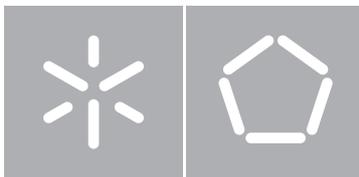


**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

José Filipe da Silva Ferreira  
LTE - Advanced: Gestão Eficiente da  
Energia

Outubro de 2014



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia  
Departamento de Informática

José Filipe da Silva Ferreira

LTE - Advanced: Gestão Eficiente da  
Energia

Dissertação de Mestrado  
Mestrado em Engenharia Informática

Trabalho realizado sob orientação de  
Professor Nuno Vasco Lopes  
Professor Luís Paulo Reis

Outubro de 2014

## *Resumo*

As redes celulares e móveis têm melhorado o seu desempenho em larga escala. Este facto motivou um incremento do número de utilizadores a usufruir destas redes nos seus dispositivos. Devido a este aumento, as operadoras tiveram que melhorar as suas infra-estruturas. No entanto, esta melhoria acarreta despesas avultadas. Desta forma, é preciso desenhar e implementar algoritmos que permitam às operadoras baixar os seus custos operacionais.

Esta dissertação tem como objetivo criar um algoritmo energeticamente eficiente. Este deverá ser capaz de reduzir a energia consumida pela rede operadora, através da concentração dos utilizadores no menor número possível de estações base.

Em primeiro lugar, será apresentada a perspectiva atual do consumo de energia das redes. De seguida, é apresentada a tecnologia que será utilizada a fim de reduzir a energia consumida e as emissões de carbono: *cell zooming*. Posteriormente, são apresentados e comparados alguns dos algoritmos de *cell zooming* estudados. Por fim, é apresentada a solução, a simulação da mesma e são analisados os resultados obtidos.

Os resultados obtidos demonstram que dependendo do perfil de tráfego considerado, os ganhos em termos de eficiência energética podem variar entre os 7% e 38%.

**Palavras-chave:** LTE, LTE-Advanced, Redes Móveis, Optimização Energética, Gestão Eficiente Energia, Energia, *Cell Zooming*.

# Acrónimos

<b>LTE</b>	<b>L</b> ong <b>T</b> erm <b>E</b> volution
<b>AP</b>	<b>A</b> ccess <b>P</b> oint (Ponto de Acesso)
<b>CS</b>	<b>C</b> ell <b>Z</b> ooming <b>S</b> erver
<b>Ack</b>	<b>A</b> cknowledgment
<b>BS</b>	<b>B</b> ase <b>S</b> tation (Estação Base)
<b>MU</b>	<b>M</b> obile <b>U</b> nit (Dispositivo Móvel)
<b>QoS</b>	<b>Q</b> uality <b>O</b> f <b>S</b> ervice (Qualidade do serviço)
<b>QoE</b>	<b>Q</b> uality <b>O</b> f <b>E</b> xperience (Qualidade da experiência)
<b>TI</b>	<b>T</b> ecnologias da <b>I</b> nformação
<b>NS-3</b>	<b>N</b> etwork <b>S</b> imulator 3

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação	3
1.3	Objetivos	4
1.4	Estrutura do documento	4
<b>2</b>	<b>Estado da arte</b>	<b>5</b>
2.1	A Actualidade do Consumo Energético das Redes	5
2.2	Conceitos Fundamentais de Redes Baixo-Consumo	7
2.2.1	Introdução	7
2.2.2	Consumo Energético na Rede	8
2.2.3	Taxonomia	9
2.2.4	Técnica utilizada para redes de baixo-consumo: <i>Cell Zooming</i>	10
2.3	Casos de Uso	16
2.3.1	Introdução	16
2.3.2	Algoritmo Centralizado e Distribuído	16
2.3.3	<i>Continuous Cell Zooming, Discrete Cell Zooming e Fuzzy Cell Zooming</i>	25
2.3.4	Algoritmo 'Ganancioso'	32
2.3.5	Comparação das diferentes Tecnologias	37

2.4	Conclusão . . . . .	40
<b>3</b>	<b>Solução Proposta</b>	<b>41</b>
3.1	Introdução . . . . .	41
3.2	Configuração das células . . . . .	43
3.3	Perfis de Tráfego e Utilizadores . . . . .	47
3.4	Modelo de Consumo de Energia . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Experiências e Resultados</b>	<b>55</b>
4.1	Introdução . . . . .	55
4.2	Simulação . . . . .	55
4.3	Resultados Obtidos . . . . .	56
4.3.1	Modo Tempo-Real . . . . .	56
4.3.2	Modo Intervalos-Temporais . . . . .	63
4.3.3	Análise e Comparação dos Resultados . . . . .	74
4.4	Conclusão . . . . .	77
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>78</b>

# Lista de Tabelas

2.1	Análise do perfil do tráfego: percentagem de tempo que o tráfego é inferior a $x\%$ do pico durante os dias da semana e o fim de semana, $x = 5, 10, 20$ . Source: [19]. . . . .	34
2.2	Comparação dos diferentes algoritmos. . . . .	38
2.3	Vantagens e desvantagens dos diferentes algoritmos. . . . .	39
4.1	Parâmetros da Simulação. . . . .	56
4.2	Tempo em segundos dos diferentes perfis nos diferentes modos e eficiência energética em $\%$ . . . . .	60
4.3	Tempo em segundos dos diferentes perfis nos diferentes modos e eficiência energética em $\%$ . . . . .	63
4.4	Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e <i>threshold</i> em $\%$ para o Tráfego 1. . . . .	63
4.5	Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e <i>threshold</i> em $\%$ para o Tráfego 2 . . . . .	64
4.6	Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e <i>threshold</i> em $\%$ para o Tráfego 3. . . . .	65
4.7	Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e <i>threshold</i> em $\%$ para o Tráfego 4. . . . .	66

4.8	Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e <i>threshold</i> em % para o Tráfego 5.	67
4.9	Tempo em segundos dos diferentes perfis nos diferentes modos e eficiência energética e <i>threshold</i> em % para os quais não é bloqueado qualquer utilizador. . . . .	68
4.10	Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e <i>threshold</i> em % para o Tráfego 1.	69
4.11	Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e <i>threshold</i> em % para o Tráfego 2.	69
4.12	Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e <i>threshold</i> em % para o Tráfego 3.	70
4.13	Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e <i>threshold</i> em % para o Tráfego 4.	71
4.14	Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e <i>threshold</i> em % para o Tráfego 5.	72
4.15	Tempo em segundos dos diferentes perfis nos diferentes modos e eficiência energética e <i>threshold</i> em % para os quais não é bloqueado qualquer utilizador. . . . .	73
4.16	Comparação da eficiência energética nos diferentes perfis no Modo Tempo-Real e Intervalos-Temporais para o tipo de capacidade 60/75.	74
4.17	Comparação da eficiência energética nos diferentes perfis no Modo Tempo-Real e Intervalos-Temporais para o tipo de capacidade 50/75.	75
4.18	Comparação da eficiência energética nos diferentes perfis no Modo Intervalos-Temporais entre o tipo de capacidade 50/75 e 60/75. . .	76

# Lista de Figuras

1.1	Estimativa das emissões de $CO_2$ das TIs (incluindo computadores, redes e dispositivos das companhias telefônicas, impressoras e <i>data centers</i> ). Fonte: Smart 2020[1] . . . . .	3
2.1	Estimativa dos gastos de energia dos telcos Europeus numa infraestrutura em 'Business-As-Usual' (BAU) e num modo Eco, e respectiva poupança de energia acumulada entre os 2 cenários. Source: Relatório da Comissão Europeia DG INFSO em [8]. . . . .	6
2.2	Emissões de carbono de acordo com o GeSI. Source: [1]. . . . .	7
2.3	Estimativa das fontes do consumo de energia nos routers IP de gama alta. Source: [11]. . . . .	8
2.4	Divisão do consumo de energia de uma operadora. Source: [13]. . . . .	9
2.5	Taxonomia das abordagens para obter eficiência energética na Internet do Futuro. Source: [13]. . . . .	10
2.6	Operações de <i>cell zooming</i> numa rede celular: a) células com o tamanho original; b) Célula central 'diminui' quando o volume de tráfego aumenta; c) Célula central 'aumenta' quando o volume de tráfego diminui; d) Célula central 'adormece' e as vizinhas 'aumentam'; e) Célula central 'adormece' e as vizinhas transmitem cooperativamente. Source: [14]. . . . .	11

2.7	<i>Framework</i> do <i>cell zooming</i> . Source: [14]. . . . .	12
2.8	Técnicas para implementar <i>cell zooming</i> : a) 'aumento' ou 'diminuição' das células com ajustamento dos parâmetros físicos das mesmas; b) 'aumento' ou 'diminuição' das células através de cooperação entre estações base e retransmissão. Source: [14]. . . . .	14
2.9	Processo dos algoritmos de <i>cell zooming</i> . Source: [14]. . . . .	17
2.10	<i>Trade-off</i> da energia consumida pelo algoritmo centralizado e distribuído. Source: [14]. . . . .	21
2.11	Algoritmo Centralizado. Source: [16]. . . . .	22
2.12	Desempenho do algoritmo. Source: [16]. . . . .	25
2.13	Método de <i>Discrete Cell Zooming</i> . Source: [18]. . . . .	27
2.14	Modelo <i>Fuzzy Discrete</i> . Source: [18]. . . . .	28
2.15	Rácio entre a energia consumida no modo dinâmico sobre o estático para diferentes valores no número de zonas discretas Z. Source: [18].	29
2.16	Rácio entre a energia consumida no modo dinâmico sobre o estático vs <i>média entre intervalos de chegada de pacotes</i> . Source: [18]. . . .	30
2.17	Rácio entre a energia consumida no modo dinâmico sobre o estático para os algoritmos <i>continuous</i> , <i>discrete</i> e <i>fuzzy</i> . Source: [18]. . . . .	31
2.18	Média do SINR recebido com e sem <i>cell zooming</i> em função do número de utilizadores. Source: [18]. . . . .	31
2.19	Perfil normalizado do tráfego de voz dum semana. Source: [19]. . .	32
2.20	Informação da localização das estações base de uma parte da cidade de Manchester, Reino Unido. Source: [19]. . . . .	33
2.21	Redundância na cobertura das redes celulares numa parte da cidade de Manchester, Reino Unido. Source: [19]. . . . .	35
2.22	Energia economizada durante os tempos de <i>off-peak</i> vs o raio de alcance das BSs na área de Manchester. Source: [19]. . . . .	36

3.1	Configuração em hexágono e <i>crossroad</i> . Source: [21]. . . . .	41
3.2	Configuração em hexágono tri-sectorial: 3 células desligadas em 4 ou 8 em 9. Source: [21]. . . . .	42
3.3	Configurações de Manhatttan: linear (cima) e quadrada (baixo). Source: [21]. . . . .	42
3.4	Configuração <i>crossroad</i> : 5 células ativas. Modo 1. . . . .	44
3.5	Configuração <i>crossroad</i> : 4 células ativas. Aumento do raio de 1, 2 ou 4 células. No algoritmo apenas é utilizado o caso mais à direita, em que se aumenta o raio na mesma proporção às 4 células. Modo 2.	45
3.6	Configuração <i>crossroad</i> : 1 célula ativa. Modo 3. . . . .	45
3.7	TeliaSonera, traffic mix durante o dia. Source: [22]. . . . .	47
3.8	Variação do tráfego durante o dia. Source: [23]. . . . .	48
3.9	Volume total de dados nas imediações da Catedral São Paulo em Londres. Source: [24]. . . . .	48
3.10	Perfis de tráfego diários (Segunda). Source: [25] . . . . .	49
3.11	Comparação entre os diferentes perfis de tráfego. . . . .	49
3.12	Comparação entre os valores reais e os valores utilizados na simula- ção do Tráfego 1. . . . .	50
3.13	Comparação entre os valores reais e os valores utilizados na simula- ção do Tráfego 2. . . . .	51
3.14	Comparação entre os valores reais e os valores utilizados na simula- ção do Tráfego 3. . . . .	51
3.15	Comparação entre os valores reais e os valores utilizados na simula- ção do Tráfego 4. . . . .	52
3.16	Comparação entre os valores reais e os valores utilizados na simula- ção do Tráfego 5. . . . .	52
4.1	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 1. . . . .	57

4.2	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 2. . . . .	57
4.3	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 3. . . . .	58
4.4	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 4. . . . .	59
4.5	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 5. . . . .	59
4.6	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 1. . . . .	60
4.7	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 2. . . . .	61
4.8	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 3. . . . .	61
4.9	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 4. . . . .	62
4.10	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 5. . . . .	62
4.11	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 1 com o <i>th-reshold</i> de 5%. . . . .	64
4.12	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 2 com o <i>th-reshold</i> de 5%. . . . .	65
4.13	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 3 com o <i>th-reshold</i> de 15%. . . . .	66
4.14	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 4 com o <i>th-reshold</i> de 15%. . . . .	67
4.15	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 5 com o <i>th-reshold</i> de 45%. . . . .	68
4.16	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 1 com o <i>th-reshold</i> de 5%. . . . .	69
4.17	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 2 com o <i>th-reshold</i> de 5%. . . . .	70
4.18	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 3 com o <i>th-reshold</i> de 30%. . . . .	71
4.19	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 4 com o <i>th-reshold</i> de 30%. . . . .	72

4.20	Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 5 com o <i>threshold</i> de 35%. . . . .	73
4.21	Comparação da eficiência energético nos diferentes perfis no Modo Tempo-Real e Intervalos-Temporais para o tipo de capacidade 60/75. . . . .	74
4.22	Comparação da eficiência energético nos diferentes perfis no Modo Tempo-Real e Intervalos-Temporais para o tipo de capacidade 50/75. . . . .	75
4.23	Comparação da eficiência energético nos diferentes perfis no Modo Intervalos-Temporais entre o tipo de capacidade 50/75 e 60/75. . . . .	76

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização

Antigamente, o acesso à Internet era feita apenas através de dispositivos que estavam ligados por cabo. Durante muitos anos, os utilizadores utilizaram esta tecnologia sem terem qualquer tipo de queixas. Com o aparecimento das redes móveis, apesar de, inicialmente, só ser possível comunicar através de mensagens ou voz, o conceito de mobilidade seduziu bastante os investigadores, pois tinha um grande potencial. Desta forma, nos últimos anos, é possível ver um grande desenvolvimento nas tecnologias sem fios com o aparecimento do 802.11 e o desenvolvimento das redes móveis 2G, 3G, 4G e 5G. Com o desenvolvimento dos smartphones e tablets, a capacidade computacional e mobilidade oferecidas aos utilizadores tornou-os mais exigentes, pois querem ter acesso à rede a qualquer momento e em qualquer lado, uma vez que os seus dispositivos o fazem na perfeição. Deste modo, era necessário investigar novas tecnologias que oferecessem uma maior mobilidade, mas que fossem capazes de oferecer largura de banda suficiente. Assim nasceu o conceito de redes da próxima geração (4G - LTE: Advanced) que tem como ideia geral ser uma rede que transporta todo o tipo de dados e serviços

sobre IP. Esta alteração para comutação de pacotes em vez de circuitos, permite às operadoras gerirem melhor a sua rede, terem uma maior capacidade e a possibilidade dos serviços convergirem numa só rede. Deste modo, foram criadas as redes como o WiMAX e o LTE que, para além de permitirem grandes taxas de transmissão, permitem uma grande mobilidade, pois têm um grande alcance.

A partir do momento em que os utilizadores têm acesso à Internet a qualquer momento, estes querem ter acesso às aplicações não só no computador, mas também no tablet e no seu smartphone. Devido a isto, começamos a ver uma mudança do paradigma nas aplicações e nasce o conceito de *Cloud Computing* e as aplicações móveis que vêm permitir o acesso às aplicações a partir de qualquer dispositivo e momento. No ponto de vista do operador do serviço, de forma a ser possível proporcionar aos utilizadores uma elevada qualidade de serviço e conseguir suportar o aumento não só do volume de tráfego, mas também de dispositivos que se encontram na rede, estes têm que melhorar e aumentar a sua infra-estrutura, existindo assim um maior consumo de recursos ao nível da rede que acarreta consigo um consumo de energia maior. Para além disso, neste momento, as operadoras têm sempre as suas redes celulares a funcionar a 100% da sua capacidade. Com o aumento do preço da energia, o conceito de eficiência energética tornou-se uma área de investigação com alta prioridade, pois é possível reduzir os custos operacionais das empresas. Por outro lado, havendo uma melhor eficiência energética, as emissões de carbono para a atmosfera serão bastante menores, nascendo deste facto o conceito de redes 'Green'.

Devido a isto, é cada vez mais importante fazer uma optimização do consumo de energia na rede do operador. A eficiência energética começa a ser um dos pontos de maior investigação, não só na área das redes móveis, como também em outras áreas. Sendo assim, podemos considerar que este é um tema bastante relevante para o futuro próximo tanto ao nível tecnológico como ao nível financeiro para as

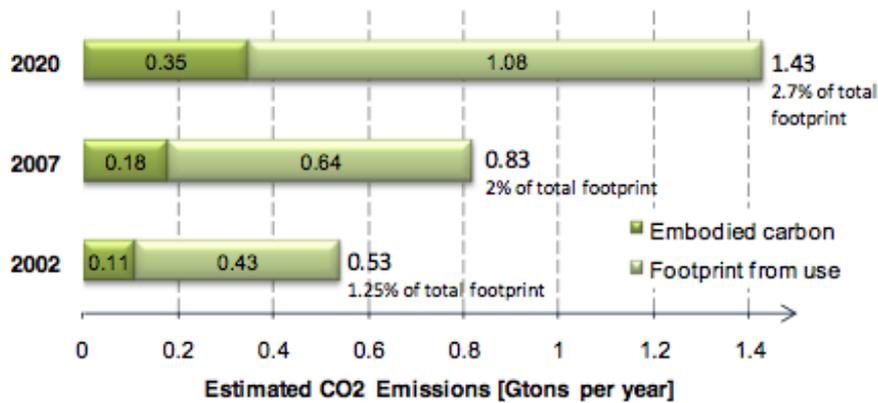


Figura 1.1: Estimativa das emissões de  $CO_2$  das TIs (incluindo computadores, redes e dispositivos das companhias telefônicas, impressoras e *data centers*). Fonte: Smart 2020[1]

operadoras. Para além dos claros benefícios sob o ponto de vista ambiental, uma gestão eficiente dos recursos energéticos permitirá às operadoras reduzir significativamente os encargos com energia e, assim, garantir um crescimento sustentável das mesmas perante a incerteza da variação do custo por bit que advém da evolução tecnológica.

## 1.2 Motivação

O conceito de tecnologias 'Green' veio para ficar. A sociedade e os investigadores estão cada vez mais preocupados com os gastos energéticos das diferentes tecnologias e respectivos equipamentos. Para além disso, o crescimento das redes celulares tem sido exponencial e obriga as operadoras a melhorar/aumentar a sua infra-estrutura. Uma vez que estas infra-estruturas trabalham sempre na sua capacidade máxima, há uma oportunidade clara para a introdução de técnicas que controlem a rede de forma a alcançar eficiência energética. Desta forma, é possível afirmar que esta área de investigação está em crescimento, sendo uma boa aposta porque, para além de serem tecnologias novas, já há e vai continuar a haver um

grande apoio à investigação por parte das operadoras.

## 1.3 Objetivos

Apresentam-se de seguida os principais objetivos desta dissertação:

- estudo e apresentação das soluções de eficiência energética para redes móveis;
- estudo e apresentação dos mecanismos de *sleep* e *cell zooming*;
- estudo da influência da técnica de *cell zooming* na performance dos serviços de rede em geral;
- Desenvolvimento, implementação e validação de um algoritmo de *cell zooming* no Network Simulator 3 - NS-3.

## 1.4 Estrutura do documento

O Capítulo 2 está dividido em quatro secções. Na secção 2.1, caracteriza-se os desperdícios de energia nas redes, sendo apontados alguns casos reais, tais como a Deutsche Telekom e British Telecom. Em 2.2, descreve-se onde estão os maiores desperdícios de energia no interior dos dispositivos e apresenta-se uma taxonomia para as abordagens atuais nas redes de baixo consumo. É também apresentado e explicado o conceito *cell zooming*. De seguida, em 2.3, são apresentados alguns casos de uso para alcançar a eficiência energética na infra-estrutura das operadoras. É também feita a comparação entre os diferentes casos de uso. No Capítulo 3, é apresentada a solução proposta, os perfis de tráfego e utilizadores e o modelo de consumo de energia que irá ser utilizado. De seguida, no Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos, assim como a sua análise. Por fim, no capítulo 5 é feita uma conclusão ao trabalho realizado.

# Capítulo 2

## Estado da arte

### 2.1 A Actualidade do Consumo Energético das Redes

Nos últimos anos, um grande conjunto de companhias telefónicas, ISPs e organizações públicas de todo o mundo têm reportado estatísticas sobre os requisitos energéticos das suas redes e as respetivas emissões de carbono. Os valores em questão são alarmantes e a tendência é aumentarem. Por exemplo, o gasto total de energia da Telecom Italia em 2006 já era superior a 2TWh (cerca de 1% da energia gasta em Itália), tendo aumentado 7.95% comparando com 2005 e 12.08% com 2004 [2][3][4]. Estes aumentos foram causados, maioritariamente, pela infraestrutura de rede, que é responsável por 70% do gasto energético.

Outro exemplo representativo é a British Telecom que reportou gastos energéticos similares à Telecom Italia: o consumo total de energia durante o ano financeiro de 2008 foi de 2.6 TWh [4]. Este valor era aproximadamente 0.7% do gasto energético realizado pelo Reino Unido, sendo o maior consumidor de energia da nação[5]. Em 2007, cerca de 10% do consumo energético realizado no Reino Unido estava

relacionado com equipamento TI.

Na Alemanha, a Deutsche Telekom reportou um gasto energético total de cerca 3TWh em 2007[6], tendo aumentado 2% comparando com 2006. Este aumento foi justificado pelo desenvolvimento da tecnologia DSL. De salientar que quase 20% do consumo era efetuado por sistemas de refrigeração.

Durante o ano de 2006, o consumo energético da Verizon era de 8.9TWh, cerca de 0.26% do consumo total dos Estados Unidos da América[7].

A Comissão Europeia DG INFSO já estimava[8] que as operadoras e empresas de comunicações europeias gastariam cerca de 14.2TWh em 2005, aumentando para 21.4 TWh em 2010 e 35.8TWh em 2020, se nenhuma medida fossem tomadas. (ver Figura 2.1)

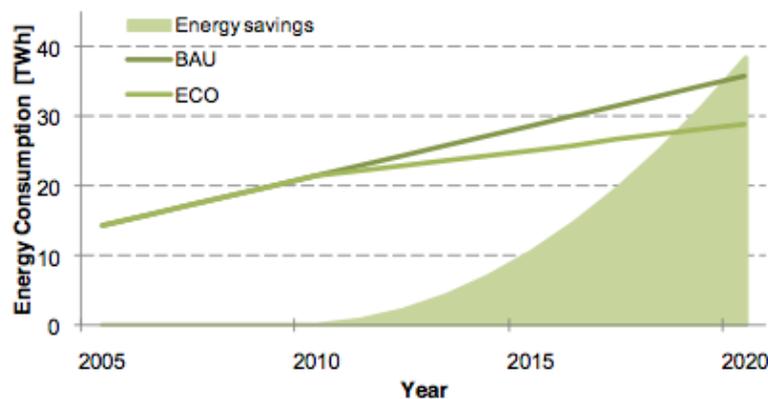


Figura 2.1: Estimativa dos gastos de energia dos telcos Europeus numa infraestrutura em 'Business-As-Usual' (BAU) e num modo Eco, e respetiva poupança de energia acumulada entre os 2 cenários. Source: Relatório da Comissão Europeia DG INFSO em [8].

