não seja confundido com o parâmetro RSSI utilizado em diversas áreas para indicar o valor absoluto da potência de recepção de um sinal RF comum.

Os experimentos utilizaram de 2 a 10 dispositivos Bluetooth, todos do mesmo tipo, adaptador Bluetooth USB classe 1 modelo USB-BT1, com chip CSR BlueCore 02, sensibilidade de $-80\ dBm$ em 0.1% de BER e consumo médio de $200\ mA@5V$.

4.1. Cenário I - Campo Aberto

Este cenário consiste em uma área aberta com aproximadamente $150\ m$ de comprimento por $70\ m$ de largura a céu aberto e sem nenhum obstáculo na linha de visada. Neste cenário, o modelo de atenuação da potência de transmissão, que considera a reflexão no chão para o cálculo da potência de recepção pode ser comparado indiretamente com o valor de dRSSI.

Com os dispositivos operando em modo Ativo, foram transmitidos 60 pacotes de $4\ KB$, a cada $3\ m$ de distância entre eles, até a queda da conexão, ocorrida a $108\ m$ de distância. Os resultados obtidos são apresentados a seguir na forma de gráficos.

A figura 4, mostra a intensidade da potência de transmissão (TPL) do escravo e mestre. A variação de TPL ocorre para compensar a atenuação com o aumento da distância sofrido pela potência do sinal recebido no mestre. Com o controle de energia sempre atuante nesta classe de dispositivo Bluetooth, o valor de TPL será o menor possível para manter a conexão, neste regime de funcionamento. Quando este valor chega a $0\ dBm$ e a distância continua aumentando, os valores amostrados de dRSSI passam a apontar um afastamento cada vez maior do ponto ótimo ($0\ dBm$), indicando que a quantidade de amostras muito menores que zero está muito alta, prejudicando a conexão e tornando necessário aumentar a potência de transmissão.

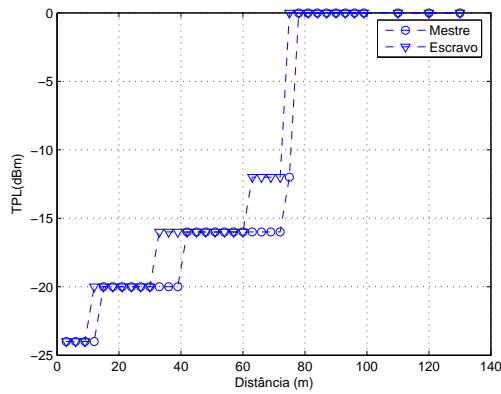


Figura 4: Mestre e Escravo - TPL - Cenário I

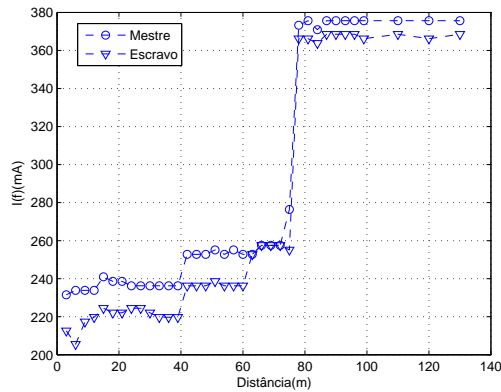


Figura 5: Mestre e Escravo - I(f) - Cenário I

A figura 5 descreve o comportamento do parâmetro $I(f)$, medido na EMDC, segundo a variação da distância. Esta curva indica que a EMDC foi capaz de perceber a variação do consumo destes dispositivos durante o afastamento dos equipamentos sem fio, dentro deste ambiente sem obstáculos. Esta variação ocorre em degraus semelhantes a variação do aumento da potência de transmissão indicado por TPL, isto mostra que este aumento da potência de transmissão tem um grande peso no consumo do dispositivo.

