

# Monitoramento de Eventos em Redes Sem Fio Utilizando EWMA e Wavelets

Ricardo A. Rabelo Oliveira\*, Rainer P. Couto\*, Antonio A.F. Loureiro

<sup>1</sup>Departamento de Ciência da Computação  
Universidade Federal de Minas Gerais

(rabelo,rainerpc,loureiro) at dcc.ufmg.br

**Resumo.** Neste trabalho é proposta uma metodologia para descrever o contexto de uma comunicação numa interface sem fio através da avaliação da correlação temporal e espectral dos indicadores de qualidade nos sinais de comunicação, fornecendo às aplicações informações sobre mobilidade e interferência no ambiente. A metodologia apresentada faz o uso de uma técnica de controle estatístico de processos, conhecida como mapa de controle com EWMA (Exponentially Weighted Moving Average), e da transformada de Wavelets, identificando os padrões na qualidade da comunicação na rede. Essa nova metodologia foi implementada e testada em duas tecnologias de comunicação sem fio distintas, IEEE 802.11 e Bluetooth.

**Abstract.** In this work we propose a new technique to describe context in a wireless communication. By doing analysis of temporal and spectral correlation of quality parameters of the radio signal, this new technique can distinguish events such as mobility of a device from interference on the wireless interface and serve this information to an application which wishes to adapt to these scenarios. In our model we use an statistical process control - known as EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) control chart - and Wavelet transform to identify patterns on radio signal's quality. We have implemented and tested our new model on two different wireless networks, IEEE 802.11 and Bluetooth, and our results show it works properly on both of them.

## 1. Introdução

A expansão da comunicação sem fio tem gerado uma demanda crescente por novas aplicações na área de computação móvel. Dentre as aplicações criadas para esse ambiente, algumas necessitam de uma maior adaptabilidade aos dispositivos que as executam. Essa adaptabilidade pode estar direcionada tanto ao conteúdo no qual a aplicação trabalha, como vídeo, voz e dados, quanto ao acesso a diversos tipos de informações, como a capacidade dos dispositivos, localização e posicionamento, dados de extrema relevância para a computação móvel. Para que esse processo de adaptação seja efetivo, as aplicações devem ter acesso a informações sobre o *contexto* em que estão inseridas. O contexto descreve o ambiente no qual o dispositivo se encontra e deve distinguir as principais características desse meio: capacidades de transmissão, qualidade de recepção, maneira como são utilizados os recursos disponíveis, etc. Dada a natureza destes canais de comunicação, nos quais a qualidade pode se alterar sensivelmente devido a fatores externos, é necessário que as aplicações tenham acesso às informações a todo instante. Como descrito em [3], o contexto da rede é um dos fatores mais importantes a serem considerados nas aplicações que usam o meio sem fio.

Para atender a esses requisitos, é preciso que a aplicação esteja integrada ao *hardware*, com uma utilização menos generalizada dos recursos disponíveis. Esta integração possibilita um

---

\*Financiado pelo CNPq.

controle mais robusto pela aplicação, diminuindo a abstração gerada pela quantidade de camadas de software entre a aplicação e o *hardware* envolvido. O acesso a essas informações permite que a aplicação seja desenvolvida de maneira a otimizar o uso dos recursos envolvidos, utilizando-se uma API de acesso direto às informações da placa de rede [16], por exemplo.

A qualidade da comunicação é descrita pela transmissão e recepção correta dos quadros transmitidos pela interface. Para que a recepção dos quadros aconteça corretamente numa placa de rede sem fio, o nível do sinal recebido deve estar num patamar aceitável pelo modem desta interface, possibilitando a reconstrução do quadro. Através do valor do nível de sinal, extraído de cada quadro recebido, pode-se obter uma descrição da qualidade da comunicação com o decorrer do tempo. Esses valores podem variar consideravelmente devido às características da transmissão via rádio, como reflexões, ruídos e absorção do meio, sendo difícil descrever um padrão específico com apenas alguns quadros. Neste caso, uma análise da correlação das medidas destes valores possibilita a identificação de uma determinada mudança no comportamento do canal.

A correlação presente nos dados pode descrever eventos tornando possível identificar e analisar os padrões de determinados sinais. A principal vantagem desta análise é a possibilidade de uma atuação mais condizente com o comportamento em tempo de execução, na qual a alocação dos recursos computacionais pode ser feita de maneira eficiente. A correlação é caracterizada pelo fato de que é possível identificar padrões a partir de uma parte do conjunto total de dados. As principais classificações dos tipos de correlação são:

- *Correlação temporal*: pode-se prever o valor de uma medida baseando-se nas medidas anteriores, de acordo com um referencial temporal, como um intervalo determinado ou amostragens sucessivas;
- *Correlação espectral*: no espectro da frequência é possível avaliar os valores das flutuações dos dados, correlacionando com a sua ocorrência. O uso de uma transformada no plano da frequência identifica os elementos em comum, onde sinais considerados suaves possuem frequências baixas, enquanto os sinais com altas frequências são correlacionados.

Neste trabalho, dada a natureza das medidas, foram utilizadas técnicas que mesclam o uso da correlação temporal, através do uso de um método de controle estatístico, e a correlação espectral, através do uso da transformada de *wavelets*, para avaliar a qualidade da comunicação e disponibilizar esta informação para a aplicação. A utilização da correlação temporal associada com a correlação espectral se faz necessária porque os dados medidos têm a natureza multi-escalar, devido aos eventos estocásticos, que ocorrem em diferentes localizações no tempo e na frequência, e porque os métodos tradicionais de controle de processos estatísticos não são completos [1, 7, 17].

## 2. Trabalhos Relacionados

A identificação da qualidade do canal para adaptar a comunicação e a computação em meios sem fio é um foco atual de estudo, sendo exploradas em diversas tecnologias. Os trabalhos variam desde a adaptação do consumo de energia à compressão dos dados. A mobilidade e a interferência são os principais elementos analisados nesses estudos.

Em [18] é proposto um algoritmo para reduzir o consumo de energia no modo infra-estruturado numa rede sem fio 802.11, no qual a potência de transmissão é alterada para economizar energia em determinadas situações de movimentação e ruído e a interface de rede também é desativada seletivamente para diminuir o consumo de energia nos momentos em que não acontece comunicação. Um middleware que adapta os dados transmitidos, decidindo se irá comprimir ou não estes, é apresentado em [4], no qual esta decisão é feita de acordo com determinadas condições da comunicação e da bateria do dispositivo envolvido.