A iniciativa Global e-Sustainability (GeSi) reportou uma estimativa similar[1] e 'pesou' as emissões de carbono das redes e respetivas infra-estruturas em 320 *metric tons* em 2020. A estimativa em 2020 sugeria que as infra-estruturas para comunicações móveis representariam mais de 50% das emissões de  $CO_2$  das redes.

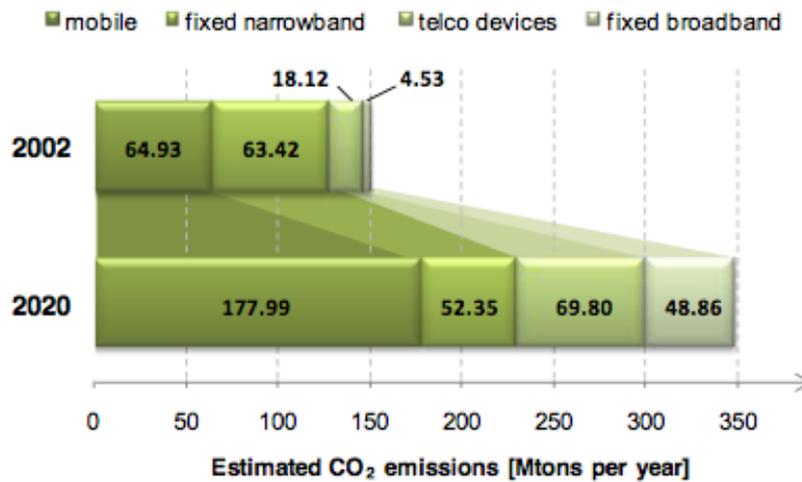


Figura 2.2: Emissões de carbono de acordo com o GeSI. Source: [1].

## 2.2 Conceitos Fundamentais de Redes Baixo-Consumo

### 2.2.1 Introdução

A fim de superar as limitações dos elementos internos dos dispositivos da rede, uma vez que estes têm características e exigências muito diferentes em relação ao hardware de propósito geral, é necessário a introdução de tecnologias e critérios de rede específicos para economizar energia.

Um dos trabalhos mais importantes sobre o consumo de energia na Internet foi realizado por Gupta et al.[9] em 2003 e por Christensen et al.[10] em 2004. Estes demonstraram que as limitações dos elementos internos dos dispositivos de rede eram um dos principais problemas a necessitar de soluções, de forma a melhorar a eficiência energética de toda a Internet. Contudo, apenas em 2008-2009 é que os investigadores, as operadoras e os fabricantes de dispositivos começaram a investir intensamente nesta direção.

No entanto, todos os primeiros esforços resultaram em tecnologias e soluções

parciais, que se referem a ambientes e/ou protocolos muito específicos que não permitiam um desenvolvimento rápido e efetivo, assim como uma distribuição em larga-escala. Além disso, a falta de abordagens standards e suporte a tecnologias já implementadas provoca que qualquer iniciativa industrial seja muito cara e economicamente inviável.

### 2.2.2 Consumo Energético na Rede

Tucker et al.[11] e Neilson[12] focaram-se nos routers IP de gama alta e estimaram que o transporte de dados tem um peso de 54% na arquitetura desses dispositivos, contra 11% dos dados de controlo e 35% para a gestão de energia e temperatura. (ver Figura 2.3)

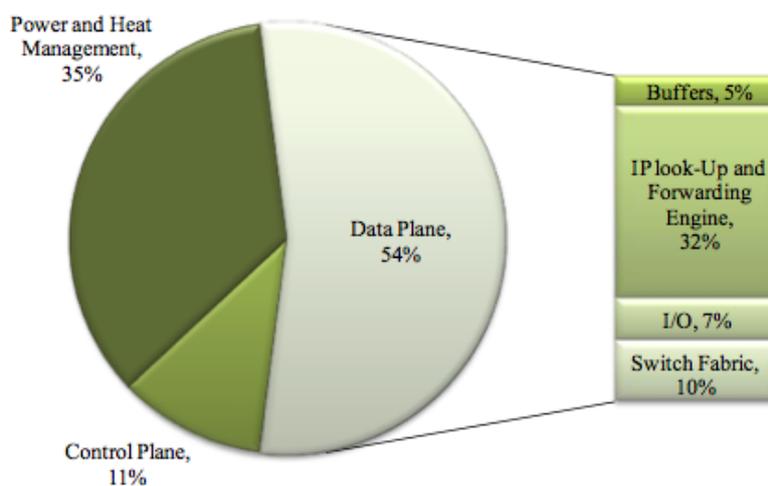


Figura 2.3: Estimativa das fontes do consumo de energia nos routers IP de gama alta. Source: [11].

Apesar deste estudo referir-se especificamente a plataformas com routers de gama alta, a mesma distribuição interna não pode ser obviamente mantida para todas as tipologias e as arquiteturas de componentes de rede. No entanto, as estimativas resultantes fornecem uma indicação relevante e clara sobre como e

onde futuros esforços de investigação precisam de se focar para construir a próxima geração de dispositivos 'Green'.

Com o objetivo de perceber melhor como se dividia o consumo energético das operadoras, a Alcatel-Lucent realizou um relatório interno. Este estimava que, numa configuração típica de um ISP/operadora, o consumo energético da rede de transporte e core representava cerca de 30% do gasto total da rede e as redes de acesso representavam cerca de 70%. (Figura 2.4).

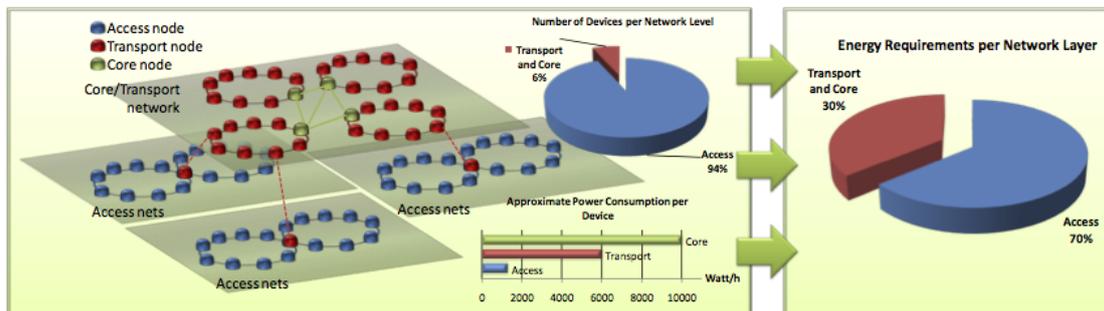


Figura 2.4: Divisão do consumo de energia de uma operadora. Source: [13].

### 2.2.3 Taxonomia

De um ponto de vista geral, a maior parte das abordagens é baseada em alguns conceitos básicos, que são inspirados em mecanismos de poupança de energia e critérios de gestão de energia que já estão parcialmente disponíveis nos sistemas de computação. Estes conceitos básicos são classificados da seguinte forma:

- i) Re-engenharia (*Re-engineering*);
- ii) Adaptação Dinâmica;
- iii) *Sleeping/Standby*.

A abordagem de *re-engineering* tem como objetivo introduzir e desenhar elementos energeticamente mais eficientes para os dispositivos de rede, através do di-

mensionamento e otimização da organização interna dos dispositivos, bem como na redução dos seus níveis de complexidade.

A adaptação dinâmica dos recursos ou dispositivos da rede tem como objetivo modular a capacidade dos mecanismos de processamento de pacotes e das interfaces de rede, respeitando sempre as cargas de tráfego e os seus requisitos.

Por fim, as abordagens de *sleeping/standby* são usadas para, de forma inteligente e seletiva, colocarem os dispositivos ou partes da rede que não estão a ser utilizados em modo *standby* ou *sleep* e 'acordá-los' quando for necessário.

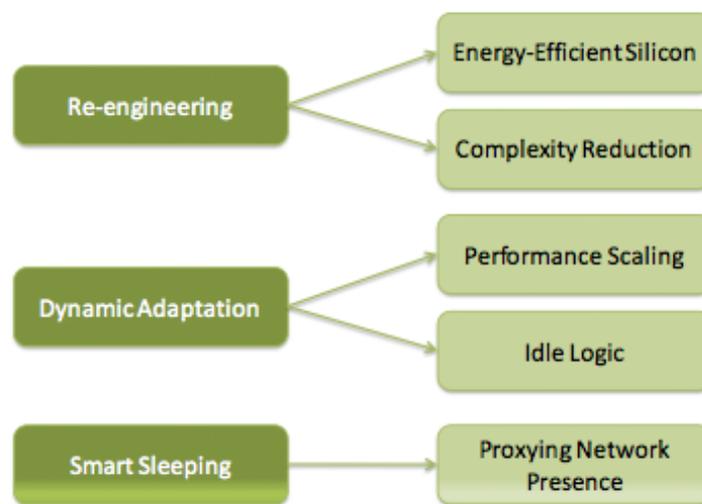


Figura 2.5: Taxonomia das abordagens para obter eficiência energética na Internet do Futuro. Source: [13].

#### 2.2.4 Técnica utilizada para redes de baixo-consumo: *Cell Zooming*

O *cell zooming*[14] é das técnicas mais utilizadas para alcançar eficiência energética. Esta permite que se tenha um controlo da rede e da sua topologia, pois é possível aumentar ou diminuir o alcance das células ou até colocá-las totalmente inativas (*sleep mode*). Deste modo, o *cell zooming* não é só uma técnica de adaptação dinâmica, mas também uma abordagem de *sleeping/standby*.

No passado, o tamanho das células nas redes celulares tinha um valor fixo, assim como o número de utilizadores que podiam servir e a sua largura de banda. Com aparecimento das redes 3G e 4G e através do conceito de *cell zooming*, tornou-se possível adaptar a célula de acordo com as condições do tráfego e número de utilizadores na área. Um exemplo de *cell zooming* é ilustrado na Fig. 2.6.

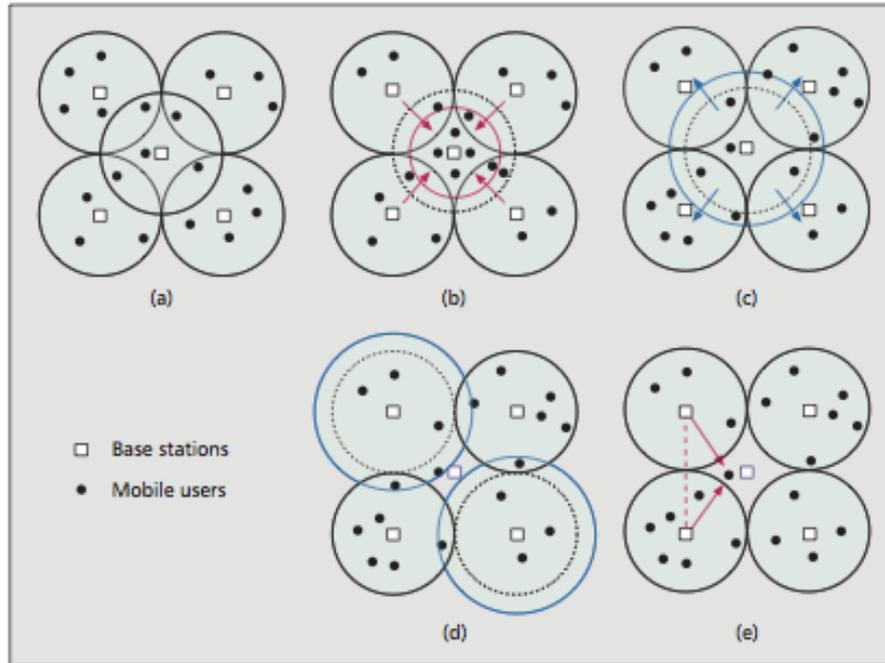


Figura 2.6: Operações de *cell zooming* numa rede celular: a) células com o tamanho original; b) Célula central 'diminui' quando o volume de tráfego aumenta; c) Célula central 'aumenta' quando o volume de tráfego diminui; d) Célula central 'adormece' e as vizinhas 'aumentam'; e) Célula central 'adormece' e as vizinhas transmitem cooperativamente. Source: [14].

Estamos perante uma rede celular com cinco células. Os dispositivos móveis estão distribuídos numa forma aleatória pelas células. Quando alguns dispositivos se movem para a célula central e esta fica congestionada, ela reduz o seu tamanho, saindo assim do seu estado de congestionamento. Os dispositivos, que estavam a ser servidos pela célula central e deixam de estar dentro da sua área quando esta diminui, são servidos pelas outras células (Fig. 2.6-b). Por outro lado, se

os dispositivos saem da área da célula central e congestionam as células vizinhas, estas podem diminuir a sua área e a central aumentar, de forma a evitar uma zona sem cobertura (Fig. 2.6-c). O *cell zooming* permite ainda que células sejam desligadas. Se as células vizinhas tiverem a capacidade de suportar os clientes que se encontram na célula central, esta pode ser desligada, reduzindo assim o consumo de energia. As células vizinhas podem aumentar a sua área de forma a dar cobertura aos clientes que estão na zona central (Fig. 2.6-d) ou servir os dispositivos de forma cooperativa (Fig. 2.6-e).

**Implementação do *Cell Zooming*** A implementação do *cell zooming* nas redes de baixo-consumo necessita de novos componentes e que as respetivas funcionalidades sejam introduzidas nas arquiteturas dessas redes. A *framework* do *cell zooming* pode ser ilustrada da seguinte forma:

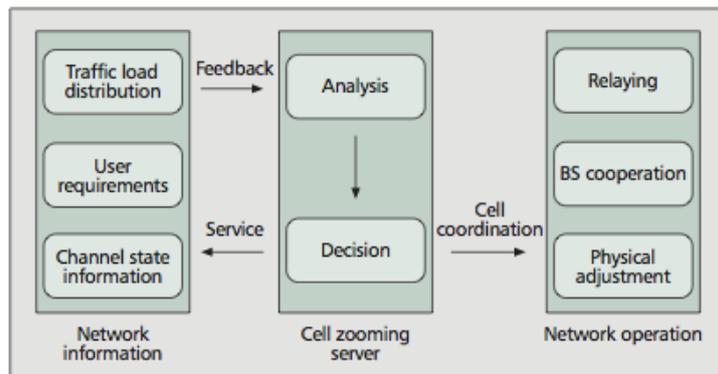


Figura 2.7: *Framework* do *cell zooming*. Source: [14].

O servidor de *cell zooming* (CS) controla os procedimentos. O CS é uma entidade virtual da rede que pode ser implementada na *gateway* ou nas estações de base. Numa fase inicial, este analisa a informação recolhida sobre o estado atual da rede, como o volume de tráfego, condições do canal e requisitos dos utilizadores. Este processo pode ser realizado através de mensagens de controlo específicas. Depois de recolher a informação e de a analisar, o CS decide se há oportunidade para

executar o *cell zooming*. Se for necessário que uma célula 'aumente' ou 'diminua', o CS coordenará o processo com as células vizinhas.

O *cell zooming* é implementado com recurso a quatro técnicas:

- **Ajuste dos parâmetros físicos:** É possível implementar *cell zooming* através do ajuste dos parâmetros físicos da rede. As células podem aumentar o seu raio de alcance se a potência de transmissão da antena da estação base for aumentado e vice-versa. Além disso, a altura e inclinação da antena pode também ser ajustada para aumentar e/ou diminuir o alcance da célula (ver Fig. 2.8-a). No entanto, estes ajustes precisam da ajuda de instrumentos mecânicos adicionais.
- **Cooperação entre estações base:** para haver cooperação, as várias estações têm que formar um cluster. Desta forma, estas podem transmitir e receber informação do dispositivo móvel cooperativamente. No LTE-Advanced, este mecanismo chama-se *Coordinated Multi-Point (CoMP) transmit/receive*[15]. Na perspectiva do dispositivo, o cluster que é formado é uma célula nova, cujo tamanho é a soma do tamanho inicial das estações. O tamanho pode ser maior em certas situações, uma vez que a cooperação reduz a interferência entre células. Neste caso, as células aumentam o seu tamanho para melhorar a área de cobertura (Fig. 2.8-b).
- **Retransmissão:** Estações de retransmissão (RSs) são implantadas nas redes celulares com o intuito de melhorar o desempenho dos dispositivos que se encontram nos limites de alcance das células. Esta técnica é uma das mais importantes do LTE-Advanced. A célula com RSs pode aumentar a sua área, como é demonstrado na Fig. 2.8-b. A RSs também pode ser implantada perto da fronteira de duas células vizinhas. Neste caso, as RSs podem transmitir o tráfego da célula que está sob uma carga elevada para

a célula que tem uma carga menor. A primeira pode diminuir o seu raio de alcance e a segunda aumentar.

- **BS Sleeping:** Quando uma estação base está em modo *sleep*, o ar-condicionado e os outros equipamentos que consomem energia podem ser desligados. As estações que se encontram neste estado podem reduzir largamente a energia consumida por uma rede celular. Neste caso, a célula que se encontra na estação que está a 'dormir' diminui a sua área para 0 e as vizinhas aumentam para garantir a cobertura aos dispositivos.

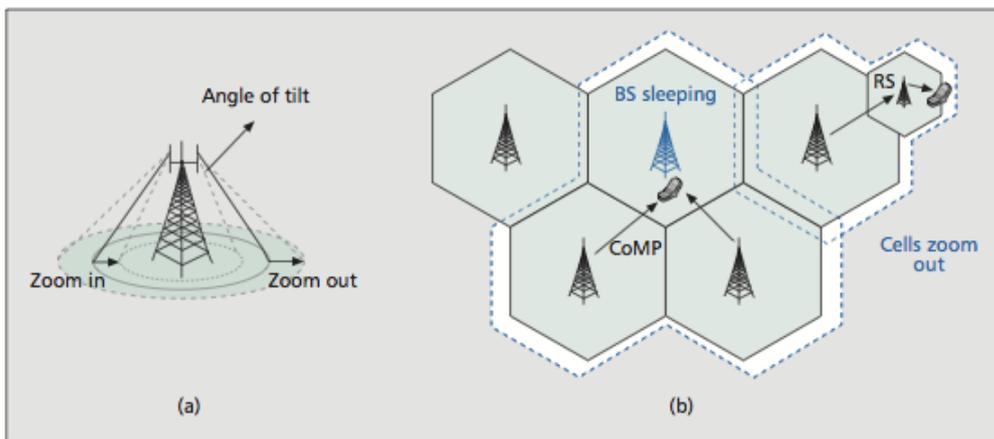


Figura 2.8: Técnicas para implementar *cell zooming*: a) 'aumento' ou 'diminuição' das células com ajustamento dos parâmetros físicos das mesmas; b) 'aumento' ou 'diminuição' das células através de cooperação entre estações base e retransmissão. Source: [14].

**Benefícios** Em primeiro lugar, o *cell zooming* pode ser utilizado para balancear o tráfego entre células que estejam perante muito tráfego e células que tenham pouco tráfego para processar. Em segundo lugar, o *cell zooming* pode ser utilizado para poupar energia, as células podem ser desligadas. Deste modo, o *cell zooming* é capaz de dispersar o tráfego ou concentrá-lo. Em ambos os casos, os recursos são alocados consoante a distribuição do tráfego. No entanto, decidir quando devemos dispersar o tráfego ou concentrá-lo não é um problema de fácil resolução.

As técnicas como a cooperação entre estações base e retransmissão podem reduzir a interferência entre células, mitigar o impacto do *shadowing* e *multipath fading* e reduzir a frequência com que os dispositivos fazem handover. É ainda possível combinar as duas técnicas. Por exemplo, no caso de células em áreas rurais, quando as células aumentam a sua área de cobertura há mais sobreposição entre elas. Desta forma, é possível existir cooperação entre estações base, oferecendo assim maior cobertura e desempenho. Uma vez que os requisitos dos utilizadores são satisfeitos, não é necessário melhorar a rede tão frequentemente, reduzindo assim os custos operacionais dos operadores.

**Desafios** Para que o *cell zooming* seja executado de modo eficiente e flexível, as flutuações do tráfego devem ser registadas sem erros e encaminhadas para o CS. Contudo, registar as flutuações espaciais e temporais significativas é um problema de difícil resolução. Uma das técnicas mais adoptadas para modelar as flutuações é dividi-las em flutuações de longo e curto prazo. As de longo prazo refletem a variação da taxa de chegada do tráfego, cujo tempo é escalado em horas ou dias. As flutuações de curto prazo retratam a aleatoriedade da chegada dos utilizadores, o tempo é escalado em segundos ou minutos.

Outro dos problemas é a compatibilidade. Algumas das técnicas de *cell zooming* não são suportadas por algumas das redes celulares atuais (ex: Redes 2G), como por exemplo: o equipamento mecânico adicional para ajustar a altura e inclinação das antenas, a cooperação entre estações base e técnicas de retransmissão. A implementação do *cell zooming* obriga também que haja alguma alteração na estrutura atual da gestão da rede. Por exemplo, o encaminhamento da informação do estado da rede requer canais de controlo especiais.

Por fim, o *cell zooming* pode provocar outros problemas, como a interferência entre células e 'buracos' de cobertura. Quando algumas células vizinhas aumentam

a sua área ao mesmo tempo, poderá haver mais interferência entre elas. Se a cooperação entre estações for inviável, serão necessários esquemas de gestão de interferência adicionais para reduzir a interferência. Por outro lado, quando as células aumentam ou diminuem o seu alcance, é possível que algumas áreas da rede fiquem sem cobertura.

## 2.3 Casos de Uso

### 2.3.1 Introdução

O LTE-Advanced é uma rede celular de nova geração. Como é possível verificar nas redes celulares UMTS e WiMAX, a investigação de técnicas eficientes a nível energético foca-se mais no lado das operadoras. Estas estão cada vez mais interessadas em diminuir os seus custos operacionais, aumentando desta forma os seus lucros. Sendo assim, há mais verbas para os investigadores que se focam nesta área. Em redes celulares UMTS, começa a surgir o conceito de *cell zooming* que é explicado na sub-secção 2.2.4 e é a abordagem mais utilizada no 4G para obter ganhos energéticos.

### 2.3.2 Algoritmo Centralizado e Distribuído

No trabalho [14], os autores propuseram dois algoritmos: um centralizado e um distribuído. Eles consideraram uma rede celular onde a cobertura das BSs se sobrepõem, ou seja, não há áreas sem cobertura e o tráfego varia durante o tempo e o espaço. Assumindo que existem  $M$  BSs e que todas consomem a mesma energia e que os dispositivos dos clientes 'chegam' à rede de acordo com uma distribuição Poisson e são associados a uma BS. O tempo de permanência na rede de cada dispositivo é distribuído exponencialmente e a taxa requerida é igual e fixa. Quando

um dispositivo se quer ligar à rede, se não houver largura de banda suficiente para lhe ser alocada, ele será bloqueado. Os autores têm dois objetivos principais: minimizar a energia consumida e minimizar a probabilidade de os terminais móveis serem bloqueados. Quanto mais células estiverem a 'dormir', mais energia será economizada. No entanto, isto também leva a que a probabilidade de bloqueio seja maior. Deste modo, tem que haver um *trade-off* entre os dois objetivos.

Nos algoritmos que eles criaram, o tempo é dividido em períodos de *cell zooming* e a duração de cada período é  $T$ . Cada período é composto por três fases: coordenação, transição e *servicing*, como pode ver na Fig. 2.9.