A figura 6, indica o tempo total gasto pelo rádio do dispositivo durante a transmissão e recepção de cada elemento da piconet para cada ponto de medida, ou seja, é o tempo que o rádio esteve ligado para transmitir e receber. A curva esperada deveria mostrar uma variação pequena deste tempo, com o aumento da distância, devido à constante taxa de transmissão e tamanho do pacote transmitido, como pode ser observado na curva do escravo. As pequenas variações de tempo podem ser explicadas pelo pequeno atraso causado com o aumento da distância entre os pontos e a política de recebimento de mensagem usado pelo Bluetooth, na qual

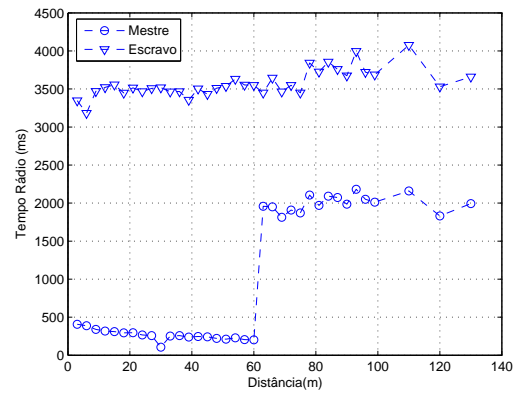


Figura 6: Soma do tempo que o Rádio ficou ligado em Tx e Rx - Cenário I

ele aumenta o tempo de recepção ou transmissão para um determinado canal que ainda não finalizou o envio ou recepção da mensagem, em até 5 unidades de tempo Bluetooth ($5 * 625 \mu s$).

A pequena queda de tempo apresentada nos primeiros 60m do mestre e o salto de tempo após este ponto foram provocados pela sucessiva queda na qualidade do canal de comunicação e possível perda de pacotes, tolerada pelo dispositivo até alcançar os 60m. Com a perda de pacotes, o mestre não liga seu transmissor para enviar a confirmação a cada trecho de pacote recebido, assim o tempo registrado caiu.

4.2 Cenários com Obstáculos - LCP

Os cenários que se seguem estão localizados dentro do Laboratório de Computação Paralela (LCP) da UFRJ. A dimensão do LCP é de aproximadamente 14m de comprimento por 14m de largura, com armários, computadores, mesas, divisórias de vidro e madeira prensada, atuando como obstáculos a comunicação sem fio, como mostra a figura 7.

Foram realizados seis experimentos reunidos em três cenários neste ambiente. Com exceção dos experimentos realizados no Cenário III e IV, os demais mantiveram o dispositivo mestre em uma posição fixa e enquanto movimentava o escravo para as posições P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, mostradas na figura 7.

4.2.1 Cenário II - Regime Ativo

Este cenário foi planejado para realizar dois experimentos. O primeiro faz o envio de 60 pacotes de 4 KB do nó Escravo em direção ao nó Mestre e o segundo inverte a situação e o Escravo se torna o destino das mensagens, de modo a verificar a influência no gasto de energia, do equipamento de comunicação sem fio ao assumir o estado de fonte ou

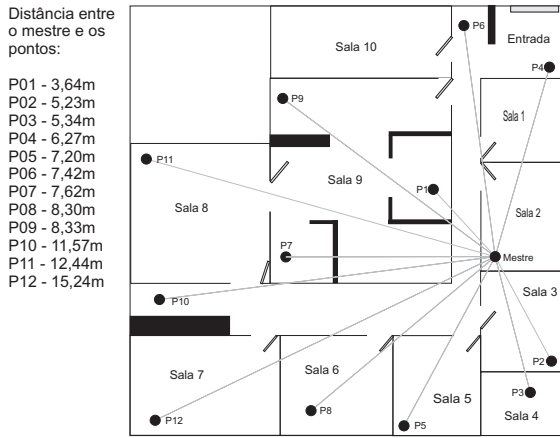


Figura 7: Mapa do LCP

destino da mensagem, dentro de uma situação real de operação repleto de obstáculos.

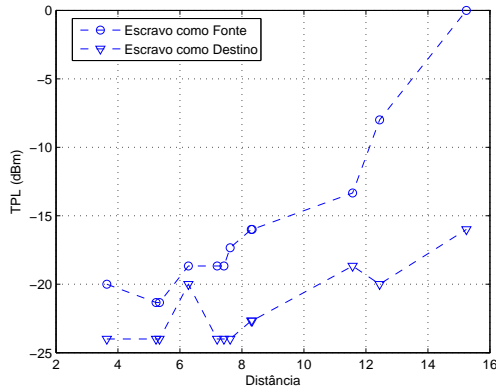


Figura 8: TPLs dos escravos Fonte e Destino

As figuras 8, 9 e 10 mostram que o comportamento do consumo dentro de ambientes com obstáculos, diminui a influência do nível de potência de transmissão sobre o gasto total de energia consumida e transfere parte deste peso para o tempo que o rádio precisa ficar ligado para completar a transmissão e recepção das mensagens. Em comparação com os gráficos anteriores de TPL, existe uma variação muito maior para pequenas distâncias, os obstáculos criam o efeito de afastamento entre mestre e escravo e faz com que o nível de energia de transmissão precise aumentar para atingir distâncias menores, além da observação de que o escravo na transmissão de pacotes precisou de um nível mais alto de potência para transmitir do que quando o mesmo escravo funcionava como receptor. Pois agora ele passou a ser o elemento passivo do controle de energia do Bluetooth e recebe mensagens o obrigando a aumentar seu nível de