As informações sobre a mobilidade podem auxiliar os sistemas de localização das estações

móveis, através da avaliação dos valores de RSSI. Em [2] é feito um estudo do posicionamento de determinados padrões de comunicação em um ambiente indoor, considerando uma rede com 802.11. Em [14] é feito um trabalho semelhante numa rede Bluetooth. O uso da medida da força do sinal para a movimentação de serviços e aplicações numa rede Bluetooth é vista em [2], no qual é feito um estudo das viabilidades e testes de implementações. Em [15] é desenvolvido um *testbed* para testar e avaliar o desempenho de diversos algoritmos de roteamento ad hoc, fornecendo as informações da flutuação da força do sinal usado na comunicação entre os elementos móveis.

Por trabalharem em canais de frequências de uso livre, o caso de interferência entre as tecnologias sem fio é bem comum. O estudo da interferência entre o Bluetooth e o IEEE 802.11b pode ser visto em [6, 10]. Estes trabalhos avaliam e propõem soluções para os casos de interferência. Atualmente, os criadores destes padrões e diversos fabricantes já propuseram soluções que diminuem consideravelmente o impacto da interferência na comunicação, tais como a solução proposta pela Texas Instrument, que prevê em cada interface um canal de sincronismo entre as interfaces que estejam no mesmo dispositivo, evitando que enviem os dados ao mesmo tempo. A especificação 1.2 do Bluetooth prevê o uso do Frequency Hopping adaptativo, que isola os canais de frequência que estejam sofrendo interferência.

O uso de métodos de controle estatístico [13] é comumente aplicado em linhas de produção industrial, nas quais os elementos produzidos são avaliados de acordo com alguma especificação pré-definida, para identificar possíveis falhas na produção quase que imediatamente. A aplicação destes métodos nas medidas de qualidade da comunicação de uma rede sem fio, que permite uma inferência sobre determinado comportamento, pode ser vista em [18], no qual os valores de força de sinal da interface 802.11 são avaliados para possíveis adaptações no funcionamento da placa. Em [7] é feito um estudo das técnicas de análise de controle estatístico e de correlação espectral com o uso de wavelets. Um ponto que deve ser levado em conta é que as técnicas apresentadas não são aplicáveis em tempo real. Neste trabalho, é feita uma modificação de um método de controle estatístico, no qual a inferência dos eventos que ocorrem na comunicação é feita através das medidas da qualidade dos quadros recebidos, sendo avaliados em tempo real.

### 3. Medidas da Qualidade da Comunicação

A primeira etapa neste trabalho foi identificar o que deveria ser medido em cada padrão para monitorar os eventos da rede. Como as tecnologias utilizadas para testes, IEEE 802.11 e Bluetooth, são bastante distintas, cada uma especifica um tipo de métrica diferente para avaliar seu canal de comunicação. A seguir daremos uma breve explicação dessas métricas.

#### 3.1. Qualidade do sinal no IEEE 802.11

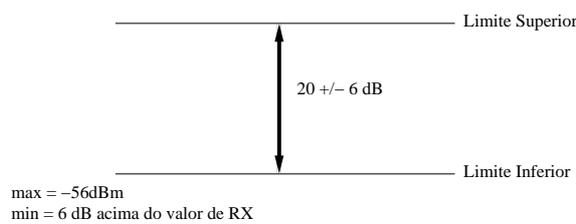
O padrão do IEEE 802.11 [8] define um mecanismo no qual o nível do sinal recebido pode ser medido no circuito da interface de rede sem fio. Este valor é um inteiro de tamanho 1 byte e é chamado de *Receive Signal Strength Indicator* (RSSI). Seus valores variam entre 0 e 255, mas não representam diretamente os valores em dBm ou mW. O RSSI é definido no padrão para uso interno pelo *chipset* da interface de rede sem fio e pelo seu driver. Quando a interface deseja transmitir um quadro, ela deve detectar se o canal de comunicação está liberado ou não. Se o valor do RSSI está abaixo de algum valor pré-determinado, conhecido como *Clear Channel Threshold*, o *chipset* identifica o canal como livre. Quando um cliente está associado a um ponto de acesso e está afastando deste, o valor de RSSI pode decair até um determinado limite, conhecido como *Roaming Threshold*, e efetuar o *roaming* com outra estação. Cada fabricante de interfaces 802.11 usa partes deste intervalo, normalmente definindo um valor máximo, *RSSI\_MAX*, e uma tabela que converte os valores RSSI em medidas em dBm, como pode ser visto em [20]. Outro fator também definido pelo padrão é a medida de qualidade do canal, que indica o quão satisfatório é

o sinal que está sendo recebido. Esta medida também depende do fabricante, podendo relacionar a razão sinal/ruído ou quantidade de beacons recebidos. Seus valores variam de 0 a 92, e quanto maior forem os valores, melhor a comunicação.

Os valores estão relacionados com a comunicação, a sua qualidade e o nível do sinal medido, ainda que a sua interpretação direta não indique uma grandeza física. Valores de RSSI em torno do valor  $RSSI\_MAX$  e qualidade perto dos valores máximos indicam uma boa qualidade na comunicação, enquanto valores baixos, ou que alterem constantemente, indicam que algum fator externo está afetando a comunicação, como um canal ocupado ou movimentação em relação ao outro elemento comunicante.

### 3.2. Qualidade do sinal no Bluetooth

O Bluetooth [19] não define nenhuma maneira de extrair a informação do nível do sinal diretamente da interface sem fio, mas define uma métrica para avaliar a qualidade do sinal proporcionalmente à distância entre os elementos. Define-se o RSSI como uma relação entre o nível do sinal recebido e uma tabela de averiguação ótima, chamada de *Golden Receiver Power Rank*, mostrada na figura 1.



**Figura 1. Região de aceitação do quadro Bluetooth *Golden Receiver Power Rank*. Retirado de [19]**

O Bluetooth determina um conjunto de comandos, implementados numa camada chamada *Host Controller Interface (HCI)*, que são utilizados pelo driver do dispositivo para acessar dados das interfaces sem fio. As funções relacionadas com a medida da qualidade do sinal e do canal são:

- `HCI_ReadQualityInfo`: este comando retorna a qualidade do canal de comunicação entre o módulo local e o dispositivo remoto, sendo este valor entre 0 e 255. O cálculo desta métrica é específica do fabricante, podendo ser baseado na vazão dos dados ou na taxa de transmissão;
- `HCI_ReadRSSI`: este comando mede o nível de RSSI. Se os elementos se encontram na *Golden Range*, a função de medida do RSSI retorna 0. Se estiver fora desse alcance, ela retorna valores entre -1 e -127, e se estiver muito próximo da estação emissora, ou acontecer algum tipo de sobrecarga na recepção, ela retorna valores entre 1 e 128.

