

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

**Área Departamental de Engenharia de Electrónica e
Telecomunicações e de Computadores**



**Técnicas de Eficiência Energética em Redes Móveis Usando o
Tráfego como Referência**

GONÇALO ANDRADE

(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Electrónica
e Telecomunicações

Orientador:

António João Nunes Serrador

Júri:

Presidente: Mário Pereira Véstias

Vogais: Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Nuno Ricardo de Jesus Pereira Carapau

Novembro de 2013

“After its invention, the telegram took 90 years to spread to four-fifths of developing countries; for the cell phone, the comparable diffusion was 16 years.”

R. J. Samuelson, in *Washington Post*.

Agradecimentos

Começo por agradecer ao Professor António Serrador que, para além de me ter permitido desenvolver a minha Dissertação de Mestrado num tema que me agrada bastante, também me acompanhou, supervisionou e, principalmente motivou durante todo o desenvolvimento da Dissertação.

Deixo também um agradecimento muito especial à Ericsson, nomeadamente ao Pedro Oliveira, Alexandre Peixoto e Nuno Carapau por toda a ajuda e toda a informação disponibilizada.

Agradeço à minha família que nunca deixou de acreditar em mim e que tudo fez para que eu tivesse sempre as melhores condições possíveis, não só para a realização desta Dissertação mas para tudo na vida.

À Tânia e a todos os meus amigos, um muito obrigado por me apoiarem sempre, mesmo quando estava ausente.

Por último gostaria de dar um agradecimento muito especial à pessoa que mais me inspirou, que mais me motivou e que mais força me deu para realizar esta Dissertação. Muito obrigado Cátia.

Resumo

O principal objectivo desta dissertação foi simular um sistema celular heterogéneo que permita diminuir a pegada ecológica referente às comunicações celulares móveis, e por outro lado, permita também aos operadores reduzir os custos associados ao consumo de energia nas Estações Base, reduzindo assim os seus custos totais de operação.

Foi desenvolvido um sistema que coloca em *standby* os componentes rádio referentes às tecnologias LTE (4G) e WCDMA (3G), caso o tráfego, no instante a ser analisado, seja inferior a um determinado limiar. Quando se verifica esta situação, o tráfego restante da tecnologia que foi “desligada”, irá ser transferido para a geração anterior (4G → 3G → 2G).

Verificou-se que esta acção proporciona uma redução do custo associado ao consumo de energia eléctrica, aumentando assim a eficiência energética de operação da rede, principalmente quando o tráfego de entrada é bastante reduzido, permitindo que exista transferência de tráfego de uma tecnologia para outra – *Handover* Vertical e possibilitando assim que os componentes da primeira sejam desligados.

Foi também verificado que existe uma degradação da qualidade do serviço, correspondente ao aumento do atraso, com o aumento da eficiência energética. Caberá então ao operador decidir qual o ponto de equilíbrio ideal tendo em conta a relação Eficiência Energética Vs. Atraso na rede.

No caso do cenário Rural, onde foram obtidos os valores mais elevados de eficiência energética, verificou-se um ganho de 32.68%, sem atrasos, correspondendo a uma poupança de 2.18€ por dia em cada célula, equivalendo, no final do ano, a uma diferença nos custos de cerca de 796€, também para uma célula apenas.

Palavras-chave

Eficiência Energética, QoS, LTE, WCDMA, GSM.

Abstract

The main objective of this thesis was to simulate a heterogeneous cell system capable to reduce the carbon footprint related to mobile cellular communications, and, on the other hand, also allows operators to reduce costs associated with energy consumption in base stations, thus reducing your total cost operation.

It has been developed a system that puts in standby mode the radio components related to LTE (4G) and WCDMA (3G), if the traffic, which is being analyzed in that moment, is inferior to a certain threshold. When this situation occurs, the traffic corresponding to the technology that was "turned off", will be transferred to the previous generation 4G → 3G → 2G.

It was found that this measure provides a reduction of the electrical energy consumption associated cost, thus increasing the network operation energy efficiency, especially when the incoming traffic is greatly reduced, enabling the transfer of the existing traffic from one technology to another - Vertical Handover, and thereby allowing to set the components of the first technology in a standby mode.

