



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA EM  
REDES CELULARES SUSTENTÁVEIS  
DE QUARTA GERAÇÃO**

**Bruno Saldanha Carminati  
Marcelo Faleiros Costa**

**Brasília, abril de 2013**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA EM  
REDES CELULARES SUSTENTÁVEIS  
DE QUARTA GERAÇÃO**

**Bruno Saldanha Carminati  
Marcelo Faleiros Costa**

*Relatório submetido à Universidade de Brasília  
como requisito parcial para obtenção do  
grau de Engenheiro Eletricista*

**Banca Examinadora**

Prof. André Noll Barreto, ENE/UnB  
*Orientador*

---

Prof. Antônio José Ribeiro dos Santos, ENE/UnB  
*Examinador Interno*

---

Prof. Ugo Silva Dias, ENE/UnB  
*Examinador Interno*

---

## **Agradecimentos**

*Agradeço ao Professor André, cuja orientação foi de fundamental importância para a elaboração deste trabalho, desde a escolha do tema até a conclusão. Faço agradecimentos especiais aos meus queridos amigos Daniel, Isabelle, Gustavo e Artur, pelo companheirismo ao decorrer de todos esses intensos anos de curso, e Marcelo, também por todas as ideias discutidas, sem as quais não seria possível concluir este projeto com tamanho mérito. Por último, porém mais importante, agradeço a meus pais, que sempre acreditaram em mim durante a construção desta trilha.*

*Bruno Saldanha Carminati*

*Agradeço aos caminhos indicados pelo Professor André, que foram essenciais para a concepção e finalização deste projeto. Agradecimentos especiais a minha família, que sempre apoiou as minhas escolhas. Aos amigos de curso e companheiros de apartamento, pois sem eles, essa longa caminhada perderia um grande valor.*

*Marcelo Faleiros Costa*

---

## RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta um estudo sobre Redes Celulares Sustentáveis. São abordados aspectos dessas redes e duas técnicas para a redução do consumo de energia em sistemas celulares por meio do gerenciamento de potência das estações rádio base. São elas o *Sleep Mode* e o *Cell Zooming*. Ademais, tendo em vista a recente finalização do novo padrão de quarta geração da telefonia celular, o trabalho é desenvolvido com foco nessa tecnologia, o 3GPP-LTE. O estudo é realizado pela construção de um simulador, capaz de colher resultados para demonstrar a eficiência de energia atingida com o uso dessas técnicas.

*Palavras-chave: Redes Celulares Sustentáveis. Gerenciamento de Potência. Eficiência de energia. Sleep Mode. Cell Zooming.*

---

## ABSTRACT

This undergraduate final project presents a study about Green Cellular Networks. It addresses aspects of these networks and two techniques for energy consumption reduction on cellular systems through power management of radio base stations. The techniques are Sleep Mode and Cell Zooming. Moreover, because a new cellular communication standard of fourth generation has been recently released, this paper is focused on this technology: the 3GPP-LTE. The study is done by implementing a simulator capable of collecting data to demonstrate energy efficiency reached with these techniques.

*Keywords: Green Cellular Networks. Power Management. Energy Efficiency. Sleep Mode. Cell Zooming.*

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2	OBJETIVOS .....	2
1.3	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO .....	2
<b>2</b>	<b>REDES CELULARES</b>	<b>3</b>
2.1	HISTÓRICO DAS COMUNICAÇÕES MÓVEIS .....	3
2.2	CONCEITOS BÁSICOS .....	4
2.2.1	Desvanecimento de larga escala .....	4
2.2.1.1	Modelo de propagação no espaço livre .....	5
2.2.1.2	Modelo de Okumura-Hata .....	5
2.2.1.3	Sombreamento .....	6
2.2.2	Reuso de frequência .....	7
2.2.3	Antenas diretivas e setorização .....	8
2.2.4	Gerenciamento de mobilidade .....	8
2.2.5	Modulação .....	9
2.2.5.1	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i> .....	9
2.3	3GPP <i>LONG TERM EVOLUTION</i> .....	11
<b>3</b>	<b>REDES CELULARES SUSTENTÁVEIS</b>	<b>13</b>
3.1	ASPECTOS DAS REDES SUSTENTÁVEIS .....	13
3.1.1	Definição de medidas .....	13
3.1.2	Alterações na arquitetura e primeira abordagem do <i>Cell Zooming</i> .....	13
3.2	DINAMICIDADE DAS REDES CELULARES .....	14
3.2.1	Variações temporais e espaciais do tráfego .....	14
3.2.2	Granularidade do controle de potência .....	15
3.3	GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA .....	15
3.3.1	<i>Sleep Mode</i> .....	15
3.3.2	<i>Cell Zooming</i> .....	16
<b>4</b>	<b>SIMULADOR</b>	<b>18</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	18
4.2	BREVE DESCRIÇÃO DA LINGUAGEM C++ .....	18
4.3	CRIAÇÃO DO AMBIENTE-BASE .....	18
4.3.1	Classe RADIOUNIT .....	19
4.3.2	Classe GRID .....	20
4.3.3	Classe CHANNEL .....	20
4.3.3.1	Perdas no canal .....	20
4.3.3.2	Ganho da antena .....	21
4.3.3.3	Conexão .....	21
4.3.3.4	Vazão .....	22
4.3.3.5	Potência consumida .....	23
4.3.4	Classe TRAFFIC .....	23

4.3.5	Classe SCHEDULER .....	25
4.4	SERVIDOR DISTRIBUÍDO .....	25
4.5	PARAMETRIZAÇÃO .....	26
4.6	COLETA DE DADOS .....	28
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>29</b>
5.1	SIMULAÇÃO PADRÃO .....	29
5.2	<i>SLEEP MODE</i> .....	31
5.3	<i>CELL ZOOMING</i> CLÁSSICO .....	33
5.4	<i>CELL ZOOMING</i> VIRTUAL .....	34
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	36
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>37</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>38</b>

# LISTA DE FIGURAS

2.1	Malha uniformemente espaçada para estimação do fator de sombreamento .....	7
2.2	Disposição das células na grade com fator de reuso 1:7 .....	7
2.3	Trissetorização das células na grade .....	8
2.4	Espectro na transmissão com múltiplas portadoras .....	9
2.5	Diagrama de blocos da transmissão no OFDM .....	10
2.6	Interferência intersimbólica .....	10
2.7	Inserção do prefixo cíclico .....	10
2.8	Estrutura de quadro do enlace direto no LTE .....	12
3.1	Perfil real de tráfego durante a semana .....	15
3.2	Configuração da grade durante a execução do <i>Sleep Mode</i> .....	16
4.1	Relações entre as classes do simulador .....	19
4.2	Grade de células hexagonais em arranjo retangular .....	20
4.3	Modelo proposto para os ganhos horizontal e vertical de antenas .....	21
4.4	Modelo de gastos de energia em cada estação base .....	23
4.5	Modelo de tráfego proposto .....	24
4.6	Formas de representação dos dados .....	28
5.1	Vazão média e dos 10% piores casos na simulação padrão .....	29
5.2	Probabilidade de interrupção na simulação padrão .....	30
5.3	Potência consumida por estação base na simulação padrão .....	30
5.4	Potência consumida por estação base na simulação padrão e no <i>Sleep Mode</i> .....	31
5.5	Vazão média e dos 10% piores casos na simulação padrão e no <i>Sleep Mode</i> .....	32
5.6	Probabilidade de interrupção na simulação padrão e no <i>Sleep Mode</i> .....	32
5.7	Potência consumida por estação base na simulação padrão e no <i>Cell Zooming</i> clássico .....	33
5.8	Vazão média e dos 10% piores casos na simulação padrão e no <i>Cell Zooming</i> clássico .....	33
5.9	Probabilidade de interrupção na simulação padrão e no <i>Cell Zooming</i> clássico .....	34
5.10	Potência consumida por estação base na simulação padrão e no <i>Cell Zooming</i> virtual .....	34
5.11	Probabilidade de interrupção na simulação padrão e no <i>Cell Zooming</i> virtual .....	35
5.12	Vazão média e dos 10% piores casos na simulação padrão e no <i>Cell Zooming</i> virtual .....	35

## LISTA DE TABELAS

2.1	Valores típicos do fator de sombreamento .....	6
2.2	Parâmetros da estrutura de quadro do enlace direto no LTE .....	12
4.1	Níveis de potência transmitida durante a execução do <i>Cell Zooming</i> .....	26
4.2	Parâmetros configuráveis do simulador .....	27
5.1	Resultados comparativos dos diversos cenários de simulação .....	36

# LISTA DE SÍMBOLOS

## SÍMBOLOS LATINOS

$B$	Largura de banda do canal	[Hz]
$c$	Velocidade da luz no vácuo	[m/s]
$d$	Distância entre receptor e transmissor	[m]
$E$	Energia	[J]
$f$	Frequência de operação da antena transmissora	[Hz]
$h$	Altura	[m]
$HPBW$	Ângulo de meia-potência	[°]
$N_0$	Densidade espectral de potência de ruído	[W/Hz]
$P$	Potência	[W]
$t$	Tempo	[s]
$T$	Período	[s]
$ups$	Usuários por segundo	[1/s]

## SÍMBOLOS GREGOS

$\delta$	Duração típica de chamadas	[s]
$\Delta$	Duração do prefixo cíclico	[s]
$\theta$	Ângulo vertical em relação ao plano horizontal	[°]
$\lambda$	Comprimento de onda	[m]
$\tau$	Horário de pico	[s]
$\varphi$	Ângulo horizontal em relação à direção do lobo principal do diagrama de radiação da antena	[°]

## NÚMEROS ADIMENSIONAIS

$BER$	Taxa de erro de bits
$FBR$	Relação frente-costa
$G$	Ganho da antena
$M$	Quantidade de símbolos na modulação
$N$	Quantidade de subportadoras ocupadas na modulação multiportadora
$PL$	Perdas de percurso
$SF$	Fator de sombreamento
$SLL$	Ganho do lobo secundário
$SNR$	Razão sinal-ruído
$SNIR$	Razão sinal-ruído-mais-interferência
$upc$	Usuários por célula

## SUBSCRITOS

AIR	Sistema de resfriamento
AMP	Amplificação
b	De <i>bit</i>
dB	Calculado em dB
dBm	Calculado em dBm
GHz	Medido em giga-hertz

h	Horizontal
km	Medido em quilômetros
max	Máximo
MHz	Medido em mega-hertz
PROC	Processamento de sinal
RX	Recepção ou receptor
s	De símbolo
TX	Transmissão ou transmissor
v	Vertical

## SIGLAS

1G	Primeira Geração da telefonia celular
2G	Segunda Geração da telefonia celular
3G	Terceira Geração da telefonia celular
3GPP	<i>3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project</i>
4G	Quarta Geração da telefonia celular
1xEVDO	<i>1x Evolution Data Optimized</i>
AMPS	<i>Analogue Mobile Phone System</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CDMA	<i>Code-Division Multiple Access</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
EDGE	<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>
ERB	Estação Rádio Base
FDMA	<i>Frequency-Division Multiple Access</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IS-95	<i>Interim Standard 95</i>
ISI	<i>Inter-symbol Interference</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
J-TACS	<i>Japanese Total Access Communication System</i>
LOS	<i>Line-of-Sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
NLOS	<i>Non Line-of-Sight</i>
NMT	<i>Nordic Mobile Telephone</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
SC-FDMA	<i>Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access</i>
TACS	<i>Total Access Communication System</i>
TDMA	<i>Time-Division Multiple Access</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication Service</i>
WCDMA	<i>Wideband Code-Division Multiple Access</i>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Nas operadoras de comunicação celular, os padrões mais utilizados atualmente são GSM/EGDE (*Global System for Mobile Communications e Enhanced Data rates for GSM Evolution*) e UMTS/HSPA (*Universal Mobile Telecommunication Service e High Speed Packet Access*) [1]. O último e recém-lançado pelo grupo de trabalho 3GPP (*3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project*) é o padrão LTE (*Long Term Evolution*), que faz parte da quarta geração (4G) da telefonia celular e irá complementar as tecnologias anteriores. Ele tem suporte a maiores taxas de transmissão, maior qualidade do serviço e maior eficiência espectral do que nas outras gerações.

Nos últimos anos, a demanda de tráfego de dados nas redes celulares aumentou significativamente. Este salto é, em grande parte, devido à popularização de vários serviços e ao barateamento e evolução das tecnologias e técnicas empregadas, possibilitando maior capacidade de tráfego a preços mais acessíveis. Todavia, o consumo de energia das redes móveis nunca foi um fator muito considerado na sua expansão. Dessa forma, com a crescente preocupação em relação aos possíveis danos causados ao meio ambiente pela emissão de gás carbônico e o esgotamento de fontes de energia não renováveis, estudos para minimizar o enorme consumo de energia nesses sistemas estão se iniciando, para que no futuro as redes celulares possam continuar a crescer sem trazer em troca consequências mais graves. Isso se tornou um assunto em pauta para as operadoras do serviço celular, e a necessidade de desenvolver sistemas de telecomunicações energeticamente eficientes já é consenso entre as empresas, mas não sem antes conseguir suprir a demanda de tráfego de dados enquanto os custos se mantêm mínimos [2,3].

Estima-se que a toda a infraestrutura da Tecnologia de Informação e Comunicação mundial contribui para 2% da emissão total anual de CO<sub>2</sub>, sendo que um décimo disso é atribuído aos sistemas celulares [2]. Entretanto, não apenas os aspectos ambientais são relevantes, mas também os econômicos, já que os gastos operacionais das estações rádio base (ERBs) alimentadas pela rede elétrica chegam a US\$ 3000 por ano, enquanto as ERBs localizadas em áreas remotas, que funcionam a diesel, podem custar dez vezes mais [3].

Por conseguinte, as operadoras investem em novas maneiras de aumentar a eficiência de energia de suas redes celulares, e o interesse dos pesquisadores é focado em uma nova área de estudo denominada “*Green Cellular Networks*”, ou “Redes Celulares Sustentáveis” [3]. A premissa desse estudo é analisar e propor soluções para tornar os sistemas de comunicação celular menos impactantes ao meio ambiente.

Percebe-se que dois fatores são recorrentes quando se trata de consumo de energia em Redes Celulares Sustentáveis: o grande número de estações base operacionais e as flutuações de tráfego durante o dia. As ERBs são responsáveis por quase 60% do consumo energético na rede [3], portanto, os esforços devem ser direcionados na redução da potência consumida pelas estações base.

Em sistemas celulares comuns, o tamanho das células e a capacidade de cada uma são especificações fixadas durante a fase de projeto da rede. As estimativas são feitas de acordo com o pico de tráfego na área em questão. No entanto, as variações temporais e espaciais do tráfego tornam esse projeto ineficiente por grande parte do tempo, exigindo uma rede mais dinâmica e capaz de adaptar-se às novas condições a cada instante. Em outras palavras, existe um imenso potencial para a economia de energia sem perda de qualidade do serviço ao se desligar algumas ERBs em momentos de baixa demanda do sistema. Porém, nos sistemas atuais, este potencial é desperdiçado. Inclusive, nas próximas gerações, as flutuações de tráfego podem suscitar ineficiências ainda maiores, uma vez que

as redes celulares avançam para a utilização de células cada vez menores, como micro, pico e femto-células [4].

Assim surge o conceito de *Cell Zooming*, uma técnica de gerenciamento de potência, na qual as ERBs ajustam o tamanho das células de acordo com a situação de tráfego na rede, com a intenção de equilibrá-lo e, ao mesmo tempo, melhorar o desempenho do sistema ou reduzir o consumo de energia. Essa parece ser uma solução bastante promissora e, embora ainda não esteja em fase de implementação a nível comercial, estudos mostram que se pode chegar a uma economia de energia de até 40% com essa técnica [3].

Tendo em vista a implantação da tecnologia 4G no Brasil nos próximos anos, o estudo sobre gerenciamento de potência desenvolvido neste projeto baseia-se na quarta geração. Ao mesmo tempo, as pesquisas acerca desse tema mundo afora não estão em fase de implantação, logo, quando as técnicas puderem ser aplicadas, muito provavelmente o sistema vigente será o LTE.

## **1.2 OBJETIVOS**

Para estudar o *Cell Zooming* e constatar seus resultados e eficiência na redução do consumo de energia em Redes Celulares Sustentáveis, é criado, neste trabalho de conclusão de curso, um simulador em linguagem de programação C++.

A importância do desenvolvimento de um simulador se dá principalmente por que a implementação da técnica em sistemas reais é uma possibilidade inexistente. Tal situação envolveria custos elevados e riscos que nenhuma operadora assumiria em quaisquer hipóteses antes de analisar exaustivamente essa solução. Ademais, a simulação permite colher resultados mais rapidamente e tecer conclusões a respeito do tema.

As funções do simulador envolvem reproduzir um ambiente o mais próximo da realidade das redes celulares de quarta geração, em termos de modelos de propagação, demanda de tráfego, distribuição de usuários no espaço e no tempo, além de testar diversos cenários e verificar a melhor solução de gerenciamento de potência para o menor consumo de energia e o melhor desempenho da rede.

## **1.3 APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO**

O Capítulo 2 aborda considerações teóricas associadas às redes celulares. São explanados todos os aspectos compreendidos na elaboração deste trabalho.

O Capítulo 3 trata sobre estudos realizados acerca de Redes Celulares Sustentáveis, abordando os conceitos e paradigmas envolvidos.

O Capítulo 4 expõe a metodologia desenvolvida para colher resultados ao dar uma visão detalhada do simulador e das técnicas utilizadas.

Os resultados obtidos e as conclusões gerais são apresentados nos Capítulos 5 e 6.

## 2 REDES CELULARES

### 2.1 HISTÓRICO DAS COMUNICAÇÕES MÓVEIS

Em 1897, pela primeira vez, Guglielmo Marconi conseguiu estabelecer comunicação contínua sem fio entre barcos navegando pelo Canal da Mancha. Desde então, as comunicações móveis evoluíram de forma sem precedentes, de modo que, mais de um século depois, elas são utilizadas por quase todos cotidianamente [5].

Nos Estados Unidos, por volta de 1934, diversos sistemas de rádio eram utilizados pela polícia e operavam com modulação AM. Estima-se que nessa época, cinco mil veículos policiais possuíam aparelhos de comunicação a rádio instalados. Não obstante, em 1935, Edwin Armstrong demonstrou a modulação FM, e no final dos anos 1930, ela já havia se tornado o esquema de modulação mais utilizado nos quatro cantos do mundo [5].

A Segunda Guerra Mundial acelerou o desenvolvimento de aparelhos de rádio menos susceptíveis ao ruído e menores em tamanho. Depois do fim da guerra, o número de usuários de radiotelefonia nos EUA saltou de alguns milhares em 1940 para dezenas de milhares em 1948, para centenas de milhares em 1958 e, finalmente, para um milhão e quatrocentos mil em 1962 [5].