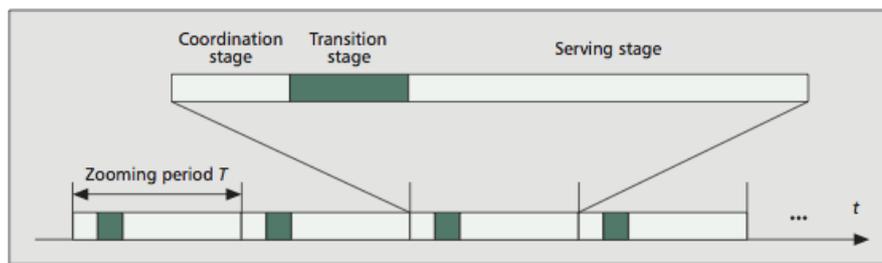


Figura 2.9: Processo dos algoritmos de *cell zooming*. Source: [14].

Na fase de coordenação, o CS recolhe a informação necessária sobre o estado da rede e decide que alterações à rede devem ser feitas. Os algoritmos que eles propõem também são executados nesta fase. Na fase de transição, as células alteram as suas definições/parâmetros de funcionamento (ex: modo de trabalho) e completam os processos de *handoff*, caso seja necessário. Na fase de *servicing*, as células fixam os seus parâmetros e prestam o serviço aos dispositivos que já se encontram na rede e aos que vão chegar. O tempo de duração da coordenação e transição é muito menor que o de *servicing*, assim, a energia consumida depende do modo de funcionamento das células na fase de *servicing*. Desta forma, o tráfego deve ser concentrado no menor número possível de BSs para que as restantes possam ser desligadas. No algoritmo centralizado, as condições do canal e os requisitos

dos utilizadores são recolhidos pelo CS e a alocação dos recursos e as operações de *cell zooming* são executadas numa forma centralizada. No algoritmo distribuído, cada dispositivo escolhe a BS à qual vai ser associado, baseado-se nas informações que foram distribuídas entre as BSs. De um modo geral, o algoritmo centralizado introduz um maior *overhead* devido à sinalização, mas consegue atingir melhor desempenho.

**Algoritmo Centralizado** Durante a fase de coordenação, os dispositivos móveis enviam informação sobre o estado do canal e a taxa que necessitam para as BSs. Depois de receber todas as atualizações dos terminais móveis (Mobile Units - MUs) e das BSs, o CS gera uma matrix 0/1  $\mathbf{X} = [x_{ij}]$ , onde  $x_{ij} = 1$  significa que o MU  $i$  está associado à BS  $j$ . Como cada MU só pode ser servido por uma BS, o somatório de cada coluna de  $X$  tem de ser 1. A ideia principal do algoritmo é desligar o maior número possível de BSs que estão a trabalhar com pouco tráfego. Como há a possibilidade de muitos MUs chegarem à rede durante a fase de *servicing*, cada BS ativa reserva uma parte da sua largura de banda para estes dispositivos. Esta proporção que é reservada na BS  $j$  é denotada por  $\alpha_j$ , onde  $\alpha_j \in [0,1]$ . Inicialmente, a largura de banda inativa da BS  $j$  é dada por  $\tilde{B}_j$ . O volume de tráfego da BS  $j$  é  $L_j$ . A largura de banda inativa é calculada da seguinte forma:

$$\tilde{B}_j = (1 - \alpha_j)B_j.$$

Sendo o conjunto dos MUs que estão associados à BS  $j$  denotado por  $M_j$ , o volume de tráfego é dado por:

$$L_j = \sum_{i \in M_j} \frac{b_{ij}}{B_j}.$$

O procedimento detalhado do algoritmo é o seguinte:

- Passo 1: Inicializar todos os  $L_j$  e todos os elementos da matrix  $\mathbf{X}$  a 0.
- Passo 2: Para cada MU  $i$ , encontrar o conjunto de BSs que o podem servir e que não violem as restrições da largura de banda:  $L_j B_j + b_{ij} \leq \tilde{B}_j$ . Se o conjunto for vazio, o MU  $i$  é bloqueado. Caso contrário, associar o MU  $i$  à BS  $j$  que tem a maior eficiência espectral  $w_{ij}$ . Atualizar  $L_j$  e  $\mathbf{X}$  depois de cada associação.
- Passo 3: Ordenar de forma crescente todas as BS através do rácio entre  $L_j B_j$  e  $\tilde{B}_j$ . Todas as BSs com rácio 0 irão 'diminuir' a sua área de cobertura para zero e entrarão em modo *sleep* no período de *servicing* seguinte. Para as restantes, encontrar a BS  $j$  com rácio mais pequeno e re-associar os MUs em  $M_j$  às restantes BSs. Se nenhum MU é bloqueado, limpar  $\mathbf{X}$  e voltar ao Passo 3. Caso contrário, retornar  $\mathbf{X}$  e finalizar o procedimento.

**Algoritmo Distribuído** De forma a reduzir as trocas de informação e o excesso de sinalização, os autores criaram também um algoritmo distribuído. Cada MU escolherá a BS de acordo com as condições do canal e o volume de tráfego de cada estação base. Neste algoritmo, as BSs também reservam uma parte da sua largura de banda para os dispositivos novos, tal como acontece no centralizado. Na prática, a informação do volume de tráfego e os parâmetros da largura de banda que deve ser reservada podem ser obtidos através do envio de sinais de controlo das BSs. Intuitivamente, cada MU escolherá a BS com o maior volume de tráfego e a melhor eficiência espectral. O algoritmo de escolha da BS por parte do MU é definido da seguinte forma:

$$U(\omega_{ij}, L_j, \alpha_j) \begin{cases} \frac{\omega_{ij}(L_j B_j + b_{ij})}{B_j}, & L_j B_j + b_{ij} \leq \tilde{B}_j \\ 0 & L_j B_j + b_{ij} > \tilde{B}_j \end{cases}$$

De uma forma simplificada, o que esta equação diz é que os MUs preferem as BSs com maior volume de tráfego e maior eficiência espectral, mas o volume do tráfego não pode exceder um limite pré-definido.

O procedimento do algoritmo distribuído de *cell zooming* é descrito de seguida:

- Passo 1: Inicializar todos os  $L_j$  e todos os elementos da matrix  $\mathbf{X}$  a 0.
- Passo 2: Para cada MU  $i$ , encontrar o conjunto de BSs que o podem servir e que não violem as restrições da largura de banda:  $L_j B_j + b_{ij} \leq \tilde{B}_j$ . Se o conjunto for vazio, o MU  $i$  é bloqueado. Caso contrário, associar o MU  $i$  à BS  $j$  que tem o maior  $U(\omega_{ij}, L_j, \alpha_j)$ . Atualizar  $L_j$  e  $\mathbf{X}$  depois de cada associação.
- Passo 3: Repetir o Passo 2 até que não exista nenhuma actualização de  $X$  e finalizar o procedimento.

No algoritmo distribuído não é preciso qualquer coordenação entre as BSs. Desta forma, reduz-se a quantidade de sinalização necessária. Este trabalha de uma forma iterativa. A convergência do algoritmo distribuído é garantida se quaisquer dois MUs não tomem uma decisão em simultâneo. Isto ocorre porque o conjunto de seleção da BS de cada MU é finito. Depois do algoritmo convergir, as estações base que não têm dispositivos associados irão entrar em modo *sleep* durante a fase de *servicing*.

**Resultados em Simulação** A Fig. 2.10 mostra os resultados obtidos da simulação a que os autores submeteram os algoritmos. É possível verificar que os

algoritmos conseguem poupar bastante energia (o consumo de energia é normalizado para 100 se todas as BSs estiverem ativas). O *Static 1/2* e *Static 1/3* demonstram os resultados obtidos quando 1/2 e 1/3 das BSs são desligadas. O algoritmo centralizado consegue atingir um melhor *trade-off* que o algoritmo distribuído. Ambos conseguem melhores resultados do que a implementação estática (BSs sempre ativas e a funcionar em modo de pico). Por outro lado, os algoritmos são também mais flexíveis, pois são capazes de aproveitar livremente o *trade-off* entre a energia consumida e a probabilidade dos dispositivos serem bloqueados.

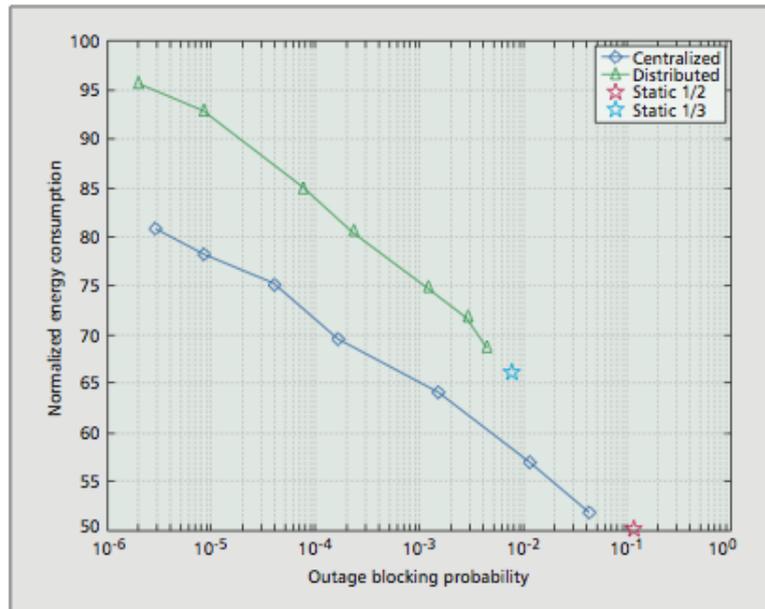


Figura 2.10: *Trade-off* da energia consumida pelo algoritmo centralizado e distribuído. Source: [14].

No artigo[16], os investigadores concentraram-se nos ganhos energéticos que é possível obter nas estações base. Criaram dois algoritmos que desligam dinamicamente algumas BSs quando o volume de tráfego na rede é baixo. Um dos algoritmos é centralizado e o outro é descentralizado. Por fim, demonstram, a partir de simulações, a eficiência energética que é possível obter e o *trade-off* entre o ganho energético e a garantia de cobertura.

Eles consideraram uma infra-estrutura de rede móvel com  $b$  BSs. O problema em questão é minimizar a energia média consumida pelas BSs enquanto os requisitos de tráfego dos utilizadores é satisfeito. É assumido que as BSs têm dois modos de funcionamento: ativo e *sleep/standby*, onde no último a energia consumida é negligenciável.

No Algoritmo Centralizado, se toda a informação do canal e dos requisitos de tráfego forem conhecidos pela rede, pode ser utilizado um algoritmo 'ganancioso' e centralizado para determinar os estados das BSs. Primeiro, é inicializado  $\beta$  (conjunto das BSs) e  $\mathcal{U}$  como o conjunto de todos os utilizadores. A cobertura de uma BS é finita e os utilizadores que podem ser 'cobertos' pela BS  $b$  é denotado por  $\mathcal{U}_b$ .

---

**Algorithm 1** Centralized BS On-Off Decision

---

**Input:**  $\mathcal{B}, \mathcal{U}, \{\mathcal{U}_b\}, \{\rho_i\}, \{r_{bi}\}, \{P_b\}, \{W_b^{\max}\}, \{\alpha_b\}$   
**Output:**  $\{x_{ib}\}, \{\mathcal{B}\}$

```

while  $\mathcal{U} \neq \emptyset$  and  $\mathcal{B} \neq \emptyset$  do
  For  $\forall b \in \mathcal{B}, \mathcal{U}_b = \mathcal{U}_b \cap \mathcal{U}$ . Find the BS  $b_j$  in  $\mathcal{B}$  with
  largest  $(\sum_{i \in \mathcal{U}_b} \rho_i / r_{bi}) / P_b$ . Set  $W = (1 - \alpha_{b_j}) W_{b_j}^{\max}$ .
  while  $W > 0$  and  $\mathcal{U} \neq \emptyset$  do
    find  $i^* = \arg \min_{i \in \mathcal{U}_{b_j}} \rho_i / r_{bi}$ 
    if  $W > \rho_{i^*} / r_{bi^*}$  then
       $\mathcal{U} = \mathcal{U} - \{i^*\}, \mathcal{U}_{b_j} = \mathcal{U}_{b_j} - \{i^*\}, W = W - \rho_{i^*} / r_{bi^*}$ 
    end if
  end while
   $\mathcal{B} = \mathcal{B} - \{b_j\}$ 
end while

```

---

Figura 2.11: Algoritmo Centralizado. Source: [16].

$\rho_i$  é a taxa requerida pelo utilizador  $i$ ,  $r_{bi}$  é a eficiência espectral (taxa por unidade de largura de banda) se o utilizador  $i$  é 'servido' pela BS  $b$  e  $W_b^{\max}$  é a largura de banda máxima que a BS  $b$  suporta. Quando o algoritmo termina, se  $\beta \neq \emptyset$ , as restantes BSs são desligadas. Se  $\mathcal{U} \neq \emptyset$ , os restantes utilizadores estão em excesso, ou seja, não se conseguem ligar à rede. Como o ganho energético é para cenários em que o volume de tráfego é baixo, não deveria haver excesso de

utilizadores. Contudo, devido ao facto do tráfego ser concentrado nas BSs ativas, com a chegada aleatória de utilizadores, o excesso pode acontecer antes do próximo período de decisão. Desta forma, os investigadores introduziram uma margem de proteção  $\alpha_b \in [0,1)$ . Esta margem deve ser determinada pela previsão de tráfego com base na variação de tráfego registada.

De forma a diminuir a informação necessária pelo Algoritmo Centralizado, também foi proposto um Algoritmo Descentralizado. A ideia principal deste é ativar uma associação específica entre utilizadores e BS, através de uma função de preferência de seleção da BS. De um modo específico, um utilizador  $i$  escolhe a BS  $b^*$  de acordo com a maximização de uma função utilitária:

$$b^* = \arg \max_b r_{bi} U(L_b, \alpha_b) / P_b,$$

onde  $L_b = (\sum_i x_{bi} \rho_i / r_{bi}) / W_b^{max}$  é a carga normalizada da BS  $b$ . De notar que o cálculo da carga inclui o utilizador  $i$  como se ele escolhesse a BS  $b$ . Um exemplo que eles utilizam é:

$$U(L_b, \alpha_b) = \begin{cases} \varepsilon + L_b / (1 - \alpha_b) & L_b \leq 1 - \alpha_b \\ \varepsilon & L_b > 1 - \alpha_b, \end{cases}$$

onde  $\varepsilon$  é um número pequeno para evitar a interrupção devido à não utilização das potenciais BSs a selecionar. A função utilitária pode ser calculada localmente por cada BS. O objetivo por detrás da função é dar um peso maior às BSs que estão com um volume de tráfego elevado, concentrando assim o tráfego nessas estações, deixando as restantes 'dormir'. O truncamento por  $\alpha_b$  atua como uma proteção para ser compatível com o balanceamento da carga. É possível criar funções utilitárias com transições de carga mais suaves, que foi deixado para trabalho futuro.

O Algoritmo Descentralizado pode ser iniciado com qualquer associação entre utilizador e BS. De seguida, se não houver dois utilizadores a decidir em simultâneo, a distribuição das BSs irá convergir para o equilíbrio. Isto deve-se ao facto do conjunto de BSs para escolha dos utilizadores ser finito. Depois do algoritmo convergir, as BSs que não têm associado a si qualquer utilizador, entram em modo *sleep*. De notar que a implementação do algoritmo descentralizado pode ser feito de várias maneiras. O valor da função utilitária  $U(L_b, \alpha_b)$  pode ser transmitido da BS através do canal de sinalização ou a BS pode sintonizar o *beacon power* de forma a simular a função de preferência, similar às soluções adotadas para balanceamento de carga[17].

A simulação utiliza células hexagonais  $10 * 10$ . O raio das células é de 200m e pode ser aumentado até 400m. A chegada dos utilizadores ao sistema é de acordo com um processo de Poisson e cada utilizador mantém-se no sistema por um período exponencialmente distribuído, havendo em média 100 utilizadores na rede. De notar que a distribuição dos utilizadores não é uniforme, pois foram gerados 3 *hotspots*, de forma a simular zonas onde existe um maior aglomerado de utilizadores. Quando o sistema estabiliza, o algoritmo, que garante eficiência energética, é executado de 15 em 15 minutos e é recolhida a informação de 100 períodos. Inicialmente, o valor de  $\alpha_b$  é igual para todas as BSs. Eles foram afinando esse valor e observaram o efeito que este tinha na energia consumida e no rácio de utilizadores ao qual foi bloqueado o acesso à rede.

A Fig. 2.12, mostra que aumentando o  $\alpha$ , ambos os algoritmos desligam menos BSs, reduzindo bastante a percentagem de *outage*. O algoritmo descentralizado tem um melhor desempenho no rácio de utilizadores que são bloqueados, uma vez que ativa mais BSs. Esta figura ilustra bem o *trade-off* entre a energia economizada e a garantia de cobertura, que é crucial no desenho de mecanismos energeticamente eficientes.

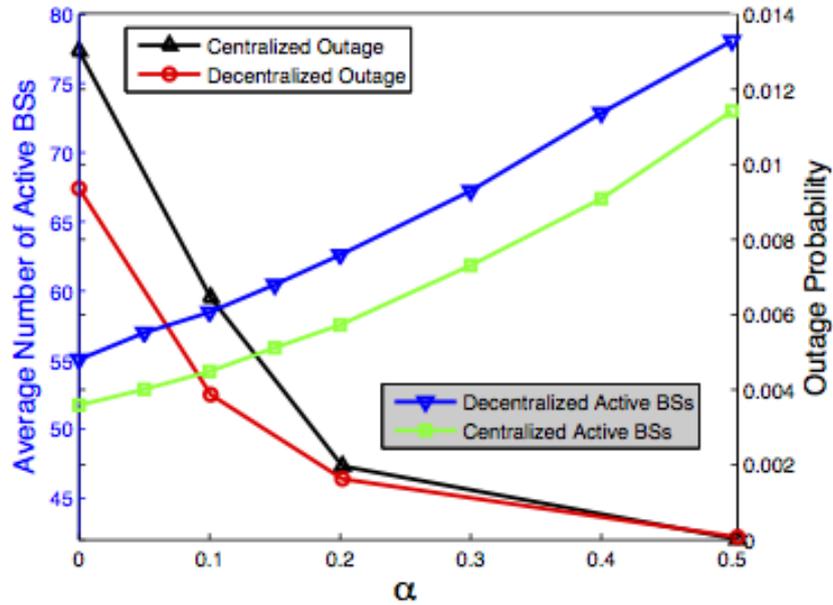


Figura 2.12: Desempenho do algoritmo. Source: [16].

Apesar de mostrar ganhos interessantes, os algoritmos ainda têm alguns problemas: não utilizam previsão do tráfego para decidir antecipadamente o valor de  $\alpha_b$ , a função utilitária necessita de refinamento para conseguir atingir transições mais suaves, todas as BSs precisam de estar ativas quando o algoritmo é executado e ainda não suporta retransmissão nem cooperação entre BSs.

### 2.3.3 *Continuous Cell Zooming, Discrete Cell Zooming e Fuzzy Cell Zooming*

Em [18], os autores consideraram que cada estação base tem apenas uma célula que pode transmitir a uma potência máxima de  $P_{max}$  ao longo de um raio máximo de cobertura de  $r_{max}$ . Para além disso, assumem que todos os utilizadores na célula requerem a mesma taxa de dados. A distribuição dos utilizadores é uniforme ao longo da área da célula e o padrão do tráfego de chegada é assumido ser uma distribuição de Poisson ao longo do período que eles estudam o sistema. São

apresentados três algoritmos diferentes: *Continuous Cell Zooming*, *Discrete Cell Zooming* e *Fuzzy Cell Zooming*.

No método de *Continuous Cell Zooming*, a BS transmite à potência necessária para alcançar o utilizador mais distante. A BS aumenta (até  $r_{max}$ ) ou diminui (potencialmente até 0) dinamicamente o seu alcance apenas para acomodar o utilizador mais distante dentro dos seus limites. Os autores afirmam que a adaptação contínua da potência de transmissão é a técnica de *cell zooming* mais eficiente energeticamente. No entanto, a implementação deste método é bastante desafiante porque os utilizadores têm uma grande mobilidade, necessitando de requisitos de *feedback* bastante rigorosos.

No *Discrete Cell Zooming*, a potência de transmissão da BS é escolhida a partir dum conjunto discreto de valores permitidos. A área de alcance da célula é dividida em  $Z$  zonas, sendo  $r(i)$  o raio da  $i^{th}$  zona discreta e  $i$  varia entre 1 e  $Z$ . Supondo que o utilizador mais distante está localizado entre duas zonas discretas  $r(i)$  e  $r(i + 1)$ , a BS escolhe a potência de transmissão baseando-se na zona discreta com o maior raio:  $r(i + 1)$ , de forma a oferecer cobertura a todos os utilizadores, incluindo os que estão mais distantes.

A vantagem do *discrete cell zooming* é reduzir os requisitos do *feedback* da localização dos utilizadores. O dispositivo só tem que informar a sua localização na BS quando atravessa para uma zona de raio superior. Através do aumento do número de zonas  $Z$ , a BS diminui a energia consumida com um aumento na complexidade do *feedback*.

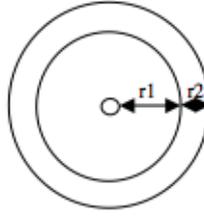


Figura 2.13: Método de *Discrete Cell Zooming*. Source: [18].

Podem ser utilizados vários critérios na divisão da células em diferentes  $Z$  zonas. No artigo que os investigadores publicaram, eles dividem a célula em zonas discretas com incrementos da potência de transmissão da BS iguais. A potência de transmissão para a zona  $i^{th}$  é igual a  $iP_{max}/Z$  (onde  $P_{max}$  é a potência máxima da BS). A área de cada zona não é a mesma que é demonstrada na Fig. 2.13, porque eles têm em consideração o *path loss*. As zonas de fronteira são mais concentradas no limite da célula do que no centro da mesma.

Por fim, o *Fuzzy Cell Zooming* é uma extensão do *Discrete Cell Zooming* com um pequeno aumento (de 10% a 20%) no raio de cobertura em cada zona discreta e um ligeiro compromisso no SINR (*signal to interference and noise ratio*) recebido pelos utilizadores localizados para além do raio da zona discreta correspondente. Esta técnica é baseada na verificação das condições dos utilizadores na fronteira, juntamente com uma extensão na área de cobertura.

Na Fig. 2.14, a parte sombreada simboliza a região *fuzzy* com um raio em excesso entre 10% e 20% da  $r(i)$  correspondente. No método *Fuzzy Cell Zooming*, quando o utilizador mais distante está localizado dentro da zona *fuzzy* da zona discreta atual  $r(i)$ , a BS mantém a potência de transmissão para a zona discreta atual em vez de transmitir na potência da zona superior seguinte  $r(i + 1)$ .

Este método funciona melhor que o *Discrete*, uma vez que a BS transmite em relação à área da zona discreta atual em vez de trocar para o nível superior. Contudo, o SINR recebido é relativamente inferior do que o desejado na área *fuzzy*

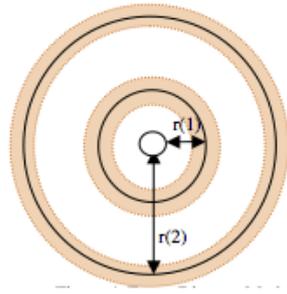


Figura 2.14: Modelo *Fuzzy Discrete*. Source: [18].

e tem de ser compensado com técnicas de correção de erros mais poderosas.

Os métodos propostos foram avaliados num cenário em que o tráfego dos utilizadores segue uma distribuição de Poisson. O tempo de chegada entre dois utilizadores, que é o tempo médio entre a chegada de dois utilizadores sucessivamente, varia dinamicamente baseando-se no número médio de utilizadores por hora. O *hold time* dos utilizadores é uma distribuição gaussiana com média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$ . Este valor representa a duração que um utilizador está em chamada. Para o algoritmo *fuzzy*, é assumido que a BS pode estender a cobertura entre 10% a 20% do alcance especificado para a zona em questão. As simulações foram executadas em MatLab.