It was also found that a degradation of the quality of service is notice, corresponding to the increase of the delay, with increased energy efficiency. It is then up to the operator to decide which optimal balance, taking into account the relationship Energy Efficiency Vs. Delay in the network.

In rural scenery case, where the highest energy efficiency values were obtained, there was a gain of 32.68%, without delay, corresponding to a saving of € 2.18 per day in each cell. At the end of the year the difference in costs is about 796 €, for one cell only.

Keywords

Energy Efficiency, QoS, LTE, WCDMA, GSM.

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	vi
Palavras-chave	vi
Abstract	viii
Keywords	viii
Índice.....	x
Índice de Figuras.....	xii
Índice de Tabelas	xv
Lista de Siglas.....	xvi
Lista de Símbolos.....	xviii
1 Introdução	19
2 Estado da Arte	23
2.1 Comunicações Móveis	23
2.2 Técnicas de Eficiência Energética	24
2.2.1 Planeamento	24
2.2.2 Cooperação Entre Estações Base.....	29
2.2.3 Reconfiguração de Redes Adaptativas	33
2.2.4 Gestão Adaptativa de Recursos de Rádio.....	37
2.3 Quantificação de Eficiência Energética	41
2.4 Estação Base	42
2.5 Self Organising Networks.....	46
2.6 Operations Support Systems	47
3 Modelos e Algoritmos Desenvolvidos.....	48
3.1 Cálculos de Potências e Custos	48
3.2 Critérios de Selecção	49
3.3 Algoritmo a Desenvolver.....	51
3.3.1 Variáveis de entrada do simulador	52
3.3.2 Variáveis de saída do simulador.....	53
3.4 Algoritmo Desenvolvido.....	53
3.5 Aplicação	59

4	Cenários e Resultados	61
4.1	Urbano	61
4.2	Suburbano e Rural	66
4.3	Fictício 1	70
4.4	Fictício 2	75
5	Conclusões	81
	Anexo A.....	84
	Anexo B – Cenários Reais	85
	• Urbano	85
	• Suburbano	88
	• Rural	90
	Anexo C – Cenário Fictício 1	91
	Anexo D – Cenário Fictício 2	94
	Referências.....	98

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Representação de uma rede heterogénea (extraída de [8]).	26
Figura 2.2 – Representação de um site composto por várias tecnologias de acesso rádio.	26
Figura 2.3 – Exemplo da aplicação de repetidores.	27
Figura 2.4 – Evolução da tecnologia MIMO (extraída de [10]).	28
Figura 2.5 – Representação da reutilização de fracções de frequência totalmente isolada (extraído de [14]).	31
Figura 2.6 – Representação das diferentes técnicas de interligação com o <i>core</i> da rede.	33
Figura 2.7 – Exemplo da constituição de uma rede heterogénea (extraído de [12]).	37
Figura 2.8 – Exemplo de <i>Handover</i> vertical e horizontal (extraído de [21]).	40
Figura 2.9 – Evolução da Arquitectura das Estações Base (extraído de [25]).	43
Figura 2.10 – Representação gráfica da variação da potência consumida em função da percentagem de carga – GSM.	44
Figura 2.11 – Representação gráfica da variação da potência consumida em função da percentagem de carga – WCDMA.	44
Figura 2.12 – Representação gráfica da variação da potência consumida em função da percentagem de carga – LTE.	45
Figura 3.1 – Diagrama de Blocos do Simulador (entradas e saídas).	51
Figura 3.2 – Fluxograma do Algoritmo do Simulador.	54
Figura 3.3 – Interface Gráfico da Aplicação.	59
Figura 4.1 – Representação gráfica do tráfego de entrada – Cenário Urbano.	62
Figura 4.2 – Percentagem de utilização no cenário urbano ($\alpha=85$, $\beta=85$ e $t_{100\%}=0$).	64
Figura 4.3 – Potência consumida no cenário urbano ($\alpha=85$, $\beta=85$ e $t_{100\%}=0$).	65
Figura 4.4 – Relação W/bps no cenário urbano ($\alpha=85$, $\beta=85$ e $t_{100\%}=0$).	66
Figura 4.5 – Representação gráfica do tráfego de entrada – Cenário Suburbano.	67
Figura 4.6 – Representação gráfica do tráfego de entrada – Cenário Rural.	67
Figura 4.7 – Percentagem de utilização no cenário rural ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=0$).	69
Figura 4.8 – Representação gráfica do atraso no cenário rural ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=5$).	70
Figura 4.9 – Representação gráfica do tráfego de entrada – Cenário Fictício 1.	70
Figura 4.10 – Percentagem de utilização no cenário fictício 1 ($\alpha=40$, $\beta=40$ e $t_{100\%}=1$).	73
Figura 4.11 – Representação gráfica do atraso no cenário fictício 1 ($\alpha=85$, $\beta=85$ e $t_{100\%}=5$).	75
Figura 4.12 – Representação gráfica do tráfego de entrada – Cenário Fictício 2.	75