A AT&T *Bell Laboratories* concebeu pela primeira vez, na década de 1960, o conceito de rede celular. No laboratório, foi desenvolvido um sistema com diversas estações rádio base interconectadas [5]. A rede celular recebe este nome pelo fato de ser composta por diversas células, cada uma com a função de cobrir determinada área. Cada célula possui uma estação rádio base fixa, na qual se encontra a antena que transmite sinal para os aparelhos móveis e capta o sinal proveniente deles. Como cada célula abrange a sua respectiva área, o usuário pode mover-se livremente pela área de cobertura de qualquer ERB sem perder a conexão, sendo que, em cada momento, ele poderá ser atendido por uma antena diferente. Dessa maneira, várias células em conjunto formam uma grade disposta em uma extensa região e podem propiciar a cobertura de enormes áreas geográficas e oferecer capacidade elevada em uma faixa de espectro limitada. Assim, deu-se início à era das comunicações sem fio.

Na década de 1980, os primeiros sistemas de comunicação móvel lançados comercialmente formaram a Primeira Geração (1G) da telefonia celular. O 1G compreendia diversos sistemas analógicos que trafegavam somente sinais de voz e eram instalados independentemente pelo mundo, dentre os quais estão: o AMPS (*Analogue Mobile Phone System*), utilizado na América; o TACS (*Total Access Communication System*) e o NMT (*Nordic Mobile Telephone*), empregados na Europa; e o J-TACS (*Japanese Total Access Communication System*), no Japão e em Hong Kong [1].

A partir da primeira geração, diversas novas tecnologias nasceram. O sistema celular foi digitalizado e a comunicação e a troca de dados tornaram-se uma realidade; e, ainda que essas funcionalidades fossem pouco utilizadas, a telefonia celular adquiriu uma nova face.

Na segunda geração (2G), além de a capacidade da rede ser ampliada devido à digitalização da voz, a qualidade, a eficiência espectral e as técnicas de codificação foram aperfeiçoadas. As principais tecnologias que surgiram no 2G e deram origem às atuais são a IS-95 (*Interim Standard 95*) e GSM. A primeira, baseada em CDMA (*Code-Division Multiple Access*), possibilita o acesso de vários usuários no mesmo canal, cada qual com uma codificação diferente, o que permite grande aumento de capacidade da rede. Do GSM derivaram dois novos padrões, desenvolvidos pelo 3GPP, para integrar a comutação de pacotes de dados à comutação de circuitos já empregada: o GPRS (*General Packet Radio Service*) e o EDGE. A família GSM/GPRS/EDGE faz uso dos SIM *cards* e o múltiplo acesso é feito no tempo e na frequência (TDMA/FDMA) [1].

A grande diferença entre os sistemas 3G (Terceira Geração) e seus antecessores é a velocidade de tráfego dos dados [1]. O 3G abarca as seguintes tecnologias: UMTS, que se baseia no WCDMA (*Wideband CDMA*) e IP (*Internet Protocol*) e possui a mesma arquitetura do GSM; o 1xEVDO (*1x Evolution Data Optimized*), evolução do IS-95, para sistemas de alto desempenho orientados a dados; e o HSPA, uma modificação do UMTS que tem como foco o aumento das taxas de dados nos enlaces direto e reverso [1].

A Quarta Geração, também conhecida por 3GPP-LTE, possui arquitetura de rede inteiramente modificada para um sistema baseado em IP. Portanto, voz e dados serão transmitidos sobre esse protocolo, extinguindo todas as distinções entre ambas as redes e alterando mais uma vez o rumo das comunicações móveis. A padronização do LTE começou em 2004, em um *workshop* em Toronto, quando diversas empresas do ramo de comunicações móveis apresentaram suas visões sobre a evolução das especificações da Quarta Geração a serem desenvolvidas pelo 3GPP, incluindo requisitos iniciais que deveriam ser cumpridos e tecnologias capazes de satisfazê-los, tipos de serviço oferecido, arquitetura de rede e outros [1]. O 3GPP sempre levou em conta os interesses das empresas e das operadoras durante esse processo cooperativo de padronização, que foi finalizado em dezembro de 2009 [1].

## 2.2 CONCEITOS BÁSICOS

A comunicação celular surge da necessidade de comunicação entre pessoas em trânsito, que, por meio de um aparelho de telefonia que pode ser carregado para qualquer lugar, são capazes de estar em contato entre si em qualquer momento. A essa unidade móvel de telefonia dá-se o nome de aparelho celular, e a rede responsável por fornecer os serviços para esses dispositivos é denominada rede celular.

Essa forma de comunicação possui diversas vantagens em relação a outros tipos de comunicação, pois é suficientemente flexível para utilizar todas as funções e funcionalidades de quaisquer outras redes públicas e privadas e permite mobilidade em grandes áreas de cobertura.

Diversos conceitos são necessários para integral compreensão do funcionamento de um sistema celular. Neste tópico, são abordados os temas mais importantes e fundamentais para o entendimento da dinâmica desses sistemas e, conseqüentemente, que deverão ser considerados na simulação desenvolvida neste trabalho.

### 2.2.1 Desvanecimento de larga escala

O desempenho em sistemas de comunicação sem fio é afetado principalmente pelas limitações impostas pelo canal físico no qual se dá a troca de informações. Ao contrário de canais cabeados (estáticos e previsíveis), os percursos entre transmissor e receptor em um sistema sem fio são aleatórios e podem mudar a qualquer instante, o que os tornam difícil de analisar e modelar. Os modelos de propagação têm função de prever o nível médio do sinal recebido, bem como sua variabilidade [5].

O bom funcionamento do sistema celular depende de uma variável bastante crítica: o desvanecimento de larga escala. Uma vez que se têm diversas estações móveis dispostas em um ambiente cheio de obstáculos, nem sempre é fácil projetar a rede de maneira a fornecer a esses usuários potência suficiente das ERBs para prover uma boa conexão a todos. O desvanecimento de larga escala é assim denominado porque o nível do sinal é caracterizado a longas distâncias, da ordem de centenas ou milhares de metros.

Existe, ainda, o desvanecimento de pequena escala, que representa rápidas flutuações da amplitude do sinal em curtos intervalos de tempo ou pequenas distâncias de deslocamento. É causado pela interferência das várias versões do sinal transmitido pelas antenas que alcançam o usuário em

momentos diferentes devido aos múltiplos percursos entre a estação base e o aparelho móvel [5]. Embora seja um conceito importante, o desvanecimento de pequena escala não é considerado neste trabalho.

### 2.2.1.1 Modelo de propagação no espaço livre

Para perdas de percurso no espaço livre, a fórmula de Friis [5] determina a relação entre potência transmitida  $P_{TX}$  e potência recebida  $P_{RX}$  ao levar em conta o ganho das antenas de recepção e transmissão ( $G_{RX}$  e  $G_{TX}$ ), a distância  $d$  entre o receptor e a fonte do sinal e a frequência  $f = c/\lambda$  de operação, em que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo, e  $\lambda$ , o comprimento de onda do sinal:

$$\frac{P_{TX}}{P_{RX}} = \frac{1}{G_{TX}G_{RX}} \left( \frac{4\pi df}{c} \right)^2. \quad (2.1)$$

Nesse caso, a potência recebida decai com o quadrado da distância entre receptor e transmissor, sem considerar outros fatores, já que pressupõe linha de visada desobstruída (LOS) e nenhum obstáculo próximo que possa causar reflexão ou difração da onda eletromagnética. A diferença, em dB, entre as potências efetivas transmitida e recebida representa a atenuação do sinal, também chamada de perdas de percurso (PL)

$$PL_{dB} = \left( \frac{P_{TX}}{P_{RX}} \right)_{dB} = 20 \log f_{GHz} + 20 \log d_{km} + 92,44 - 10 \log G_{TX}G_{RX}, \quad (2.2)$$

na qual a frequência é dada em GHz e a distância em km. Deriva-se a Equação (2.2) ao aplicar a transformação  $10\log(\cdot)$  nos dois fatores da Eq. (2.1).

Por outro lado, esse modelo é ideal e não é adequado à situação real do ambiente de propagação em uma rede celular. Existem, entretanto, modelos empíricos que são adaptados para sistemas reais e elaborados com base em diversas medições realizadas em determinado local e ajustes de curvas. Com os resultados em mãos, podem-se desenvolver fórmulas relativamente bem ajustadas aos cenários práticos.

### 2.2.1.2 Modelo de Okumura-Hata

É o modelo empírico mais famoso e foi elaborado a partir de medidas de campo feitas em um terreno urbano quase plano [5]. Apresenta diferentes fatores para ambientes urbanos e suburbanos e relaciona as perdas com a altura  $h_{RX}$  do móvel, a altura  $h_{TX}$  da estação base, frequência  $f$  de operação em MHz, distância  $d$  entre usuário e ERB em km, acrescidos de um fator de correção  $a(h_{RX})$ . O modelo de Okumura-Hata é válido para frequências entre 150 e 1500 MHz [5].

A versão estendida Cost 231 deste modelo é válida para frequências entre 1500 e 2000 MHz [5]. A Equação (2.3) explicita como se calcula, em dB, as perdas de percurso segundo este modelo

$$PL_{dB} = 46,6 + 33,9 \log f_{MHz} - 13,82 \log h_{TX} - a(h_{RX}) + \\ + (44,9 - 6,55 \log h_{TX}) \log d_{km} + C_M. \quad (2.3)$$

A variável  $C_M$  pode assumir o valor 0 dB para áreas suburbanas e 3 dB para áreas urbanas densas. O fator de correção para cidades grandes e frequências maiores que 300 MHz é dado, em dB, por

$$a(h_{RX}) = 3,2(\log 11,75h_{RX})^2 - 4,97. \quad (2.4)$$

### 2.2.1.3 Sombreamento

No ambiente urbano, dois usuários à mesma distância do transmissor podem apresentar perdas de percurso diferentes. Isso ocorre devido a diferentes obstáculos que existem entre o aparelho móvel destes usuários e a antena transmissora, criando uma situação com linha de visada interrompida (NLOS). Esse fenômeno é conhecido por sombreamento.

Os modelos de perda de percurso não levam em consideração o sombreamento, mas apenas determinam o desvanecimento médio ao longo do canal. Para um modelo mais realístico deve-se adicionar um fator correspondente ao sombreamento. O fator de sombreamento (SF) é normalmente caracterizado como uma variável log-normal com média zero e desvio padrão determinado empiricamente. Valores típicos são apresentados na Tabela (2.1).

Tabela 2.1. Valores típicos do fator de sombreamento. Adaptado de [6].

<i>Cenário de Propagação</i>	<i>Desvio Padrão do Fator de Sombreamento</i>
Macro célula urbana	8 dB
Macro célula suburbana	8 dB
Micro célula urbana	NLOS: 4 dB; LOS: 3 dB
Macro célula rural	NLOS: 8 dB; LOS: 6 dB

Para estações móveis situadas em locais muito próximos, o fator de sombreamento observado é tipicamente similar ou correlacionado. Por esse motivo, deve ser realizada uma interpolação de valores, pois os usuários próximos não podem assumir qualquer valor aleatório do fator de sombreamento. Isso provocaria descontinuidades acentuadas no desvanecimento dentro dessa pequena região onde eles se encontram [6].

Então, para cada ERB é gerada uma malha uniformemente espaçada onde cada nó é separado de seus adjacentes por uma distância de decorrelação  $D_{cor}$  preestabelecida. Os nós da malha individual de cada estação base representam um SF correspondente a uma localização geográfica. Consequentemente, se o usuário estiver na posição  $(x_{pos}, y_{pos})$  dentro da região quadrada indicada na Fig. (2.1), o seu fator de sombreamento (Eq. 2.5) é dado, em dB, pela seguinte interpolação linear

$$SF_{dB} = \sqrt{1 - \frac{x_{pos}}{D_{cor}}} \left( S_0 \sqrt{\frac{y_{pos}}{D_{cor}}} + S_3 \sqrt{1 - \frac{y_{pos}}{D_{cor}}} \right) + \sqrt{\frac{x_{pos}}{D_{cor}}} \left( S_1 \sqrt{\frac{y_{pos}}{D_{cor}}} + S_2 \sqrt{1 - \frac{y_{pos}}{D_{cor}}} \right). \quad (2.5)$$

A interpolação linear garante mudanças suaves do fator de sombreamento entre os nós não correlatos e de uma região quadrada para outra. Os termos  $S_i$ ,  $i = 0$  até 3, assumem valores aleatórios de acordo com a Tabela (2.1). O valor encontrado após esse cálculo corresponde ao fator de sombreamento devido aos obstáculos entre o usuário e a estação base a qual está conectado. É preciso, porém, levar em conta um sombreamento adicional correlato entre todas as ERBs da grade de células. Para isso, basta considerar que existe uma malha comum entre todas as estações base. Finalmente, ambas as estimativas do fator de sombreamento são acrescidas às perdas de percurso para compor o desvanecimento de larga escala.

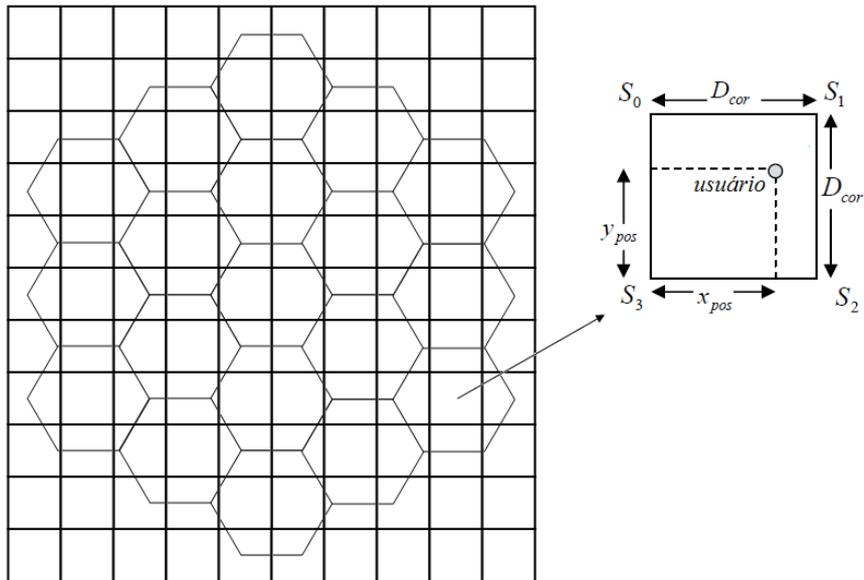


Figura 2.1. Malha uniformemente espaçada para estimação do fator de sombreamento.

### 2.2.2 Reuso de frequência

Cada célula da rede possui certo número de canais para atender seus usuários. Quanto maior a banda disponível da célula for, maior será a quantidade de canais e mais usuários poderão ser atendidos.

Na fase de projeto, é alocada para a célula a faixa de frequência na qual ela irá operar. Porém, dentro da mesma grade, várias células podem usar a mesma frequência de transmissão, contanto que elas estejam suficientemente distantes umas das outras. Com a disposição adequada, a interferência criada entre elas não impede o correto funcionamento do sistema.

A Figura (2.2) ilustra uma rede com fator de reuso 1:7; isto é, a cada sete células, cada faixa de frequência é utilizada apenas uma vez. As células marcadas com a letra A, por exemplo, irão sofrer interferência somente das células análogas, que estão a quase cinco raios de distância da primeira. Quanto menor o fator de reuso do sistema, maior a banda dedicada para cada célula e, portanto, mais usuários são permitidos nela. Por outro lado, mais próximas estarão aquelas que utilizam a mesma frequência, o que aumenta a interferência entre os sinais de suas antenas.

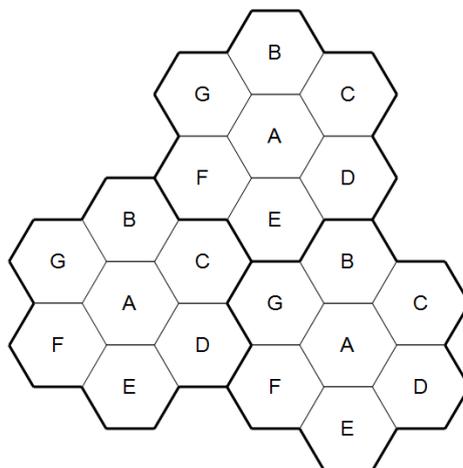


Figura 2.2. Disposição de células na grade com fator de reuso 1:7.

### 2.2.3 Antenas diretivas e setorização

A setorização consiste na divisão de uma célula em setores. Cada setor é atendido por uma antena diretiva. Com essa técnica, se as antenas transmitem em frequências diferentes, cada setor sofrerá interferência significativa somente daqueles que estão voltados em sua direção, o que melhora a razão sinal-ruído do sistema.

Observa-se na Fig. (2.3) a trissetorização das células. Sem as antenas diretivas, a célula A central sofreria interferência das seis células ao seu redor também marcadas com essa letra. Já com a setorização, seu sinal é degradado apenas pelos sinais de duas células que utilizam a mesma frequência em um de seus setores. Esse artifício reduz consideravelmente a interferência entre células.

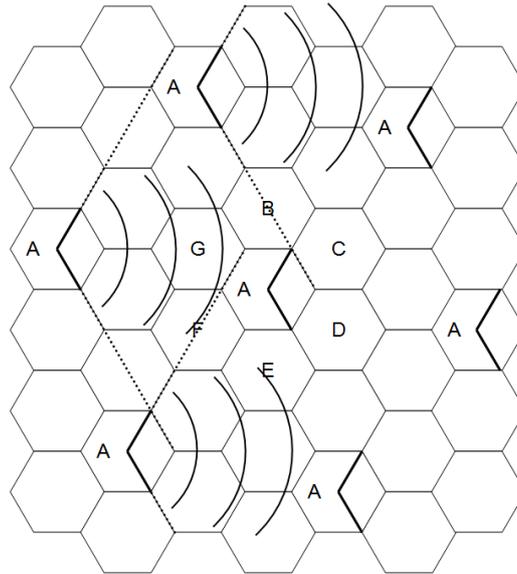


Figura 2.3. Trissetorização das células na grade.

### 2.2.4 Gerenciamento de mobilidade

A mobilidade em um sistema celular pode gerar alguns problemas, que são solucionados pelo uso de técnicas que permitem que os usuários movam-se livremente sem perder a conexão ou estabeleçam conexão com a rede de qualquer lugar que estejam.

O *roaming*, a primeira dessas técnicas, é o acesso de um usuário móvel fora de sua rede original. Ao ligar o aparelho móvel em uma rede visitada, o usuário é sincronizado com a ERB e solicita acesso a essa rede, que, por sua vez, comunica-se com a rede própria do assinante, busca seus dados e o registra finalmente.