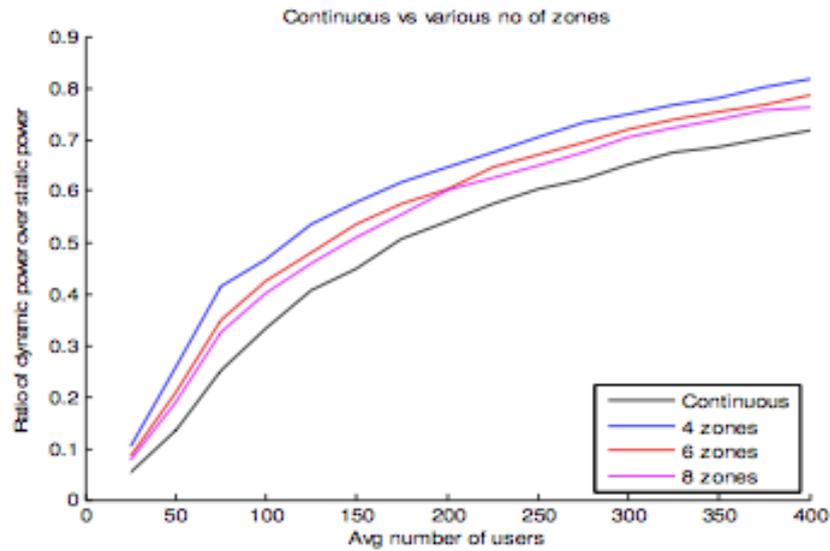


Figura 2.15: Rácio entre a energia consumida no modo dinâmico sobre o estático para diferentes valores no número de zonas discretas  $Z$ . Source: [18].

Os resultados demonstram que o método *fuzzy* tem melhor desempenho que o *discrete*, uma vez que no primeiro é evitada a troca para a zona superior seguinte. Os resultados da simulação demonstram que a perda no SINR para os utilizadores que se encontram na fronteira foi cerca de 1 dB.

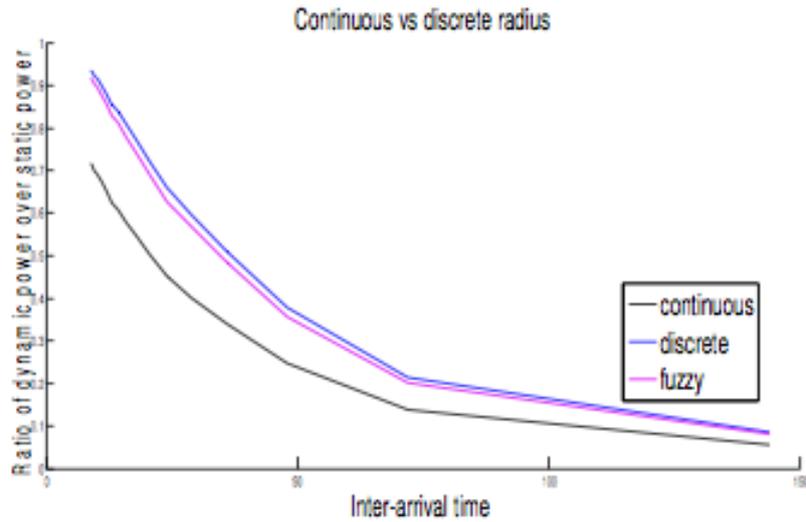


Figura 2.16: Rácio entre a energia consumida no modo dinâmico sobre o estático vs *média entre intervalos de chegada de pacotes*. Source: [18].

Como os autores já estavam à espera, os resultados também demonstraram que, com o aumento do número de zonas, a BS utiliza menos potência de transmissão. Com o aumento do número de zonas discretas, o método *discrete* assemelha-se ao *continuous*. Contudo, com este aumento, o *feedback* com a informação da localização tem de ser mandado mais frequentemente, pois os utilizadores móveis irão atravessar mais vezes as fronteiras das zonas. Mais uma vez, os benefícios do *cell zooming* são maiores quando o tráfego na rede é baixo e quando o tempo de chegada entre utilizadores é elevado.

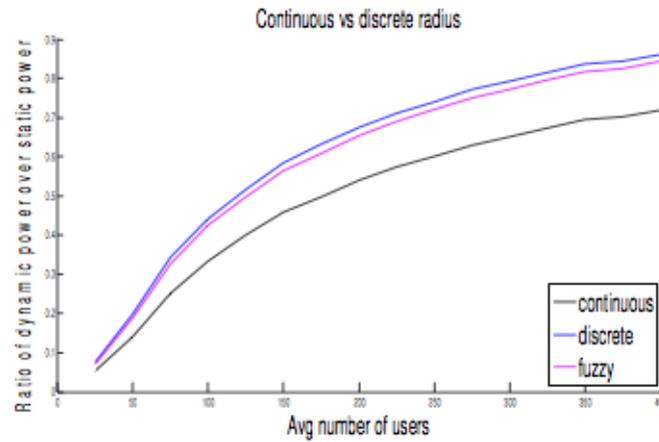


Figura 2.17: Rácio entre a energia consumida no modo dinâmico sobre o estático para os algoritmos *continuous*, *discrete* e *fuzzy*. Source: [18].

No caso estático, ou seja, quando as BSs estão sempre a transmitir na potência máxima, a média do SINR é muito maior do que é realmente necessário, sobretudo nos utilizadores que não se encontram perto da fronteira da célula. Desta forma, uma BS que implemente técnicas de *cell zooming*, apesar de oferecer uma média de SINR mais baixa, esta ainda é superior ao mínimo exigido.

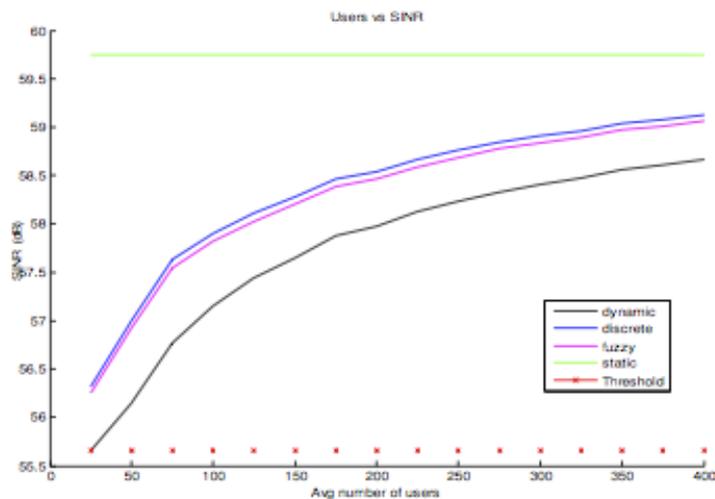


Figura 2.18: Média do SINR recebido com e sem *cell zooming* em função do número de utilizadores. Source: [18].

### 2.3.4 Algoritmo 'Ganancioso'

No artigo[19], os investigadores utilizam tráfego real duma rede celular para estimar a quantidade de energia que conseguem economizar nas áreas urbanas através da utilização de operações dinâmicas nas estações base. Analisaram dois conjuntos de tráfego. O primeiro contém o perfil temporal do tráfego dum operador duma área metropolitana (ver Fig. 2.19). O segundo contém a informação das estações base duma parte do centro de Manchester, Inglaterra (Fig. 2.20). Esta informação foi obtida através de um website que é patrocinado pelo governo inglês[20].

O perfil temporal contém a informação de cinco BSs, uma central e quatro vizinhas. É possível verificar um perfil periódico e sinusoidal do tráfego em cada célula. Durante o dia (11:00 até 21:00), o tráfego é muito maior do que no período noturno (22:00 até às 9:00). Para além disso, o perfil durante o fim de semana ou períodos de férias, mesmo durante as horas de pico, é muito menor que num dia normal da semana.

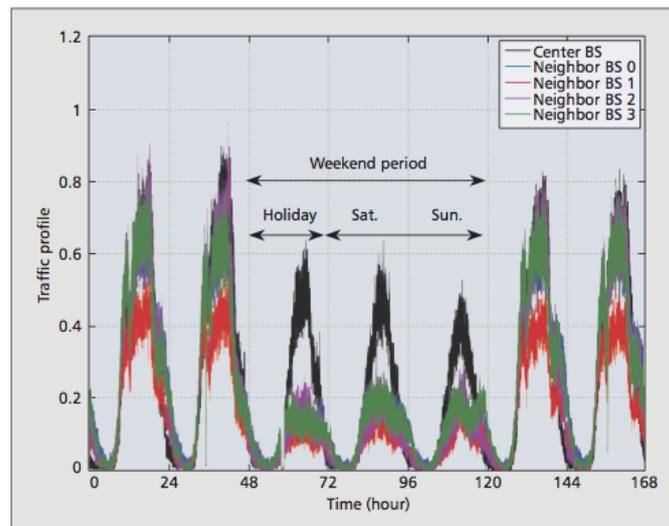


Figura 2.19: Perfil normalizado do tráfego de voz duma semana. Source: [19].

O segundo conjunto contém a informação de uma área de  $3.5 \times 3.5$  km e 129 BSs em 128 locais. É possível obter informações sobre a localização das BSs, do operador, a potência máxima de transmissão, a altura da antena e a frequência a que está a operar.

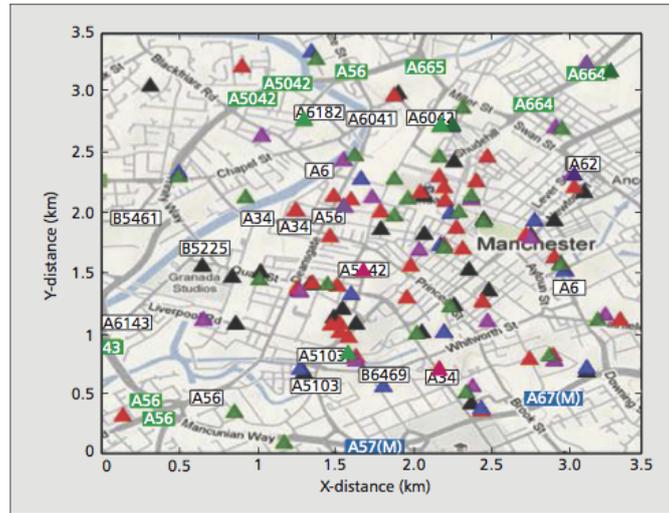


Figura 2.20: Informação da localização das estações base de uma parte da cidade de Manchester, Reino Unido. Source: [19].

**Estimativa da energia economizada** De notar que o perfil temporal que eles utilizaram não corresponde às estações base do segundo conjunto. Contudo, a metodologia que eles utilizam para estimar a energia economizada, através da gestão dinâmica das BSs, separa as componentes temporais e espaciais. Utilizam o perfil temporal para gerar estimativas aproximadas das frações de tempo em que as células têm baixa atividade. De forma independente, analisaram a distribuição espacial das estações base, assumindo zonas de cobertura uniformes e circulares, de forma a estimar o grau de redundância que pode ser eliminado, enquanto mantêm uma cobertura superior a 95%.

Baseando-se na informação da Fig. 2.19, obtiveram a percentagem do tempo em que o tráfego é inferior a  $x$  % do pico, onde  $x = 5, 10, 20$ . Os números são

apresentados na Tab. 2.1.

<i>Threshold</i>	<b>Dia da semana</b>	<b>Fim de semana</b>	<b>Média por semana</b>
5% do pico	23.2	29.8	25.1
10% do pico	30.2	43.3	34.0
20% do pico	38.6	75.6	49.2

Tabela 2.1: Análise do perfil do tráfego: porcentagem de tempo que o tráfego é inferior a  $x\%$  do pico durante os dias da semana e o fim de semana,  $x = 5, 10, 20$ . Source: [19].

Focaram-se no tempo em que o tráfego é inferior a 10%, mas afirmaram que, no futuro, estudarão melhor qual a fração do tráfego de pico que deve ser escolhido como *threshold*. Desta forma, descobriram que, durante os dias da semana, cerca de 30% do tempo o tráfego é inferior a 10% do pico. Durante os fins de semana e feriados, o período de tempo aumenta para 43%. Assumindo dois dias da semana, numa semana normal, estimam que a média de tempo em que há tráfego reduzido é de 34%.

De seguida, consideraram o nível de redundância apresentada na implantação espacial das estações base. Como pode ser visto na Fig. 2.19, não existe uma densidade homogênea para cada operador. No centro, existe uma grande densidade de BSs. Com o intuito de simplificar a análise de primeira ordem, assumem que todas as células têm a mesma cobertura máxima. De forma a minimizar a interferência entre células, quando todas as células estão ativas, algumas estações base podem funcionar com um raio de cobertura inferior ao máximo. Assumem também que as BSs podem aumentar a sua cobertura, quando é necessário. Se todas as estações funcionarem na sua potência máxima (cobertura máxima), existe uma sobreposição redundante significativa na cobertura. Por exemplo, a Fig 2.21 mostra a cobertura de todas as estações quando utilizam um raio de alcance de

700 m. As cores indicam o grau de redundância. No centro da cidade, é possível verificar que existem mais de 50 BSs de diferentes operadoras a sobreporem-se, se funcionarem com o seu raio de cobertura no máximo.

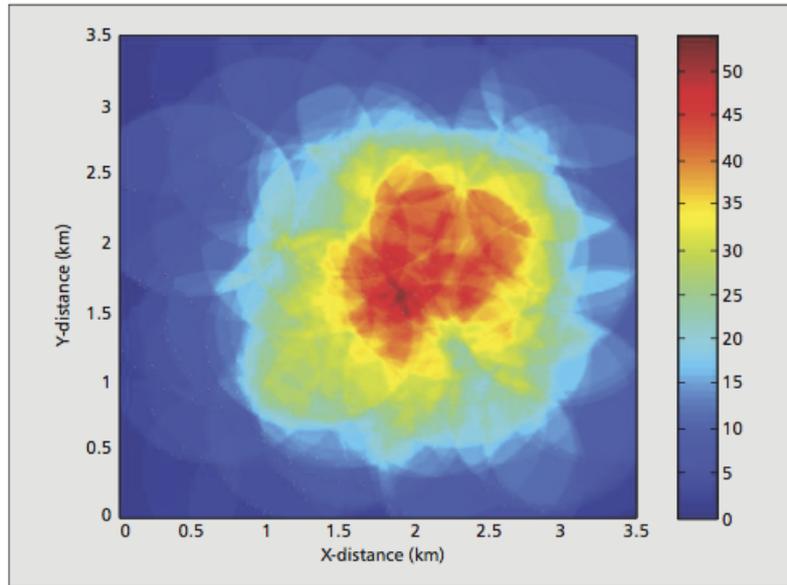


Figura 2.21: Redundância na cobertura das redes celulares numa parte da cidade de Manchester, Reino Unido. Source: [19].

Os autores trataram cada operadora separadamente. Para um raio máximo de cobertura, eles utilizaram um algoritmo 'ganancioso' que tem como objetivo identificar o número mínimo de BSs que é preciso para suportar os utilizadores e que alcance mais de 95% da área abrangida, quando as estações estão todas ativas. Neste algoritmo, eles desligaram sequencialmente as estações base, tendo sempre em consideração que a condição de cobertura não seja violada. Na Fig. 2.22, é possível ver os ganhos energéticos que os investigadores conseguiram atingir. Por exemplo, quando o raio máximo é 700 m, dependendo da operadora, podem ser desligadas entre 25% a 65% das estações, mantendo-se mais de 95% da cobertura original. Também é possível verificar a percentagem de estações que podem ser

desligadas se as operadoras fossem capazes de partilhar os recursos das estações. Como seria de esperar, os ganhos são maiores neste caso.

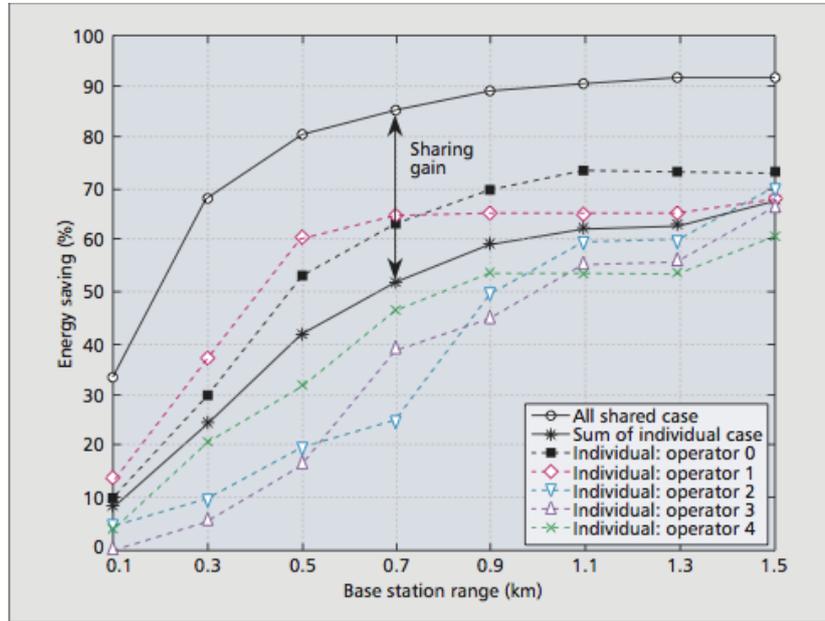


Figura 2.22: Energia economizada durante os tempos de *off-peak* vs o raio de alcance das BSs na área de Manchester. Source: [19].

Os investigadores afirmam que, ao fazer apenas análises temporais e espaciais, as operadoras podem reduzir entre 8% a 22% a energia consumida em áreas urbanas. A partir da partilha dos recursos das estações base, é possível alcançar uma redução de cerca de 29%. Estas percentagens de ganhos energéticos correspondem entre 32 e 60 kWh de energia economizada para uma área de  $12\text{km}^2$  de Manchester (assumindo que as estações base gastam entre 800 e 1500 W). Esta energia corresponde a cerca de \$42,000 a \$78,000 anuais e 200 a 375 *metric tons* de emissões de  $\text{CO}_2$  anuais.

No entanto, os investigadores não explicam como o algoritmo 'ganancioso' funciona. Desta forma, não é possível saber se têm em consideração requisitos de QoS dos clientes e se há a possibilidade de haver clientes novos que não tenham acesso

à rede porque esta se encontra sobrelotada. Contudo, demonstram que é possível alcançar bons resultados apenas verificando o perfil do tráfego a nível temporal e espacial. Dos artigos que foram analisados, são os primeiros a abordar a cooperação entre operadoras. É uma ideia interessante e a que, em teoria, alcança os melhores resultados.

### 2.3.5 Comparação das diferentes Tecnologias

Nesta sub-secção serão comparados os diferentes algoritmos apresentados anteriormente. A comparação será feita através de seis factores: se é uma técnica de *cell zooming*, se utiliza o *sleep mode* das estações base, se faz uma adaptação dinâmica dos recursos da rede, se tem em consideração os requisitos de QoS, se bloqueia utilizadores e, por fim, a eficiência energética que consegue atingir. (Ver Tabela 2.2). Na Tabela 2.3 serão apontadas algumas vantagens e desvantagens de cada solução.

Como é possível ver na Tabela 2.2, todos os algoritmos utilizam o *sleep mode* e fazem uma adaptação dinâmica à rede. Um dos factores que diferencia mais os algoritmos é o cumprimento dos requisitos de QoS. Grande parte dos algoritmos permite ajustar a quantidade de utilizadores bloqueados. Todas as soluções apresentam uma elevada eficiência energética.

Algoritmo	<i>Cell Zooming</i>	<i>Sleep Mode</i>	Adaptação Dinâmica	Requisitos de QoS	Bloqueia Utilizadores	Eficiência Energética
Algoritmo Centralizado [14]	Sim.	Sim.	Sim.	Sim.	Sim. Possível ajustar.	Elevada.
Algoritmo Distribuído [14]	Sim.	Sim.	Sim.	Sim.	Sim. Possível ajustar.	Elevada, mas inferior ao Centralizado. (Fig. 2.10)
Algoritmo Centralizado [16]	Sim.	Sim.	Sim.	Sim.	Sim. Possível ajustar.	Elevada.
Algoritmo Descentralizado [16]	Sim.	Sim.	Sim.	Sim.	Sim. Possível ajustar.	Elevada, mas inferior ao Centralizado. (Fig. 2.12)
Continuous Cell Zooming [18]	Sim.	Sim.	Sim.	N/A.	Sim.	Elevada.
Discrete Cell Zooming [18]	Sim.	Sim.	Sim.	N/A.	Sim.	Elevada, mas menor que o <i>Continuous</i> .
Fuzzy Cell Zooming [18]	Sim.	Sim.	Sim.	N/A.	Sim. Possível ajustar.	Elevada, mas menor que o <i>Continuous</i> e maior que o <i>discrete</i> (Fig. 2.17).
Algoritmo 'Ganancioso' [19]	Sim.	Sim.	Sim.	N/A.	N/A.	Elevada. (Fig. 2.22)

Tabela 2.2: Comparação dos diferentes algoritmos.

Algoritmo	Vantagens	Desvantagens
Algoritmo Centralizado [14]	Flexível: possível ajustar a energia consumida e a probabilidade de utilizadores bloqueados. Mais eficiente que o distribuído.	Introduzir algum overhead na comunicação devido à sinalização. Necessita de coordenação.
Algoritmo Distribuído [14]	Flexível: possível ajustar a energia consumida e a probabilidade de utilizadores bloqueados. Não necessita de coordenação. Menor sinalização.	Menos eficiente que o centralizado.
Algoritmo Centralizado [16]	Mais eficiente que o descentralizado. É possível ajustar a probabilidade dos utilizadores serem bloqueados à rede.	<i>Overhead</i> na informação. Todas as BSs precisam de estar ativos quando o algoritmo é executado. Não suporta <i>relay</i> e cooperação entre BSs.
Algoritmo Descentralizado [16]	É possível ajustar a probabilidade dos utilizadores serem bloqueados à rede. Reduz a informação extra introduzida pelo centralizado.	Menos eficiente que o Centralizado. Função utilitária necessita de refinamento. Todas as BSs precisam de estar ativos quando o algoritmo é executado. Não suporta <i>relay</i> e cooperação entre BSs.
Continuous Cell Zooming [18]	Mais eficiente comparada com as outras duas.	Implementação difícil devido à grande mobilidade dos utilizadores. Necessita requisitos de feedback bastante rigorosos. Só precisam de comunicar quando atravessam para uma zona de raio superior.
Discrete Cell Zooming [18]	Reduz os requisitos de feedback da localização dos utilizadores.	Maior complexidade nos feedbacks.
Fuzzy Cell Zooming [18]	Funciona melhor que o <i>discrete</i> , porque não muda para a zona de nível superior.	O SINR recebido é inferior.
Algoritmo 'Ganancioso' [19]	Introduzem a noção de cooperação entre operadores. Desta forma, o ganho energético é superior. Demonstram que é possível alcançar bons resultados apenas verificando o perfil do tráfego a nível temporal e espacial.	Não explicam como o algoritmo funciona. Não é possível saber se têm em consideração requisitos de QoS e como tratam a entrada de novos clientes na rede.

Tabela 2.3: Vantagens e desvantagens dos diferentes algoritmos.