Figura 4.13 – Potência consumida no cenário fictício 2 ($\alpha=50, \beta=50$ e $t_{100\%}=0$).....	77
Figura 4.14 – Representação gráfica do atraso no cenário fictício 2 ($\alpha=15, \beta=15$ e $t_{100\%}=1$)..	78
Figura 4.15 – Percentagem de utilização no cenário fictício 2 ($\alpha=15, \beta=15$ e $t_{100\%}=1$).....	78
Figura 4.16 – Percentagem de utilização no cenário fictício 2 ($\alpha=85, \beta=85$ e $t_{100\%}=5$).....	80
Figura B.1 – Percentagem de utilização no cenário urbano ($\alpha=15, \beta=15$ e $t_{100\%}=5$).	85
Figura B.2 – Potência consumida no cenário urbano ($\alpha=15, \beta=15$ e $t_{100\%}=5$).	85
Figura B.3 – Relação W/bps no cenário urbano ($\alpha=15, \beta=15$ e $t_{100\%}=5$).	86
Figura B.4 – Atraso no cenário urbano ($\alpha=15, \beta=15$ e $t_{100\%}=5$).....	86
Figura B.5 – Percentagem de utilização no cenário urbano ($\alpha=15, \beta=15$ e $t_{100\%}=0$).	87
Figura B.6 – Potência consumida no cenário urbano ($\alpha=15, \beta=15$ e $t_{100\%}=0$).	87
Figura B.7 – Percentagem de utilização no cenário suburbano ($\alpha=15, \beta=15$ e $t_{100\%}=1$).....	88
Figura B.8 – Potência consumida no cenário suburbano ($\alpha=15, \beta=15$ e $t_{100\%}=1$).....	88
Figura B.9 – Relação W/bps no cenário suburbano ($\alpha=15, \beta=15$ e $t_{100\%}=1$).	89
Figura B.10 – Atraso no cenário suburbano ($\alpha=15, \beta=15$ e $t_{100\%}=1$).....	89
Figura B.11 – Potência consumida no cenário rural ($\alpha=15, \beta=15$ e $t_{100\%}=0$).....	90
Figura B.12 – Relação W/bps no cenário rural ($\alpha=15, \beta=15$ e $t_{100\%}=0$).	90
Figura C.1 – Potência consumida no cenário fictício 1 ($\alpha=40, \beta=40$ e $t_{100\%}=1$).....	91
Figura C.2 – Potência consumida no cenário fictício 1 ($\alpha=85, \beta=85$ e $t_{100\%}=0$).....	91
Figura C.4 – Relação W/bps no cenário fictício 1 ($\alpha=40, \beta=40$ e $t_{100\%}=1$).....	92
Figura C.5 – Atraso no cenário fictício 1 ($\alpha=40, \beta=40$ e $t_{100\%}=1$).	92
Figura C.6 – Percentagem de utilização no cenário fictício 1 ($\alpha=85, \beta=85$ e $t_{100\%}=5$).....	93
Figura C.7 – Percentagem de utilização no cenário fictício 1 ($\alpha=85, \beta=85$ e $t_{100\%}=0$).....	93
Figura D.1 – Percentagem de utilização no cenário fictício 2 ($\alpha=50, \beta=50$ e $t_{100\%}=0$).....	94
Figura D.2 – Relação W/bps no cenário fictício 2 ($\alpha=50, \beta=50$ e $t_{100\%}=0$).	94
Figura D.3 – Potência consumida no cenário fictício 2 ($\alpha=50, \beta=50$ e $t_{100\%}=5$).....	95
Figura D.4 – Potência consumida no cenário fictício 2 ($\alpha=50, \beta=50$ e $t_{100\%}=1$).....	95
Figura D.5 – Atraso no cenário fictício 2 ($\alpha=50, \beta=50$ e $t_{100\%}=5$).	96
Figura D.6 – Atraso no cenário fictício 2 ($\alpha=50, \beta=50$ e $t_{100\%}=1$).	96
Figura D.7 – Relação W/bps no cenário fictício 2 ($\alpha=15, \beta=15$ e $t_{100\%}=1$).	97
Figura D.8 – Relação W/bps no cenário fictício 2 ($\alpha=85, \beta=85$ e $t_{100\%}=1$).	97