Em segundo lugar, para que o usuário móvel seja facilmente encontrado quando receber uma chamada, a rede deve armazenar sua localização aproximada. É por meio do *location update* que o sistema mantém-se informado da localização do cliente; cada vez que o último altera sua área de localização, o primeiro deve ser informado.

Ainda, quando o usuário é chamado, a rede faz o *paging* para encontrá-lo. Essa técnica consiste em um *broadcast* realizado em todas as células da área de localização na qual ele se encontra. Assim, a rede é capaz de identificar a célula responsável por atender àquele usuário e estabelecer a conexão.

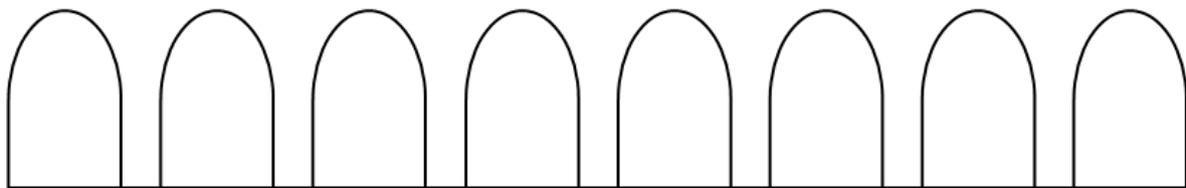
Por fim, durante o tempo de uma única conexão, devido à característica de mobilidade, o usuário pode mudar várias vezes de célula. O *handover* é o processo no qual a ligação com a célula inicial é desfeita, e uma nova ligação é estabelecida com outra célula antes que a conexão caia.

## 2.2.5 Modulação

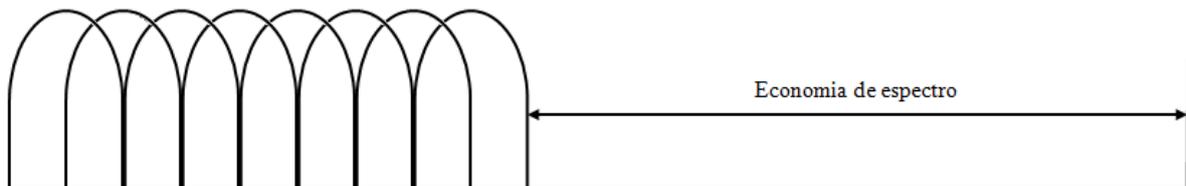
Em telecomunicações, modulação é o procedimento em que se adiciona informação às ondas eletromagnéticas antes de serem transmitidas e recuperadas no receptor. O demodulador extrai a informação inserida. O método escolhido para modulação do sinal é extremamente importante, pois define a taxa de transmissão no canal e a qualidade das chamadas. Grande parte dos avanços na capacidade das comunicações móveis foi atingida graças ao desenvolvimento de técnicas mais eficientes de modulação. Na Quarta Geração da telefonia celular é empregada a modulação OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*).

### 2.2.5.1 Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

No geral, esquemas multiportadora dividem a banda disponível do canal em vários subcanais paralelos. Para evitar sobreposição de espectros, as subportadoras devem ser espaçadas por uma banda de guarda, o que leva ao desperdício de boa parte do espectro. O OFDM é um caso especial de transmissão com múltiplas portadoras no qual o canal é dividido em subcanais que se sobrepõem, mas que ao mesmo tempo são ortogonais entre si. Isso significa que o máximo de uma subportadora está no nulo das outras, evitando que elas precisem ser separadas pela banda de guarda, o que torna essa técnica muito mais espectralmente eficiente (Fig. 2.4).



(a) Subportadoras separadas por uma banda de guarda.



(b) Subportadoras ortogonais.

Figura 2.4. Espectro na transmissão com múltiplas portadoras.

A implementação analógica do OFDM é extremamente difícil de realizar. Seria preciso gerar subportadoras perfeitamente ortogonais para que a técnica funcionasse de modo correto, o que na prática é praticamente impossível de acontecer. A solução se deu em 1971, com a proposta da Transformada Discreta de Fourier (DFT) e, em 1980, tornou-se menos complexa ainda com o desenvolvimento da Transformada Rápida de Fourier (FFT) [1]. Em outras palavras, o transmissor deve associar os dados a subportadoras ortogonais, somá-las e transmitir o sinal contínuo no domínio do tempo; a Transformada Discreta Inversa de Fourier (IFFT) faz exatamente a mesma coisa, porém com menos complexidade, e o sinal resultante no domínio do tempo é discreto.

A Figura (2.5) mostra o diagrama de blocos simplificado de um sistema OFDM. Na transmissão, um conversor S/P (Serial/Paralelo) paraleliza a sequência de *bits*  $\mathbf{b} = [b_0 \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_k]$  em  $N$  blocos ou subcanais. Cada bloco é mapeado em um símbolo  $\mathbf{X}_n$ ,  $n = 0$  a  $N - 1$ , com modulação M-PSK ou M-

QAM. Assim, cada subportadora pode transmitir dados a diferentes taxas das outras. Os símbolos passam, então, por uma IFFT (*Inverse FFT*) e um conversor P/S (Paralelo/Seria), resultando em uma sequência  $\mathbf{x}$  de amostras complexas no domínio do tempo. A sequência  $\mathbf{x}$ , também chamada símbolo OFDM, é transmitida pelo canal após passar por um conversor digital-analógico. Na recepção, são realizadas operações inversas. Em primeiro lugar, converte-se o sinal analógico em digital. Depois, os símbolos paralelizados são passados para a FFT e demodula-se o sinal das  $N$  subportadoras. O espaçamento  $\Delta f = 1/t_s$  entre as subportadoras, em que  $t_s$  é a duração do símbolo OFDM, é tal que o receptor pode separá-los exatamente [1].

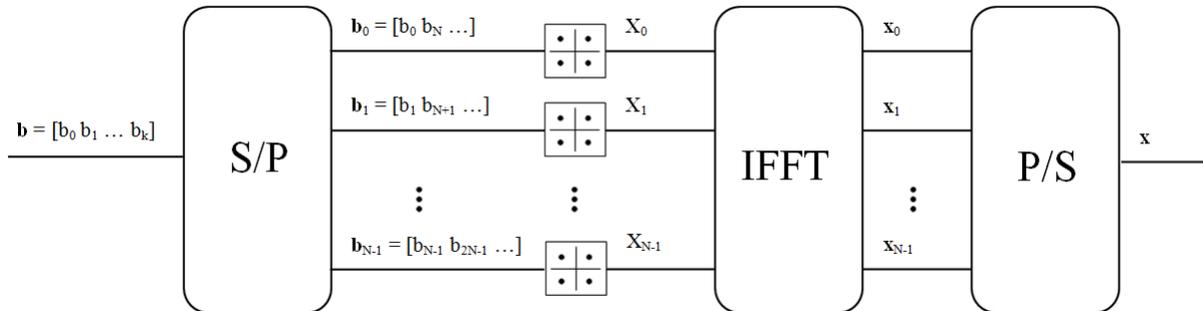


Figura 2.5. Diagrama de blocos da transmissão no OFDM.

Devido ao fato de o canal não ideal introduzir uma dispersão temporal que alarga os pulsos transmitidos de duração  $t_s$  e provocar interferência intersimbólica (ISI) entre símbolos OFDM subsequentes (Fig. 2.6), é preciso adicionar um intervalo de guarda  $\Delta$  antes de se transmitir cada um deles. Durante esse período de guarda, o canal poderia ficar ocioso, porém, aproveitando a inserção obrigatória desse intervalo, utiliza-se uma técnica para simular a periodicidade do sinal que a DFT supõe. Dessa forma, as últimas  $G$  amostras são copiadas para o início do símbolo OFDM, compondo o prefixo cíclico (CP) (Fig. 2.7). O CP converte a convolução linear (aperiódica) para uma convolução circular (periódica), adequada para a transformada discreta; a convolução circular é transformada pela FFT em uma operação de multiplicação, simplificando a equalização das subportadoras [1]. Em sistemas multiportadora, como o OFDM, é essencial escolher bem a duração do intervalo de guarda, que deve ser superior à do alargamento provocado pelo canal, e o número de subportadoras, pois, segundo Hara *et al* [7], esses parâmetros afetam significativamente a taxa de erro de bits (*BER*).

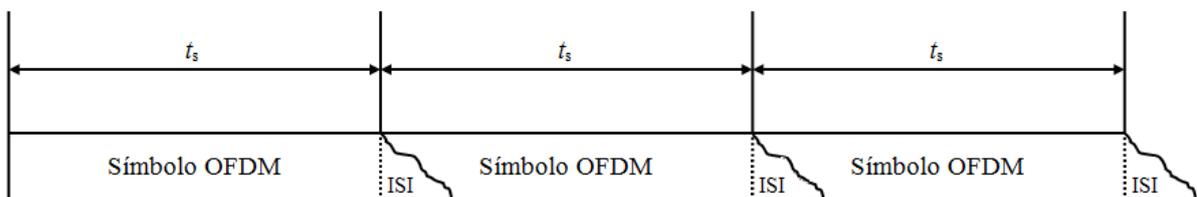


Figura 2.6. Interferência intersimbólica.

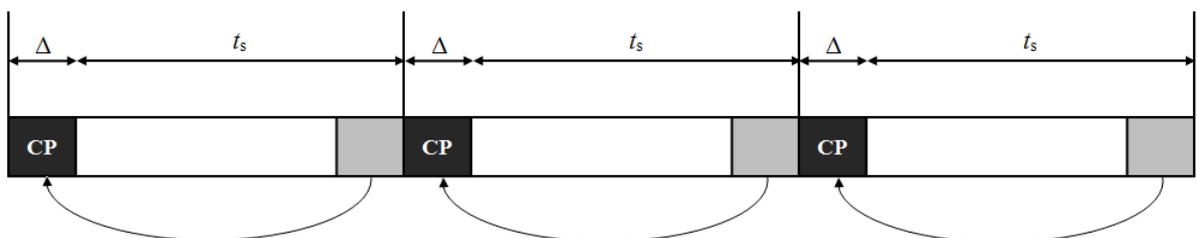


Figura 2.7. Inserção do prefixo cíclico.

A duração total de cada símbolo OFDM é  $T_s = \Delta + t_s$ . Sabendo que o sinal transmitido é a soma dos sinais provenientes das  $N$  subportadoras modulados em M-PSK ou M-QAM, a taxa de símbolos OFDM é  $R_s = N/T_s$ . Sendo assim, a banda  $B$  necessária para a transmissão [7] é

$$B \approx \frac{2}{T_s} + \frac{N-1}{t_s} \approx \frac{N+1}{T_s} = \frac{N+1}{N} R_s. \quad (2.6)$$

### 2.3 3GPP LONG TERM EVOLUTION

O *Long Term Evolution* é o último grande passo no avanço dos sistemas móveis de comunicação. Desde o início de sua padronização, essa tecnologia foi projetada com objetivo de evoluir a telefonia celular ao adotar serviços orientados à comutação de pacotes, ao contrário dos padrões antigos, que fazem uso da comutação por circuitos.

Para assegurar sua competitividade em uma janela futura de no mínimo 10 anos, o 3GPP criou um estudo formal para definir e refinar os requisitos do LTE [1], incluindo a redução de latências, aumento da vazão de dados dos usuários, maior eficiência espectral, arquitetura de rede simplificada e menor consumo de bateria nos aparelhos móveis.

Entre os requisitos de desempenho deste padrão, estão as taxas de pico nos enlaces direto e reverso, que podem alcançar 50 e 100 Mbps, respectivamente, para uma banda de 20 MHz, correspondendo a eficiências espectrais de 2,5 e 5 bps/Hz [1]. As taxas de pico são definidas como a vazão máxima por usuário supondo que toda a banda é disponibilizada para uma única estação móvel com melhor esquema de modulação e de codificação. Apesar de essas taxas poderem de fato ser atingidas em condições ideais, é praticamente impossível que o usuário possa experimentá-las por um período longo; primeiro porque as condições de propagação do sinal raramente são perfeitas; segundo porque os recursos disponíveis devem ser repartidos entre vários usuários.

A extensa gama de requisitos somente é possível de ser atendida graças a duas tecnologias fundamentais, dentre outras, que moldam a face do LTE: a modulação multiportadora e as antenas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*). Adotar esse tipo de modulação para o múltiplo acesso no *Long Term Evolution* foi a primeira grande escolha. Os esquemas candidatos para realizar o acesso no enlace direto eram o OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) e o *Multiple WCDMA* [1], sendo que o primeiro foi, por fim, escolhido. No enlace reverso, adotou-se o FDMA com monoportadora e equalização no domínio da frequência (SC-FDMA).

O OFDMA é uma extensão do OFDM para a implementação de um sistema de comunicação multiusuários. No OFDM, pressupõe-se que um único usuário recebe dados de todas as subportadoras a qualquer momento. Por outro lado, o OFDMA distribui as subportadoras por diferentes usuários ao mesmo tempo, permitindo o acesso múltiplo. Essa última é utilizada em conjunto com o TDMA, de forma que os recursos são divididos no plano do tempo e da frequência, isto é, grupos de subportadoras por uma duração específica.

O sinal de cada usuário pode ser modulado em BPSK, QPSK, 16-QAM ou 64-QAM [8], a depender de sua razão sinal-ruído (SNR). Assim, o número de *bits* por símbolo e, conseqüentemente, a velocidade da conexão são maximizados para a atual condição da SNR do usuário, levando em conta uma taxa de erro de *bits* limite.

Na Figura (2.8), pode-se observar a maneira como os recursos da rede são divididos pelos usuários. Cada quadro de 10 ms comporta 20 *slots* de tempo. Os *slots* podem carregar 6 ou 7 símbolos OFDM, dependendo de como foi escolhido o prefixo cíclico. Normalmente, faz-se uso do CP com duração curta, implicando 7 símbolos por *slot*. Porém, em áreas suburbanas ou rurais, onde as células da grade possuem maior raio e a dispersão temporal é maior, o CP precisa ter uma duração estendida, e

os *slots* passam a comportar somente 6 símbolos. A associação de um símbolo OFDM com uma subportadora compõe um elemento de recurso.

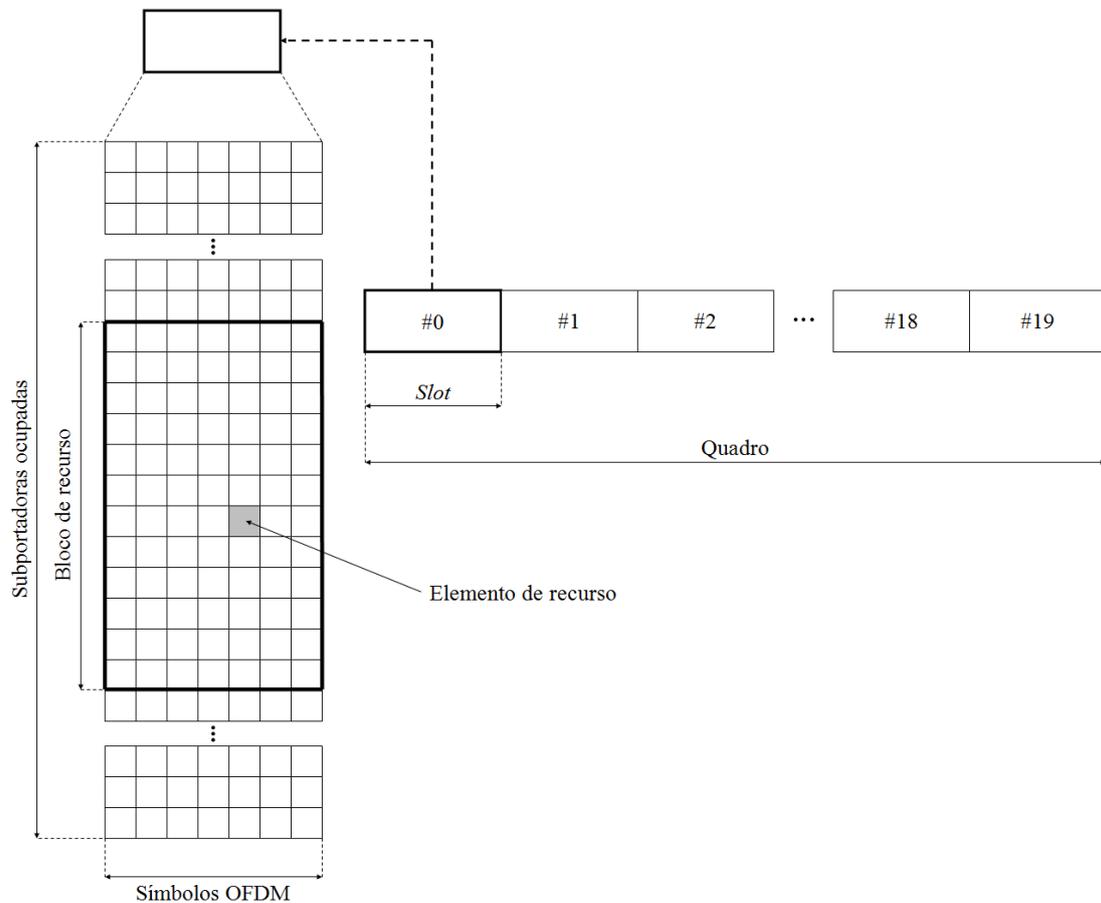


Figura 2.8. Estrutura de quadro do enlace direto no LTE.

No domínio da frequência, os recursos são agrupados em 12 subportadoras, de forma que, durante a duração de um *slot*, esse agrupamento é denominado bloco de recurso. Um bloco de recurso corresponde, portanto, a 84 elementos, no caso do prefixo cíclico normal, ou 72, no caso de prefixo cíclico estendido. Certos elementos de recurso dos blocos são reservados para propósitos especiais, como sinais de sincronização, referência e controle. A Tabela (2.2) explicita os parâmetros utilizados na estrutura de quadro do enlace direto no LTE.

Tabela 2.2. Parâmetros da estrutura de quadro do enlace direto no LTE. Adaptado de [9].

Largura de banda	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Duração do quadro				10 ms		
Espaçamento entre subportadoras				15 kHz		
Subportadoras por bloco de recurso				12		
Tamanho da FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Número de subportadoras ocupadas	76	151	301	601	901	1201
Blocos de recurso por <i>slot</i>	6	15	25	50	75	100
Símbolos OFDM por subportadora (CP curto/longo)				7 ou 6		
Símbolos utilizados para controle por bloco de recurso				4-8		

## 3 REDES CELULARES SUSTENTÁVEIS

### 3.1 ASPECTOS DAS REDES SUSTENTÁVEIS

Hasan *et al* [3] identificam quatro aspectos que devem ser observados no estudo de Redes Celulares Sustentáveis: definição de medidas, alterações na arquitetura, planejamento e projeto eficiente da rede. Considerando o escopo deste trabalho, apenas os dois primeiros serão abordados.