## 2.4 Conclusão

Neste capítulo, foi descrita a actualidade do consumo energético nas redes. Foram apresentados alguns dos conceitos fundamentais de redes de baixo-consumo. Descreveu-se o conceito de *cell zooming*, assim como os seus benefícios e desafios. De seguida, foram analisados três artigos que apresentam oito algoritmos e/ou técnicas de *cell zooming*. Todos eles conseguem obter ganhos energéticos superiores a 20%. No entanto, como não há testes/simulações standard é difícil ter a certeza que a sua implementação numa rede real será bem sucedida. Cada artigo apresenta simulações diferentes e avalia a energia consumida pelas estações base de forma diferente. Este é outro dos maiores problemas que os investigadores encontram que é saber a quantidade exata de energia que uma estação base consome. Por outro lado, para atingir os ganhos energéticos, há uma degradação dos parâmetros do QoS. Um bom algoritmo terá que ser capaz de tornar essa degradação desprezível.

# Capítulo 3

## Solução Proposta

### 3.1 Introdução

Um dos aspectos mais importantes do *cell zooming* é a configuração das células nas quais vai ser aplicado o algoritmo.

A configuração das células varia na quantidade e disposição das mesmas, complexidade dos cálculos que determinam quando aumentar, diminuir ou desligar as células e eficiência energética.

Algumas das configurações utilizadas são:

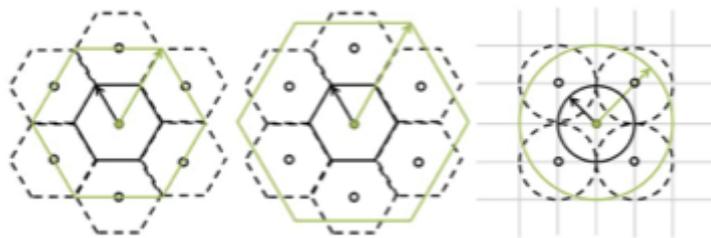


Figura 3.1: Configuração em hexágono e *crossroad*. Source: [21].

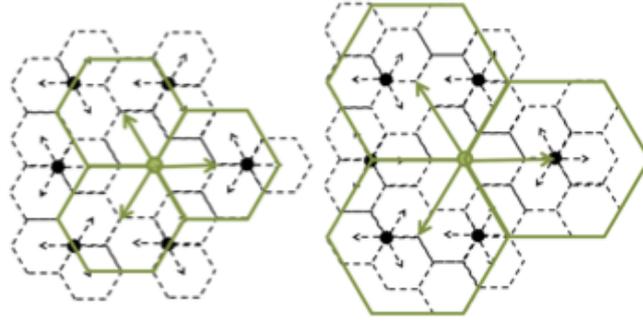


Figura 3.2: Configuração em hexágono tri-sectorial: 3 células desligadas em 4 ou 8 em 9. Source: [21].

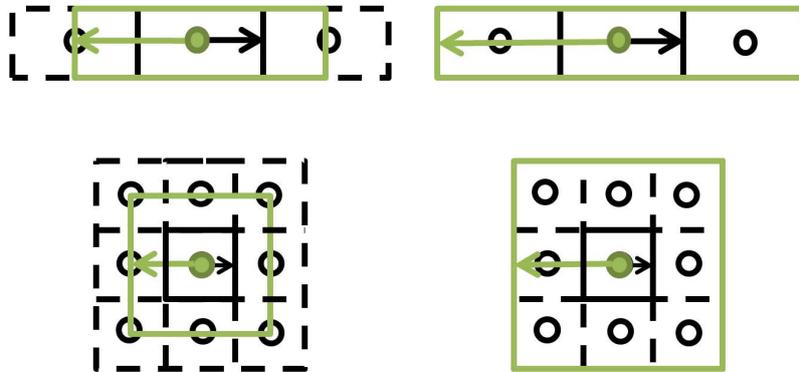


Figura 3.3: Configurações de Manhattan: linear (cima) e quadrada (baixo). Source: [21].

No lado esquerdo da Figura 3.1, temos a configuração hexagonal com antenas omnidirecionais que é composta por 7 células. Durante a noite, podem ser consideradas duas possibilidades:

- A célula central fica encarregue do tráfego das células vizinhas e estas são desligadas, conseguindo assim desligar 6 em 7.
- A célula central apenas cobre metade do raio das células vizinhas, enquanto que o resto é coberto por outra célula. Neste caso, desligam-se 3 células em 4.

Ainda na Figura 3.1, temos a configuração em *crossroad* que é composta por

5 células com antenas omnidirecionais, sendo umas das mais utilizadas em cenários urbanos. Durante o período noturno, podem ser desligadas 4 das 5 células, mantendo-se apenas a central a funcionar. Esta configuração é também dada como exemplo no artigo [14].

A configuração hexagonal pode ser constituída por antenas tri-sectoriais (Figura 3.2). Neste caso, durante a noite, a célula central aumenta a sua área de cobertura, de modo a cobrir o equivalente a 4 ou 9 células. Este cenário tem como resultado desligar 3 células em 4 ou 8 em 9.

Por fim, temos a configuração de Manhattan (Figura 3.3), onde as células formam uma estrutura em rede (*grid*). Esta também é bastante utilizada em cenários urbanos. São permitidos vários esquemas, dependendo de se a célula é aumentada ao longo de uma linha ou de um modo omnidirecional. Para o caso linear (os dois casos superiores), é possível desligar 1 em 2 células (Manhattan (1,2)) ou 2 em 3 (Manhattan (2,3)). No caso omnidirecional, é possível desligar 3 em 4 ou 8 em 9.

Das diferentes configurações, as menos complexas são: Manhattan (2,3) e *crossroad*. Analisando o estudo feito em [21] é possível verificar que, apesar de serem as menos complexas, conseguem obter ganhos energéticos na ordem dos 30%. Em particular, a configuração em *crossroad* é a mais eficiente.

## 3.2 Configuração das células

Como foi dito anteriormente, a configuração das células será a *crossroad*. Os ganhos energéticos desta configuração encontram-se nos períodos de tráfego reduzido, pois é possível ter apenas uma célula a fazer o trabalho de cinco. Se estes momentos forem bem aproveitados pelo algoritmo, é possível alcançar uma eficiência energética boa, sem colocar em causa a qualidade do serviço, uma vez que o

número de utilizadores e o tráfego que se encontra na rede é bastante reduzido.

Esta configuração pode operar em 3 modos distintos:

1. Em caso de pico, as cinco células estão ligadas e cada uma trata da sua área (Figura 3.4);
2. No caso intermédio, é possível desligar a célula central e aumentar a área de cobertura de alguma(s) da(s) vizinha(s) ou até de todas, dependendo do estado de cada uma delas. Posto isto, é desligada 1 em 5 células. (Figura 3.5). No entanto, o NS-3 ainda não permite que se aumente apenas uma das células, pois cria uma enorme interferência no alcance das restantes, influenciando negativamente a escolha das células no handover dos dispositivos. Desta forma, o algoritmo apenas funcionará no caso em que as 4 células aumentam o tamanho na mesma proporção.
3. Em momentos em que o tráfego é reduzido, a célula central trata do tráfego das 4 células vizinhas. Desta forma, são desligadas 4 das 5 células. (Figura 3.6)

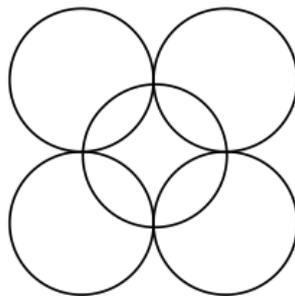


Figura 3.4: Configuração *crossroad*: 5 células ativas. Modo 1.

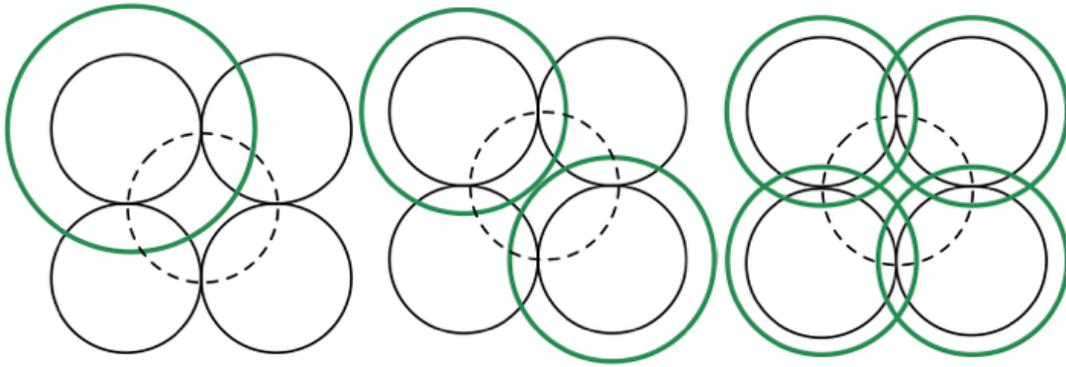


Figura 3.5: Configuração *crossroad*: 4 células ativas. Aumento do raio de 1, 2 ou 4 células. No algoritmo apenas é utilizado o caso mais à direita, em que se aumenta o raio na mesma proporção às 4 células. Modo 2.

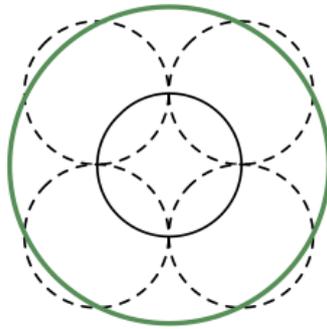


Figura 3.6: Configuração *crossroad*: 1 célula ativa. Modo 3.

Os modos são dependentes uns dos outros, ou seja, se estivermos no modo  $X$  só podemos passar para o  $X-1$  ou  $X+1$ . Desta forma, temos de ter em consideração quatro passagens entre os diferentes modos:

- Modo 1 para 2: verificar a quantidade de utilizadores que estão na célula central. Se esse valor for superior ao limite permitido, as células vizinhas aumentam o raio de alcance e a célula central é colocada em *sleep mode*.
- Modo 2 para 3: esta passagem será utilizada durante os períodos em que o volume de utilizadores é reduzido. Como no modo 2 só estão quatro células ativas, só precisamos de verificar se a quantidade de utilizadores que estão

nessas células pode ser suportada apenas pela célula central. As células vizinhas são desligadas e a central aumenta o seu raio para 400 metros.

- Modo 3 para 2: este é o caso inverso ao anterior, desliga-se a célula central e ativa-se as vizinhas com raio de 285 metros.
- Modo 2 para 1: esta transição é direta, pois este é o modo que permite suportar os momentos de pico. Verifica o número de utilizadores nas células e vizinhas e, assim que alguma delas ultrapassar o limite, liga-se a célula central e configura-se o raio de todas as células para 200 metros.

Como os perfis de tráfego só apresentam um número crescente de utilizadores durante a simulação, porque o NS-3 não permite remover utilizadores durante a simulação, apenas se fazem passagens do Modo 3 para 2 ou Modo 2 para 1.

O algoritmo será centralizado e serão ainda testados dois tipos de funcionamento do algoritmo:

- Intervalos-Temporais: o algoritmo será executados de  $x$  em  $x$  minutos, tal como tinha sido descrito na sub-seção 2.2.4. É importante também salientar que será dada uma margem de proteção  $\alpha$  (*threshold*) na capacidade das células de modo a suportarem a chegada de novos utilizadores, evitando assim que algum deles seja bloqueado. Na nossa simulação, o algoritmo será executado de 20 em 20 minutos.
- Tempo-Real: o algoritmo verificará o estado da rede cada vez que um utilizador novo se liga ou desliga da rede e quando um utilizador faz o *handover* entre células.

O funcionamento Tempo-Real é o mais eficiente a nível energético, pois adapta a rede em tempo real, mas é também o mais exigente ao nível computacional. O Intervalos-Temporais é mais versátil, visto que o valor de  $x$  pode ser alterado,

podendo até ter o desempenho do iterativo quando o valor de  $x$  tende para 0. Deste modo, serão apresentados os resultados para ambos os modos, mas o Tempo-Real só será utilizado como comparação, pois a sua implementação sobrecarrega a rede e as estações em demasia.

### 3.3 Perfis de Tráfego e Utilizadores

Não foi possível encontrar informação sobre a variação da quantidade de utilizadores das redes 4G. Desta forma, procurou-se encontrar informações sobre a variação do volume de tráfego ou da percentagem de utilização da rede e, supondo que cada utilizador gasta, em média, o mesmo volume de tráfego ou a mesma percentagem da rede, é possível obter uma aproximação da variação dos utilizadores na rede. Sendo assim, iremos testar o algoritmo em 5 perfis diferentes.

O primeiro perfil é da TeliaSonera que tem os diferentes volumes para os diferentes tipos de tráfego, mas só iremos ter em consideração o volume total.

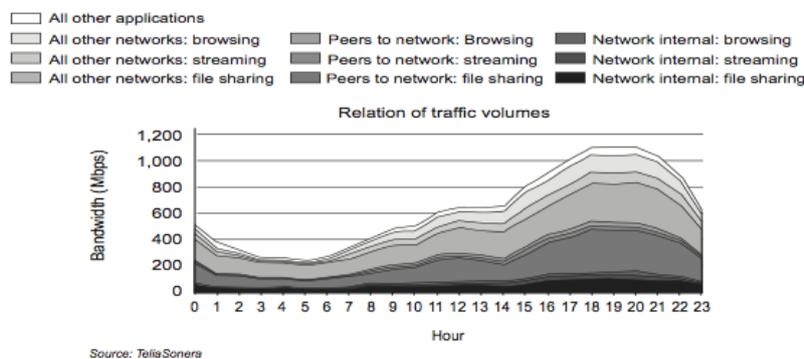


Figura 3.7: TeliaSonera, traffic mix durante o dia. Source: [22].

De seguida, o segundo tem como fonte o Projeto EARTH.

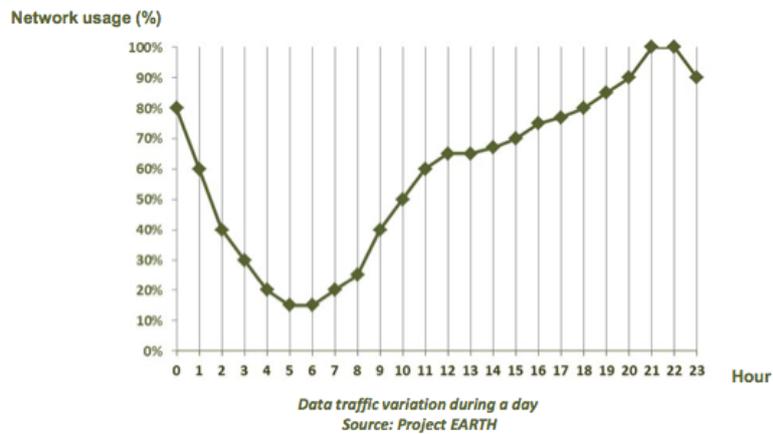


Figura 3.8: Variação do tráfego durante o dia. Source: [23].

O terceiro tem origem no Reino Unido, mais propriamente nas imediações da Catedral de São Paulo em Londres.

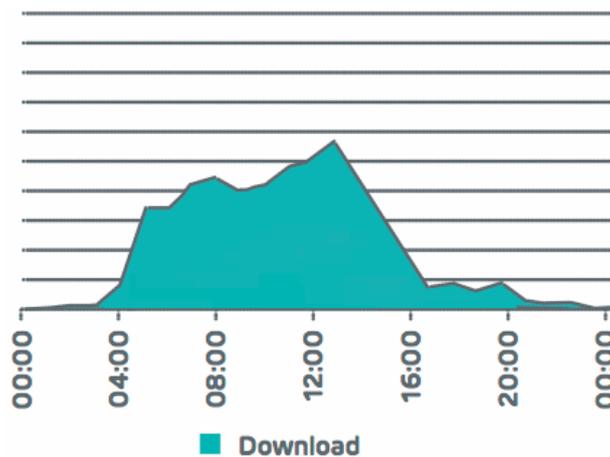


Figura 3.9: Volume total de dados nas imediações da Catedral São Paulo em Londres. Source: [24].

Por fim, o quarto e quinto perfil são de dois operadores móveis de países e tecnologias diferentes: M1 e M2. Para além disso, as tecnologias e estações base usadas por M2 são mais modernas que M1.

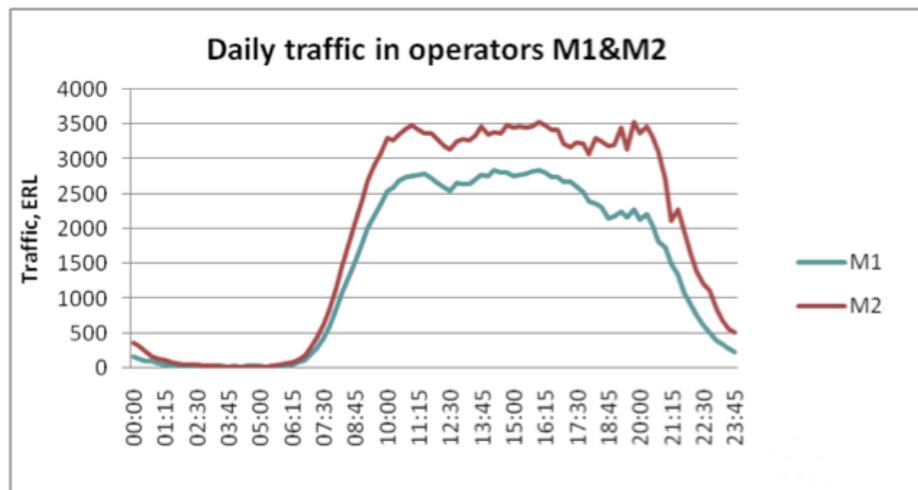


Figura 3.10: Perfis de tráfego diários (Segunda). Source: [25]

Desta forma, a variação do número de utilizadores durante o dia que foi derivada dos gráficos anteriores é:

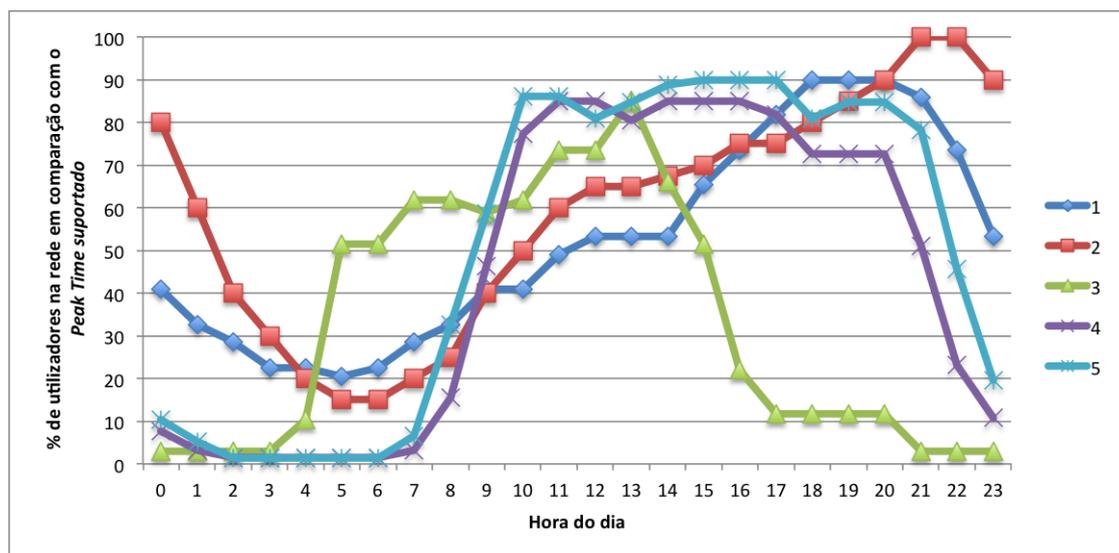


Figura 3.11: Comparação entre os diferentes perfis de tráfego.

De momento, o NS-3 não permite remover utilizadores da simulação e, por isso, só serão utilizadas as porções temporais em que o tráfego está a aumentar. É também importante salientar que foram feitos pequenos ajustes aos valores utiliza-

dos, pois, como disse anteriormente, não é possível remover utilizadores durante a simulação. Estes ajustes não alteram em nada o desempenho do algoritmo. Desta forma, não têm qualquer impacto para melhor na eficiência energética obtida, apenas têm como intuito não parar a simulação.

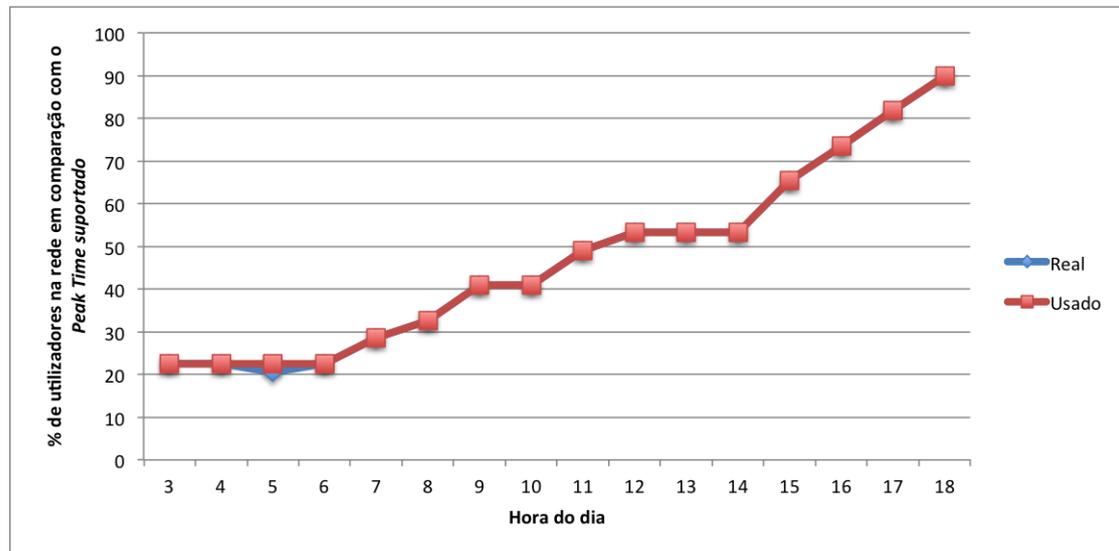


Figura 3.12: Comparação entre os valores reais e os valores utilizados na simulação do Tráfego 1.

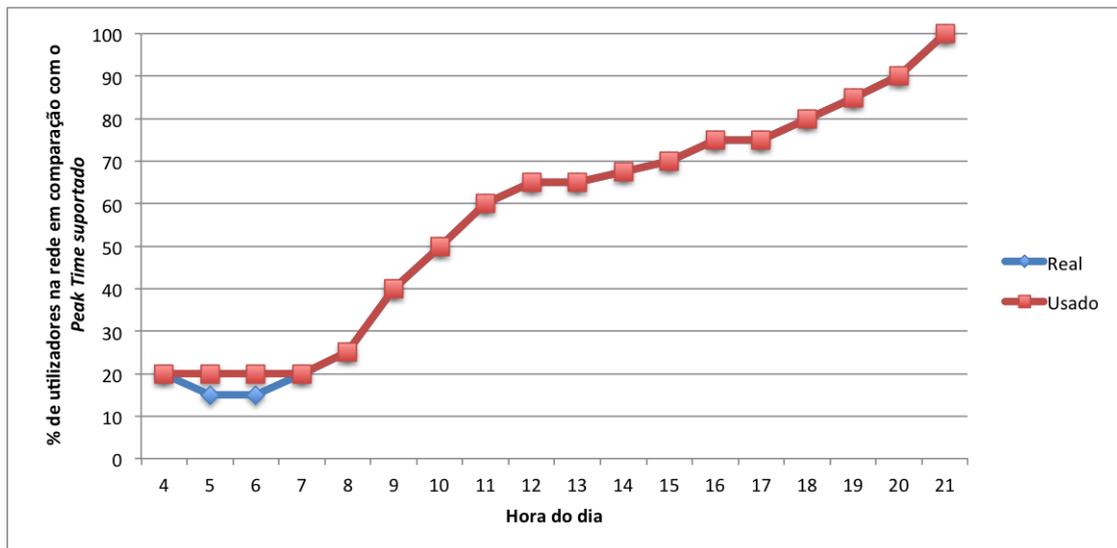


Figura 3.13: Comparação entre os valores reais e os valores utilizados na simulação do Tráfego 2.