## 4. Controle Estatístico de Processos

### 4.1. A Medida Estatística EWMA

O controle estatístico de processos é uma técnica usualmente utilizada para monitorar o comportamento de determinado processo de produção, identificando os momentos em que seu funcionamento não atende a algum requisito. Desta maneira é possível detectar se a operação do processo está acontecendo de maneira anormal a partir do comportamento estatístico das variáveis analisadas. Isso é feito através do Mapa de Controle (*Control Chart*) que verifica as medidas dos elementos gerados pelo processo monitorado, comparando-as com determinados limites pré-estabelecidos. Assim o mapa de controle é capaz de detectar se determinada medida do processo

encontra-se fora de algum parâmetro pré-estabelecido, possibilitando que algum tipo de gerência identifique as possíveis causas e determine quais as contra-medidas a serem tomadas [13].

O mapa de controle trabalha com a comparação das amostragens dos valores medidos durante a execução do projeto, com as medidas de média,  $\mu$ , e variância,  $\sigma^2$  esperados. Esses valores amostrados, chamados de  $\bar{X}$ , são comparados com dois limites, um superior, UCL (*Upper Control Limit*) e um inferior, LCL (*Lower Control Limit*) que estão associados ao valor de  $\mu$ .

$$LCL \leq \bar{X} \leq UCL$$

Se a medida está dentro dos limites, o processo se encontra sob controle e nenhuma ação precisa ser tomada. Caso contrário, é identificada uma situação fora de controle e algum tipo de correção e/ou identificação da causa deve ser tomada. A determinação desses dois limites e a detecção das amostragens depende do tipo de processo a ser analisado, pois limites muito afastados podem ocultar algumas possíveis falhas, e muito próximos acabam causando falsos alarmes. Dessa maneira os mapas de controle podem ser baseados, por exemplo, em alguma especificação de valores que são aceitos ou em um histórico dos dados corretos gerados pelo processo em instantes anteriores.

A medida estatística escolhida para analisar o comportamento do canal sem fio é o EWMA (*Exponentially Weighted Moving Average*) [9]. Um gráfico EWMA é usado quando é necessária uma rápida detecção de situações fora de controle, através do cálculo de uma série temporal das medidas, como descrito em [1]. Muitos trabalhos na área de controle de processos e segurança usam o EWMA por causa de sua grande sensibilidade na percepção de mudanças nas medidas de um processo, entretanto, sua aplicação no monitoramento de um canal sem fio necessita de algumas alterações nos seus parâmetros de funcionamento, como descrito a seguir. Na primeira etapa do cálculo do EWMA, as medidas dos processos são amostradas em determinados períodos e agrupadas em subgrupos de tamanho pré-definido, para os quais são calculados a média e o desvio padrão de cada subgrupo. Em seguida, a estatística do EWMA no tempo  $t$ ,  $EWMA_t$ , é recursivamente calculada a partir da média dos valores dos subgrupos amostrados, onde o primeiro valor da série do EWMA é calculado como a média do primeiro subgrupo.

$$EWMA_t = \lambda \bar{X} + (1 - \lambda)EWMA_{t-1}$$

onde  $\lambda$  é o fator de peso, que pode ser ajustado para aumentar a sensibilidade a pequenas mudanças instantâneas ou a mudanças graduais, dependendo do valor escolhido, que varia de 0.1 a 0.9. O cálculo do EWMA permite incorporar informações de todos os subgrupos de medidas anteriores, com pesos que aumentam a relevância do último sub-grupo calculado. Assim uma decisão de controle é tomada com base nas informações dos sub-grupos anteriores e o atual. Os valores do limite superior (UCL) e inferior (LCL) são calculados da seguinte forma:

$$LCL = EWMA_1 - s \cdot k \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}} \quad UCL = EWMA_1 + s \cdot k \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}}$$

onde  $EWMA_1$  é a primeira medida de referência,  $s$  é o desvio padrão dos valores de  $\bar{X}$ ; a função dentro da raiz é o componente do desvio padrão da estatística do EWMA e  $k$  é um fator que permite uma maior abertura dos limites, sendo usualmente 3.

## 4.2. EWMA na comunicação sem fio

A aplicação de um controle estatístico para caracterizar a correlação temporal da medida de qualidade e nível do sinal de rádio é uma estratégia para determinar se a comunicação entre dois ou mais elementos obedece determinados padrões, que possibilita detectar e prever possíveis falhas de comunicação e perda de dados.

Durante a comunicação sem fio, é possível identificar dois principais tipos de eventos que caracterizam a qualidade da comunicação: a mobilidade e a interferência. A mobilidade acontece

quando algum dos elementos comunicantes se afasta ou aproxima do transmissor/receptor. A correlação da distância e a medida do nível de sinal depende muito da tecnologia utilizada [8, 19], e dos fatores do ambiente. A interferência se dá quando alguns outros elementos utilizam canais de frequência comuns ou adjacentes, ocasionando os distúrbios no processo de comunicação.

A identificação destes eventos através do Mapa de Controle necessita que os parâmetros de controle LCL e UCL descrevam corretamente cada evento, mostrando uma nova tendência do canal de comunicação. Assim, se os dois elementos comunicantes estiverem parados com o canal de comunicação estável, o mapa de controle descreve essa condição como um evento determinado. Caso aconteça uma mobilidade, os níveis do sinal são alterados, rompendo com algum dos limites e um novo evento pode ser identificado, para o qual novos parâmetros são calculados. Esse controle de processo também deve estar preparado para lidar com os espúrios, que podem ser associados a alguns níveis de sinal gerados por propagação multi-caminho ou interferências, por exemplo. Para evitar que estes sejam identificados como situação fora de controle, optou-se por calcular o EWMA da média e da variância de cada subgrupo formado de 10 valores, amostrados a cada 100ms. A escolha dessa amostragem se deu ao fato que o intervalo de 100ms foi considerado suficiente para estipular as variações das medidas, sendo fixada dessa forma uma janela de 1 segundo. No Bluetooth e 802.11, estas medidas representam uma característica e uma funcionalidade intrínseca para cada meio, mas que descrevem a qualidade da comunicação sem fio.

Para a identificação de um novo evento, o valor do desvio padrão das medidas dos subgrupos,  $s$ , é calculado e armazenado a cada amostragem. Caso a medida saia dos parâmetros de controle, o valor de  $s$  é utilizado como referência na geração dos parâmetros UCL e LCL. Com isso, a tendência das medidas do evento anterior é a base para a identificação de um novo evento. Caso a variabilidade seja pequena, as flutuações não são consideradas como um novo evento, podendo ser associadas a espúrios por exemplo. Caso a variabilidade aumente muito, os parâmetros UCL e LCL aumentam a distância entre si, criando um intervalo maior e permitindo que o novo padrão seja identificado como um novo evento. Assim, a principal propriedade do EWMA de detecção rápida de eventos é somada a um processo decisório, com base nos elementos medidos. Para o EWMA calculado sobre a média dos subgrupos, os limites são dados por:

$$LCL = EWMA_1 - s_{e-1} \cdot k \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}} \quad UCL = EWMA_1 + s_{e-1} \cdot k \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}}$$

onde  $s_{e-1}$  está relacionado com o evento anterior. Para o primeiro evento,  $s_{e-1}$  é iniciado com um valor constante, dependente da tecnologia de rede sem fio utilizada.