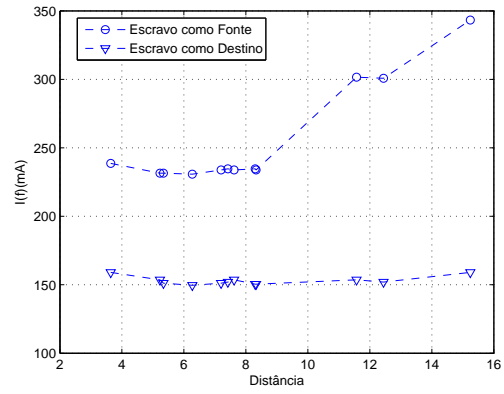


Figura 9: $I(f)$ dos escravos Fonte e Destino

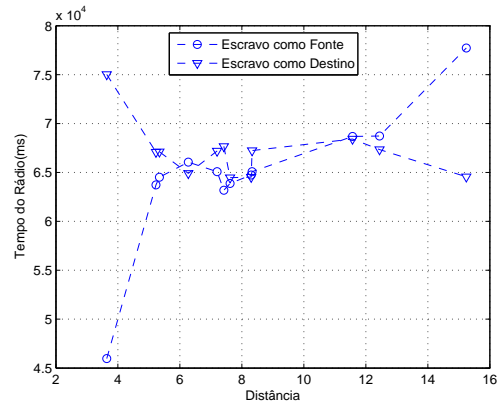


Figura 10: Tempo total que o Rádio ficou ligado em Tx e Rx do Escravo

energia de transmissão, seção 2.1.

4.2.2 Cenário III - Ping

Para observar as curvas características do equipamento de comunicação sem fio quanto a variação do tamanho do pacote, este experimento montou uma piconet dentro do LCP e sem variar a distância entre o nó mestre e escravo, foram criadas mensagens de 100B até 30KB, sendo de 100B a 1KB usando passo de variação de tamanho igual a 100B, de 1kB a 10kB passo de 1.000B e de 10KB a 30KB com passo de 10.000B. Estas mensagens foram enviadas pelo escravo para o mestre, sem variar a quantidade de mensagens, com um pequeno atraso de 1 segundo entre cada mensagem.

Com os resultados medidos foram construídas as curvas das figuras 11, 12 e 13.

A figura 11 mostra que não houve mudança do nível de potência de transmissão com a variação do tamanho da mensagem e que os dois nós usaram o mesmo nível de potência de transmissão durante o experimento, segundo o