#### 3.1.1 Definição de medidas

Acompanhando o conceito de sustentabilidade que impera nos dias atuais, poderiam se observar as emissões de carbono para classificar as redes de telecomunicações como sustentáveis ou não. Entretanto, a parcela de emissão de carbono pelo qual essas redes são responsáveis é muito pequena, o que torna esse fator não muito apropriado neste caso [3].

Nota-se assim que outros fatores devem ser considerados para se medir quão sustentável é uma rede. Em primeiro lugar, quão financeiramente econômica é a rede, e em segundo, e mais importante, quão energeticamente eficiente ela é. Dessa forma, pode-se avaliá-la em termos de economia de energia e desempenho em um sistema prático por meio de medidas que fornecem informações acerca do sistema.

As medidas mais significativas para se realizar o estudo abordado neste projeto de graduação são: o número de usuários por célula, a vazão média, a vazão média dos 10% usuários com conexão mais lenta, a probabilidade de interrupção e a potência média consumida por estação base. A vazão é a taxa da troca de dados, medida em *bits* por segundo, na camada física entre o aparelho móvel e a antena transmissora da célula. Ademais, a interrupção acontece quando o usuário não é capaz de estabelecer conexão com o sistema se, após serem consideradas todas as perdas de percurso, a potência recebida por ele for menor do que a sensibilidade de seu aparelho móvel.

O número de usuários por célula é uma medida de controle. Essa curva representa a assimetria temporal do sistema e considera-se, neste trabalho, que varia senoidalmente durante o dia. Esse aspecto é utilizado para analisar os outros parâmetros e realizar comparações quando o tráfego é mais ou menos intenso.

A qualidade do serviço é mensurada pela vazão e pela probabilidade de interrupção, que são medidas de avaliação de desempenho. A média geral da vazão é insuficiente para medir o desempenho relativo à velocidade de conexão dos usuários, pois não retrata a realidade daqueles nas piores situações. É preciso, então, medir a vazão destes usuários. Assim, nos horários críticos para o sistema, sabe-se qual é a condição da rede. Já a interrupção deve ser principalmente observada pelo motivo de que alguns usuários podem estar muito distantes das estações base, o que degrada a potência recebida em seus aparelhos e aumenta a probabilidade de não estabelecer a conexão.

Por fim, a medida de avaliação da eficiência de energia da rede é dada pela potência média consumida por ERB. O consumo de potência deve ser medido para verificar como é possível reduzir os gastos e tornar o sistema sustentável.

#### 3.1.2 Alterações na arquitetura e primeira abordagem do *Cell Zooming*

Devido ao elevado crescimento na demanda pelo serviço de telefonia celular, o número de ERBs aumentou substancialmente. O consumo de potência por estação base pode chegar a 1400 W, e os custos podem chegar a US\$ 3000 por ano por ERB [3]. É de crucial importância, portanto, reduzir o consumo de energia devido especialmente às estações rádio base. Tal redução pode ser feita por me-

lhorias em *hardware*, projeto dos amplificadores, protocolos mais eficientes e até mesmo uso de fontes renováveis de energia. Existe, porém, uma forma bastante simples e eficaz (e que é o tema deste trabalho): o gerenciamento de potência.

Ao longo de um período de vinte e quatro horas e da semana, o tráfego na rede sofre flutuações significantes de tempo e de espaço. Durante o dia, o tráfego é mais intenso em áreas comerciais do que nas residenciais; pela noite, a situação se inverte. Assim, sempre há ERBs sob tráfego reduzido, enquanto outras estão sobrecarregadas, o que torna o projeto clássico (estático) da grade de células ineficiente.

Quando uma célula fica congestionada com um grande número de usuários, ela pode encolher, enquanto suas células vizinhas podem expandir para cobrir aqueles usuários que a célula sobrecarregada não é mais capaz de suportar. Em alguns casos, a célula pode inclusive ser desativada, reduzindo drasticamente o consumo de energia, enquanto outras células absorvem os usuários para si.

A implementação dessa técnica, o *Cell Zooming*, se dá por um servidor distribuído pelas ERBs que percebe informações de estado da rede, tais como tráfego, qualidade do canal, vazão dos usuários etc. e toma as decisões necessárias para a atuação do gerenciamento de potência. As células podem expandir ou encolher principalmente pelo ajuste físico nas estações base, que consiste no ajuste da potência transmitida e, também, no ajuste da altura e angulação das antenas. Ademais, no caso em que a célula é desativada e colocada em *sleep mode*, é possível desligar outros equipamentos que consomem energia, como os aparelhos de ar-condicionado e os amplificadores de potência.

Redes celulares auto-organizáveis são, dessa forma, ideais para o balanço de tráfego, ao distribuir os usuários por várias células, e para a economia de energia, ao concentrá-los em poucas células. O servidor distribuído auto-organizável se faz extremamente necessário uma vez que o próprio sistema deve ser capaz de perceber o estado da rede e realizar as alterações sem que haja intervenção humana e deslocamento de quadro operacional para executar em cada célula as mudanças requeridas. Todavia, o *Cell Zooming* automático pode gerar problemas como “buracos” na cobertura de certas áreas e agravamento na qualidade da comunicação, sendo necessários estudos bastante detalhados para torná-lo uma técnica realizável e capaz de superar os desafios existentes.

## 3.2 DINAMICIDADE DAS REDES CELULARES

A ideia básica das Redes Celulares Sustentáveis é eliminar as ineficiências existentes devido ao fato de que atualmente as redes são construídas e operam sob estimativas de pico de tráfego. Intuitivamente, porém, durante períodos de tempo em que o tráfego é reduzido, identifica-se a possibilidade de se desligar ERBs inutilizadas ou subutilizadas. De qualquer forma, Oh *et al* [2] afirmam que a eficiência energética não deve estar acima da qualidade do serviço de comunicação.

### 3.2.1 Variações temporais e espaciais do tráfego

O tráfego de usuários na rede possui períodos de alta e de baixa demanda. Dados obtidos de operadoras de telefonia celular mostram que essa variação temporal obedece a um perfil senoidal [2]. Durante o dia, entre seis e dezoito horas, o tráfego é muito mais intenso do que durante a noite, entre dezenove e cinco horas. Ainda, o pico de tráfego é muito menor em finais de semana e feriados (Fig. 3.1).

Por outro lado, o tráfego distribuído por toda a área abrangida pela rede celular também é heterogêneo. Existem pontos espalhados pela grade nos quais a probabilidade de existirem usuários ativos é muito maior. Esses pontos são chamados *hotspots*. Um centro urbano é exemplo de *hotspot*, pois existem muito mais usuários nessa região do que nos seus arredores.

A composição desses dois tipos de variação gera uma situação claramente dinâmica e bastante acentuada nesse sistema, enfatizando a importância do estudo sobre o gerenciamento e controle de potência nas estações base.

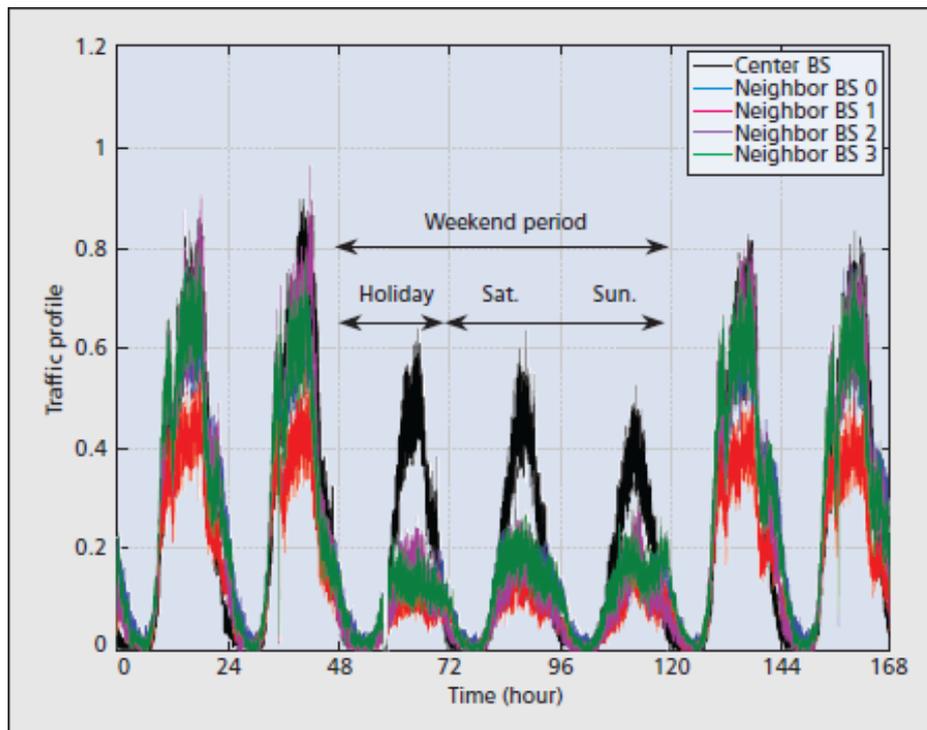


Figura 3.1. Perfil real de tráfego durante a semana. Reproduzido de [2].

### 3.2.2 Granularidade do controle de potência

Outro enfoque que deve ser dado quando se trata de grades dinâmicas é a granularidade temporal do gerenciamento da potência. A maioria dos estudos iniciais propunha que as ERBs subutilizadas deveriam ser desligadas apenas uma vez por dia [2]. Entretanto, quanto maior a granularidade da operação de controle, maior é a eficiência de energia do sistema. Porém, tal fator é limitado pelo aumento da complexidade da coordenação e do monitoramento das células.

## 3.3 GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA

Para realizar o gerenciamento de potência são propostas as técnicas *Sleep Mode* e *Cell Zooming*, que aqui são tratadas separadamente, apesar de, na literatura, o *Sleep Mode* ser considerado uma espécie de *Cell Zooming* no qual as células se reduzem a zero. Na primeira, desligam-se algumas das células quando o tráfego de usuários é muito baixo; na segunda, as células alteram seu tamanho para comportar mais ou menos usuários quando estão subutilizadas ou sobrecarregadas.

### 3.3.1 *Sleep Mode*

Os algoritmos normalmente propostos para *Sleep Mode* escolhem automaticamente quais células devem ser desligadas, e o critério de escolha é a menor quantidade de usuários. Todavia, a existência de *hotspots* faz com que a concentração de usuários seja muito maior em algumas células vizinhas do que em outras regiões da grade em torno dessas mesmas células. Então, é muito provável que a escolha arbitrária gere áreas sem cobertura, ou “buracos”.

Com a intenção de evitar esse problema, deve-se, contudo, observar a disposição inicial das células na grade para se tomar a decisão de quais podem ou não entrar em *sleep mode*. A proposta desse trabalho é escolher as células que devem permanecer ligadas da forma apresentada na Fig. (3.2). A probabilidade de alguma área ficar sem cobertura do serviço celular é bastante reduzida, ainda mais se considerando o aumento da potência de transmissão das ERBs e a alteração do apontamento das antenas. Esses ajustes têm a intenção de manter a probabilidade de interrupção e o desempenho geral do sistema. Vale ressaltar que o *Sleep Mode* explora a assimetria temporal da rede e será ativado quando o número de usuários por célula for menor que certo valor determinado, o que irá acontecer nos períodos de baixo tráfego.

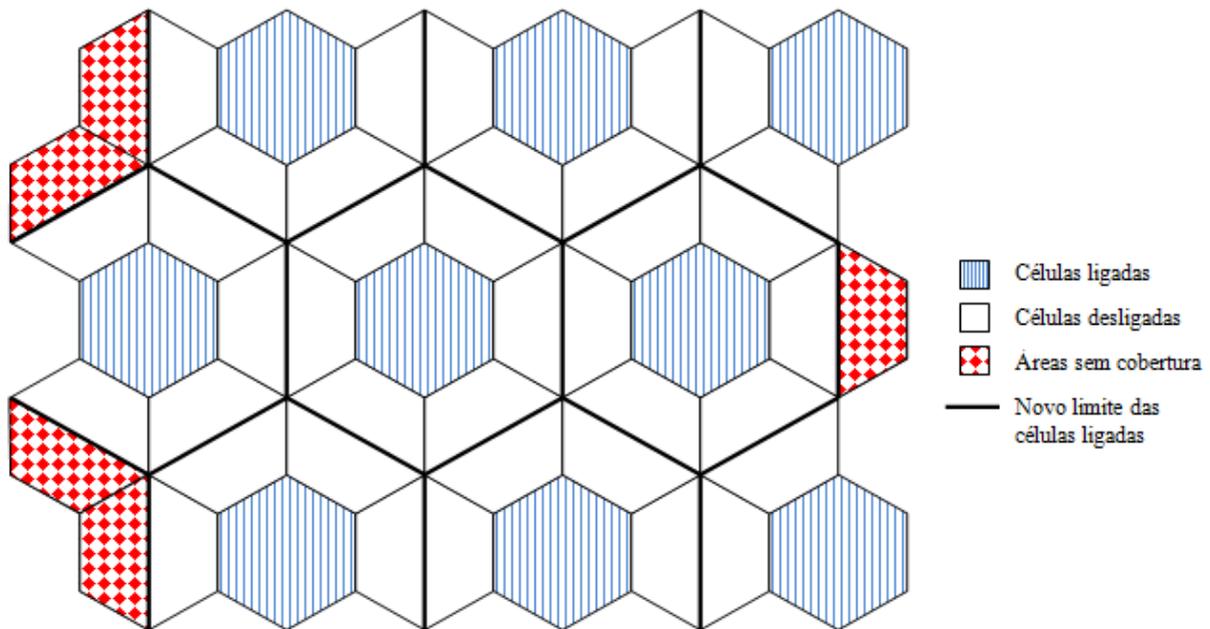


Figura 3.2. Configuração da grade durante a execução do *Sleep Mode*.

### 3.3.2 Cell Zooming

O *Cell Zooming* também é geralmente proposto para que o servidor distribuído faça escolhas automáticas das células que devem expandir ou encolher. Dessa vez, todavia, não é a automatização das decisões o grande problema.

As redes celulares são espacialmente assimétricas, ou seja, os usuários dentro da grade não são distribuídos uniformemente, principalmente devido à existência de *hotspots*. Essa assimetria faz com que os recursos da rede sejam divididos desigualmente, posto que os usuários que se encontram em células com maior tráfego possuirão pior qualidade do serviço celular do que aqueles em células mais vazias.

Quando o gerenciamento do *Cell Zooming* passa a atuar à maneira convencionalmente sugerida, na qual as células expandem ou encolhem por ajustes físicos, aquelas células sobrecarregadas são forçadas a diminuir sua potência de transmissão para absorver menos usuários e assim aliviar seu trabalho. Para atender os usuários que ficaram fora dessas células, as outras aumentam sua potência de transmissão para englobá-los. De qualquer maneira, a redução da potência em uma ERB deve ser compensada pelo aumento em outras, o que não contribui notavelmente para a eficiência de energia, e acima disso, ainda pode gerar áreas sem cobertura.

Para resolver essa questão, propõe-se neste trabalho um *Cell Zooming* em que as células são expandidas ou encolhidas virtualmente. No sistema prático, o servidor distribuído é o mecanismo que realiza a conversação entre as estações base para que as decisões sejam tomadas. Então, assim que o usuário inicia sua chamada, a conexão sempre é feita com a ERB da qual a potência recebida em seu aparelho é maior. Por outro lado, o usuário também recebe o sinal de várias outras estações base ao seu redor com capacidade para atendê-lo. Nesse momento, o gerenciamento atua reconectando o usuário à célula com menor tráfego, desde que a potência recebida dessa ERB seja superior a sua sensibilidade.

Nesse modo de conexão, as células sobrecarregadas diminuem sua densidade de usuários, e as subutilizadas aumentam-na, dando a ideia de *Cell Zooming* virtual, isto é, sem necessidade de ajustes de natureza física. A alteração dinâmica na densidade das células proporcionará uma distribuição mais igualitária dos recursos da rede. A efetividade desta solução deve ser comparada com os resultados de uma operação convencional de *Cell Zooming*. Sendo assim, o objetivo do modo clássico é economizar energia, variando a potência de transmissão das estações base de acordo com o número de usuários conectados a cada uma delas, enquanto o modo proposto tem uma abordagem expressamente focada na melhor divisão de recursos.

## 4 SIMULADOR

### 4.1 INTRODUÇÃO

Para averiguar a aplicabilidade do *Cell Zooming*, foi desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso um simulador em linguagem de programação C++. Esta é uma linguagem orientada a objetos, o que significa que cada componente é tratado sob uma perspectiva em que possui seus próprios métodos e propriedades. Tal característica é ideal para o tipo de simulador que se pretendia implementar.

Como primeiro passo, antes de se testar qualquer algoritmo da técnica, cria-se um ambiente onde isso possa ocorrer. Ou seja, é preciso simular previamente o funcionamento normal de uma rede celular, com sua grade de células e suas estações base, tráfego e mobilidade dos usuários, *hotspots*, modelos de canal. Após a criação do ambiente-base, parte-se finalmente para a execução dos algoritmos de *Sleep Mode* e de *Cell Zooming*, que são baseados em fatores como a quantidade de usuários por célula, capacidade de cada uma e necessidade de se reduzir o consumo de energia do sistema.

O simulador é disponibilizado na página <https://code.google.com/p/green-cell-sim> hospedada no site GOOGLE<sup>®</sup> Project.

### 4.2 BREVE DESCRIÇÃO DA LINGUAGEM C++

Antes de explicar a construção do simulador, apresentam-se as características básicas da linguagem C++ para melhor compreensão dos elementos empregados neste trabalho de graduação. Pretende-se, porém, apenas dar uma visão superficial da linguagem e dos recursos integrados a ela.

O C++ é uma linguagem de código aberto e padronizada pela Organização Internacional de Padronização (ISO). Isso é extremamente importante para garantir que programas escritos em um compilador funcionarão normalmente em outro. De certa forma, a intenção deste projeto é disponibilizar o código para que qualquer desenvolvedor possa fazer mudanças que julgar necessárias e sempre buscar melhorias, sendo estes alguns dos grandes motivos para a escolha desta linguagem.

Embora, de fato a razão citada acima tenha peso enorme na seleção da linguagem, a característica certamente mais visada é a orientação a objetos. A programação orientada a objetos é um paradigma das linguagens estruturadas para expressar os programas em termos de objetos, permitindo a reutilização ilimitada do código [10].

Os objetos são instâncias das classes, que por sua vez podem ser comparados a grupos. Por exemplo, a classe é um grupo que possui atributos característicos. Quando um objeto é criado, ele possui todos os atributos referenciados a sua classe. Então, na construção do código, os objetos são criados e destruídos constantemente, mas a classe sempre permanece.