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Equações de potência em função da percentagem de carga.	48
Tabela 3.2 – Cálculo de $P_{(Standby)}$ para cada tecnologia.	49
Tabela 3.3 – Resumo das diferentes técnicas estudadas.	50
Tabela 3.4 – Diferentes acções para cada estado.	56
Tabela 4.1 – Resultados cenário urbano $t_{100\%}=0$	62
Tabela 4.2 – Resultados cenário urbano $t_{100\%}=1$	63
Tabela 4.3 – Resultados cenário urbano $t_{100\%}=5$	63
Tabela 4.4 – Resultados cenário suburbano e rural para $\alpha=15\%$ e $\beta=15\%$	68
Tabela 4.5 – Resultados cenário Fictício 1 $t_{100\%}=0$	71
Tabela 4.6 – Resultados cenário Fictício 1 $t_{100\%}=0$ ($15\% < \alpha < 50\%$).....	72
Tabela 4.7 – Resultados cenário fictício 1 $t_{100\%}=1$	72
Tabela 4.8 – Resultados cenário fictício 1 $t_{100\%}=5$	74
Tabela 4.9 – Resultados cenário fictício 2 $t_{100\%}=0$	76
Tabela 4.10 – Resultados cenário fictício 2 $t_{100\%}=1$	77
Tabela 4.11 – Resultados cenário fictício 2 $t_{100\%}=5$	79
Tabela A.1 – Evolução das Comunicações Móveis	84

Lista de Siglas

- 3GPP – *3rd Generation Partnership Project*
- AC – *Alternate Current*
- ADSL – *Asymmetric Digital Subscriber Line*
- AMPS – *Advanced Mobile Phone System*
- AON – *Active Optical Network*
- BER – *Bit Error Rate*
- BTS – *Base Transceiver Station*
- C2POWER – *Cognitive Radio and Cooperative Strategies for POWER saving in multi-standard wireless devices*
- CAPEX – *Capital Expenditure*
- CDMA – *Code Division Multiple Access*
- CDPD – *Cellular Digital Packet Data*
- CSD - *Circuit Switched Data*
- D-AMPS – *Digital Advanced Mobile Phone System*
- DC – *Direct Current*
- DU – *Digital Unit*
- EARTH – *Energy Aware Radio and neTwork tecHnologies*
- EDF – *Earliest Deadline First*
- EDGE – *Enhanced Data rates for GSM Evolution*
- E-MBMS – *Evolved Multimedia Broadcast Multicast Service*
- ETACS – *Extended Total Access Communication System*
- FDD – *Frequency Division Duplex*
- FDM – *Frequency-Division Multiplexing*
- FR – *Factor de Reutilização*
- FTTA – *Fiber-To-The-Antenna*
- FTTN – *Fibre-to-the-node*
- GPRS – *General Packet Radio Service*
- GPS – *Global Positioning System*
- GSM – *Global System for Mobile Communications*
- HSCSD – *High-Speed Circuit-Switched Data*
- HSPA – *High Speed Packet Access*
- IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