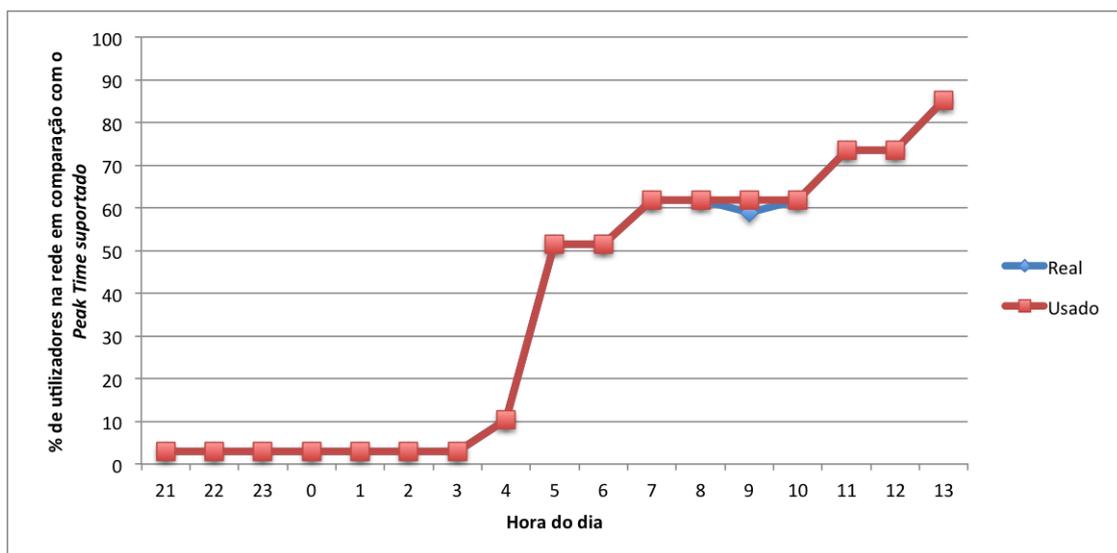


Figura 3.14: Comparação entre os valores reais e os valores utilizados na simulação do Tráfego 3.

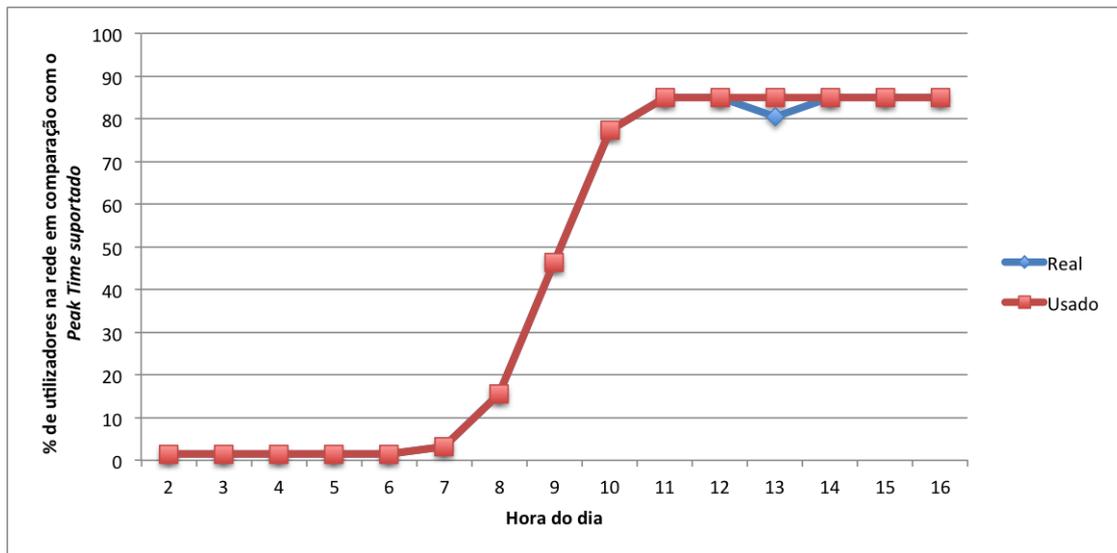


Figura 3.15: Comparação entre os valores reais e os valores utilizados na simulação do Tráfego 4.

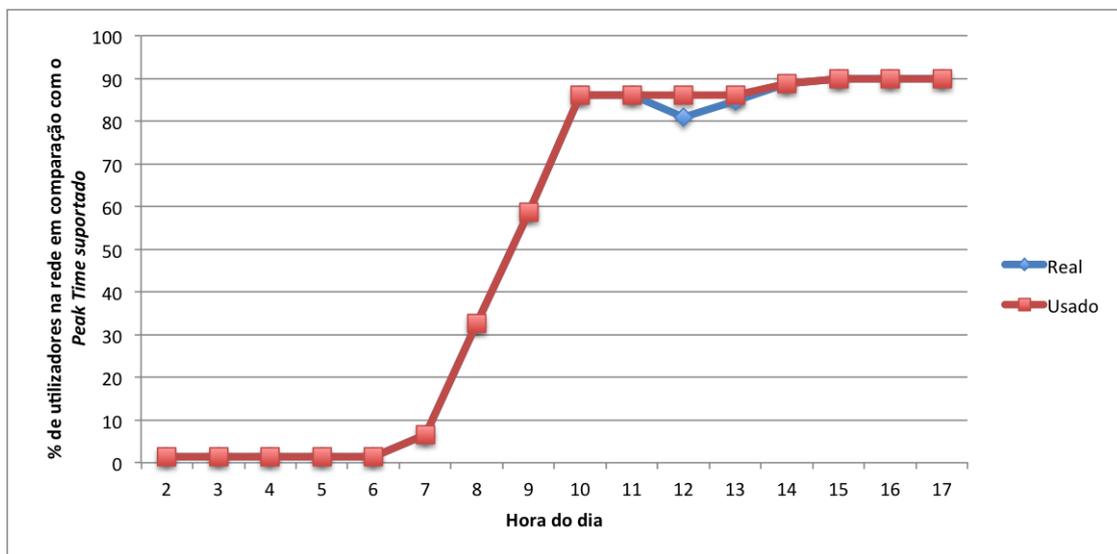


Figura 3.16: Comparação entre os valores reais e os valores utilizados na simulação do Tráfego 5.

## 3.4 Modelo de Consumo de Energia

A energia consumida pelas estações base é um dos assuntos que gera mais discordância. Há diferentes opiniões e não há ainda um modelo que seja utilizado como standard.

Em [14], os investigadores assumem que a energia consumida pelos BSs é de 400W no modo ativo e 10W em *sleep mode*. Independentemente da área alcançada pela estação base, é assumido que esta gasta sempre 400W.

Em [16], os autores dizem que quando a cobertura não é limitada pelo *transmit power* (potência de transmissão da antena, quando aumentado, a área da célula é maior), os utilizadores que estão na área da célula que se encontra a "dormir", podem ser servidos pelas restantes células. Para além disso, afirmam que aumentar o poder de transmissão da antena tem um aumento negligenciável no total de energia consumida pela estação. Por outro lado, afirmam também que quando as estações base estão em *standby*, a energia consumida por estas é negligenciável.

Em [21], os investigadores quando desligam algumas células, assumem que a cobertura e o provisionamento do serviço podem ser suportados pelas células que permanecem ativas. Isto só é possível com um pequeno aumento da potência emitida pela antena. Numa investigação anterior, eles já tinham mostrado que nos casos em que tiveram que aumentar a potência, o aumento era negligenciável (poucos *watts*) em comparação com o total da energia consumida.

Desta forma, será assumido que, independentemente da área que as células estão a servir, a energia consumida pelas estações, quando estas se encontram ativas, é sempre a mesma. Por outro lado, quando estas estão em *standby*, será assumido que a energia consumida é negligenciável. É importante salientar que quando é aumentada a área de funcionamento das estações base, o número de utilizadores que esta suporta é diminuído. Sendo assim, no modo 1, não há eficiência energética. No modo 2, como apenas estão em funcionamento 4 células, alcançamos

uma eficiência energética de 20%. Por fim, o modo 3 é onde se alcança uma maior eficiência energética: 80%.

# Capítulo 4

## Experiências e Resultados

### 4.1 Introdução

Neste capítulo, serão apresentados os dados da simulação, assim como os diferentes valores utilizados na mesma. Para além disso, serão apresentados e analisados todos os resultados obtidos.

### 4.2 Simulação

Como já foi dito anteriormente, o simulador utilizado foi o NS-3. Foram testados todos os perfis de tráfego em ambos os modos e o número máximo de utilizadores no *peak time* é de 500. Para além disso, testaram-se dois tipos de capacidades para as células:

- 60/75: Capacidade máxima da célula central no modo 3 de 60 utilizadores e capacidades das células vizinhas no modo 2 de 75. Sendo assim, no modo 3, a célula central pode suportar até 12% dos utilizadores da área em *peak time*. No modo 2, as células vizinhas podem suportar até 60%.

- 50/75: Capacidade máxima da célula central no modo 3 de 50 utilizadores e capacidades das células vizinhas no modo 2 de 75. Sendo assim, no modo 3, a célula central pode suportar até 10% dos utilizadores da área em *peak time*. No modo 2, as células vizinhas podem suportar até 60%.
- Não foram medidos quaisquer valores de QoS, pois assumimos que o número de utilizadores suportados pelas estações base permitem alcançar os valores mínimos de QoS.

<i>BS bandwidth</i>	20 MHz
Número máximo de utilizadores no peak-time	500
Raio de alcance da célula central no Modo 3	400 metros
Raio de alcance das células vizinhas no Modo 2	285 metros
Raio de alcance das células no Modo 1	200 metros
Número de utilizadores suportado pela célula central no Modo 3	60/75 - 60 utilizadores 50/75 - 50 utilizadores
Número de utilizadores suportado pelas células vizinhas no Modo 2	75 utilizadores por célula nos 2 tipos
Número de utilizadores suportado pelas células no Modo 3	100 utilizadores por célula nos 2 tipos
Distribuição dos utilizadores	ns3::UniformDiscPositionAllocator
Movimentação dos utilizadores	ns3::RandomWalk2dMobilityModel
<i>Path Loss Model</i>	ns3::FriisPropagationLossModel
Algoritmo de <i>handover</i>	ns3::A2A4RsrqHandoverAlgorithm
Tipo de Antena das células e dos dispositivos móveis	ns3::IsotropicAntennaModel

Tabela 4.1: Parâmetros da Simulação.

## 4.3 Resultados Obtidos

### 4.3.1 Modo Tempo-Real

Como este modo verifica o estado da rede em tempo real, os gráficos apresentados demonstram o tempo em que os diferentes modos estão em funcionamento, assim como os instantes de tempo que eles são activados.

60/75

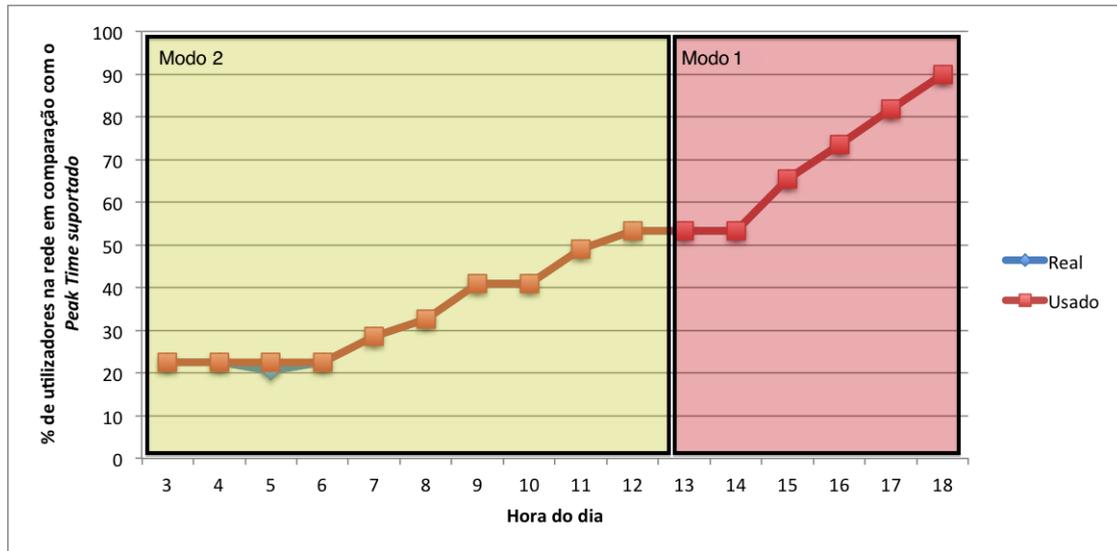


Figura 4.1: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 1.

Como é possível ver no gráfico anterior, o modo 3 nunca é ativado, pois o número de utilizadores mesmo nos tempos de volume de tráfego reduzido não o permite. O modo 2 consegue estar activo até por volta das 12:40.

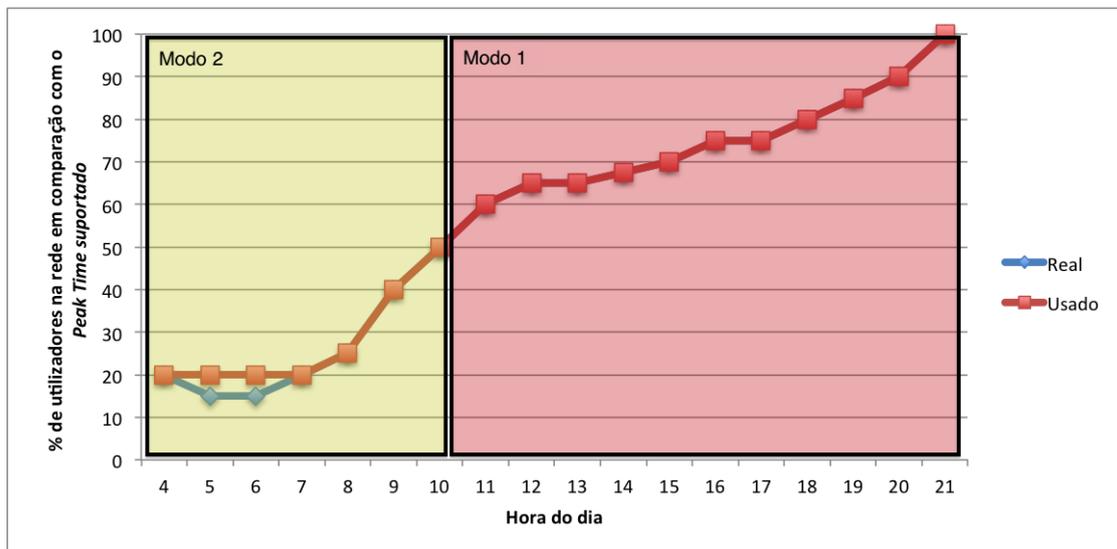


Figura 4.2: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 2.

Como no caso anterior, não é possível activar o modo 3. Neste perfil, o modo 2 é activado pouco depois das 10 horas, uma vez que o número de utilizadores ultrapassa os 50% em comparação com o *peak time* mais cedo que o anterior.

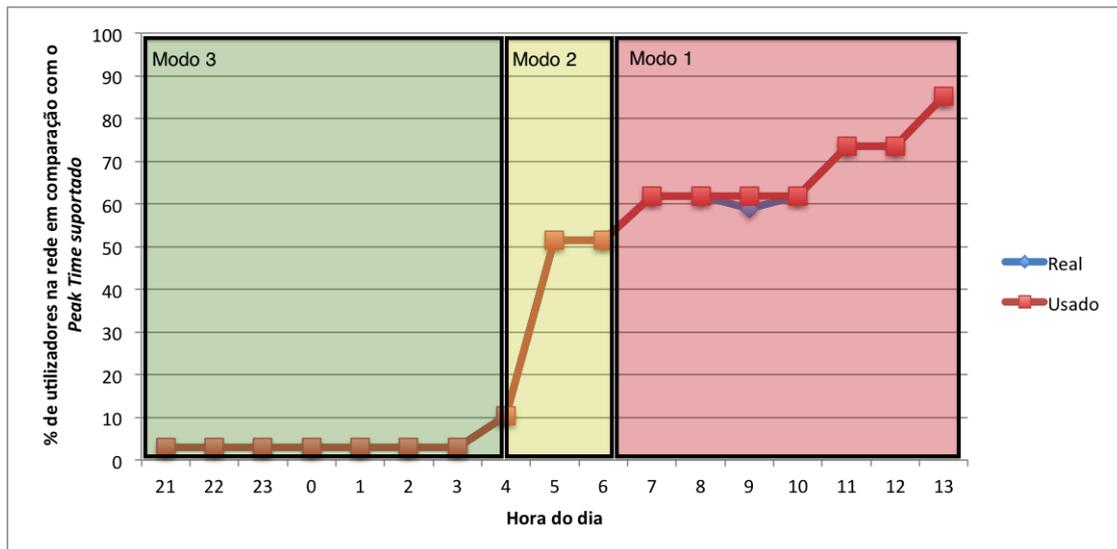


Figura 4.3: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 3.

Este perfil apresenta uma quantidade de utilizadores muito reduzida das 21 até às 4, permitindo activar o modo 3 durante esse intervalo de tempo. No entanto, há um grande aumento de utilizadores entre as 4 e as 6, fazendo com que o modo 2 só esteja activo durante, aproximadamente, 2 horas.

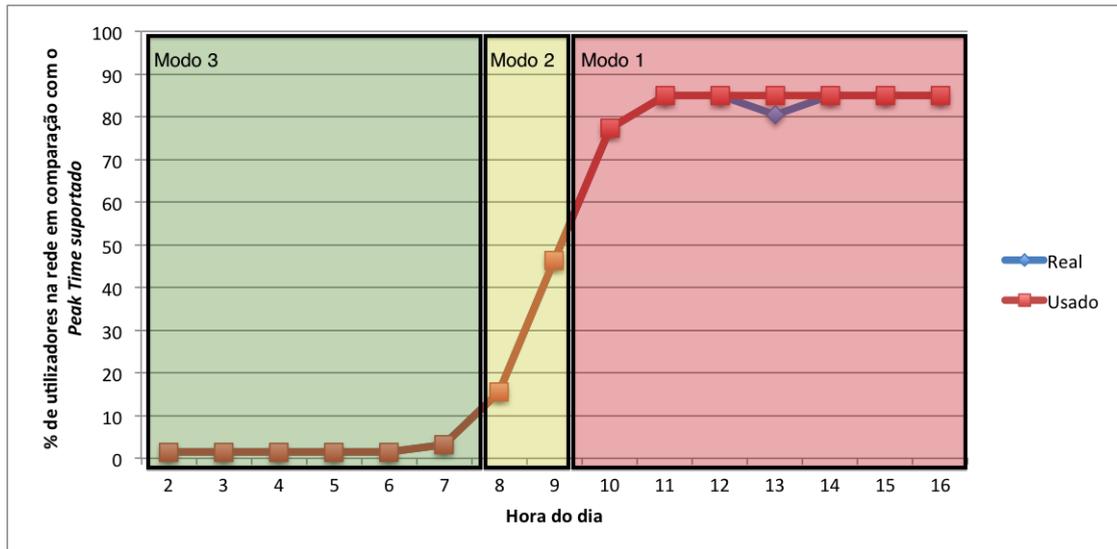


Figura 4.4: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 4.

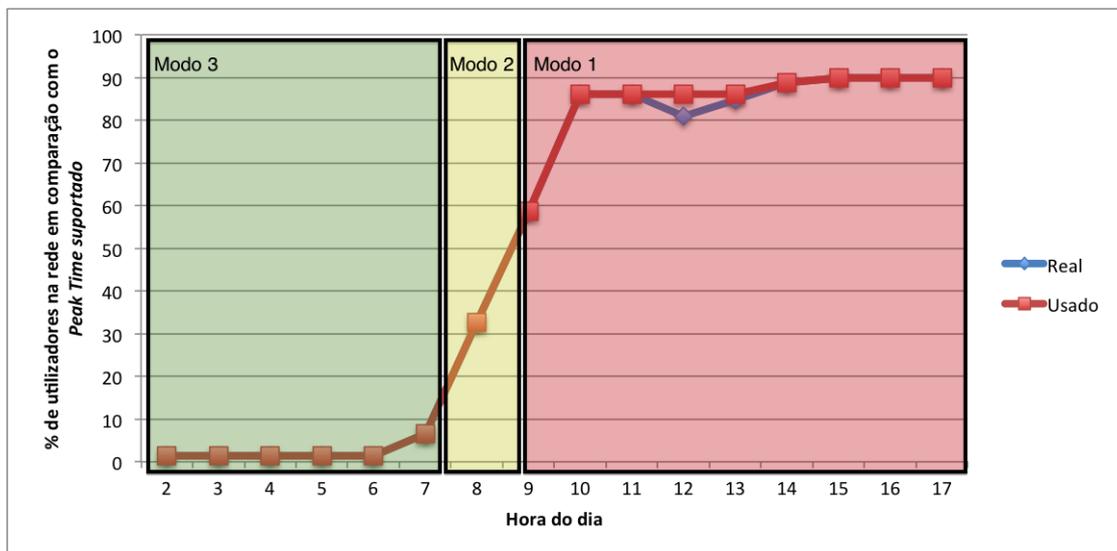


Figura 4.5: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 5.

Os gráficos anteriores são muito idênticos, pois os perfis temporais são muito parecidos entre si. Na Figura 4.4, o modo 3 funciona das 2 até perto das 8 horas. Enquanto que na Figura 4.5, o modo 3 só está activo até pouco depois das 7. Em

ambos os casos, o modo 2 funciona cerca de 1 hora e meia.

Perfil de Tráfego	Tempo no Modo 1	Tempo no Modo 2	Tempo no Modo 3	Eficiência Energética
1	18362	35638	0	13.199
2	39270.500	21929.500	0	7.170
3	23983	8286.700	25330.300	38.058
4	24213	5718.700	20468.300	34.759
5	29658.320	5253.680	19088	30.224

Tabela 4.2: Tempo em segundos dos diferentes perfis nos diferentes modos e eficiência energética em %.

Nesta tabela, é possível ver o tempo de funcionamento em segundos de cada modo e a respectiva eficiência energética nos diferentes perfis de tráfego. Como seria de esperar, os perfis que não activam o modo 3 são os que têm uma eficiência energética menor.

50/75



Figura 4.6: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 1.