O EWMA sobre a variância dos dados identifica a variabilidade das medidas, pois esta descreve em termos relativos o comportamento do processo dentro dos subgrupos. Uma alta variabilidade pode estar associada a interferência ou a algum outro evento, enquanto valores mais baixos podem descrever espúrios na comunicação, ou algum comportamento de recuperação do canal. No Bluetooth, a alta variabilidade na medida do RSSI pode descrever uma entrada ou saída na *golden range*, enquanto a baixa variabilidade das medidas pode descrever alguma interferência localizada ou recuperação do canal. Nas medidas da qualidade do canal, uma alta variabilidade descreve uma movimentação mais explícita ou mesmo uma interferência, enquanto os valores mais baixos podem descrever uma recuperação na comunicação. No caso do IEEE802.11, a alta variabilidade no RSSI descreve uma interferência ou/e uma movimentação, enquanto que baixos valores são os espúrios. O mesmo se pode dizer a respeito da qualidade do sinal. Como o EWMA é uma série temporal, para minimizar os efeitos de uma pequena variabilidade, que pode ser associada aos espúrios, os subgrupos medidos anteriormente devem ter uma precedência maior do que o atual, de maneira que o termo  $\lambda$  da fórmula seja próximo de zero, como descrito em [18]. Como uma alteração no funcionamento do EWMA, não é necessário o re-cálculo do limite superior a

cada novo evento, pois a variância dos elementos se estabiliza dentro de um determinado evento.

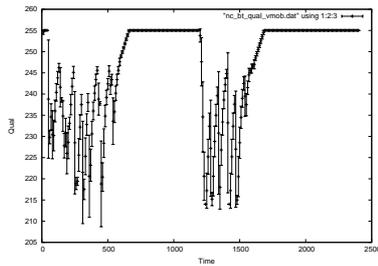
### 4.3. Identificação de eventos

Para efetuar a classificação e decisão da ocorrência de um evento, foram analisadas as tendências e comportamentos do EWMA da média e da variância. Nas *tendências da média*, o rompimento com um dos limites, inferior ou superior, é uma indicação forte de um evento, que implica no re-cálculo dos limites de acordo com o desvio padrão do evento anterior. Essa tendência é marcada como *MEAN*. A *tendência da variância* foi dividida em duas, uma baseada no rompimento com o limite superior, chamada de *UPPERVAR*; e outra baseada no rompimento com o limite inferior, chamada de *LOWERVAR*.

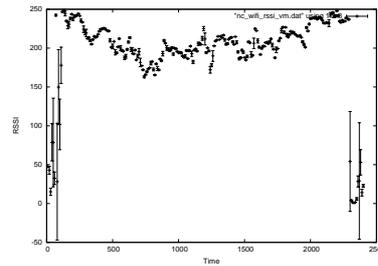
Dentro dessa classificação, foram criadas as tabelas 1 e 2, referentes ao Bluetooth e o IEEE 802.11, e as tabelas 3 e 4, referentes aos tipos de medida, RSSI e qualidade do canal. Estas tabelas descrevem os comportamentos possíveis durante a comunicação sem fio, da maneira que seriam interpretados por um especialista, numa abordagem semelhante a descrita em [13]. A validação dessas tabelas foi feita após diversos testes empíricos e observações dos valores das medidas e do comportamento durante a comunicação, através da indução da movimentação e interferência. Para essa identificação do comportamento (se é uma interferência ou mobilidade) foi utilizada a seguinte abordagem:

- A **Interferência** acontece quando os quadros são danificados por ruídos localizados. Os ruídos gerados por outro padrão de comunicação (por exemplo a interferência do Bluetooth sobre o IEEE 802.11 ou vice versa) possui um comportamento intenso, mas localizado temporalmente, de acordo com testes e estudos feitos em [6, 10, 16]. Interferências devido a perda por propagação *multipath* apresentam o mesmo comportamento [18]. O efeito da interferência pode ser visto na figura 2, em um teste de interferência no Bluetooth. Neste teste, durante uma comunicação Bluetooth foi inserida e depois retirada uma fonte de interferência ao longo do tempo. Nos instantes que em que ocorre a interferência é possível notar o decaimento do valor da qualidade do canal, até um determinado valor, seguido de sua recuperação após a retirada da fonte de interferência.
- A **Mobilidade** acontece quando os elementos comunicantes estão se movendo de acordo com algum referencial. Como descrito em [15], em diversos momentos essa mobilidade pode ser definida como virtual, já que os valores medidos pela interface e a relação deles com uma movimentação necessitariam de mais referenciais, como discutido em [2, 14]. O comportamento da mobilidade pode ser visto como um decaimento/acréscimo constante nas medidas da interface. A figura 3 mostra o comportamento da mobilidade numa rede IEEE 802.11, afastando-se e se aproximando de uma estação base. As quedas nos valores mostram o momento de afastamento do ponto de acesso, enquanto que os pequenos acréscimo mostram os instantes em que o movimento foi interrompido. O aumento gradativo indica a aproximação. Em [15, 16, 18] é feito um estudo relacionando a distância com os níveis de sinal.

Dentro dessas observações, foi possível criar uma tabela que relaciona as tendências com a mobilidade e a interferência. A coluna *Tendência* indica qual medida que fugiu da “especificação”. O valor *MEAN* indica que o EWMA sobre a média das medidas detectou algum valor que rompeu um dos limites, o valor *UPPERVAR* indica que o EWMA sobre a variância dos dados rompeu o limite superior e o *LOWERVAR* rompeu com o limite inferior. É interessante observar que estes dois últimos eventos são excludentes, pois não acontecem ao mesmo tempo. As tabelas 1 e 2 descrevem o que a variação dos limites de controle pode identificar em uma interface Bluetooth e IEEE 802.11, respectivamente. A partir da observação empírica destes eventos foi possível criar uma árvore de decisão para cada tipo de medida que define o comportamento geral para as tecnologias usadas. A representação da combinação dos eventos foi feita através de tabelas da verdade.