ITRS – *International Technology Roadmap for Semiconductors*
LAN – *Local Area Network*
LTE – *Long Term Evolution*
N-AMPS – *Narrowband Advanced Mobile Phone Service*
MBSFN – *Multicast Broadcast Single Frequency Network*
MBWA – *Mobile Broadband Wireless Access*
MCI – *Maximum Channel to Interference Ratio*
MIMO – *Multiple-Input Multiple-Output*
MLWDF – *Modified Largest Weighted Deadline First*
MMS – *Multimedia Messaging Service*
MW – *Microwave links*
NMT - *Nordic Mobile Telephony*
OFDMA – *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*
OPEX – *Operating Expense*
OSS – *Operations Support Systems*
P2P – *Point-to-Point*
PDU – *Power Distribution Units*
PF – *Proportional Fair*
PON – *Passive Optical Network*
QoS – Quality of Service
RDIS – *Rede Digital com Integração de Serviços*
RF – *Radio Frequency*
RRU – *Remote Radio Units*
RU – *Radio Unit*
SC-FDMA – *Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*
SISO – *Single-Input Single-Output*
SON – *Self Organising Networks*
TACS – *Total Access Communication System*
TDD – *Time Division Duplex*
TDMA – *Time Division Multiple Access*
TD-SCDMA – *Time Division Synchronous Code Division Multiple Access*
TMA – *Transcription-Mediated Amplification*
TREND – *Towards Real Energy-efficient Network Design*
TTL – *Time To Live*

UMTS – *Universal Mobile Telecommunications System*

WCDMA – *Wideband Code Division Multiple Access*

WiDEN – *Wideband Integrated Digital Enhanced Network*

WiMax – *Worldwide Interoperability for Microwave Access*

Lista de Símbolos

ΔE – Diferença de Energia

ΔP – Diferença de Potência

E_b – Energia de Bit

N_0 – Densidade Espectral de Ruído

1 Introdução

São raras as inovações técnicas que tenham causado tanto impacto no dia-a-dia das pessoas, tão rápido e tão profundamente, como o uso generalizado de comunicações móveis pessoais. Durante as duas últimas décadas, assistiu-se a um aumento, de tal forma significativo, da utilização de serviços móveis, que deixou de ser um conjunto de aplicações restringidas a um segmento de mercado, passando a estar disponível na vida diária dos utilizadores, a nível global.

A primeira chamada de telefone móvel que utilizou o GSM (*Global System for Mobile Communications*) teve lugar em 1991, na Finlândia e, passados apenas 15 anos, havia mais de dois mil milhões de utilizadores de GSM. Estima-se que em 2011 o número total de assinantes móveis no mundo tenha já aumentado para 4 mil milhões [1], mais de metade da população do planeta. Em comparação, nesse mesmo ano, existiam apenas cerca de 1,3 mil milhões de assinantes de rede telefónica fixa em todo o mundo e 1,8 mil milhões de pessoas, cerca de um quarto da população da Terra, acediam à Internet. A força motriz que proporcionou este rápido desenvolvimento foi a crescente importância de conectividade para as interacções socioeconómicas.

De acordo com o ITRS (*International Technology Roadmap for Semiconductors*) [1], o poder de processamento e a capacidade de armazenamento dos dispositivos móveis tem vindo a duplicar aproximadamente, a cada 18 meses, sendo este crescimento conhecido como "Lei de Moore", obrigando assim ao uso de sistemas de informação e de comunicação cada vez mais poderosos e de dispositivos móveis mais atraentes para a população.

De forma a ser possível transportar esta crescente quantidade de dados, que se encontram disponíveis para o utilizador, dentro de um período de tempo aceitável, as taxas de transmissão de dados em ambos os acessos à Internet, com e sem fios, incluindo redes móveis, redes locais e redes pessoais, têm também vindo a aumentar, aproximadamente à mesma velocidade, cerca de dez vezes a cada cinco anos, sensivelmente.

A busca crescente por serviços sem fio e acesso omnipresente provoca, no entanto, uma pegada de carbono de dimensão relativamente significativa. Estima-se que todo o sector das tecnologias de informação e comunicação represente cerca de 2 por cento das emissões globais de CO₂, uma pequena fracção comparativamente ao da aviação mundial, por exemplo, e cerca de 1,5 por cento do valor de CO₂ emitido globalmente em 2007. Estima-se que o valor

correspondente às redes móveis seja cerca de 0,2% e 0,4% das emissões globais de CO₂ em 2007 e 2020, respectivamente [1]. Prevê-se também que a pegada do sector das tecnologias de informação e comunicação aumente pouco menos do dobro, entre 2007 e 2020, enquanto a pegada de comunicações móveis, em particular, triplique no mesmo período.

Considerando, por um lado, o crescente consumo de energia das redes móveis, impulsionado pelo aumento do número e da complexidade das estações de base, e por outro lado, considerando o constante aumento dos custos de energia, torna-se claro que este será um ponto fundamental a ter em consideração pelos operadores de telecomunicações móveis, devido à elevada contribuição para as suas despesas operacionais [1].