Sozinhos os objetos não têm utilidade alguma. Para que o código realize as diversas tarefas pretendidas, criam-se métodos dentro das classes. Os métodos são os grandes mecanismos que executam as rotinas escritas no simulador. Ao serem invocados, realizam aquilo que lhe foi determinado e alteram os atributos dos objetos, dando sentido ao simulador.

### 4.3 CRIAÇÃO DO AMBIENTE-BASE

Reiterando, o ambiente-base é formado por todos os elementos característicos de uma rede celular: grade de células, estações base, usuários móveis, canal AWGN (*Additive White Gaussian*

Noise) com desvanecimento de larga escala e variações temporais e espaciais de tráfego. A fim de se escrever um código de programação profissional e bem documentado, são criadas classes para cada um desses elementos. Cada classe possui atributos e métodos próprios que executam somente o que compete àquela classe. Isso torna, de certa forma, o código mais segmentado e mais organizado, o que facilita tanto na sua programação quanto no seu entendimento.

A Fig. (4.1) adianta o relacionamento entre as classes do simulador, indicando como elas interagem umas com as outras. As classes BASESTATION e MOBILEUSER são herdeiras da classe RADIOUNIT. A primeira é utilizada pela classe GRID para compor todas as estações base da grade de células; a segunda, juntamente com a classe SCHEDULER, agenda eventos de surgimento e movimentação de usuários e desconexão de chamadas para formar o perfil de tráfego da classe TRAFFIC. As interações entre os usuários móveis e as estações base, como estabelecimento de conexão e determinação da vazão, são consolidadas com a classe CHANNEL. A classe STATS recolhe periodicamente, com auxílio de SCHEDULER, as estatísticas da rede. E, finalmente, a classe SERVER, também por meio do SCHEDULER, agenda eventos para atuar na configuração da grade e promover o gerenciamento de potência. Uma descrição mais detalhada de cada classe majoritária do simulador é feita nas seções a seguir.

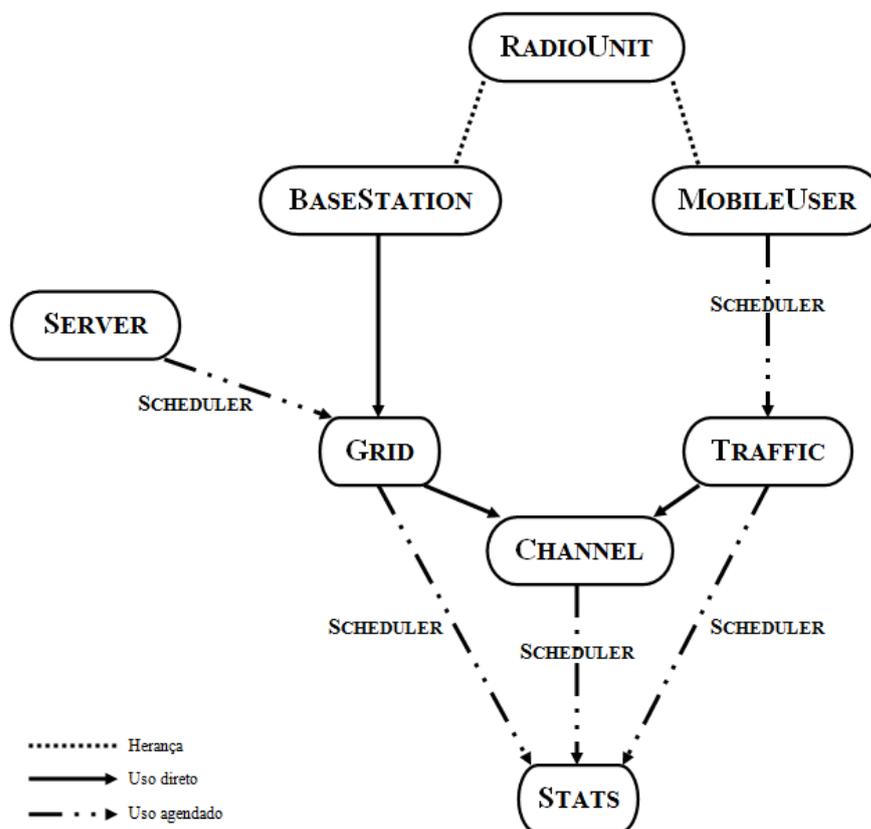


Figura 4.1. Relações entre as classes do simulador.

### 4.3.1 Classe RADIOUNIT

Essa classe comporta os elementos de rádio que compõem a rede, tais como estações rádio base e aparelhos móveis, que por sua vez formam duas subclasses distintas, BASESTATION e MOBILEUSER, que herdam todas as propriedades da classe superior RADIOUNIT.

Esta última possui somente propriedades simples: coordenadas do espaço cartesiano e um número de identificação. Já as outras duas classes, são muito mais detalhadas. BASESTATION possui

elementos como potência transmitida e potências consumidas na amplificação do sinal e no sistema de resfriamento, além de armazenar informações da quantidade de usuários conectados e estado de funcionamento (ligada ou desligada). De igual modo, MOBILEUSER tem atributos que informam a estação base a que está conectado e potência recebida, mas também vazão de dados e velocidade com que se move no espaço cartesiano.

### 4.3.2 Classe GRID

É responsável pela criação automática da grade na qual se sucedem todos os eventos durante a simulação. Possui métodos para posicionar todas as estações base, calcular os limites da área abrangida e determinar a localização dos *hotspots*.

As células hexagonais são dispostas num arranjo retangular, como na Fig. (4.2). A geração da grade depende de parâmetros indicados pelo usuário do programa. Pode-se escolher o raio médio das células, bem como a quantidade de células que serão dispostas na direção horizontal (número de colunas) e na direção vertical (número de linhas). O posicionamento das ERBs acontece de forma aleatória dentro de uma pequena região dentro de cada célula, com a intenção de criar uma grade completamente distinta a cada vez que o programa é executado. As células são divididas em três setores, o que implica o uso de antenas diretivas em cada estação base.

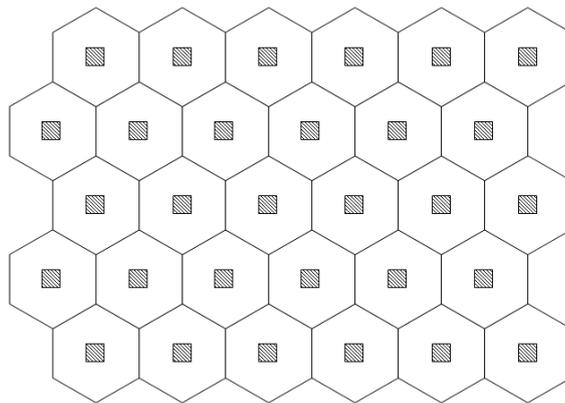


Figura 4.2. Grade de células hexagonais em arranjo retangular. Os quadrados hachurados são regiões dentro das quais as estações base podem ser posicionadas aleatoriamente.

Igualmente, os *hotspots* são elementos essenciais dessa classe. Existem cinco *hotspots* na grade: um no centro e quatro nos cantos. O primeiro representa o centro da cidade, local onde a maioria dos usuários do serviço celular se encontra durante o horário comercial. Dentre os outros, três representam os arredores do centro comercial, onde a maior parte dos usuários se localiza durante o período não comercial. O último retrata um ponto da cidade onde a concentração de usuários é motivacional, por exemplo, um estádio de futebol em dia de jogo.

### 4.3.3 Classe CHANNEL

Uma das classes mais extensas em termos de número de atributos e de métodos, CHANNEL possui a importantíssima atribuição de simular o canal pelo qual é estabelecida a conexão entre o usuário móvel e a estação rádio base.

#### 4.3.3.1 Perdas no canal

O desvanecimento de larga escala é um dos elementos do canal e é composto pelas perdas de percurso e pelo sombreamento. As perdas de percurso (Eq. 2.3) são computadas com o método

Okumara-Hata *Extended Cost-231*, explicado no Capítulo 2. O fator de sombreamento (Eq. 2.5) é calculado pelo método proposto também nesse capítulo.

#### 4.3.3.2 Ganho da antena

Existe, ainda, um método para calcular o ganho das antenas sobre o sinal transmitido no canal entre o usuário e a estação base. Gunnarsson *et al* [11] propuseram um modelo de antena adequado para ambientes de simulação (Fig. 4.3). Tal modelo pode ser utilizado em arranjos de células hexagonais para representar condições autênticas do cenário real no ambiente virtual e tem como referência dados obtidos de uma antena comumente utilizada, a Kathrein 742215 [11].

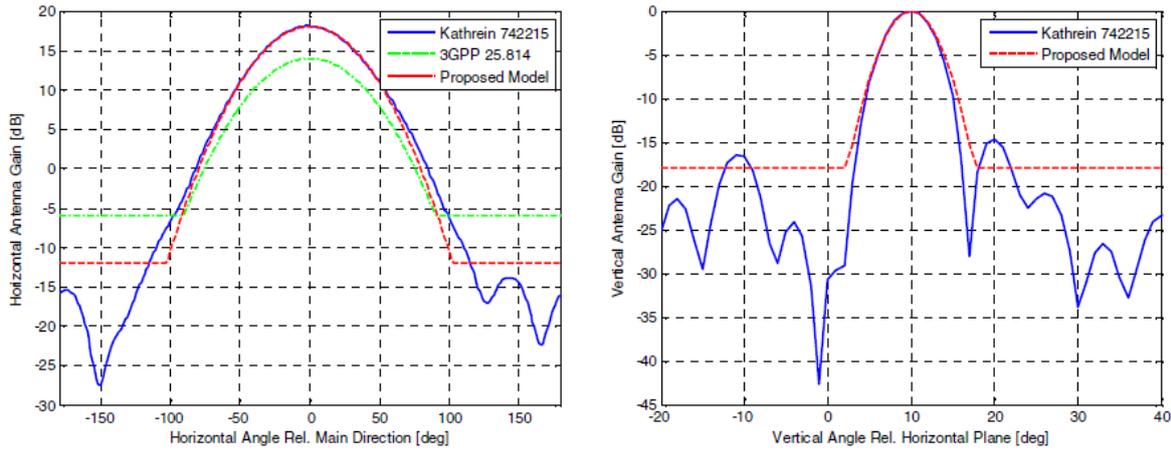


Figura 4.3. Modelo proposto para os ganhos horizontal e vertical de antenas. Reproduzido de [11].

O ganho horizontal é parametrizado por um ganho máximo  $G_{\max}$ , o ângulo horizontal de meia-potência  $HPBW_h$  e a relação frente-costa  $FBR_h$ , resultando em

$$G_h(\varphi) = -\min\left(12\left(\frac{\varphi}{HPBW_h}\right)^2, FBR_h\right) + G_{\max}, \quad (4.1)$$

em que  $\varphi$ ,  $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ , é o ângulo horizontal em relação à direção do lobo principal do diagrama de radiação da antena. Da mesma forma, a componente vertical do ganho é dada por

$$G_v(\theta) = \max\left(-12\left(\frac{\theta - \theta_{\text{tilt}}}{HPBW_v}\right)^2, SLL_v\right). \quad (4.2)$$

O ângulo  $\theta$ ,  $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ , é o ângulo vertical em relação ao plano horizontal, e  $SLL_v$  é o ganho do lobo secundário. Finalmente, o ângulo de inclinação  $\theta_{\text{tilt}}$  da antena é determinado pela direção para a qual ela aponta. No projeto inicial de um sistema celular, as antenas são apontadas para as bordas de suas respectivas células.

A soma das duas componentes (Eq. 4.3), horizontal e vertical, determina o ganho da antena transmissora, em dB,

$$G_{\text{TX,dB}} = G_h(\varphi) + G_v(\theta). \quad (4.3)$$

#### 4.3.3.3 Conexão

No instante em que é gerado, o usuário móvel precisa ser conectado a uma ERB. O processo de decisão entre todas as estações base da grade leva em consideração o maior nível de sinal em ter-

mos de potência. Em outras palavras, na localização em que se encontra, o usuário é inundado pelo sinal de várias ERBs, mas se conectará apenas àquela cujo nível da potência recebida é maior em sua antena receptora. Por isso, necessário se faz calcular a potência recebida no aparelho móvel devido a todas as ERBs e compará-las. Por causa de seu movimento, a conexão dos usuários deve ser eventualmente refeita a intervalos constantes, de forma a atualizar os níveis de potência recebida e até mesmo, dependendo do caso, sua estação base.

Computados o ganho da antena  $G_{TX,dB}$ , as perdas de percurso  $PL_{dB}$  e o fator de sombreamento  $SF_{dB}$ , a Equação (4.4) determina o nível de potência do sinal que atinge o usuário  $P_{RX,dBm}$ ,

$$P_{RX,dBm} = P_{TX,dBm} + G_{TX,dB} - PL_{dB} - SF_{dB}. \quad (4.4)$$

Feita a conexão entre usuário e a  $i$ -ésima estação base, os sinais das ERBs remanescentes são considerados interferência para a antena receptora do aparelho móvel. A Equação (4.5) dá a razão sinal-ruído-mais-interferência no receptor

$$SNIR_{dB} = \frac{P_{RX,i}}{BN_0 + \sum_{j \neq i} P_{RX,j}}, \quad (4.5)$$

na qual a interferência é a soma dos sinais recebidos de todas as estações base, exceto a que o usuário está conectado, mais um fator extra  $BN_0$ , que é a potência do ruído intrínseco existente no receptor.

#### 4.3.3.4 Vazão

O cálculo da vazão é feito com base no número de elementos de recurso do quadro alocados para cada usuário no estabelecimento da conexão e o esquema de modulação escolhido. Genericamente, o quadro possui um conjunto de símbolos OFDM úteis associados a subportadoras, compondo os elementos de recurso. Esses últimos são repartidos entre os usuários. A Equação (4.6) mostra o raciocínio realizado para se encontrar a quantidade de símbolos úteis por quadro:

$$\left( \frac{\text{subportadoras}}{\text{bloco de recurso}} \cdot \frac{\text{símbolos}}{\text{subportadora}} - \frac{\text{símbolos de controle}}{\text{bloco de recurso}} \right) \cdot \frac{\text{blocos de recurso}}{\text{slot}} \cdot \frac{\text{slots}}{\text{quadro}} = \frac{\text{símbolos úteis}}{\text{quadro}}. \quad (4.6)$$

Considerando que a escolha do esquema de modulação determina a quantidade de bits por símbolo, a vazão pode ser encontrada na forma da Eq. (4.7), ao dividir os recursos úteis pelo número de usuários

$$\frac{\text{bits}}{\text{símbolo}} \cdot \frac{\text{símbolos úteis}}{\text{quadro}} \cdot \frac{\text{quadros}}{\text{segundo}} \cdot \frac{1}{\text{\#usuários}} = \frac{\text{bits/segundo}}{\text{\#usuários}}. \quad (4.7)$$

Aqui se considera que os recursos são divididos igualmente, mas, na prática, isso pode não acontecer. Além disso, é feita também a suposição de que todos os *bits* enviados são exclusivamente de dados, não havendo, portanto, codificação da sequência de *bits*.

A questão agora é como decidir o esquema de modulação para cada usuário móvel. Conhecida a razão sinal-ruído-mais-interferência  $SNIR_{dB}$  na recepção e sabendo que a largura de banda  $B$  para a transmissão do sinal é dada pela Eq. (2.6) e que a energia de símbolo se relaciona com a energia de *bit* por  $E_s = E_b \log_2 M$ , é possível determinar a razão  $E_b/N_0$ , em dB,

$$\left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{dB} = SNIR_{dB} - 10 \log \frac{N \log_2 M}{N+1}, \quad (4.8)$$

na qual  $N$  é o número de subportadoras ocupadas e  $M$  assume os valores 2, 4, 16 ou 64 símbolos para modulação BPSK, QPSK, 16-QAM ou 64-QAM, respectivamente. Para uma  $BER$  considerada, pode-se finalmente decidir o esquema de modulação que maximiza o número de bits por símbolo (igual a  $\log_2 M$ ), sem que a taxa de erro de bits ultrapasse seu valor máximo preestabelecido.

#### 4.3.3.5 Potência consumida

O modelo de gastos de energia é construído conforme Hasan *et al* [3] especificam em seu artigo (Fig. 4.4). Cada ERB consome algo entre 800 e 1500 W, divididos entre a amplificação da potência ( $P_{AMP}$ ), sistema de resfriamento ( $P_{AIR}$ ), processamento de sinal ( $P_{PROC}$ ) e transmissão ( $P_{TX}$ ). De tal maneira, a potência total consumida  $P_{CONS}$  por cada ERB é soma das potências elencadas acima

$$P_{CONS} = P_{TX} + P_{AMP} + P_{AIR} + P_{PROC}. \quad (4.9)$$

Antes de o sinal ser transmitido, a uma potência  $P_{TX}$ , é necessário amplificá-lo. A amplificação deve ser realizada para converter o sinal de baixa potência em um sinal de alta potência necessário para a que a transmissão supere as perdas introduzidas pelo canal. O consumo de potência para amplificar o sinal é dado por  $P_{AMP}$ .

O processamento de sinal dos vários usuários conectados a determinada ERB também é responsável por consumir uma potência  $P_{PROC}$ . Considera-se que esse valor cresce linearmente de acordo com a quantidade de usuários conectados.

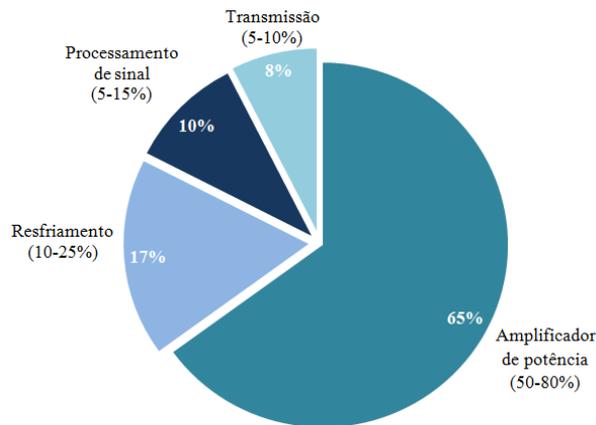


Figura 4.4. Modelo de gastos de energia em cada estação base. Adaptado de [3].

#### 4.3.4 Classe TRAFFIC

A variabilidade temporal do tráfego dos usuários é o grande cerne em que se baseia o conceito de Redes Celulares Sustentáveis. A Figura (3.1) reflete essa característica dinâmica do tráfego. Para reproduzir a curva de tráfego real para o ambiente de simulação (Fig. 4.4), propõe-se o seguinte modelo (Eq. 4.10) para a quantidade média de usuários por segundo  $ups(t)$  que surgem na grade

$$ups(t) = ups_{max} \left( 1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \tau\right) \right)^{1,6}, \quad (4.10)$$

em que  $ups_{max}$  é definido como a quantidade máxima de usuários que podem surgir por segundo,  $T$  é o período da função (igual a 24 horas), e  $\tau$  o deslocamento para ajustar o horário de pico do tráfego. O expoente empregado na Eq. (4.10) tem função de tornar a curva mais alargada na base e mais afunilada no topo, aproximando-a mais da curva real.