**Figura 2. Medidas da qualidade por instante de tempo numa interface Bluetooth, em um cenário com interferência induzida**



**Figura 3. Medidas do rssi por instante de tempo numa interface IEEE802.11, em um cenário de mobilidade**

**Tabela 1. Descrição dos eventos no Bluetooth**

Medida	Tendência	Descrição
RSSI	MEAN	Sai/Entra no <i>Golden Receiver Power Rank</i>
RSSI	UPPERVAR	Movimentação intensa ou recuperação intensa de interferência
RSSI	LOWERVAR	Fim de movimentação
Qualidade	MEAN	Associada a movimentação e interferência forte
Qualidade	UPPERVAR	Recuperação de interferência e/ou mudança parada
Qualidade	LOWERVAR	Início de interferência e rajadas e/ou movimentação constante

As tabelas 3 e 4 mostram os eventos para as medida de RSSI e de qualidade, respectivamente.

Como resultado da etapa de controle de processos é possível ver os gráficos para detecção de mobilidade e interferência no Bluetooth. Para estes testes, duas interfaces Bluetooth foram colocadas para comunicar a distâncias e em ambientes controlados, sendo que no cenário de interferência esta foi induzida através de uma fonte de comunicação IEEE 802.11. As figuras 4(a), 4(b), 4(c) mostram a medida da qualidade e a identificação dos eventos na mobilidade do Bluetooth, enquanto as Figuras 4(d), 4(e), 4(f) mostram essa identificação para a medida de RSSI. Na figura 4(a) é possível ver os eventos detectados a medida em que os valores mudam. Esses resultados, somados aos valores detectados em 4(b) e 4(c), descrevem os comportamentos visíveis na qualidade. Os eventos detectados em 4(b) descrevem um comportamento que está estabilizando, uma vez que a variância dos subgrupos diminui, enquanto que 4(c) mostra exatamente o contrário. O mesmo pode ser afirmado sobre as figuras 4(d), 4(e), 4(f). A análise conjunta das duas medidas, que indexa a informação das tabelas 3 e 4 permite uma descrição temporal dos eventos.

## 5. A Transformada de Wavelets na Análise de Interferência e Mobilidade

### 5.1. Discussão Inicial

Os métodos de controle estatístico não efetuam com precisão uma análise de dados de natureza multi-escalar e estocástica, pois, neste tipo de processo, os eventos podem ocorrer em diferentes posições de tempo e frequência. Métodos, que fazem análises no domínio do tempo, são eficientes para identificar oscilações de impulso, i.e., oscilações que são facilmente localizadas no tempo, e associá-las a possíveis eventos; mas são limitadas quando esses eventos estão em padrões escondidos ou distribuídos na frequência, dificultando a detecção da correlação dos dados.

Para lidar com esse problema, deve ser usada uma base matemática diferente que revela ou não uma correlação espectral. Esta base matemática deve ter como principais propriedades, (i) a independência dos dados, (ii) a existência de um algoritmo rápido para seu cálculo e (iii) a capacidade de indicar correlação para um conjunto grande e geral de dados [11]. Uma possibilidade é

**Tabela 2. Descrição dos eventos no WiFi**

Medida	Tendência	Descrição
RSSI	MEAN	Indicação de movimentação brusca e interferência forte
RSSI	UPPERVAR	Indicação de princípio de movimentação e princípio de interferência
RSSI	LOWERVER	Indicação de movimento constante ou parada e término de interferência
Qualidade	MEAN	Indicação de movimentação brusca e interferência forte
Qualidade	UPPERVAR	Indicação de princípio de movimentação e término de interferência
Qualidade	LOWERVER	Indicação de princípio de interferência e término de movimentação

**Tabela 3. Descrição dos eventos na medida do RSSI**

LowerVar	UpperVar	Mean	Descrição
0	0	0	Nenhum Evento
1	0	0	Começa a parar/Espúrio
0	1	0	Espúrio
0	0	1	Movendo
1	0	1	Parando
0	1	1	Altera a velocidade

usar a transformada de Fourier rápida. Ela definitivamente possui as duas primeiras propriedades, entretanto não possui a terceira. A transformada de Fourier é local na frequência, mas de maneira alguma local no tempo. A maioria dos sinais tem correlação local na frequência e no espaço. A transformada que preenche essas características é a transformada de wavelets [5].

As transformadas de wavelets podem ser vistas como mecanismos para decompor ou quebrar sinais nas suas partes constituintes, permitindo analisar os dados em diferentes domínios de frequências com a resolução de cada componente amarrada à sua escala. As famílias de funções geradas a partir das operações de dilatação e translação da mesma função  $\psi$  (wavelet “mãe”) tornaram-se uma ferramenta muito importante em várias áreas da matemática pura e aplicada. Uma wavelet é uma função  $\psi(x)$ , tal que a família de funções tem a forma

$$\psi_{j,k}(X) = \frac{1}{\sqrt{j}} \psi\left(\frac{x-k}{j}\right)$$

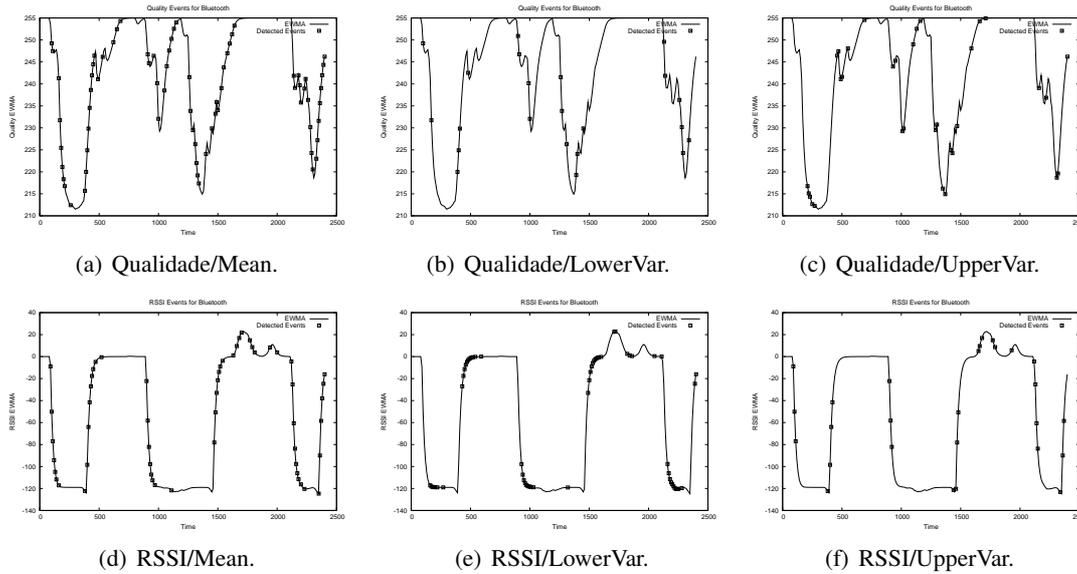
onde  $j$  e  $k$  são inteiros arbitrários e representam respectivamente os parâmetros de dilatação e translação da wavelet. Dessa forma, a transformada de wavelet permite que a convolução dessas funções com os sinais possibilite uma localização bem definida. Elas também são reversíveis, sendo possível reconstruir a função original.