Como tal, o tema tem vindo a despertar o interesse de investigadores numa nova e inovadora área de investigação denominada “*green cellular networks*”. Com base nesta ideia, a Comissão Europeia iniciou novos projectos que visem abordar a eficiência energética dos sistemas de comunicações móveis, sendo alguns destes: EARTH (*Energy Aware Radio and neTwork tecHnologies*), TREND (*Towards Real Energy-efficient Network Design*) e C2POWER (*Cognitive Radio and Cooperative Strategies for POWER saving in multi-standard wireless devices*) [2].

Relativamente à estrutura desta dissertação, a mesma encontra-se dividida em 5 capítulos, sendo o primeiro este onde é feita uma pequena introdução à história das comunicações móveis e como se têm vindo a desenvolver, bem como as necessidades actuais a nível económico e ambiental.

No segundo capítulo é feita uma descrição do estado da arte a nível das comunicações móveis. Este capítulo encontra-se dividido em 6 subcapítulos onde é descrita a evolução das tecnologias de comunicações móveis, assim como as principais características de cada uma. É também feito um resumo de várias técnicas utilizadas para se obter uma melhor eficiência energética e é dada uma pequena explicação de como se poderá quantificar essa mesma eficiência. Os 3 subcapítulos restantes são dedicados à descrição da arquitectura de uma estação base e à explicação do conceito de SON (*Self Organising Networks*) e OSS (*Operations Support System*)

No capítulo 3 – Modelos e Algoritmos Desenvolvidos, encontra-se uma descrição de todas as decisões tomadas na construção do algoritmo. Este capítulo encontra-se também dividido em 5 subcapítulos onde são expostos os cálculos efectuados e os critérios de selecção utilizados

na escolha da técnica a desenvolver. É feita também uma descrição do algoritmo desenvolvido, não só através da apresentação de todas as variáveis, quer de entrada quer de saída, mas também dos testes efectuados. No último subcapítulo encontra-se uma breve descrição da aplicação desenvolvida, da sua interface gráfica e dos cálculos efectuados mais relevantes.

Nos capítulos 4 e 5 estão apresentados respectivamente todos os resultados obtidos nos vários cenários em que foi aplicado o algoritmo e as conclusões mais relevantes que foram sendo verificadas ao longo da dissertação.

Serão também apresentados 4 anexos onde se encontram os dados referentes às diferentes tecnologias de comunicações móveis e os resultados obtidos após execução do algoritmo desenvolvido nos vários cenários.

2 Estado da Arte

2.1 Comunicações Móveis

Com o crescimento do número de utilizadores verificou-se que os sistemas celulares analógicos (sistemas de 1ª geração) não tinham capacidade de resposta para a procura existente. A chegada dos sistemas digitais permitiu uma melhor gestão e partilha dos recursos, levando a uma maior capacidade. Para além disso, possibilitaram que os sistemas obtivessem uma qualidade mais elevada, pois são mais imunes a ruído e interferências, permitindo ainda a possibilidade de oferecer serviços mais avançados. Foram assim desenvolvidos os sistemas de 2ª geração que fornecem serviços avançados de voz e dados, compatíveis por exemplo, com RDIS (Rede Digital com Integração de Serviços). No caso Europeu o sistema adoptado foi o GSM. Com a evolução deste sistema, surgiram duas novas tecnologias, GPRS (*General Packet Radio Service*) e EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*), que viriam a ser consideradas respectivamente a geração 2.5 (2.5G) e a geração 2.75 (2.75G) [3].

Os sistemas de 3ª geração vieram oferecer uma maior capacidade (canais de maior largura de banda) e a integração de serviços de voz, dados, imagens e vídeo. Na Europa o sistema adoptado foi o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*). Como forma de promover o lançamento desta tecnologia, surgiram no mercado novos serviços, como por exemplo o MMS (*Multimedia Messaging Service*) [3].