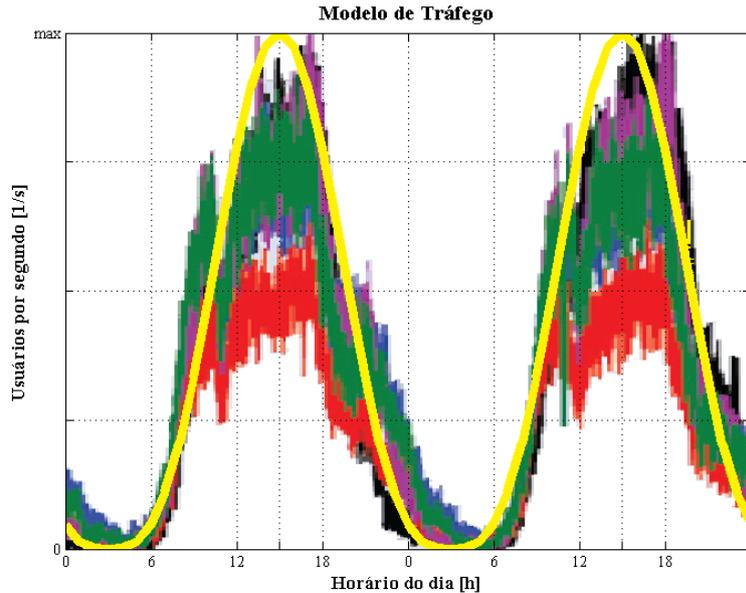


Figura 4.5. Modelo de tráfego proposto. A curva amarela retrata o modelo proposto pela Eq. (4.10); as curvas de cores diferentes representam o perfil real de tráfego em diversas células apresentado em [2].

O número de usuários por segundo que aparece na grade é uma variável aleatória poissoniana com valor médio  $ups(t)$ ; como consequência o tempo de chegada entre usuários é uma variável aleatória exponencial com valor médio  $1/ups(t)$ . Então, quando um usuário chega ao sistema, pode-se determinar o momento em que próximo irá chegar também, escolhendo-se um valor aleatório na distribuição exponencial. Igualmente, a duração de uma chamada é variável aleatória exponencial e, depois de estabelecida, pode-se determinar o momento em que o usuário deixará o sistema.

Como se pode notar, o horário do dia é fundamental para se estabelecer quantos usuários por segundo surgem na grade e também qual *hotspot* é mais provável naquele instante. No horário comercial, a probabilidade de surgirem usuários é maior no centro da grade, e no não comercial, é maior nas bordas. Quando o usuário é criado e suas posições são escolhidas aleatoriamente da forma descrita acima, são invocados os métodos da classe CHANNEL para conectá-lo à estação base e para calcular a sua vazão.

A classe TRAFFIC possui um método próprio para simular a mobilidade dos usuários dentro da grade. O modelo de mobilidade foi construído de maneira a atualizar a posição dos usuários a intervalos de um segundo. Considera-se que existem três padrões de movimento: browniano (velocidades entre 0 e 1,2 m/s), pedestre (entre 1,2 e 6,0 m/s) e automóvel (entre 6,0 e 16,0 m/s). O movimento browniano é caracterizado por usuários que se deslocam em direções completamente não correlatas a cada segundo; os pedestres mudam a direção de seu movimento de forma não tão brusca, mas ainda podem alterá-la ou não para direções ortogonais àquela definida no segundo anterior; por último, supôs-se que os automóveis não sofrem mudança de direção durante o tempo de chamada. Após sortear um valor para a velocidade do usuário, sua posição e direção são atualizadas a cada segundo.

Uma situação problema que deve ser tratada refere-se aos usuários localizados próximos às bordas da grade. Por causa de seu movimento, os usuários podem extrapolar os limites da área abrangida. Para evitar isso, quando a estação móvel ultrapassa as bordas, o usuário é redirecionado para o centro da grade. Conquanto isso não represente a realidade de um sistema celular, é o modelo adotado no simulador e tem intenção de aumentar a quantidade de usuários do *hotspot* central, atuando de forma a impulsionar o número de usuários nessa região durante o período da simulação.

### 4.3.5 Classe SCHEDULER

O simulador desenvolvido é orientado a eventos, isto é, a simulação do ambiente exige a criação de eventos que devem ser agendados e posteriormente executados. Por exemplo, como explicado na seção anterior, quando um usuário surge na grade, deve-se determinar a duração de sua chamada e agendar tanto o momento em que ele será desconectado da rede quanto o instante que surge o próximo usuário. Sendo assim, a desconexão de um usuário e o surgimento de outro são eventos. De forma geral, no simulador implementado, os eventos são variados. São considerados eventos: a criação e a desconexão de um usuário, a atualização de sua posição, a execução do *Sleep Mode* e do *Cell Zooming*, dentre outros que serão apresentados mais a frente.

O registrador é uma lista prioritária de eventos, e estes por sua vez possuem um atributo chamado *timestamp*. Quando cada evento é criado, é necessário determinar o horário em que deve ser executado, inseri-lo na lista prioritária e agendar o próximo. Observe que cada evento, quando é criado, agenda outros eventos posteriores. O horário calculado é o *timestamp* dos eventos, e o registrador organiza-os de forma a dar prioridade para a execução dos mais próximos em detrimento dos mais distantes. Assim, quando a simulação começa, a lista é varrida elemento por elemento e executa-se o que é estabelecido naquele evento.

## 4.4 SERVIDOR DISTRIBUÍDO

O servidor distribuído, construído em uma classe específica denominada SERVER, agenda no registrador eventos para execução dos algoritmos de *Sleep Mode* e de *Cell Zooming*. A atuação dessas técnicas acontece a intervalos regulares de acordo com a granularidade de controle definida pelo usuário do simulador, e o seu acionamento é feito de forma automática de acordo com critérios estabelecidos logo a seguir.

O *Sleep Mode* é ativado quando o número de usuários por célula  $upc$  é menor do que 75% da estimativa máxima (Eq. 4.11). Essa margem é utilizada para que o número de usuários por célula ativa durante o *Sleep Mode* seja sempre menor do que no horário de pico, implicando o fato de que a vazão média da rede durante o desligamento das ERBs ainda é melhor do que a sua média nos horários de maior tráfego.

$$upc < 0,75upc_{\max} \quad (4.11)$$

A estimativa máxima  $upc_{\max} = ups_{\max} \cdot \delta$  é calculada sabendo que, no horário de pico, surge uma quantidade  $ups_{\max}$  de usuários por segundo na grade que realizam ligações de duração tipicamente distribuída exponencialmente em torno de uma média  $\delta$ . Nesse horário, toda a grade deve estar ativa, então os usuários estão distribuídos por todas as células. Ao contrário, durante a atuação da técnica, os usuários são distribuídos somente pelas células que permanecem ativas. O raciocínio a seguir resume isso:

$$\frac{ups \cdot \delta}{\#células \text{ ativas no } Sleep \text{ Mode}} < 0,75 \left( \frac{ups_{\max} \cdot \delta}{\#total \text{ de células}} \right) \quad (4.12a)$$

$$ups < 0,75ups_{\max} \left( \frac{\#células \text{ ativas no } Sleep \text{ Mode}}{\#total \text{ de células}} \right) \quad (4.12b)$$

Assim, quando o número de usuários por segundo que surge na grade é menor do que o valor apresentado, o *Sleep Mode* pode ser executado, e, como na Fig. (3.2), as células que são desativadas passam a não consumir energia pela redução a zero das potências gastas na transmissão, amplificação, sistemas de resfriamento e processamento de sinal; as células que permanecem ligadas devem aumen-

tar sua potência de transmissão para cobrir as áreas deixadas pelas outras. Quando esse número é maior, as células desligadas são religadas e o sistema todo passa a operar em situação normal.

A operação do *Cell Zooming* clássico também é baseada em comparações do número de usuários distribuídos pela grade. Nesse caso, o servidor colhe informações acerca de todas as estações base e compara a quantidade de usuários conectados a cada uma com a média de usuários por todas as ERBs. A Tabela (4.1) apresenta como foram definidos empiricamente patamares para a redução da potência transmitida pelas ERBs com grande quantidade de usuários. Essas ERBs passam a englobar uma área menor e absorvem menos usuários para si. As estações base ao seu redor não sofrem nenhuma alteração, a fim de reduzir a potência total consumida no sistema. Isso, entretanto, pode gerar “buracos”, que serão percebidos pela análise da probabilidade de interrupção.

Tabela 4.1. Níveis de potência transmitida durante a execução do *Cell Zooming*.

Quantidade $x$ de usuários conectados a uma estação base	Redução da potência de transmissão
$0,8 \cdot \text{média} \leq x < 1,0 \cdot \text{média}$	$P_{\text{TX,dB}} - 1,0 \text{ dB}$
$1,0 \cdot \text{média} \leq x < 1,1 \cdot \text{média}$	$P_{\text{TX,dB}} - 2,0 \text{ dB}$
$1,1 \cdot \text{média} \leq x < 1,2 \cdot \text{média}$	$P_{\text{TX,dB}} - 2,5 \text{ dB}$
$1,2 \cdot \text{média} \leq x < 1,4 \cdot \text{média}$	$P_{\text{TX,dB}} - 3,0 \text{ dB}$
$x \geq 1,4 \cdot \text{média}$	$P_{\text{TX,dB}} - 3,5 \text{ dB}$

Deve-se, portanto, enfatizar mais uma vez que o *Cell Zooming* clássico possui desafios difíceis de se resolver e pode ainda não contribuir significativamente para o consumo de energia. Por esses motivos, chega-se a conclusão de que esta técnica é muito melhor aproveitada se for dedicada para dividir melhor os recursos, deixando que o *Sleep Mode* seja o grande responsável pela eficiência de energia nas Redes Celulares Sustentáveis.

Daí surge a proposta do *Cell Zooming* virtual, explicada no Capítulo 3. Nesse caso, o servidor distribuído precisa atuar o mais rápido possível assim que um usuário tentar estabelecer conexão com a rede. A granularidade do gerenciamento de potência nesse algoritmo deve, então, ser muito menor do que nos anteriores, pois muitos usuários surgem na grade entre um intervalo de execução e outro. Cada usuário será conectado a estação base que no momento atende a menor quantidade de chamadas, e da qual a potência recebida em seu aparelho móvel seja maior do que sua sensibilidade. Dessa maneira, os usuários que surgem em certa região da grade de células, serão distribuídos mais igualmente pelas estações base ao seu redor. A conexão é feita por comparações entre a potência recebida, como na situação padrão de operação da rede, e também por comparações entre a quantidade de usuários por ERB.

## 4.5 PARAMETRIZAÇÃO

Testar vários ambientes de simulação significa alterar as variáveis do código e executar o programa, para posteriormente colher os resultados. Deve-se, porém, evitar que essa alteração seja feita dentro do código, pois os parâmetros podem estar espalhados por inúmeros arquivos. Isso dificultaria a parametrização e empobreceria o simulador.

Para contornar esse problema, é preferível criar um arquivo de configuração do programa executável. Com isso, todas as variáveis são concentradas em um único arquivo e podem ser rapidamente modificadas a critério de quem faz uso do código. Quando o programa é executado, o arquivo de configuração é lido e os parâmetros são repassados para as funções e os métodos do simulador. A Tabela (4.2) apresenta os elementos configuráveis e suas respectivas descrições e

unidades de medida, divididos em categorias, e os valores utilizados na situação normal de operação do sistema, isto é, sem executar *Sleep Mode* ou *Cell Zooming*.

Tabela 4.2. Parâmetros configuráveis do simulador.

Parâmetros	Simulação Padrão	Unidade	Descrição
<b>Simulação</b>			
Tempo máximo	86400	s	Tempo máximo de execução da simulação
Granularidade da coleta de dados	10	s	Intervalo para a coleta de dados
<b>Gerenciamento</b>			
<i>Sleep Mode</i>	0	—	1 para executar; 0 para não executar
<i>Cell Zooming</i> Clássico	0	—	1 para executar; 0 para não executar
<i>Cell Zooming</i> Virtual	0	—	1 para executar; 0 para não executar
Granularidade do gerenciamento	0	s	Intervalo entre cada execução do algoritmo
<b>Sleep Mode</b>			
Razão de aumento do raio da célula	1	—	Aumento do raio da célula que permanece ligada; a antena aponta para a borda da célula
Aumento na potência de transmissão	0	dB	Aumento na potência de transmissão das estações rádio base ligadas
<b>Grid</b>			
Colunas	6	—	Quantidade de células no eixo horizontal do plano
Linhas	5	—	Quantidade de células no eixo vertical do plano
Raio da célula	250	m	Raio médio da célula
Variação do raio da célula	5	%	Variação no tamanho do raio da célula
<b>Estação Rádio Base</b>			
	De acordo com a Fig. (4.4), considerando um consumo de 1250 W por ERB [3]		
Potência de transmissão	51,54	dBm	Potência inicial de transmissão
Potência de amplificação	58,92	dBm	Potência de amplificação do sinal
Potência do ar condicionado	53,22	dBm	Potência gasta com sistema de resfriamento
Potência de processamento por usuário	40,85	dBm	Potência gasta com o processamento de um único usuário
Altura	35	m	Altura média da estação rádio base
<b>Antena</b>			
Frequência de transmissão	1700	MHz	
Ângulo horizontal de meia-potência	70	°	
Relação frente-costa horizontal	20	dB	
Ângulo vertical de meia-potência	6,2	°	
Ganho do lobo secundário	-18	dB	
Ganho máximo	14	dB	
<b>Usuário Móvel</b>			
Sensitividade	-95	dBm	Potência mínima para perceber o sinal; valor determinado na referência [12]
Altura	1,7	m	Altura média do usuário
<b>Canal</b>			
Largura de banda	10	MHz	
Densidade espectral de potência de ruído	-180	dBm/Hz	
<i>BER</i> máxima	10 <sup>-6</sup>	—	Máxima taxa de erro de <i>bits</i> aceitável
Vazão máxima por usuário	5	Mbps	Máxima vazão permitida por usuário
Fator de sombreamento	8	dB	Desvio padrão do fator de sombreamento
Distância de decorrelação	50	m	Distância de decorrelação para o sombreamento
<b>Tráfego</b>			
Máximo número de usuários por segundo	10	1/s	
Horário de pico	17	h	Horário de pico no formato 24-horas
Duração típica da ligação	60	s	
<i>Log</i>	0	—	1 para salvar histórico da simulação
<b>OFDMA</b>			
	De acordo com a Tabela (2.2), considerando uma largura de banda de 10 MHz		
Subportadoras por bloco de recurso	12	—	
Símbolos por subportadora	7	—	
Símbolos de controle por bloco de recurso	4	—	
Blocos de recurso por <i>slot</i>	50	—	
<i>Slots</i> por quadro	20	—	
Quadros por segundo	100	1/s	
Quantidade de subportadoras ocupadas	601	—	

## 4.6 COLETA DE DADOS

A avaliação dos resultados gerados é feita pela análise dos dados coletados ao longo da simulação. No simulador, a classe STATS cria eventos de coleta de dados e os salva em arquivos de texto. Posteriormente, os arquivos são lidos e as informações são visualizadas em gráficos.

A granularidade temporal da coleta é um parâmetro fundamental e deve ser bem escolhido. Ela reflete o intervalo de tempo em que os dados são salvos no arquivo. Se o intervalo for demasiado elevado, os dados não retratarão a realidade, já que muitos usuários podem surgir e desaparecer nesse ínterim; se for muito pequeno, maior poder de processamento é exigido para a simulação, pois mais eventos serão criados e mais cálculos serão necessários.

Feita a decisão, o simulador executa os métodos para adquirir os dados. Quando a simulação é finalizada, os arquivos podem ser interpretados. Para ler os arquivos e projetar os dados em gráficos, utilizou-se o software MATLAB<sup>®</sup>. De tal modo, pode-se realizar uma análise crítica dos resultados e construir conclusões concretas sobre a eficiência dos algoritmos sugeridos para economia de potência no sistema celular.

A representação dos dados deve também ser feita de modo a melhorar visualização dos resultados. Como a granularidade da coleta é um intervalo de tempo pequeno, muitas flutuações acontecem nas curvas obtidas na simulação. Porém, como enfatizado anteriormente, a granularidade da coleta também não pode ser elevada, pois os dados sofreriam mudanças muito acentuadas entre um intervalo de coleta e outro. Para remediar esse problema, calcula-se a média dos valores obtidos a cada hora e associa-se esse resultado a um novo ponto do gráfico sobre o horário a que se refere. A título de exemplificação, adiantam-se, nesta seção, resultados referentes ao número de usuários por célula, retratado com dados originais e com essa manipulação sugerida de cálculo da média na Fig. (4.6). A partir disso, escolhe-se a segunda forma de representação dos resultados deste trabalho.

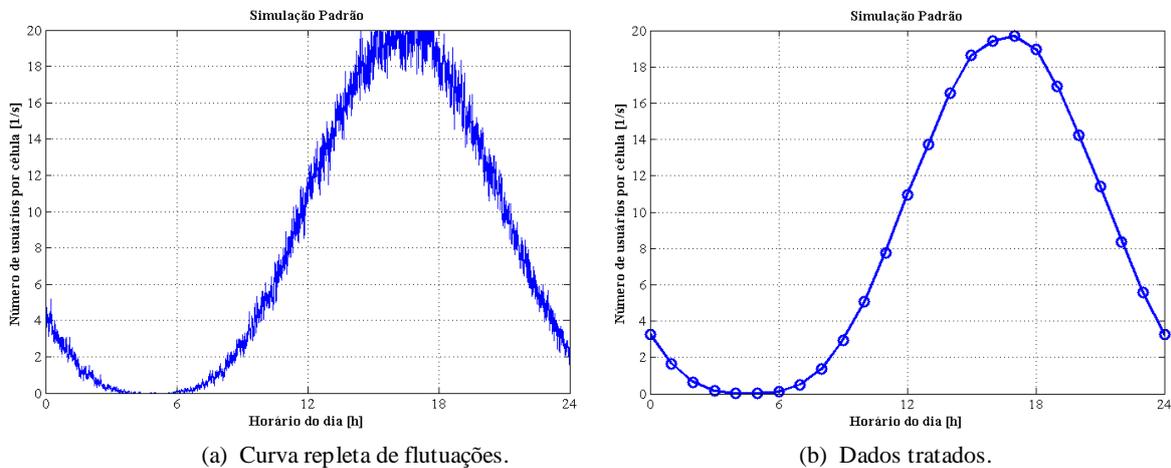


Figura 4.6. Formas de representação dos dados.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 SIMULAÇÃO PADRÃO

A simulação padrão é a referência para todas as outras em que são testados cenários executando *Sleep Mode* e *Cell Zooming*. Os dados padrões são usados para fins de comparação do desempenho do sistema e da economia de energia com dados obtidos das simulações posteriores. Para avaliar a qualidade do serviço oferecido aos usuários finais no ambiente simulado, executa-se o programa durante o período de um dia, em tempo de simulação e, ao final, pode-se analisar o comportamento do sistema, que não diverge das expectativas iniciais. O cenário da simulação padrão é caracterizado por uma grade de 30 células numa disposição 6 por 5 (Fig. 4.2). Cada célula possui um raio médio de 250 metros. Os demais parâmetros são configurados conforme especificado na Tabela (4.2).