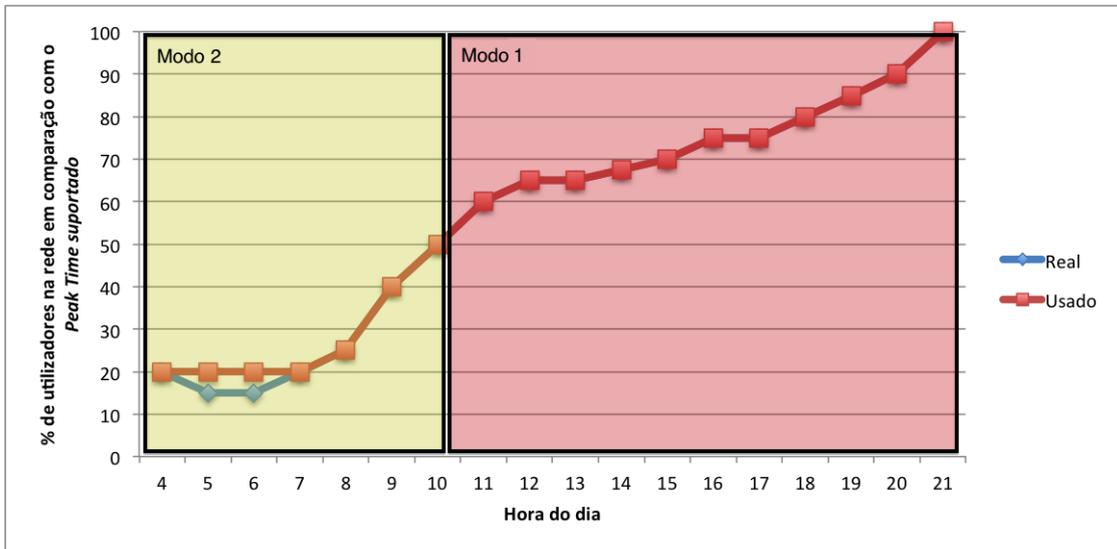


Figura 4.7: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 2.

Mais uma vez, como é possível ver na Figura 4.6 e 4.7 ambos os perfis não permitem activar o modo 3.

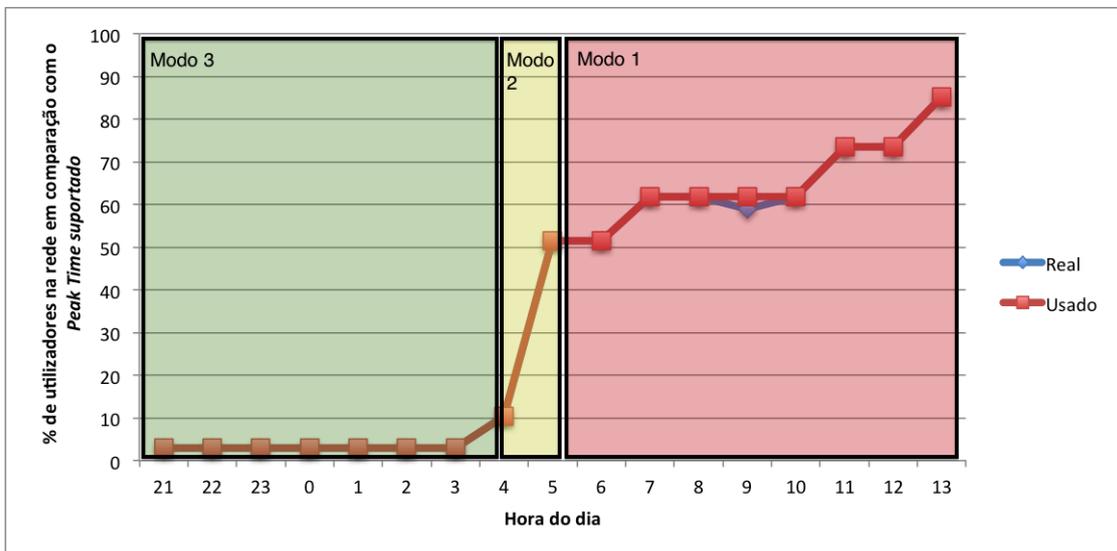


Figura 4.8: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 3.

O modo 3 funciona aproximadamente 7 horas e o modo 2 pouco mais de 1.

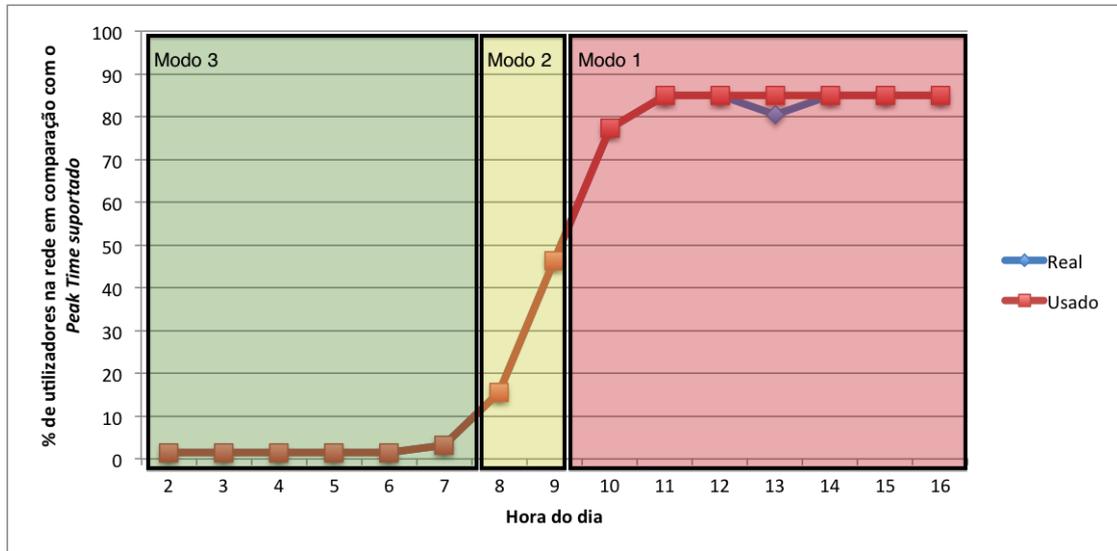


Figura 4.9: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 4.

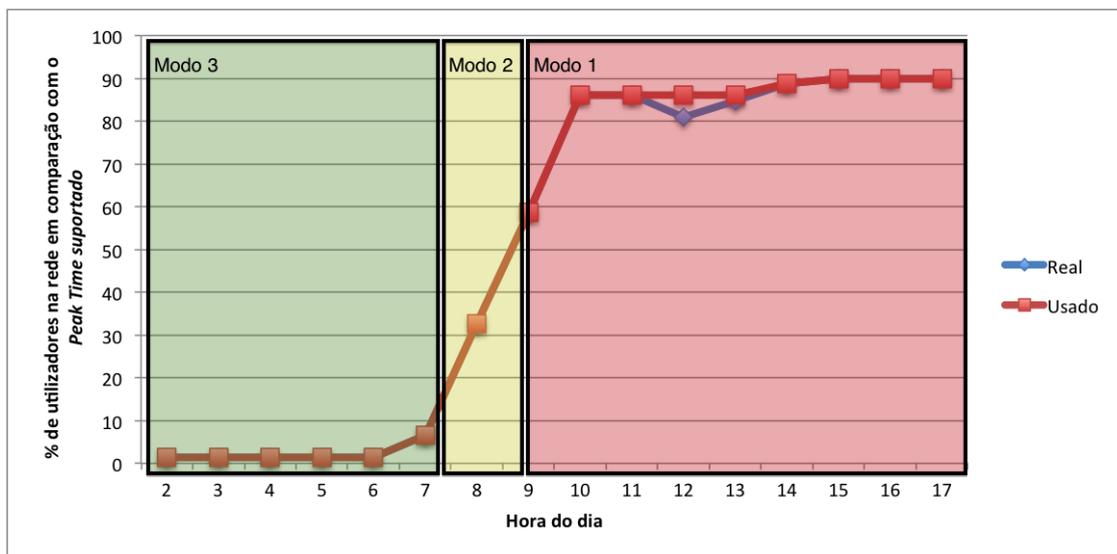


Figura 4.10: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 5.

Como já foi dito anteriormente, tanto o perfil de tráfego 4 como o 5 são muito idêntico. Como consequência disso, os gráficos também são muito parecidos. Na

Figura 4.9, o modo 3 está activo até as 7:30. Enquanto que na Figura 4.10, só está até às 7.

Perfil de Tráfego	Tempo no Modo 1	Tempo no Modo 2	Tempo no Modo 3	Eficiência Energética
1	22873	31127	0	11.530
2	39270.500	21929.500	0	7.170
3	28297	4179	25124	36.345
4	24528	5642	20230	34.350
5	29772	5384	18844	29.911

Tabela 4.3: Tempo em segundos dos diferentes perfis nos diferentes modos e eficiência energética em %.

Como já foi referido na análise à tabela 4.2, os perfis que não permitem que o modo 3 seja activado têm uma eficiência energética menor. O perfil 3 é o que permite atingir uma eficiência energética maior.

### 4.3.2 Modo Intervalos-Temporais

Uma vez que este modo verifica a rede de 20 em 20 minutos, como já foi dito anteriormente, foi necessário dar uma proteção (*threshold* à capacidade das células de forma a não ter utilizadores bloqueados. Serão apresentados os diferentes *thresholds* simulados nos diferentes perfis de tráfego.

#### 60/75

<i>Threshold</i>	Bloqueados	Tempo no Modo 1	Tempo no Modo 2	Tempo no Modo 3	Eficiência Energética
5	0	22800	31200	0	11.560

Tabela 4.4: Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e *threshold* em % para o Tráfego 1.



Figura 4.11: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 1 com o *threshold* de 5%.

<i>Threshold</i>	Bloqueados	Tempo no Modo 1	Tempo no Modo 2	Tempo no Modo 3	Eficiência Energética
5	0	39600	21600	0	7.060

Tabela 4.5: Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e *threshold* em % para o Tráfego 2 .

Como é possível ver na tabela 4.4 e 4.5, ambos os perfis só necessitam de um *threshold* de 5% para não haver qualquer utilizador bloqueado.

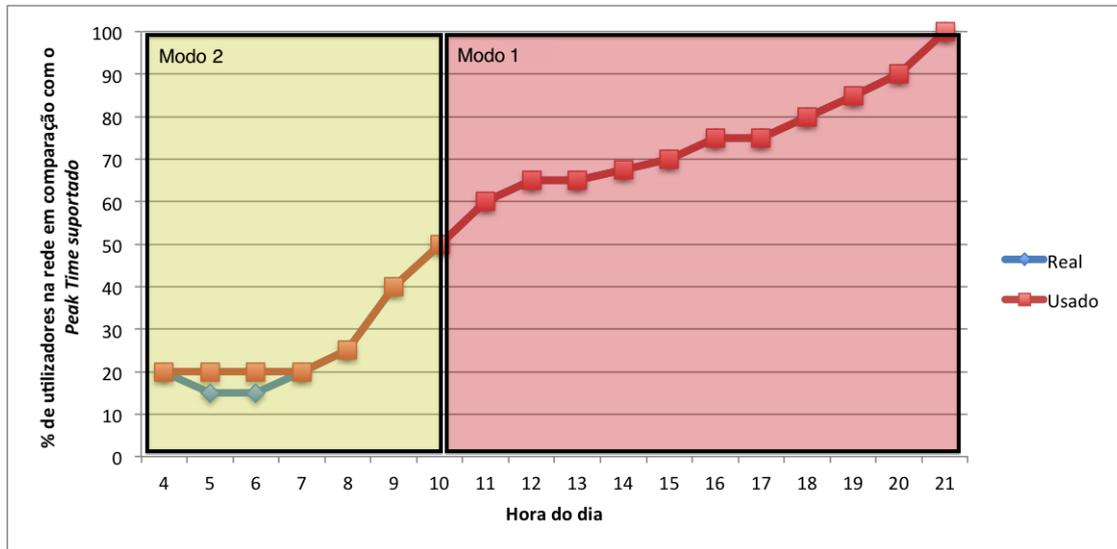


Figura 4.12: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 2 com o *threshold* de 5%.

<i>Threshold</i>	Bloqueados	Tempo no Modo 1	Tempo no Modo 2	Tempo no Modo 3	Eficiência Energética
10	53	33600	8400	8400	37.500
13	53	33600	8400	8400	37.500
15	0	28800	3600	25200	36.250

Tabela 4.6: Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e *threshold* em % para o Tráfego 3.

Este perfil já necessita de um *threshold* de 15%, apesar da eficiência energética ser mais reduzida nesta percentagem, a diferença não é significativa o suficiente para permitir que 53 utilizadores sejam bloqueados.

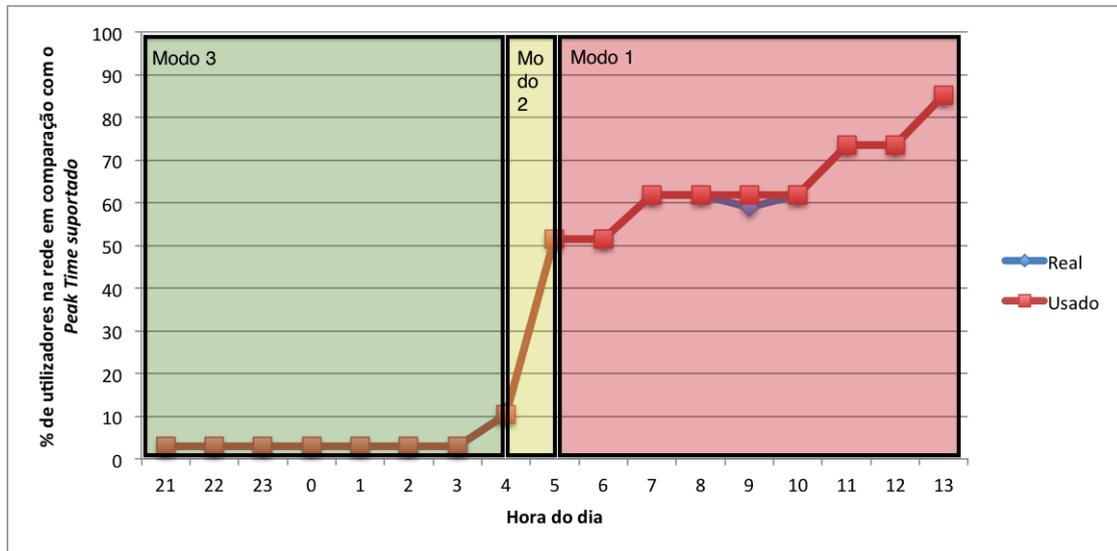


Figura 4.13: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 3 com o *threshold* de 15%.

<i>Threshold</i>	Bloqueados	Tempo no Modo 1	Tempo no Modo 2	Tempo no Modo 3	Eficiência Energética
10	14	24000	6000	20400	34.762
13	14	24000	6000	20400	34.762
15	0	25200	4800	20400	34.286

Tabela 4.7: Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e *threshold* em % para o Tráfego 4.

Tal como no perfil anterior, o *threshold* é de 15% e a diferença de eficiência também não é grande o suficiente para bloquear 14 utilizadores.

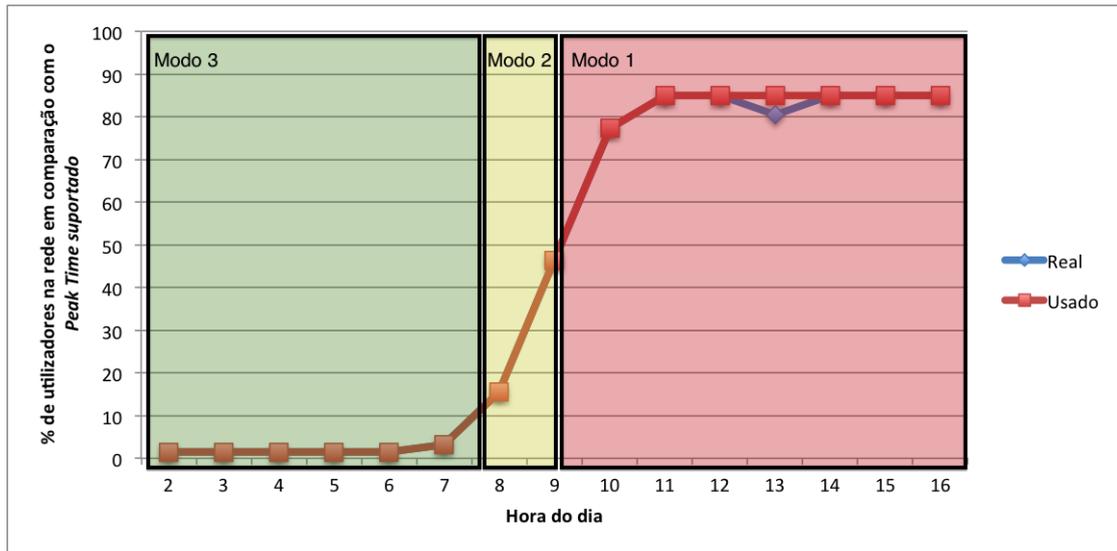


Figura 4.14: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 4 com o *threshold* de 15%.

<i>Threshold</i>	Bloqueados	Tempo no Modo 1	Tempo no Modo 2	Tempo no Modo 3	Eficiência Energética
10	4	30000	4800	19200	30.855
40	4	30000	4800	19200	30.855
45	0	32400	3600	18000	28.000

Tabela 4.8: Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e *threshold* em % para o Tráfego 5.

Este é o perfil que necessita de uma maior proteção: 45%. No entanto, é possível ter uma eficiência energética superior em 2.855% se a operadora não se importar que 4 utilizadores sejam bloqueados.

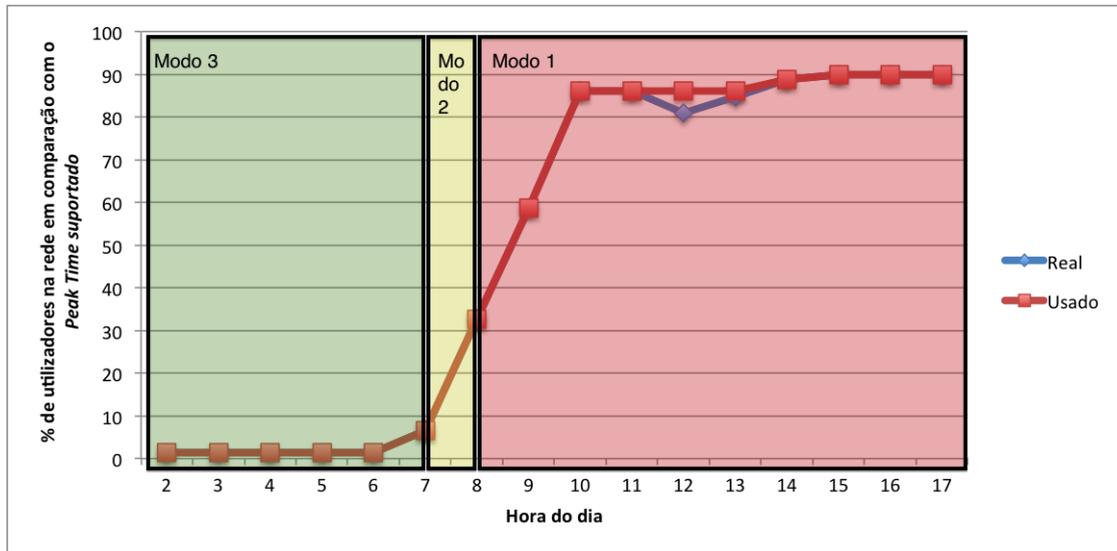


Figura 4.15: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 5 com o *threshold* de 45%.

Perfil de Tráfego	Tempo no Modo 1	Tempo no Modo 2	Tempo no Modo 3	Eficiência Energética	<i>Threshold</i>
1	22800	31200	0	11.560	5
2	39600	21600	0	7.060	5
3	28800	3600	25200	36.250	15
4	25200	4800	20400	34.286	15
5	32400	3600	18000	28.000	45

Tabela 4.9: Tempo em segundos dos diferentes perfis nos diferentes modos e eficiência energética e *threshold* em % para os quais não é bloqueado qualquer utilizador.

Na tabela 4.9, são apresentados os *thresholds* para os vários perfis de tráfego que não bloqueiam qualquer utilizador.

50/75

<i>Threshold</i>	Bloqueados	Tempo no Modo 1	Tempo no Modo 2	Tempo no Modo 3	Eficiência Energética
5	0	24000	30000	0	11.110

Tabela 4.10: Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e *threshold* em % para o Tráfego 1.



Figura 4.16: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 1 com o *threshold* de 5%.

<i>Threshold</i>	Bloqueados	Tempo no Modo 1	Tempo no Modo 2	Tempo no Modo 3	Eficiência Energética
5	0	39600	21600	0	7.060

Tabela 4.11: Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e *threshold* em % para o Tráfego 2.

Mais uma vez, tanto o perfil 1 como o 2, não bloqueiam qualquer utilizador com um *threshold* igual a 5%.

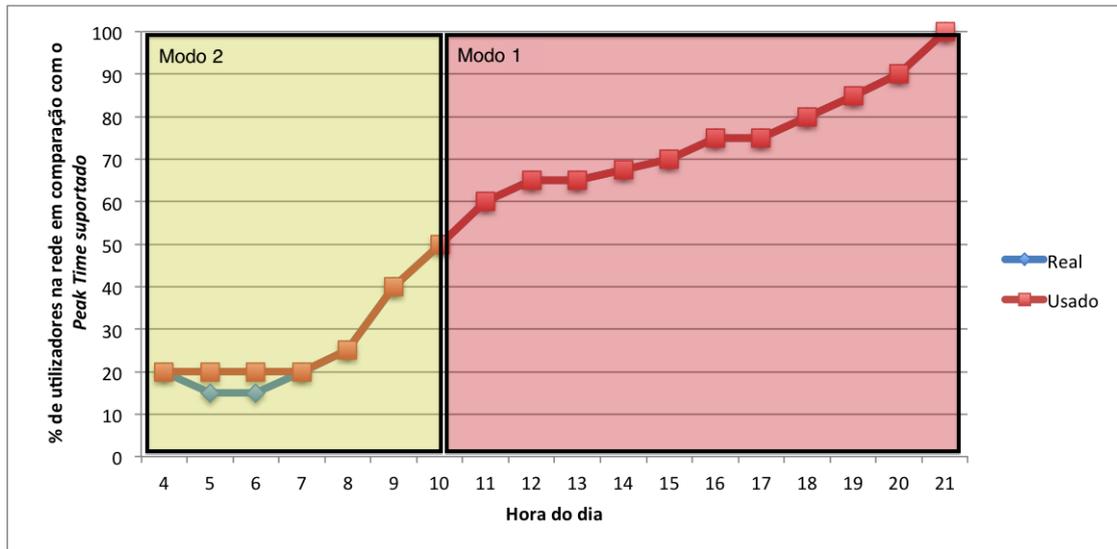


Figura 4.17: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 2 com o *threshold* de 5%.

<i>Threshold</i>	Bloqueados	Tempo no Modo 1	Tempo no Modo 2	Tempo no Modo 3	Eficiência Energética
13	1	28800	3600	25200	36.250
25	1	28800	3600	25200	36.250
30	0	30000	3600	24000	34.583

Tabela 4.12: Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e *threshold* em % para o Tráfego 3.

Ao contrário da capacidade 60/75 (ver Tabela 4.6), para a capacidade 50/75, o perfil 3 necessita de um *threshold* de 30%. Isto deve-se ao facto da capacidade no modo 3 ser inferior. De salientar que é possível ter um ganho de 1,667% se a operadora permitir que 1 utilizador seja bloqueado.