A nova geração de comunicações móveis (4G) vem melhorar os sistemas 3G e estão associadas desde logo um conjunto de vantagens que equipará a experiência de utilização dos serviços móveis à das comunicações fixas em fibra: maior ritmo de transmissão, maior largura de banda e maior qualidade de rede. Através do 4G, os utilizadores terão a oportunidade de usufruir de maiores débitos de transferência de dados, assim como de uma maior eficiência e performance no acesso a serviços disponíveis na Internet. Comparativamente com o 3G, os utilizadores das comunicações móveis podem, ainda, através do 4G, beneficiar de uma melhor eficiência de utilização do espectro radioelétrico e de uma menor latência, usufruindo de serviços em mobilidade até agora só possíveis através da Fibra Óptica ou ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) [4]. Tecnologias como o WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) ou LTE (*Long Term Evolution*) têm vindo a ser rotuladas como 4G, apesar de ainda não ser possível obter os valores convencionados para aquela que será definida como a 4ª geração. Poderá, por isso, ser considerada a seguinte evolução na 3ª

geração: HSPA (*High Speed Packet Access*) – 3.5G, HSPA+ – 3.75G e LTE/WiMAX – 3.9G [3].

Encontra-se no Anexo A, a Tabela A.1 onde se poderá ver um resumo da evolução das redes móveis, onde estão indicadas também as principais características de cada tecnologia.

2.2 Técnicas de Eficiência Energética

Tendo em conta que actualmente cerca de 80% da potência utilizada nas telecomunicações móveis é consumida na rede de acesso rádio, mais especificamente, nas estações base [4], devem ser tidas em consideração duas formas gerais de otimizar a eficiência energética nas mesmas. Em primeiro lugar, por optimização da rede já existente, por exemplo, através da utilização de componentes de *hardware* mais eficientes e adaptáveis à carga, bem como módulos de *software*. Em segundo lugar, por meio de estratégias de implementação melhoradas, reduzindo, por exemplo, o número de sites necessários na rede para cumprir as métricas de desempenho, tais como cobertura e eficiência espectral.

Serão apresentadas, de seguida, várias técnicas estudadas e desenhadas para um aumento da eficiência energética em redes móveis. Estas técnicas foram retiradas do projecto de investigação EARTH financiado pela comissão europeia.

2.2.1 Planeamento

2.2.1.1 Combinação Ideal da Dimensão das Células

Um dos aspectos onde se poderá economizar é através da redução da potência de emissão necessária para uma boa cobertura, diminuindo a distância de transmissão. Esta poupança deve-se, essencialmente à atenuação sofrida pelo sinal quando este é propagado pelo ar. Para tal são necessárias células menores e consequentemente mais estações base [5].

Por outro lado, por cada estação base que se acrescente, é aumentado o número de componentes que consomem energia, sendo, por isso, necessário efectuar uma análise ao consumo de energia de toda a rede para se confirmar o potencial de poupança deste método.

Visto ser bastante difícil alterar o diagrama das redes após a sua implementação, estas são, de um modo geral, projectadas para valores de capacidade muito superiores aos que

efectivamente serão necessários. Assim, é importante perceber qual o impacto desse excesso de provisionamento no consumo de energia.

Caso se verifique um aumento das exigências de tráfego, poderá ser efectuada uma densificação da rede, adicionando macro e/ou micro células, de forma a reduzir a distância entre células. Esta alteração na rede será mais benéfica se se optar pela colocação de pequenas células na extremidade da macro, onde o sinal é mais afectado pela atenuação e interferências de células vizinhas [6], sendo, por isso, necessária uma maior potência de emissão para que se mantenham os mesmos valores de capacidade verificados no centro da célula.

2.2.1.2 Evolução Para Redes com Múltiplas Tecnologias de Acesso Rádio

As redes heterogéneas são um dos meios de expandir a capacidade de uma rede móvel. Uma rede heterogénea é tipicamente constituída por múltiplas tecnologias de acesso rádio, arquitecturas, soluções de transmissão e estações base com capacidade de variação da potência de transmissão [7].

No futuro, as redes sem fio serão radicalmente diferentes das redes actuais, e serão constituídas por tecnologias de acesso rádio independentes, devido à noção amplamente aceite de convergência na heterogeneidade.

Esta ideia estimula a tendência de integração de novas tecnologias de acesso rádio, com características diferentes, para uma multiplicidade de tecnologias independentes já existentes, cada uma com cobertura, mobilidade, largura de banda e *QoS (Quality of Service)* distintos mas complementando-se entre si. Na Figura 2.1 pode-se verificar um exemplo de uma rede heterogénea, enquanto na Figura 2.2 está representado um exemplo de um site que integra diferentes tipos de tecnologia de acesso rádio.