Conforme visto anteriormente, a quantidade de usuários na grade deve ser uma curva à maneira da Fig. (3.1). Com o modelo proposto pela Eq. (4.10), obteve-se a forma de onda exibida na Fig. 4.6. Esse perfil de tráfego repete-se para todos os demais cenários de simulação.

O desempenho da rede é avaliado pela taxa de dados das chamadas (Fig. 5.1) e pela probabilidade de interrupção (Fig. 5.2). A vazão das conexões é inversamente proporcional à quantidade de usuários presentes na grade durante o dia. Quanto mais usuários surgem, mais os recursos devem ser repartidos, piorando a qualidade geral das chamadas. Entre os 10% piores casos, essa medida apresenta-se ainda muito mais degradada no horário de pico. Por sua vez, a interrupção varia irregularmente ao longo do dia.

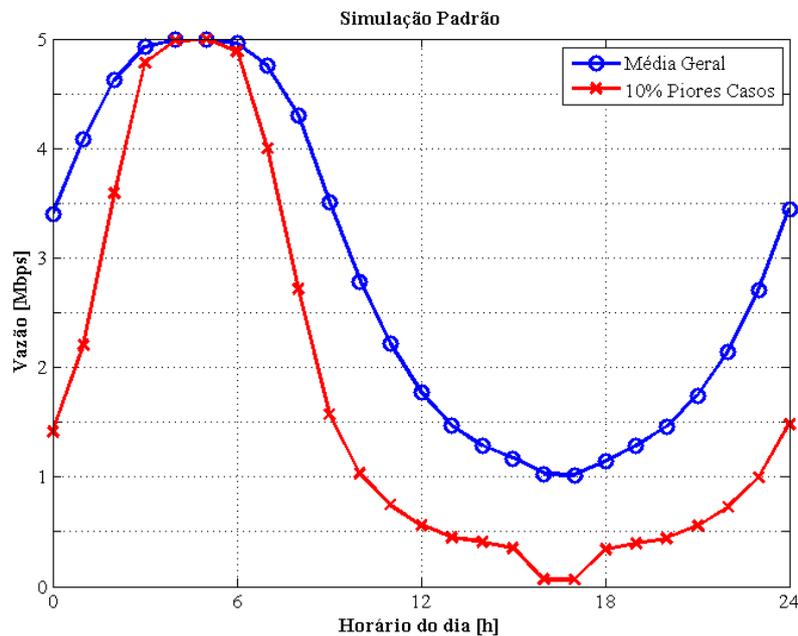


Figura 5.1. Vazão média e dos 10% piores casos na simulação padrão.

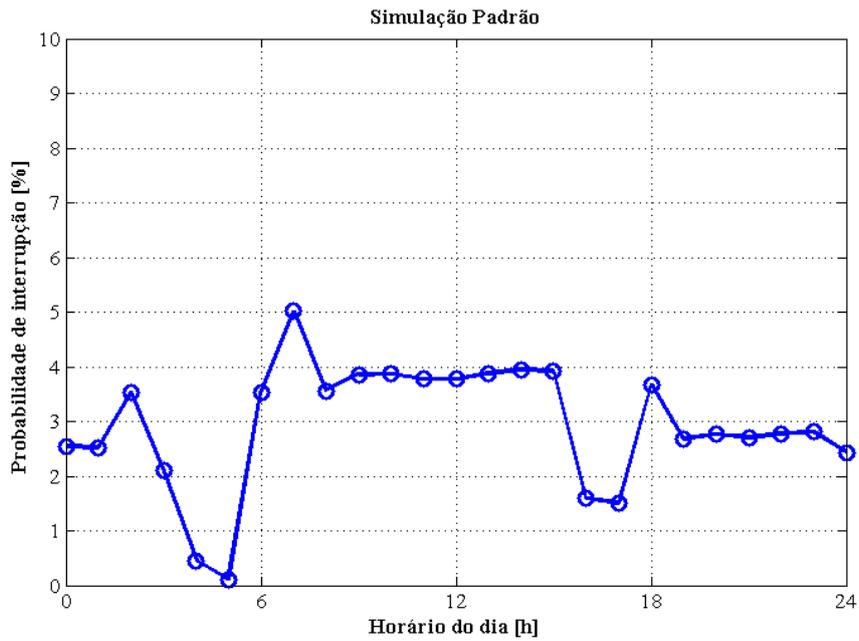


Figura 5.2. Probabilidade de interrupção na simulação padrão.

A potência consumida por estação base também varia de acordo com a quantidade de usuários, já que os gastos relativos ao processamento de sinal dependem diretamente de quantos estão conectadas a cada ERB (Fig. 5.3). Os valores ficam em torno de 1170 W.

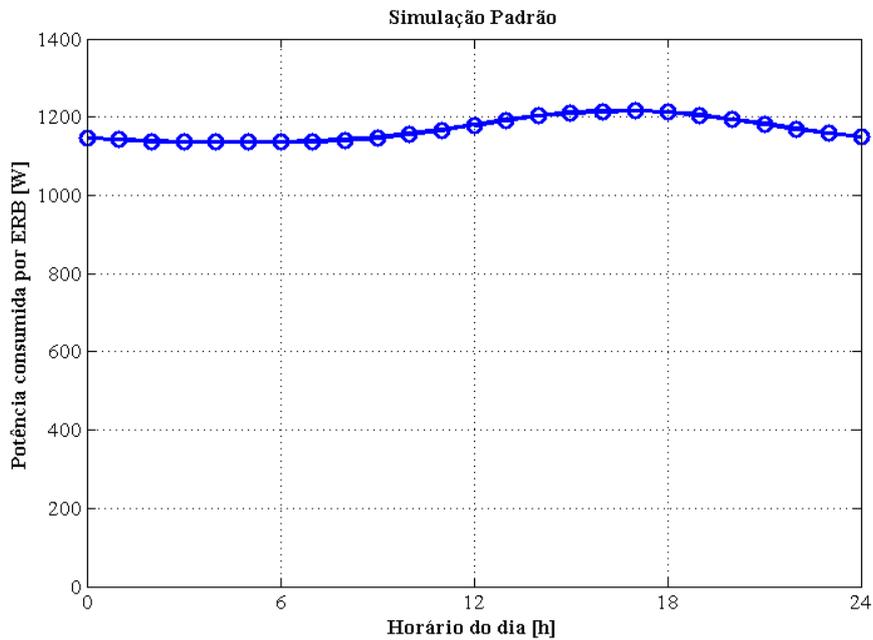


Figura 5.3. Potência consumida por estação base na simulação padrão.

## 5.2 SLEEP MODE

O *Sleep Mode*, apesar de reduzir tremendamente o consumo de energia geral, deve apenas ser ativado quando o sistema experimenta menor tráfego de usuários. Caso contrário, as poucas células que permanecem ligadas experimentam grandes demandas, degradando a vazão dos usuários.

A técnica é testada em um cenário em que somente 9 das 30 células da grade padrão permanecem ligadas (Fig. 3.2). Todas as outras ERBs são desligadas, isto é, seus sistemas de resfriamento, de amplificação e de processamento de sinal e a antena de transmissão passam a não consumir energia. Para minimizar o aumento da probabilidade de interrupção devido ao desligamento de várias células, a potência de transmissão das ERBs ativas é elevada em 3 dB (+3 dB), e o raio das células é dobrado (2×), o que interfere diretamente no ângulo de inclinação das antenas. Diversas simulações são realizadas para comparar a eficácia do algoritmo sem expandir o tamanho da célula (+0dB / 1×), seja pelo aumento da potência de transmissão ou pela alteração da inclinação das antenas. Ademais, o servidor distribuído verifica a situação da rede a cada vinte minutos e toma decisões sobre o gerenciamento de potência.

O *Sleep Mode* é ativado quando o número de usuários por célula é menor do que 75% da estimativa máxima. Pela Equação (4.12b), o servidor passa então a atuar quando  $ups(t) < 2,25$ . À medida que o tráfego se intensifica, as ERBs são religadas e o sistema volta a funcionar normalmente. Observe que os dados foram colhidos entre 0 e 9 horas da manhã, pois além destes horários o sistema opera normalmente, como na situação padrão.

Uma vez que durante a madrugada somente 30% das ERBs está ativo, o consumo energético do sistema é consideravelmente menor nesse período. A Figura (5.4) mostra como a potência média por estação base se comporta. As reduções chegam a 70% durante o *Sleep Mode*, enfatizando como é vantajoso fazer uso dessa técnica. Deve-se, entretanto, investigar o que foi comprometido graças à economia de energia.

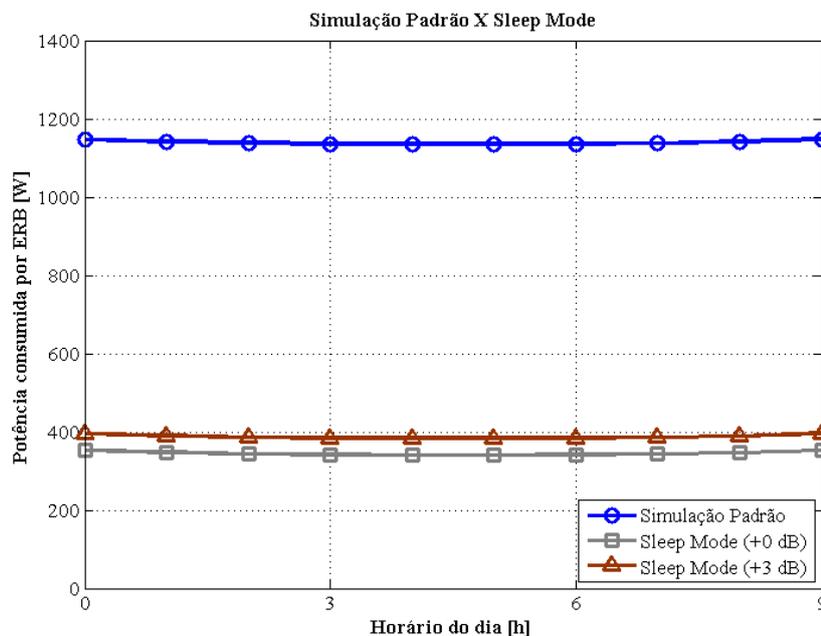


Figura 5.4. Potência consumida por estação base na simulação padrão e no *Sleep Mode*.

A vazão dos usuários também foi reduzida durante o período de *Sleep Mode* (Fig. 5.5) em relação à simulação padrão. Mesmo assim, esse parâmetro manteve-se em valores razoáveis. Vê-se

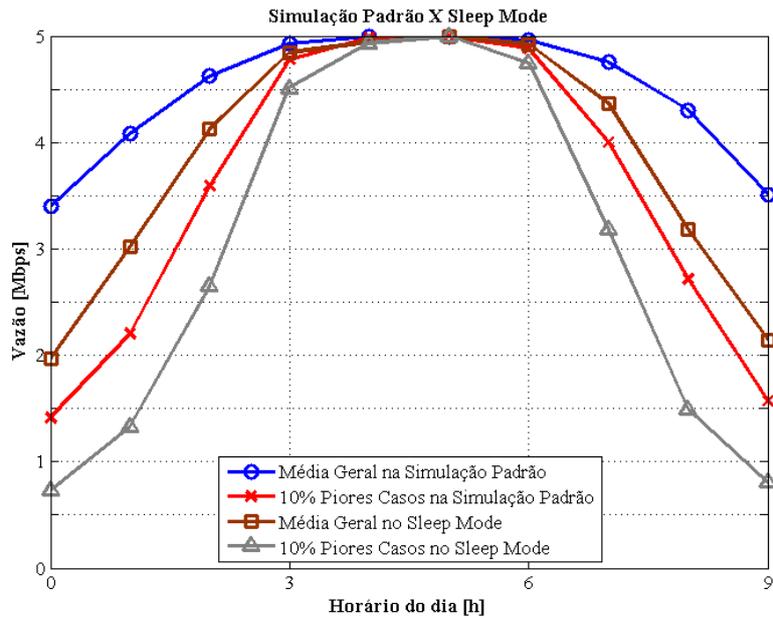


Figura 5.5. Vazão média e dos 10% piores casos na simulação padrão e no *Sleep Mode*.

que a assimetria temporal da rede foi bem explorada para diminuir os gastos de energia, dado que apesar da velocidade das chamadas ter diminuído durante baixo tráfego, ele nunca é inferior aos níveis alcançados no horário de pico. Em qualquer cenário de teste do *Sleep Mode*, a curva da vazão de dados permanece inalterada.

Para concluir a avaliação de desempenho do sistema que faz uso dessa técnica, observa-se a probabilidade de interrupção. O comportamento desse parâmetro (Fig. 5.6) superou as expectativas ao ser praticamente eliminada a interrupção apenas com alteração no ângulo de inclinação das antenas. É possível, portanto, cobrir as áreas deixadas pelas ERBs desligadas sem aumentar a potência de transmissão das outras, maximizando ainda mais a economia de energia do sistema.

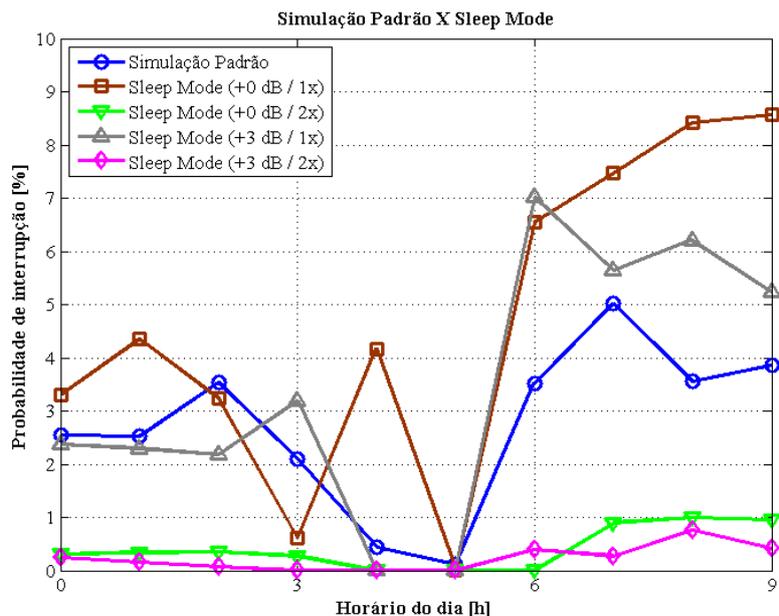


Figura 5.6. Probabilidade de interrupção na simulação padrão e no *Sleep Mode*. A observação das curvas permite concluir a necessidade de se aumentar a potência de transmissão ou alterar o ângulo de apontamento da antena para reduzir a probabilidade de interrupção. Acrescenta-se que as bruscas variações existentes nos dados são devidas ao fato de que, em alguns momentos, muito poucos usuários estão na grade, o que pode elevar a média do parâmetro aqui avaliado.

### 5.3 CELL ZOOMING CLÁSSICO

Quando executado a fim de reduzir o consumo de potência, o *Cell Zooming* demonstra-se muito eficiente na redução da potência de transmissão das estações base. Entretanto, como a transmissão corresponde somente a 10% da energia total gasta no sistema, a economia geral de potência (Fig. 5.7) não é tão significativa. Por outro lado, o desempenho do sistema não é prejudicado pelo uso da técnica. A vazão média dos usuários e dos 10% piores casos permanece inalterada em relação à simulação padrão (Fig. 5.8). Também, por causa da redução na potência de transmissão de algumas células, as chances de algum usuário não conseguir estabelecer conexão são pouco maiores durante grande parte do dia e isso é observado na Fig. (5.9). Nessa situação, escolhe uma granularidade de 10 minutos entre cada execução do algoritmo.

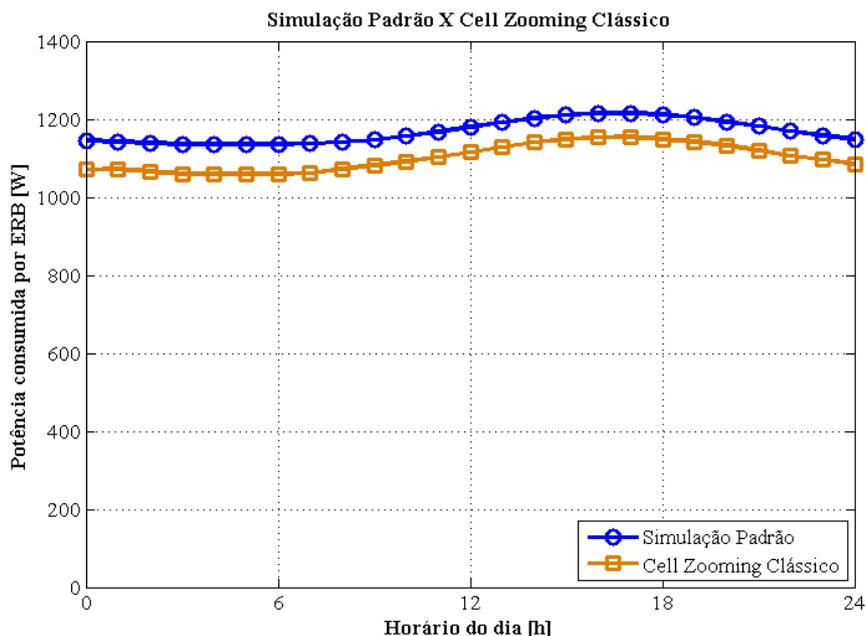


Figura 5.7. Potência consumida por estação base na simulação padrão e no *Cell Zooming* clássico.