O princípio mais geral na construção das wavelets é o uso de dilatações e translações. As wavelets mais usadas formam um sistema ortonormal de funções com suportes compactos construído desta forma. Esta é a razão pela qual elas podem distinguir as características locais de um sinal em diferentes escalas e, por translações, elas cobrem toda a região na qual o sinal é estudado. Na análise de sinais não-estacionários, a propriedade de localidade das wavelets nos conduz às suas vantagens sobre a transformada de Fourier.

Os algoritmos de wavelets processam dados em diferentes escalas ou resoluções e independente da função de interesse ser uma imagem, uma curva ou uma superfície, descrevem matematicamente o “incremento na informação” necessário para se ir em diversas hierarquias, de uma aproximação grosseira para uma com maior resolução. Esta técnica é chamada de análise de múltipla resolução [12], na qual o sinal é dividido em um conjunto de subespaços agrupados de acordo com o nível de frequência. A informação é detalhada em coeficientes, distribuídos em diversos subconjuntos de frequências localizadas, das mais altas as mais baixas. Valores baixos de coeficientes indicam que não existem informações importantes no nível de frequências observado.

**Tabela 4. Descrição dos eventos na medida da qualidade do canal**

LowerVar	UpperVar	Mean	Descrição
0	0	0	Nenhum Evento
1	0	0	Movimentação Contínua/ Ocorre Interferência
0	1	0	Recupera Interferência/Muda Movimentação
0	0	1	Movendo
1	0	1	Movimenta Constante/Ocorre Interferência
0	1	1	Recupera Interferência/Muda Movimentação



**Figura 4. Eventos identificados para a Qualidade e para o RSSI em uma movimentação no Bluetooth.**

Dada a natureza dos dois principais cenários analisados nas placas de interface sem fio, mobilidade e interferência, o uso das wavelets fez-se necessário para distingui-las, uma vez que no plano da frequência, as medidas de evento de interferência variam mais do que as de mobilidade. Essa característica se deve a como cada um destes cenários ocorre: a interferência é relacionada a distúrbios localizados e de alta frequência na recepção de pacotes e a mobilidade a uma flutuação menos intensa nos valores do sinal. O uso da transformada de Wavelets permite uma decomposição hierárquica do sinal, descrevendo através dos coeficientes de detalhes, cada um destes cenários. A mobilidade, por ser um evento descrito por baixa frequência, possui coeficientes de valores próximos de zero na decomposição da alta frequência do sinal, enquanto que o contrário ocorre nos eventos de interferência.

A análise de múltipla resolução é necessária pois existem situações nas quais os eventos de interferência e mobilidade acontecem ao mesmo tempo. Nestes cenários, os eventos de interferência, identificados como alta frequência, estão situados em bandas diferentes dos eventos medidos na mobilidade, de baixa frequência. A múltipla resolução é feita através da re-alimentação dos dados transformados, sendo estes filtrados novamente em frequências menores. O efeito final são diversas bandas de frequência separadas ortogonalmente.

## 5.2. Algoritmo

Para efetuar a classificação do sinal, é feita uma convolução dos eventos detectados no método de controle estatístico com a transformada de wavelets de Daubechies 4 [5], que possui

as características necessárias para efetuar a separação dos dados utilizados [11]. As funções base desta transformada são representadas pelos vetores  $h$  e  $g$ , sendo que  $h$  representa função de escala, e  $g$  representa a função de coeficientes.  $h$  é da forma:

$$h_0 = \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}; h_1 = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}; h_2 = \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}; h_3 = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}; \quad e$$

$$g: \quad g_0 = h_3; g_1 = -h_2; g_2 = h_1; g_3 = -h_0; \quad O$$

algoritmo consiste na convolução dos eventos detectados pelo mapa de controle,  $ev$  com os vetores  $h$  e  $g$

$$ev_{scale}[i] = h_0 \cdot ev[2i] + h_1 \cdot ev[2i + 1] + h_2 \cdot ev[2i + 2] + h_3 \cdot ev[2i + 3];$$

$$ev_{detail}[i] = g_0 \cdot ev[2i] + g_1 \cdot ev[2i + 1] + g_2 \cdot ev[2i + 2] + g_3 \cdot ev[2i + 3];$$

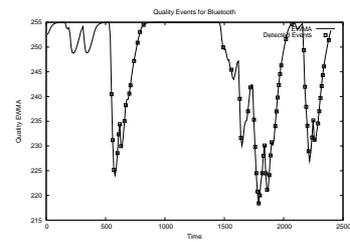
onde  $ev_{scale}$  contém a informação suavizada do sinal original, e  $ev_{detail}$  contém os coeficientes de frequência. Para a análise múltipla resolução dos eventos amostrados, é necessário replicar a transformada, fazendo-se  $ev = ev_{scale}$ .

A identificação dos eventos é feita de acordo com os valores dos coeficientes em  $ev_{detail}$ . Para essa verificação é calculado o módulo do coeficiente e comparado com um determinado limite. Caso eles sejam inferiores a este limite, eles descrevem uma mobilidade, caso contrário, descrevem uma interferência. Após algumas dezenas de testes, este limite foi estipulado como 1,6. Os gráficos a seguir mostram diversos testes feitos com Bluetooth e IEEE 802.11 em condições de movimentação e interferência induzida e ambiente.

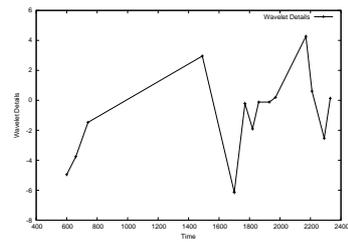
Os gráficos das figuras 5(a) e 5(b) comparam os resultados obtidos com os métodos de EWMA e Wavelets em um cenário de interferência no Bluetooth. Podemos notar que os valores dos coeficientes no gráfico 5(b) são consideravelmente grandes, o que indica um padrão de interferência. Os coeficientes com valores menores que o limite indicam os momentos em que a interferência induzida foi inicializada. Apesar disso, essa informação cruzada com a das tabelas 3 e 4, descreve o comportamento de interferência. Os gráficos 5(c) e 5(d) fazem esse mesmo tipo de análise para um padrão de movimentação (afastando-se do ponto de comunicação). O primeiro coeficiente de wavelets gerado possui um valor maior que o limite, devido a uma interferência local que ocorreu no ambiente de experimentação. A comparação entre os gráficos 5(d) e 5(b) deixa claro o que havíamos descrito anteriormente: uma movimentação gera valores baixos para os coeficientes da wavelet, enquanto interferência gera valores superiores ao limite estipulado.