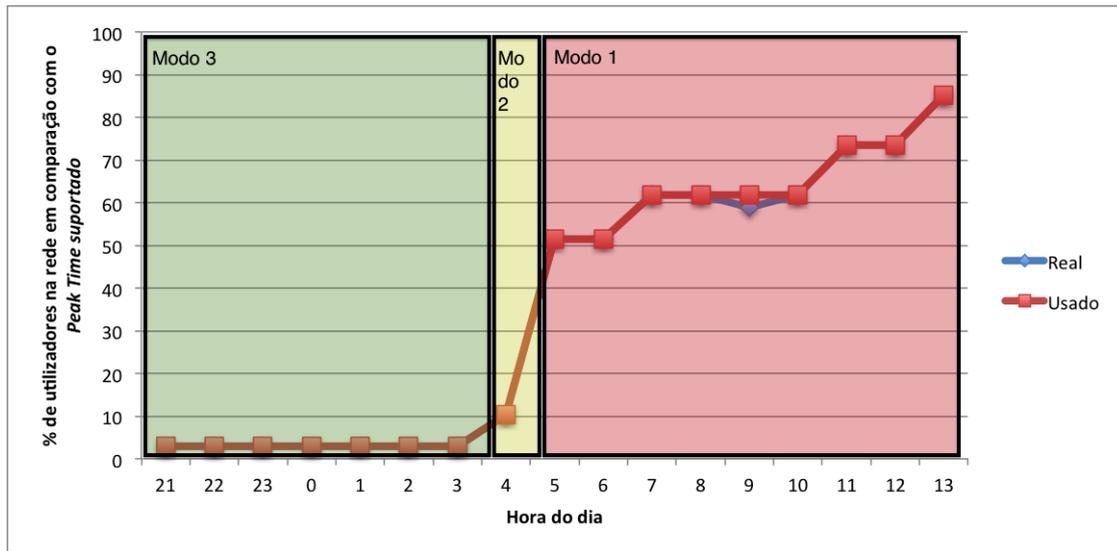


Figura 4.18: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 3 com o *threshold* de 30%.

<i>Threshold</i>	Bloqueados	Tempo no Modo 1	Tempo no Modo 2	Tempo no Modo 3	Eficiência Energética
10	19	24000	6000	20400	34.762
15	5	25200	4800	20400	34.286
30	0	25200	6000	19200	32.857

Tabela 4.13: Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e *threshold* em % para o Tráfego 4.

Tal como no caso anterior, este perfil também necessita de um maior *threshold* para a capacidade 50/75: 30% em comparação com os 15% da 60/75. Se quisermos permitir que utilizadores sejam bloqueados, com um *threshold* de 15% e 5 utilizadores bloqueados é possível ter um ganho de 1.429%. Por outro lado, é possível ter um ganho de 1.905% com um *threshold* de 10% e 19 utilizadores bloqueados.

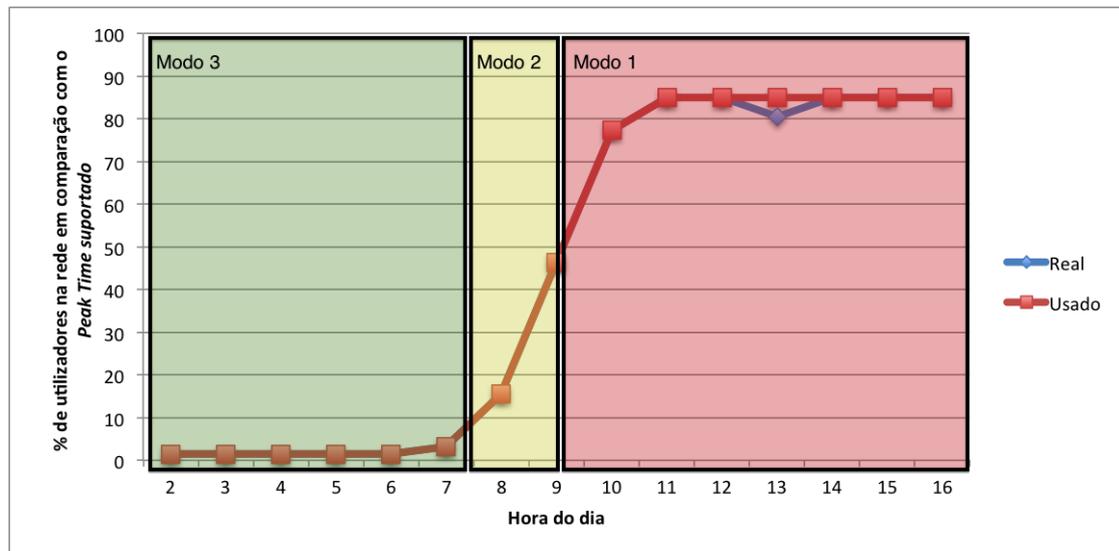


Figura 4.19: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 4 com o *threshold* de 30%.

<i>Threshold</i>	Bloqueados	Tempo no Modo 1	Tempo no Modo 2	Tempo no Modo 3	Eficiência Energética
25	14	31200	3600	19200	29.780
30	14	31200	3600	19200	29.780
35	0	31200	4800	18000	28.440

Tabela 4.14: Tempo em segundos nos diferentes modos, número de utilizadores bloqueados e eficiência energética e *threshold* em % para o Tráfego 5.

Nesta capacidade, este perfil necessita de uma protecção menor (35%) em comparação com a capacidade de 60/75 (45%).



Figura 4.20: Tempo de funcionamento em cada modo no Tráfego 5 com o *threshold* de 35%.

Perfil de Tráfego	Tempo no Modo 1	Tempo no Modo 2	Tempo no Modo 3	Eficiência Energética	<i>Threshold</i>
1	24000	30000	0	11.110	5
2	39600	21600	0	7.060	5
3	30000	3600	24000	34.583	30
4	25200	6000	19200	32.857	30
5	31200	4800	18000	28.440	35

Tabela 4.15: Tempo em segundos dos diferentes perfis nos diferentes modos e eficiência energética e *threshold* em % para os quais não é bloqueado qualquer utilizador.

### 4.3.3 Análise e Comparação dos Resultados

Perfil de Tráfego	Modo Tempo-Real	Modo Intervalos-Temporais
1	13.199	11.560
2	7.170	7.060
3	38.058	36.250
4	34.749	34.286
5	30.224	28.000

Tabela 4.16: Comparação da eficiência energética nos diferentes perfis no Modo Tempo-Real e Intervalos-Temporais para o tipo de capacidade 60/75.

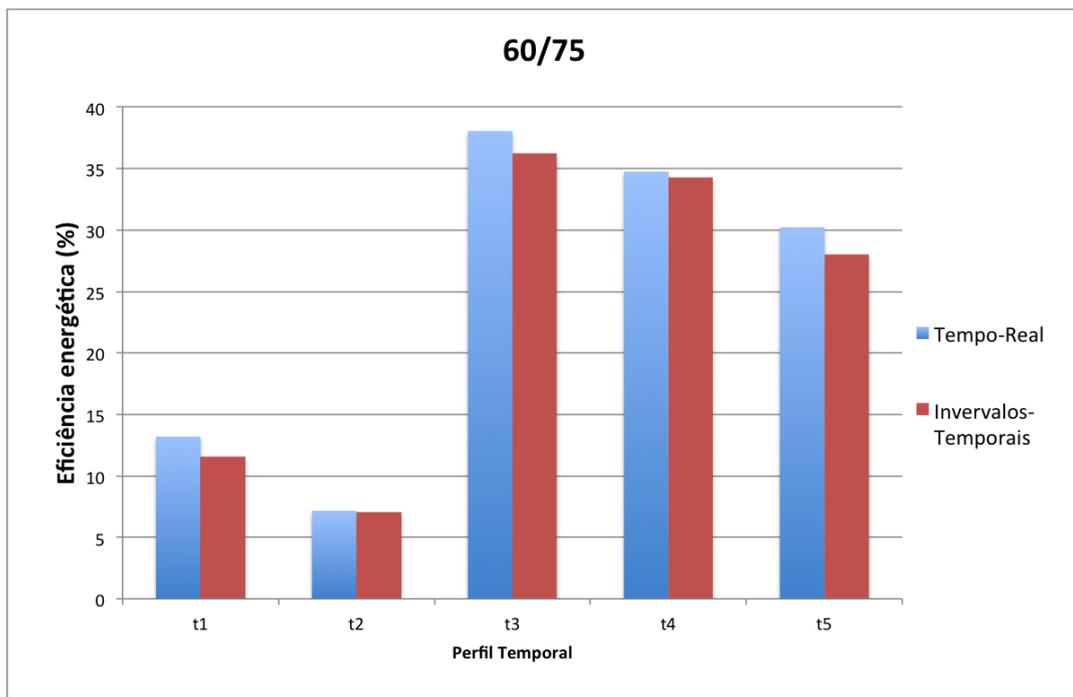


Figura 4.21: Comparação da eficiência energética nos diferentes perfis no Modo Tempo-Real e Intervalos-Temporais para o tipo de capacidade 60/75.

Como seria de esperar, o Modo Tempo-Real consegue obter uma eficiência energética melhor, uma vez que verifica o estado da rede em tempo real. No entanto, esta diferença não é muito significativa, no máximo 2.224% e 0.11% no mínimo. Como a diferença é relativamente pequena, não há razão para sobrecarregar a rede

com o Modo Tempo-Real. Como seria de esperar os perfis temporais que não permitem que o algoritmo funcione no modo 3, têm uma eficiência energética muito menor.

Perfil de Tráfego	Modo Tempo-Real	Modo Intervalos-Temporais
1	11.530	11.110
2	7.170	7.060
3	36.345	34.583
4	34.350	32.857
5	29.911	28.440

Tabela 4.17: Comparação da eficiência energética nos diferentes perfis no Modo Tempo-Real e Intervalos-Temporais para o tipo de capacidade 50/75.

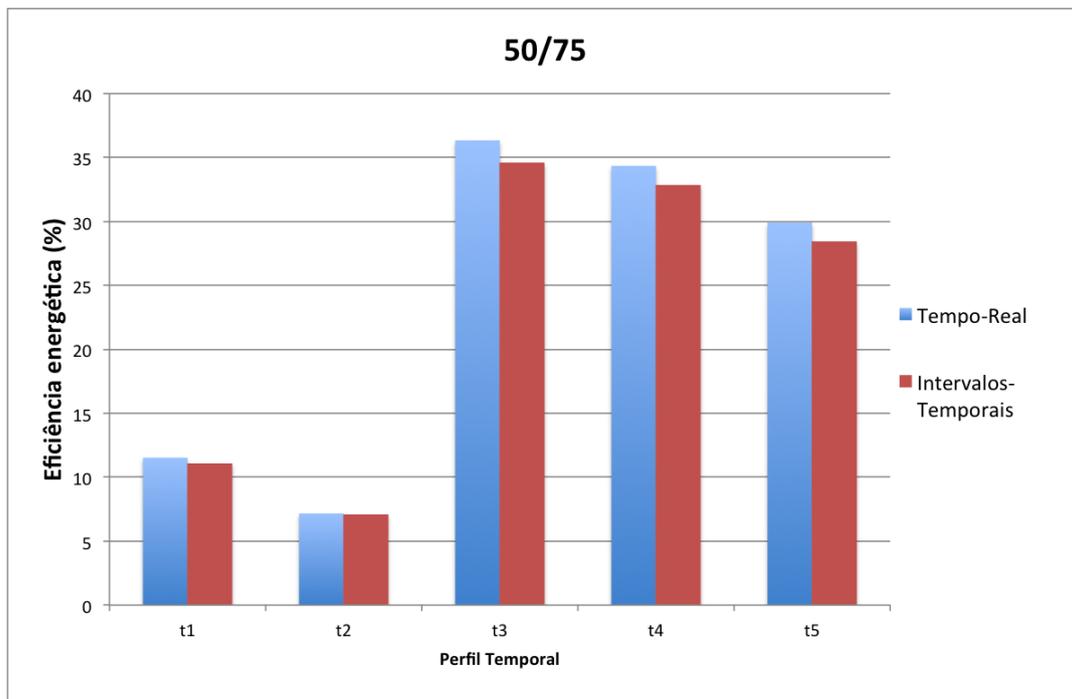


Figura 4.22: Comparação da eficiência energético nos diferentes perfis no Modo Tempo-Real e Intervalos-Temporais para o tipo de capacidade 50/75.

Mais uma vez, o Modo Tempo-Real é o que consegue obter uma eficiência energética melhor. No entanto, esta diferença também não é muito significativa na

capacidade 50/75, no máximo 1.762% e 0.11% no mínimo. Novamente, a diferença é relativamente pequena, não há razão para sobrecarregar a rede com o Modo Tempo-Real.

Perfil de Tráfego	50/75	60/75
1	11.110	11.560
2	7.060	7.060
3	34.583	36.250
4	32.857	34.286
5	28.440	28.000

Tabela 4.18: Comparação da eficiência energética nos diferentes perfis no Modo Intervalos-Temporais entre o tipo de capacidade 50/75 e 60/75.

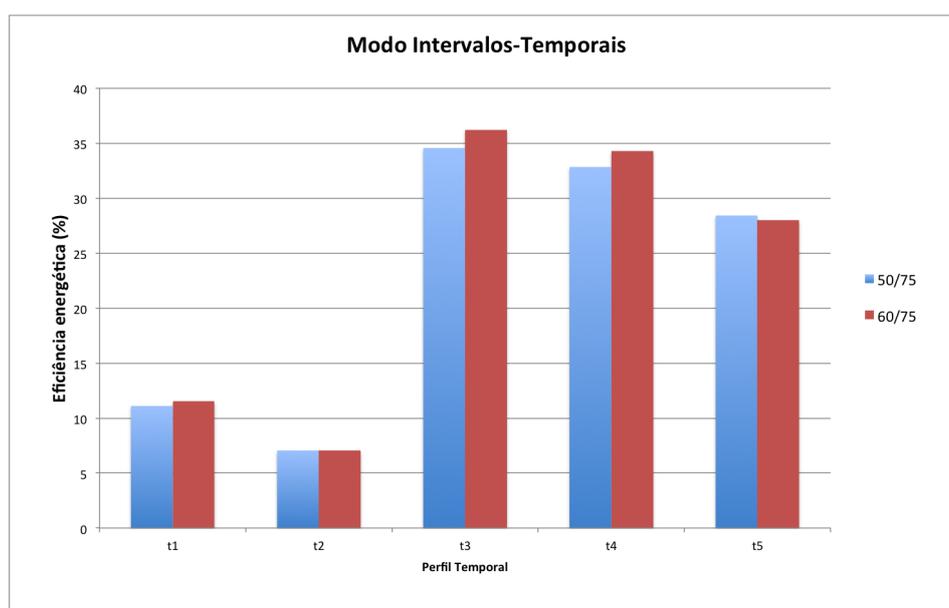


Figura 4.23: Comparação da eficiência energético nos diferentes perfis no Modo Intervalos-Temporais entre o tipo de capacidade 50/75 e 60/75.

Apesar da capacidade 60/75 suportar mais utilizadores no modo 3, só consegue ser mais eficaz energeticamente em três dos perfis. Isto deve-se ao facto ou do modo 3 não ser ativado ou a passagem do modo 3 para o 2 ser executada na mesma altura

em ambas as capacidades. No perfil 5, a capacidade 60/75 tem uma eficiência energética inferior porque necessita de um *threshold* superior, fazendo com que a passagem do modo 2 para o 1 seja activada mais rapidamente.

## 4.4 Conclusão

Neste capítulo, foram apresentados todos os resultados obtidos nas simulações que foram efectuadas. Foi possível verificar que não há necessidade de sobrecarregar a rede com o Modo Tempo-Real, pois as diferenças na eficiência energética são pequenas em comparação com o Modo Intervalos-Temporais. A capacidade 60/75 é mais eficaz energeticamente em dois dos perfis, o que seria de esperar, pois permite um maior número de utilizadores no modo 3. No Modo Intervalos-Temporais, demonstrou-se também que é possível obter ganhos energéticos maiores à custa da quantidade de utilizadores bloqueados. O algoritmo consegue ganhos energéticos entre os 7% e os 38%, valores estes muito interessantes, uma vez que o funcionamento do algoritmo é relativamente simples e não cria muito *overhead* na rede.

# Capítulo 5

## Conclusões

Durante a realização desta tese de mestrado, foram encontrados diversos obstáculos. Embora tenha sido difícil encontrar informação acerca da quantidade de utilizadores suportada pelas estações base, foi possível verificar que esta varia consoante o equipamento, configuração do mesmo e alcance da estação base. Não há uma fórmula *standard* que possa ser utilizada. Os valores utilizados podem não ser totalmente fidedignos e seria necessário trabalhar diretamente com uma operadora e tentar perceber que valores são possíveis alcançar consoante as configurações que usam para os diversos equipamentos. No entanto, podem ser usados como uma referência por forma a perceber melhor que eficiência energética é possível alcançar.

Outro obstáculo foi o modelo do consumo de energia das estações, como já foi referido anteriormente, não há um modelo *standard* que possa ser utilizado. Mais uma vez, seria preciso analisar, com a ajuda de uma operadora, o consumo de energia de uma estação base durante todas as fases do dia para perceber qual a influência que o número de utilizadores, volume de tráfego e o alcance da estação base têm sobre a energia consumida pela mesma.

O NS-3 é ainda um software de simulação em desenvolvimento, ou seja, algumas

funcionalidades do LTE ainda estão em fase de implementação. Durante a tese, já foram apontados diversos problemas que foram afetados por este facto.

Quanto aos resultados obtidos, como é possível verificar, é possível obter uma melhor eficiência energética analisando apenas o número de utilizadores que se encontram na rede e o perfil de tráfego na área em questão. A eficiência varia entre o 7% e os 38%, representando uma economia interessante ao final do ano. Para além disto, estes valores foram atingidos com a implementação de um algoritmo simples e que não acrescenta muito *overhead* na rede. As BSs enviam de 20 em 20 minutos o número de utilizadores que estão a servir e recebem do CS se devem ou não mudar o seu modo de funcionamento.

É possível que os valores de eficiência energética possam ser ligeiramente melhorados se forem utilizados dois valores de *threshold* em vez de um porque onde ocorre um maior número de utilizadores bloqueados é na transição do Modo 3 para o Modo 2. Desta forma, a transição do Modo 2 para 1 não necessita dum *threshold* tão elevado, podendo aumentar o tempo de utilização no modo 2 nos diferentes perfis. Outra forma de aumentar a eficiência é executar o algoritmo em intervalos de tempo mais reduzidos, mas com um aumento no overhead que o algoritmo provoca na rede. Por outro lado, é possível diminuir o overhead se forem utilizados diferentes intervalos de tempo na execução do algoritmo em certas alturas do dia. Por exemplo, nas horas de pico não é necessário analisar a rede de 20 em 20 minutos, tal como, nas horas em que o tráfego é reduzido. Disto isto, uma das grandes vantagens do algoritmo é a possibilidade de ser adaptado duma forma simples consoante a necessidade da operadora.

Por fim, o algoritmo seria muito mais completo se tivesse em consideração não só o número de utilizadores, mas também a largura de banda disponível nas células. Por outro lado, se as operadoras cooperassem entre si [16], seria possível baixar ainda mais a energia consumida e as emissões de carbono, para além de também

permitir diminuir a interferência entre as estações das diferentes operadoras.

# Bibliografia

- [1] Global e-Sustainability Initiative (GeSI). “SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age”, <http://www.theclimategroup.org/assets/resources/publications/Smart2020Report.pdf>.
- [2] C. Bianco, F. Cucchietti, G. Griffa. “Energy consumption trends in the next generation access network - a telco perspective,” Proc. 29th Internat. Telecommunications Energy Conf. (INTELEC 2007), Rome, Italy, Sept. 2007, pp.737-742
- [3] Telecom Italia Website. “The Environment,” URL: <http://www.telecomitalia.it/sostenibilita2006/English/B05.html>
- [4] British Telecom Group. “Sustainability Report 2009”, <http://www.btplc.com/Societyandenvironment/Ourapproach/Sustainabilityreport/index.aspx>.
- [5] BT Press. “BT announces major wind power plans,” 2007, <http://www.btplc.com/News/Articles/Showarticle.cfm?ArticleID=dd615e9c-71ad-4daa-951a-55651baae5bb>.
- [6] Deutsche Telekom Group. “Ecological Indicators”, <http://cr-report.telekom.de/site08/en/daten-fakten/kennzahlen/oekologische-kennzahlen-/index.php>.

- [7] S. N. Roy. "Energy Logic: A Road Map to Reducing Energy Consumption in Telecommunications Networks," Proc. 30th Internat. Telecommunications Energy Conference (INTELEC 2008), San Diego, CA, USA, Sept. 2008.
- [8] European Commission DG INFSO. "Impacts of Information and Communication Technologies on Energy Efficiency," final report, Sept. 2008, [http://ec.europa.eu/information\\_society/newsroom/cf/itemdetail.cfm?item\\_id=4441](http://ec.europa.eu/information_society/newsroom/cf/itemdetail.cfm?item_id=4441).
- [9] M. Gupta and S. Singh. "Greening of the Internet," Proc. ACM SIGCOMM Conf. (SIGCOMM 03), Karlsruhe, Germany, Aug. 2003, pp. 19-26.
- [10] K. Christensen, B. Nordman, R. Brown. "Power Management in Networked Devices," IEEE Computer, vol. 37, no. 8, pp. 91-93, Aug. 2004.
- [11] R. S. Tucker, R. Parthiban, J. Baliga, K. Hinton, R. W. A. Ayre, W. V. Sorin. "Evolution of WDM Optical IP Networks: A Cost and Energy Perspective", IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 27, no. 3, pp. 243-252, Feb 2009.
- [12] Neilson, D.T. "Photonics for switching and routing," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (JSTQE), vol.12, no.4, pp.669- 678, July-Aug. 2006.
- [13] Raffaele Bolla, Roberto Bruschi, Franco Davoli, and Flavio Cucchietti. "Energy Efficiency in the Future Internet: A Survey of Existing Approaches and Trends in Energy-Aware Fixed Network Infrastructures", in Communications Surveys & Tutorials, IEEE 13, 223-244, 2011.
- [14] Zhisheng Niu, Yiqun Wu, Jie Gong, and Zexi Yang. "Cell Zooming for Cost-Efficient Green Cellular Networks", IEEE Communications Magazine, volume 48, issue 11, November 2010.

- [15] 3GPP TR 36.814 V1.2.1. "Further Advancements for EUTRA: Physical Layer Aspects," June 2009.
- [16] Zhou S, Gong J, Yang Z, Niu Z, and Yang P. "Green mobile access network with dynamic base station energy saving", in Proceedings of ACM MobiCom, 2009.
- [17] Y. Bejerano and S. J. Han. "Cell breathing technique for load balancing in wireless lans", IEEE Trans. Mob. Compt., 8(6):735-749, June 2009.
- [18] R. Balasubramaniam, S. Nagaraj, M. Sarkar, C. Paolini and Paras Khaitan. "Cell Zooming for Power Efficient Base Station Operation", in Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013 9th International, July 013.
- [19] Eunsung Oh, Bhaskar Krishnamachari, Xin Liu, and Zhisheng Niu. "Toward Dynamic Energy-Efficient Operation of Cellular Network Infrastructure", IEEE Communication magazine, June 2011.
- [20] Ofcom. "Sitefinder: Mobile Phone Base Station Database", <http://www.sitefinder.ofcom.org.uk/>.
- [21] M. A. Marsan, L. Chiaraviglio, D. Ciullo, and M. Meo. "Optimal Energy Savings in Cellular Access Networks," Communications Workshops, 2009. ICC Workshops 2009. IEEE International Conference on, 14-18 June 2009, pp.1-5
- [22] UMTS Forum. "UMTS Forum Report 44 - Mobile traffic forecasts 2010-2020", May 2011.
- [23] Rafael Coomonte, Sergio Ramos, Claudio Feijóo, and José-Luis Gómez-Barroso "Energy Consumption Forecast in 4G Networks: The Case of Spain", 32nd Annual International Symposium on Forecasting, 24-27 June 2012.

- [24] EE. "4GEE Mobile Living Index: First Half 2013 Report", 16 August 2013.
- [25] Dr. Andreas Eisenblätter, Rafał Pisz and Szymon Stefański. "GreenNets - White Paper", 16 August 2013.