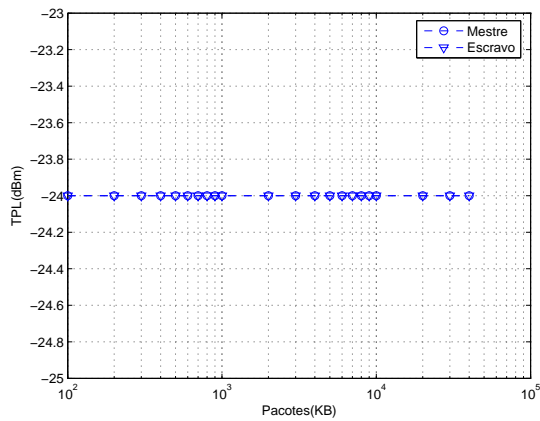


Figura 11: TPL - Cenário III

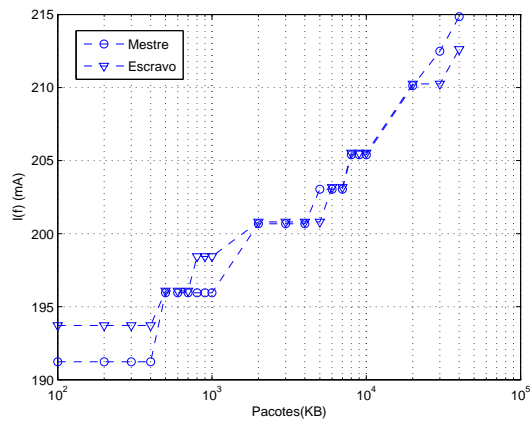


Figura 12: Mestre e Escravo - I(f) - Cenário III

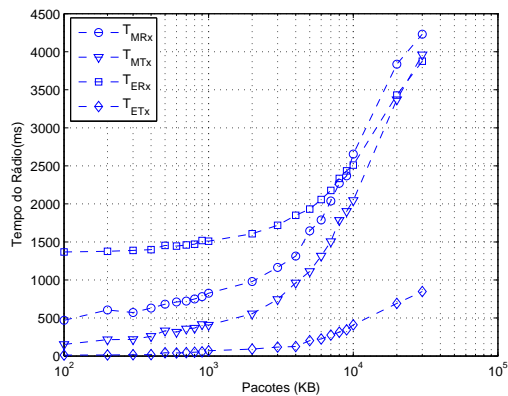


Figura 13: Mestre e Escravo - Tempo Tx e Rx - Cenário III

parâmetro TPL fornecido pelo Bluetooth.

Na figura 12 notamos uma pequena variação da cor-

rente consumida com o aumento do tamanho da mensagem e muito pouca variação entre o mestre e escravo. Isto mostra que o nível de energia de transmissão tem um peso grande no consumo, mas não é mandatório em algumas situações e aplicações do equipamento sem fio. Com o aumento do tamanho da mensagem, surge a necessidade de processar mais dados, por isso o consumo aumenta. Mas sem variação de distância, nem obstáculos na linha de visada dos equipamentos de transmissão, o valor de TPL não varia.

A figura 13 mostra o tempo total do rádio ligado em transmissão e recepção do mestre e escravo. Observa-se, que o escravo está gastando mais tempo para receber a mensagem de retorno e confirmação, do que o mestre gasta para retransmiti-la. Isto ocorre porque a contagem do tempo de rádio ligado em recepção, inclui o tempo que o mestre e escravo gastaram para verificar outros canais em busca de outros dispositivos. Porém com o aumento do tamanho da mensagem o escravo sacrifica as unidades de tempo utilizadas para verificar outros canais, para receber o restante da mensagem sem particiona-las.

4.2.3 Cenário IV - Mestre + 7 Escravos

Neste cenário foi observada a simples variação de consumo em relação ao aumento do número de conexões ativas com um único mestre, mostrada na Figura 14. O experimento consistiu em ligar a EMDC ao dispositivo Bluetooth mestre e realizar uma conexão com outro dispositivo Bluetooth escravo e repetir este processo até completar sete conexões ativas com este mesmo mestre, ou seja formar uma piconet e acrescentar um escravo de cada vez até o limite de sete.

De acordo com o comportamento observado do protocolo Bluetooth, podemos afirmar que o tempo de rádio ligado deve aumentar quase linearmente com o acréscimo de escravos na piconet. Porém a figura 14 indica que esta variação de consumo não segue o mesmo comportamento, mas também é crescente com o número de escravos. Observando a figura 15, que retrata o nível de energia de transmissão em um único canal de comunicação mestre-escravo, de cada novo escravo adicionado durante o experimento é possível perceber que a variação do comportamento do consumo total de energia por parte do mestre não sofre uma forte influência do valor de TPL, pois para cada canal o mestre manteve um valor de TPL distinto.

5 Discussão dos Resultados

Com os resultados obtidos dentro de cada cenário para a variação de I(f) e do tempo de rádio utilizado na comunicação é possível afirmar que estes parâmetros respondem a todos os principais fatores que influenciam o consumo de energia. Esses resultados contrastam com os do Bluetooth no sentido de que ele não mede a variação dos fatores