Os gráficos das figuras 6(a) e 6(d) mostram os eventos detectados e os coeficientes para o nível de RSSI numa comunicação do IEEE 802.11. Neste cenário a interferência foi induzida, com o uso de uma interface Bluetooth. É possível ver na figura 6(d), que na análise de wavelets foram detectadas condições de interferência, com valores de coeficientes acima do limite estipulado, mas com um percentual de erro de coeficientes abaixo do limite, nos tempos 600, 1000, 1200, 1500 e 2100 milissegundos. Estes erros ocorreram devido a interferência induzida gerar eventos duplicados, onde a grande variação dos valores pode ser interpretada como uma mobilidade, como pode ser facilmente visto nos tempos 1500 e 2100. Mas este resultado não é problemático, uma vez que ele é complementado pelas informações da análise temporal, na detecção do *UPPERVAR* e *LOWERVAR*, que descrevem o evento como interferência. Os gráficos das figuras 6(b) e 6(e) mostram os testes para um cenário de movimentação, onde os elementos comunicantes se afastaram do tempo 0 ao tempo 1000, e depois se aproximaram. Os valores dos coeficientes, dado o nível de decaimento e dos valores detectados em 6(b), variam dentro dos limites estipulados.

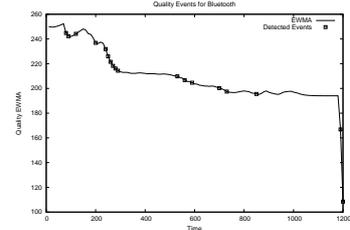
As figuras 6(c) e 6(f) mostram um cenário indoor, no qual a estação está se movendo em um ambiente com diversas fontes de interferência e obstáculos de comunicação. É interessante notar que a mobilidade é caracterizada pela grande variação dos valores de RSSI, como pode ser



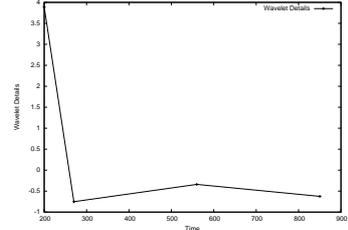
(a) EWMA/MEAN para interferência



(b) Coeficientes de Wavelets para interferência.

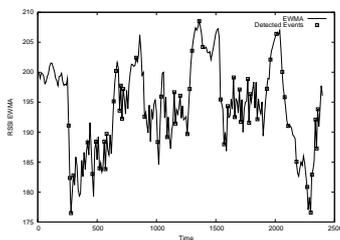


(c) EWMA/MEAN para movimentação.

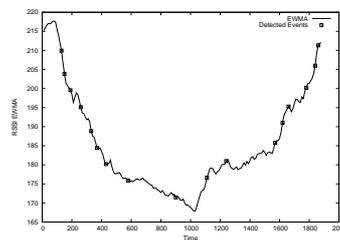


(d) Coeficientes de Wavelets para movimentação.

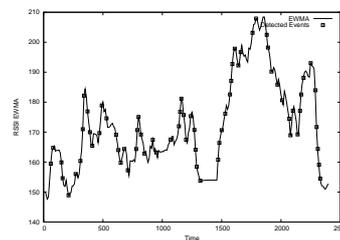
**Figura 5. Análise de Wavelets da qualidade para cenários de movimentação e interferência no Bluetooth.**



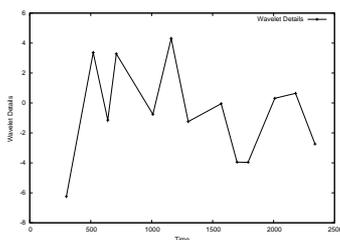
(a) EWMA/MEAN para interferência



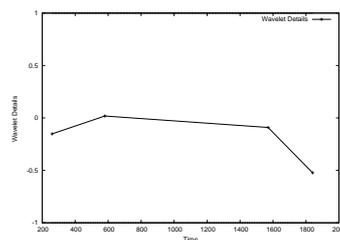
(b) EWMA/MEAN para movimentação.



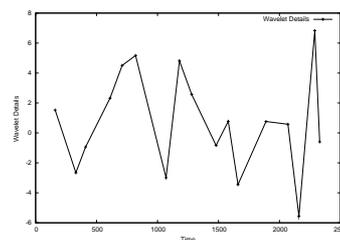
(c) EWMA/MEAN para movimentação e interferência.



(d) Coeficientes de Wavelets para interferência.



(e) Coeficientes de Wavelets para movimentação.



(f) Coeficientes de Wavelets para movimentação e interferência.

**Figura 6. Análise de Wavelets da medida de RSSI para cenários de movimentação e interferência no IEEE 802.11.**

visto nas faixas de tempo de 200 a 500 e 1100 a 1700, enquanto que a interferência é vista pela variação brusca em diversos intervalos localizados. A figura 6(f) mostra os valores dos coeficientes que descrevem a mobilidade, em valores abaixo do limite estabelecido e a interferência com coeficientes de valores bem superiores.

## 6. Metodologia e Análise

A Figura 7 descreve em blocos funcionais todo o método de controle desenvolvido. A primeira etapa consiste na amostragem dos valores de RSSI e qualidade, a cada 100ms. Sobre cada grupo de 10 medidas é feito o cálculo da média,  $\mu$ , e variância,  $\sigma^2$ . Esses valores são passados para a segunda etapa, do mapa de controle estatístico, que utiliza o EWMA. Este bloco é chamado de EWMA adaptativo, pois são passados os parâmetros de configuração e ajuste do EWMA para cada tecnologia, IEEE 802.11 e Bluetooth. Estes dados são colocados em confronto com os limites medidos, de forma que esta etapa gera como saída: os dados da média suavizados, devido a série temporal do EWMA, e os eventos detectados, na média, *MEAN*, e na variância, *LOWERVER* e *UPPERVAR*. Estes eventos detectados são classificados na tabela de análise temporal.