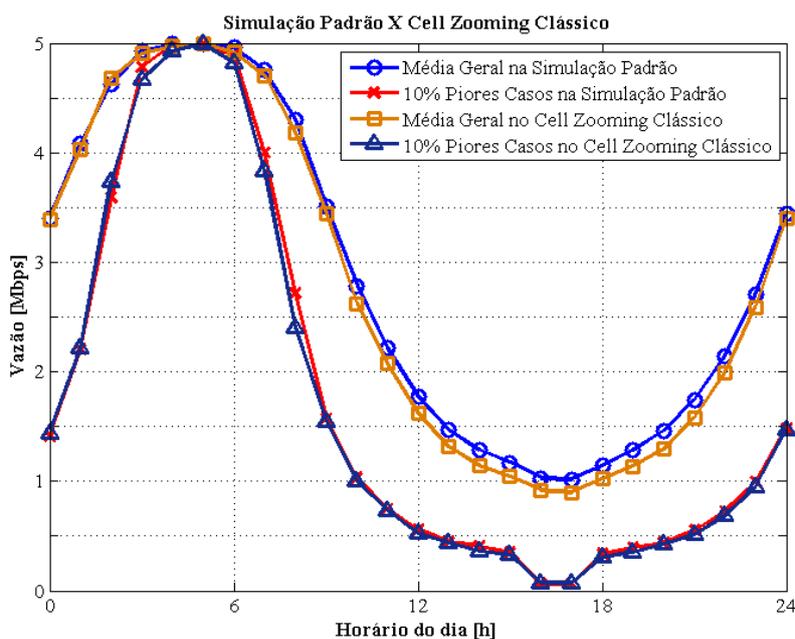


Figura 5.8. Vazão média e dos 10% piores casos na simulação padrão e no *Cell Zooming* clássico.

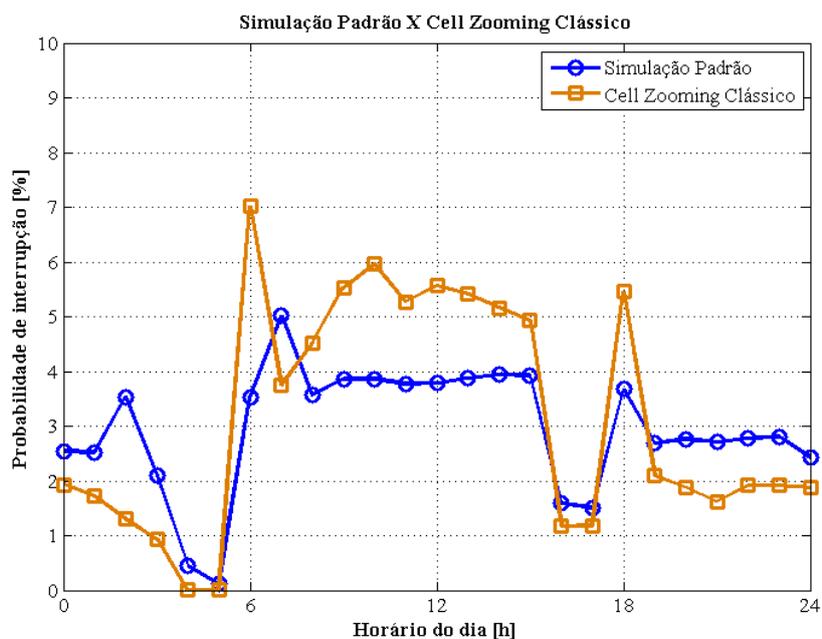


Figura 5.9. Probabilidade de interrupção na simulação padrão e no *Cell Zooming* clássico.

## 5.4 CELL ZOOMING VIRTUAL

O algoritmo proposto de *Cell Zooming* reparte os recursos do sistema de forma mais justa entre os usuários. Esperava-se que a velocidade de conexão dos 10% piores casos melhorasse drasticamente e, de fato, isso acontece. Os demais parâmetros (Figs. 5.10 e 5.11) mantêm-se nos mesmos patamares da simulação padrão. Aqui, o servidor distribuído deve atuar com frequência muito maior, por isso a granularidade do gerenciamento é estabelecida em 10 segundos.

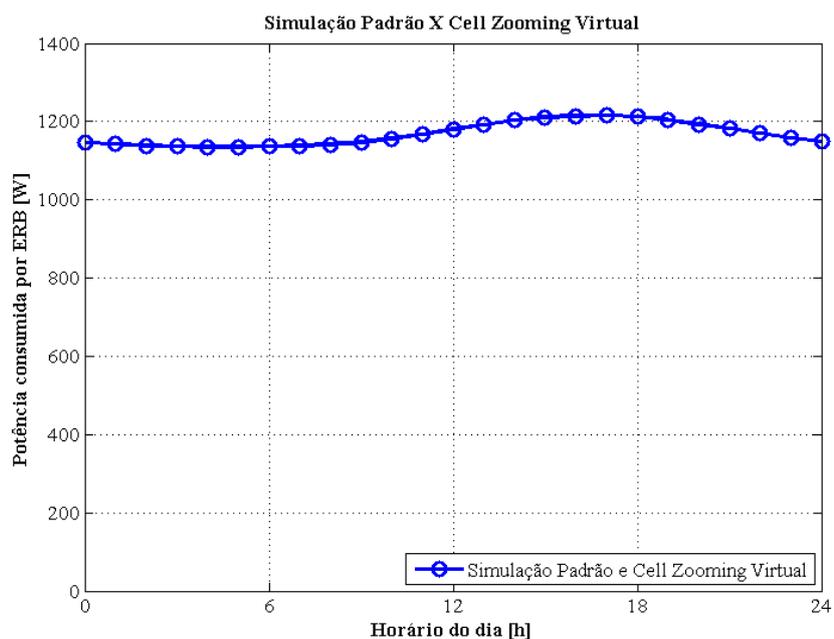


Figura 5.10. Potência consumida por estação base na simulação padrão e no *Cell Zooming* virtual.

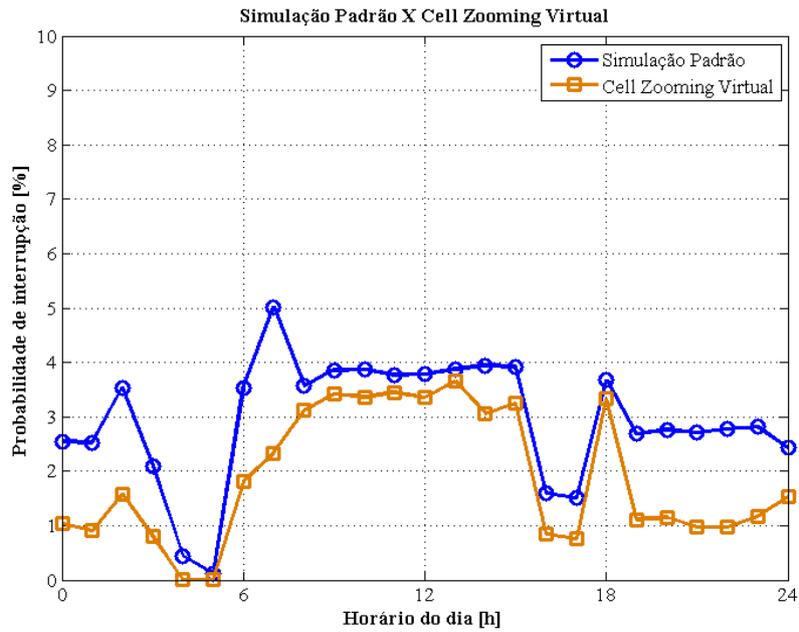


Figura 5.11. Probabilidade de interrupção na simulação padrão e no *Cell Zooming* virtual.

A curva da Fig. (5.12) extraída da simulação retrata claramente como a vazão dos 10% piores casos melhora ao se aproximar da média geral da simulação padrão. Este é o indicativo de que os recursos estão mais bem divididos entre os usuários, pois eles mesmos são mais bem distribuídos pelas células da grade. Se em determinado momento, uma célula tem baixo tráfego enquanto sua vizinha pode estar saturada, os recursos da primeira estão sendo desperdiçados. Esse desperdício é minimizado pelo *Cell Zooming* virtual.

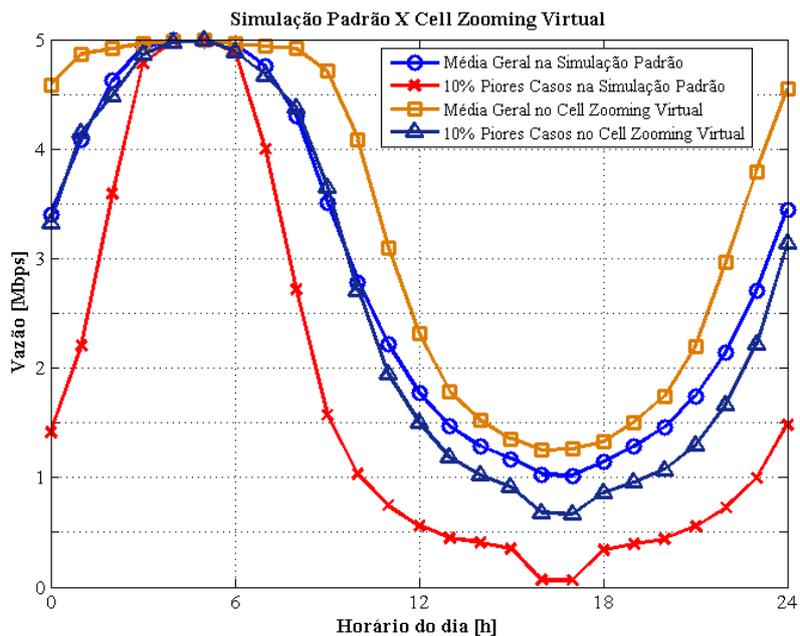


Figura 5.12. Vazão média e dos 10% piores casos na simulação padrão e no *Cell Zooming* virtual.

Ocorre uma melhoria muito mais expressiva nas velocidades de conexão durante o horário de pico. Uma análise comparativa da vazão dos 10% piores casos entre a simulação padrão e a simulação do *Cell Zooming* virtual mostra que, no caso normal, o valor médio dessa variável é de 63 kbps; no outro, quando a qualidade do serviço oferecido torna-se uma preocupação, esse valor salta para 664 kbps. Com efeito, este algoritmo é capaz de melhorar a qualidade mínima do serviço prestado ao usuário final.

## 5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar os dados obtidos pelas simulações de *Sleep Mode*, observa-se que esta técnica é extremamente eficaz na otimização da eficiência energética da rede. Há, no entanto, uma troca entre a economia de potência e a qualidade do serviço oferecido. Embora tenha sido afetada pela execução do *Sleep Mode*, ainda assim a vazão manteve-se em níveis aceitáveis e nunca é menor do que as velocidades alcançadas no horário de pico. Já a interrupção pode ser completamente eliminada ao simplesmente alterar o ângulo de inclinação das antenas para apontar para as bordas da célula com raio duplicado. Os “buracos” podem, portanto, ser suprimidos sem a necessidade de aumentar a potência de transmissão das ERBs que permanecem ligadas durante a operação da técnica. No entanto, no sistema real, promover alterações no apontamento das antenas é algo muito mais dispendioso e passível de problemas do que apenas elevar o nível de potência transmitida, já que nesse caso são necessários pequenos motores e peças mecânicas para realizar as mudanças.

O *Cell Zooming*, por sua vez, deve ser cuidadosamente construído. É possível diminuir os gastos energéticos, sem afetar a qualidade de serviço, negativa ou positivamente. Apesar disso, o consumo de potência não é significativo como no *Sleep Mode*. Então, essa técnica pode ser utilizada com o propósito somente de melhorar os parâmetros de desempenho do sistema, demonstrando-se realmente eficaz em distribuir os recursos da rede de maneira mais igualitária. A Tabela (5.1) reúne comparativamente os resultados colhidos nas diversas simulações.

Tabela 5.1. Resultados comparativos dos diversos cenários de simulação.

Parâmetros	Simulação Padrão	<i>Sleep Mode</i>				<i>Cell Zooming</i>	
		+0 dB / 1×	+0dB / 2×	+3 dB / 1×	+3dB / 2×	Clássico	Virtual
Potência média consumida por estação base (0-24h)	1170 W	—		—		1101 W	1170 W
Potência média consumida por estação base (0-9h)	1140 W	345 W		388 W		1066 W	1140 W
Economia percentual de energia (0-24h)	—	—		—	—	5,90%	0%
Economia percentual de energia (0-9h)	—	69,7%		66,0%		6,49%	0%
Vazão média geral (0-24h)	2,85 Mbps			—		2,76 Mbps	3,34 Mbps
Vazão média geral (0-9h)	4,45 Mbps			3,85 Mbps		4,42 Mbps	4,88 Mbps
Vazão média dos 10% piores casos (0-24h)	1,75 Mbps			—		1,70 Mbps	2,65 Mbps
Vazão média dos 10% piores casos (0-9h)	3,52 Mbps			2,93 Mbps		3,45 Mbps	4,44 Mbps
Probabilidade de interrupção média (0-24h)	2,93%	—	—	—	—	3,12%	1,88%
Probabilidade de interrupção média (0-9h)	2,72%	4,67%	0,41%	3,41%	0,23%	2,67%	1,50%

## 6 CONCLUSÕES

Visando cumprir os objetivos citados na introdução, o simulador desenvolvido demonstra-se uma ferramenta bastante útil para avaliação do funcionamento do sistema celular e pode ser utilizado como base para testar quaisquer algoritmos de gerenciamento de potência.

Ao comparar a simulação padrão da rede com a operação em *Sleep Mode*, são observados percentuais significativos de economia de potência geral na grade. As perdas em termos de velocidade de conexão, apesar de existirem, não comprometem o desempenho nem a qualidade do serviço prestado aos usuários finais. Durante o período de execução da técnica, a vazão média ainda é maior do que no horário de pico do sistema padrão. A probabilidade de interrupção, ao contrário, é sim um fator que pode afetar a qualidade do serviço oferecido, mas pode também ser minimizada pelo aumento do raio das células. É importante ressaltar que a interrupção pode ser quase que completamente eliminada se o ângulo de inclinação das antenas for modificado. Porém, essa é uma solução mais delicada e difícil de se realizar.

O estudo realizado acerca do *Cell Zooming* mostra que essa é uma técnica muito mais eficiente na divisão de recursos do que na economia de energia. Algumas pesquisas concluem que com ela é possível alcançar 40% a menos de consumo de potência [3]. Todavia, esses mesmos estudos tratam o *Sleep Mode* como uma espécie de *Cell Zooming*; e, neste trabalho, os dois algoritmos foram construídos independentemente, o que justifica os resultados colhidos.

O conceito de *Cell Zooming* virtual cria uma nova visão sobre essa ferramenta de gerenciamento de potência em estações base. Os resultados obtidos são demasiado esclarecedores e correspondem às expectativas ao demonstrar que essa é uma proposta simples, porém extremamente eficaz.

Ainda, o advento do 3GPP-LTE direciona as redes celulares para a utilização de células cada vez menores e, portanto, para a implantação de mais estações base. Cria-se, a partir disso, um cenário ideal para o uso de ambas as técnicas a fim de promover menor consumo de energia em sistemas celulares, concretizando, enfim, o conceito de redes sustentáveis.

Como propostas de trabalhos futuros, são sugeridas duas mudanças no simulador. Primeiramente, pode-se trabalhar na otimização do código a fim de se reduzir o poder de processamento necessário para executar o programa e, conseqüentemente, diminuir o tempo de simulação.

Em segundo lugar, o modelo de mobilidade também pode ser melhorado. Neste trabalho, a posição de cada usuário é alterada a cada segundo, e, para isso, são criados eventos, que devem ser executados pelo registrador. Quanto mais eventos a serem executados, maior o tempo de simulação. No entanto, é possível reduzir a quantidade de eventos relativos à mobilidade fazendo uma observação simples: se um usuário se move no espaço cartesiano com uma velocidade suficientemente pequena a ser definida, não há necessidade de que sua posição seja atualizada com tanta frequência, já que muito provavelmente suas condições de potência recebida e estação base a qual está conectado não serão alteradas nesse pequeno intervalo de tempo. O intervalo de atualização, portanto, deve ser adaptado para cada faixa de velocidade das estações móveis.

Finalmente, outras propostas para eficiência de energia em redes celulares devem ser estudadas. As conclusões obtidas de vários estudos permitem avaliar ferramentas melhores e mais adequadas para os vários cenários de um sistema de comunicações móveis. Uma vez concluída a fase de pesquisa, parte-se para a implementação das técnicas, consolidando a ideia de Redes Celulares Sustentáveis e a preocupação em se reduzir os impactos provocados ao meio ambiente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, *LTE – The UMTS Long Term Evolution*, 1st ed., Wiley, 2009.
- [2] E. Oh, B. Krishnamachari, X. Liu, and Z. Niu, “Toward Dynamic Energy-Efficient Operation of Cellular Network Infrastructure”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 56-61, Jun. 2011.
- [3] Z. Hasan, H. Boostanimehr, and V. K. Bhargava, “Green Cellular Networks: A Survey, Some Research Issues and Challenges”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 13, no. 4, pp. 524-540, 2011.
- [4] Z. Niu, Y. Wu, J. Gong, and Z. Yang, “Cell Zooming for Cost-Efficient Green Cellular Networks”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 74-79, Nov. 2010.
- [5] T. S. Rappaport, *Wireless Communication: Principles and Practice*, 2nd ed., Prentice Hall, 2001.
- [6] J. Zhuang, L. Jalloul, R. Novak, and J. Park, “Evaluation Methodology for P802.16m – Advanced Air Interface”, *IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group*, pp. 44-45, Jan. 2009.
- [7] S. Hara, M. Mouri, M. Okada, and N. Morinaga, “Transmission Performance Analysis of Multi-Carrier Modulation in Frequency Selective Fast Rayleigh Fading Channel”, *Wireless Personal Communications*, vol. 2, no. 4, pp. 335-356, Dec. 1996.
- [8] *Rohde & Schwarz Products UMTS Long Term Evolution (LTE) Technology Introduction*, pp. 4-8, Rohde & Schwarz GmbH & Co., München.
- [9] H. G. Myung, *Technical Overview of 3GPP Long Term Evolution (LTE)*, Feb. 2007. Disponível em: <http://cewit.org.in/docs/downloads/lte/LTEOver.pdf>. Acesso em: 01 de Março de 2013.
- [10] S. Meyers, *Effective C++: 55 Specific Ways to Improve Your Programs and Designs*, 3rd ed., Addison-Wesley, 2005.
- [11] F. Gunnarsson, M. N. Johansson, A. Furuskär, M. Lundevall, A. Simonsson, C. Tidestav, and M. Blomgren, “Downtilted Base Station Antennas – A Simulation Model Proposal and Impact on HSPA and LTE Performance”, 2008.
- [12] M. L. Belhouciet, and M. H. Ebdelli, “LTE Technology Performance Evaluation”, *ITU/BDT Arab Regional Workshop on 4G Wireless Systems – Tunisia 2010*, pp. 11-12, Jan. 2010. Disponível em: [http://www.itu.int/ITU-D/arb/COE/2010/4G/Documents/Doc6-LTE%20Workshop\\_TUN\\_Session5\\_Performance%20Evaluation.pdf](http://www.itu.int/ITU-D/arb/COE/2010/4G/Documents/Doc6-LTE%20Workshop_TUN_Session5_Performance%20Evaluation.pdf). Acesso em: 01 de Março de 2013.