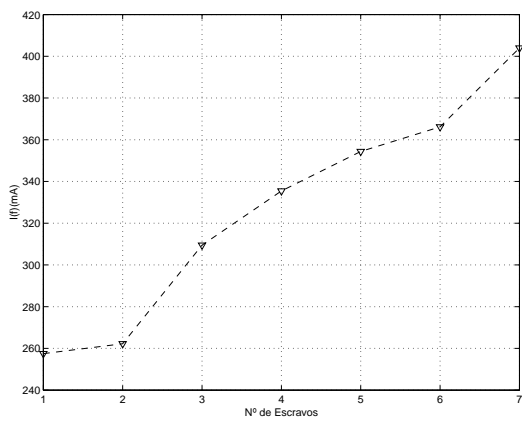


Figura 14: Mestre - I(f) - Cenário IV

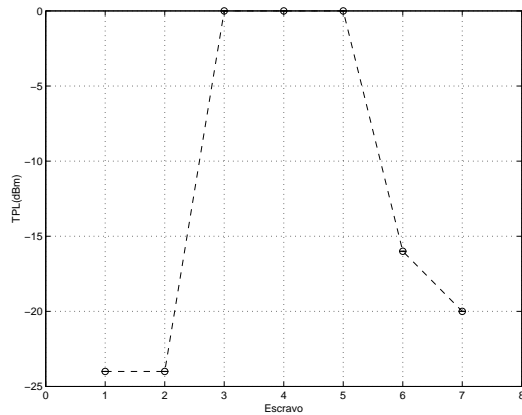


Figura 15: Mestre - TPL - Cenário IV

tais como, o número de conexões, retransmissões ocorridas durante a troca de mensagens entre mestre e escravo e geografia do ambiente onde o equipamento está localizado.

Também foi possível comprovar algumas afirmações como a falta de simetria na energia de transmissão [2], primeiramente observada pela variação de TPL do mestre e escravo dentro do cenário II. Notamos também que a relação entre, a quantidade de chaveamentos no circuito RF para transmissão e recepção e o consumo de energia [10], também pode ser vista no cenário II. A variação do consumo com o tamanho da mensagem e o tempo de atividade do equipamento [8], foi observada no cenário III.

A diferença no consumo observada em todos os cenários entre mestre e escravo e seus regimes diferenciados de funcionamento, mostram o peso da influência que o ambiente de operação tem sobre a energia gasta pelos dispositivos de comunicação sem fio e a importância em diferenciar estes ambientes ao gerar simulações ou técnicas que tentam prever o comportamento do consumo de energia desses tipos de equipamentos. Observando os resultados da EMDC para

gerar o parâmetro $I(f)$ da equação de gasto de energia, verificamos sua capacidade para demonstrar as mudanças de ambiente e geografia de operação dos equipamentos. Como resultado, a EMDC é capaz de caracterizar com precisão as curvas de consumo de energia destes diferentes ambientes e regimes de operação.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Discutimos sobre um novo modelo capaz de descrever o consumo de energia em equipamentos de comunicação sem fio, que utiliza como parâmetro as informações fornecidas por um instrumento de medida construído por nós com esta finalidade. Apresentamos experimentos com o protocolo Bluetooth realizado em condições reais de operação e comparamos os resultados com as descrições de outros modelos de consumo de energia para comprovar a eficácia da nossa proposta.

Trabalhos futuros incluem a avaliação de outros cenários e políticas de baixo consumo utilizadas pelo protocolo Bluetooth. Também temos a intenção de usar este modelo em testes com outros protocolos, como o Zigbee e o 802.11.

Referências

- [1] I. Bluetooth® SIG. Specification of the Bluetooth System, 2002.
- [2] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In *HICSS '00*.
- [3] S. Kostin and C. L. Amorim. Métricas para Controle Eficiente de Potência de Transmissão em Cenários de Redes de Sensores com Obstáculos. Technical Report ES-692/06, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- [4] C. B. Margi and K. Obraczka. Instrumenting Network Simulators for Evaluating Energy Consumption in Power-Aware Ad-Hoc Network Protocols. In *MASCOTS '04*.
- [5] A. C. Monteiro. Sistema Eficiente de Medição de Consumo de Energia para Equipamentos de Comunicação sem fio. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Janeiro, 2006.
- [6] MoteIV. <http://www.moteiv.com/>.
- [7] L. Negri and L. Thiele. Power Management for Bluetooth Sensor Networks. *Wireless Sensor Network European Workshop*, Fevereiro 2006.
- [8] A. Rác, G. Miklós, F. Kubinszky, and A. Valkó. A Pseudo Random Coordinated Scheduling Algorithm For Bluetooth Scatternets. In *MobiHoc '01*.
- [9] P. Santi. *Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. JohnWiley & Sons Ltda., 2005.
- [10] Y. Tseng and T. Lin. Power-conservative designs in ad hoc wireless networks. *The handbook of ad hoc wireless networks*, pages 71–81, 2003.