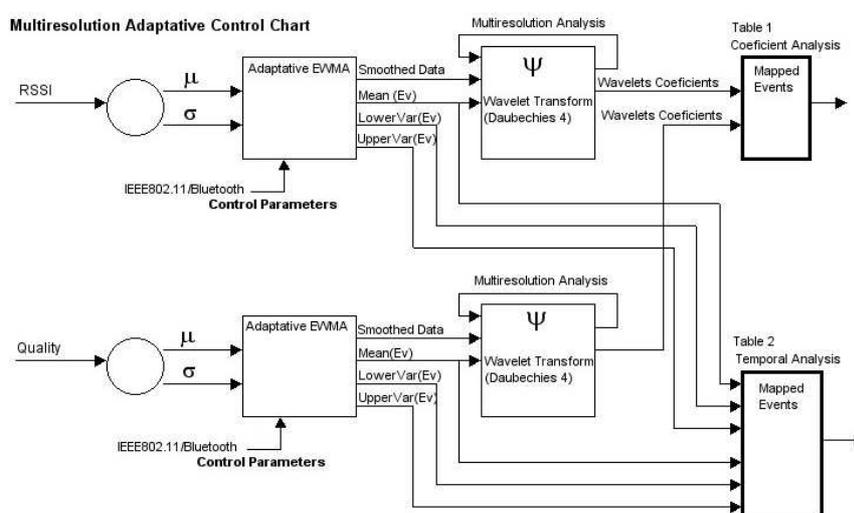


Figura 7. Método de aplicação do controle multiresolução

Os dados da média suavizados e seus respectivos eventos são passados para a etapa de análise espectral, onde é feita a transformada de wavelets de Daubechies 4. Os coeficientes gerados são medidos e catalogados na tabela de análise espectral, identificando se os dados descritos são referentes a mobilidade ou interferência. O uso da análise de múltipla resolução indica os casos em que ocorre mobilidade e interferência ao mesmo tempo. Dada a natureza da transformada de wavelets escolhida é necessário no mínimo quatro eventos detectados para descrever o cálculo dos coeficientes e a detecção de algum tipo de comportamento. O uso de bases menores, como a de Haar, permite um número mínimo de eventos menor, mas em contrapartida a possibilidade de erro de descrição é maior, enquanto em bases maiores seriam necessários mais eventos detectados.

Um fator importante é notar que o desempenho da detecção dos dados está associado ao tempo de amostragem dos dados. Cada grupo de 10 medidas, amostrados a cada segundo, que possa conter um evento, é imediatamente identificado pelo EWMA. Os novos limites de controle calculados permitem que novos eventos possam ser rapidamente detectados da mesma maneira.

## 7. Conclusão

Neste trabalho é proposta uma metodologia para descrever o *contexto* de uma comunicação numa interface sem fio utilizando-se correlação temporal e espectral. Essa nova técnica faz o uso de um controle estatístico de processos, conhecido como mapa de controle com EWMA (*Exponentially Weighted Moving Average*), e da transformada de *Wavelets*, para identificar eventos de mobilidade e interferência nos canais de comunicação. Dada a natureza do EWMA, um

evento é detectado na correlação temporal logo após a medida do grupo extrapolar alguns limites pré-estabelecidos, sendo classificado pelos valores indicados nas tabelas 3 e 4. Para a descrição mais precisa da natureza dos eventos, devido a possibilidade dúbia na descrição temporal, a análise espectral efetua a convolução de, no mínimo, quatro eventos detectados, indicando assim a sua natureza. Uma das principais contribuições deste trabalho foi a criação destas tabelas que permitem uma análise qualitativa do meio. Essa nova metodologia foi implementada e testada em duas tecnologias de comunicação sem fio distintas, IEEE 802.11 e Bluetooth. Os resultados indicam que a nova técnica funciona adequadamente para ambos ambientes. Como trabalho futuro estamos avaliando mais possíveis cenários de testes e criando a adequação dessas informações poderem ser disponibilizadas de maneira mais simplificada para as aplicações.

## Referências

- [1] H.B. Aradhye, B. R. Bakshi, R. A. Strauss, and J. F. Davis. Multiscale statistical process control using wavelets—Theoretical analysis and properties. *AICHE Journal*, 49:939–958, 2003.
- [2] Y. Chen and H. Kobayashi. Signal strength based indoor geolocation. In *IEEE International Conference on Communications*, May 2002.
- [3] S. Corson and J. Macker. Mobile ad hoc networking (manet): Routing protocol performance issues and evaluation considerations. *RFC 2501*, January 1999.
- [4] R. P. Couto, R. A. Rabelo Oliveira, and A. A. Loureiro. Compressão adaptativa em ambientes de comunicacao sem fio. In *Anais do XXI SBRC*, 2003.
- [5] I. Daubechies. *Ten Lectures in Wavelets*. CBMS - NSF Regional Conferences Series in Applied Mathematics, 1992.
- [6] M. Fainberg and D. Goodman. Analysis of the interference between ieee 802.11b and bluetooth systems. In *IEEE Vehicular Technology Conference*, October 2001.
- [7] R. Ganesan, T. K. Das, and V. Venkataraman. Wavelet based multiscale statistical process monitoring—A literature review. *IIE Trans. on Quality and Reability*, 36:787–806, 2004.
- [8] M. Gast. *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*. O'Reilly, 2002.
- [9] J. S. Hunter. The exponentially weighted moving average. *Journal of Quality Technology*, pages 202–209, 1986.
- [10] J. Jung-Hyuck and N. Jayant. Performance evaluation of multiple ieee 802.11b wlan stations in the presence of bluetooth radio interference. In *IEEE International Conference on Communications*, volume 2, pages 1163–1168, May 2003.
- [11] P. C. Lima. Wavelets: uma introdução. *Matemática Universitária*, 33:13–44, 2002.
- [12] S. G. Mallat. Characterization of signals from multiscale edges. *IEEE Trans. and Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992.
- [13] D. Montgomery. *Introduction to Statistical Quality Control*. John Wiley and Sons, 1996.
- [14] M. Nilsson, J. Hallberg, and K. Synnes. Positioning with bluetooth. In *10th International Conference on Telecommunications ICT'2003*, 2003.
- [15] E. Nordstrom. Ape—A large scale ad hoc network testbed for reproducible performance tests. Master's thesis, Information Technology Dept of Comp. Systems Uppsala Univ, june 2002.
- [16] R. A. Rabelo Oliveira. Uma api para integração e gerenciamento de redes wi-fi e bluetooth. Master thesis, DCC/UFMG, MG/Brasil, December 2003.
- [17] M. B. Sadler and A. Swami. Analysis of multiscale products for step detection and estimation. *IEEE Transactions on Information Theory*, 45, 1999.
- [18] A. Shet and R. Han. Adaptive power control and selective radio activation for low-power infrastructure-mode 802.11 lans. In *IEEE Workshop on Mobile and Wireless Networks (MWN)*, pages 812–818, 2003.
- [19] SIG. Bluetooth specification version 1.2, 2003.
- [20] WildPackets. Converting signal strength percentage to dbm values. <http://www.wildpackets.com/elements/whitepapers/>, 2002.