Figura 2.1 – Representação de uma rede heterogênea (extraída de [8]).

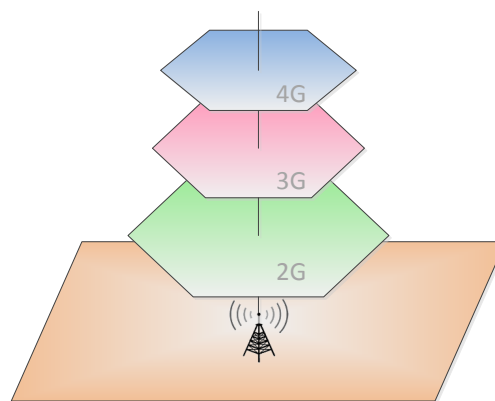


Figura 2.2 – Representação de um site composto por várias tecnologias de acesso rádio.

Consequentemente, as futuras redes sem fio estão previstas como uma plataforma de convergência, em que a reunião de diferentes tecnologias de acesso rádio complementares permita que os serviços multimédia possam ser suportados de forma otimizada através da rede, possibilitando assim o acesso de uma forma mais eficiente a qualquer pessoa em qualquer lugar, a qualquer hora [9].

2.2.1.3 Utilização de Retransmissores/Repetidores - Relay Nodes

A importância do conceito de retransmissão é relativamente recente na arquitetura de uma rede. O retransmissor ou repetidor capta os sinais transmitidos a partir de uma estação base para um dispositivo móvel e reenvia o sinal amplificado para o dispositivo móvel, não necessitando assim de uma ligação com a rede. A utilização de repetidores está a ser estudada

pela 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) como uma tecnologia que oferece a possibilidade de ampliar a cobertura e aumentar a capacidade (Figura 2.3), permitindo opções de implementação mais flexíveis e de mais baixo custo [5].

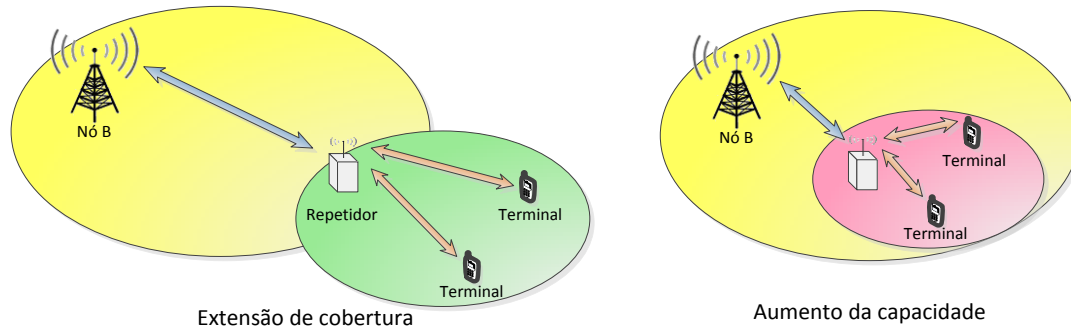


Figura 2.3 – Exemplo da aplicação de repetidores.

Os repetidores, para além de serem mais simples, cobrem áreas muito menores quando comparados com as macro células, sendo por isso necessária uma menor energia de transmissão comparativamente à necessária nos NósB. Isto é, visto os repetidores estarem pensados para abranger uma pequena extensão, é espectável que consumam também uma menor quantidade de energia. Esta torna-se, por isso, uma solução promissora para aumentar a eficiência energética de uma rede móvel.

2.2.1.4 Antenas MIMO e Adaptativas

Um sistema MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) consiste na utilização de múltiplas antenas quer no receptor quer no transmissor. Esta técnica pode ser utilizada para melhorar o desempenho do sistema através da diversidade espacial ou através de multiplexagem espacial. Poderão usar-se também algumas das antenas para diversidade e as restantes para multiplexagem espacial dependendo o número de antenas que se utiliza para cada objectivo e da aplicação que se pretende executar. Na Figura 2.4 pode-se verificar um esquema simplificado da evolução da tecnologia, desde o esquema SISO (*Single-Input Single-Output*) até ao MIMO.

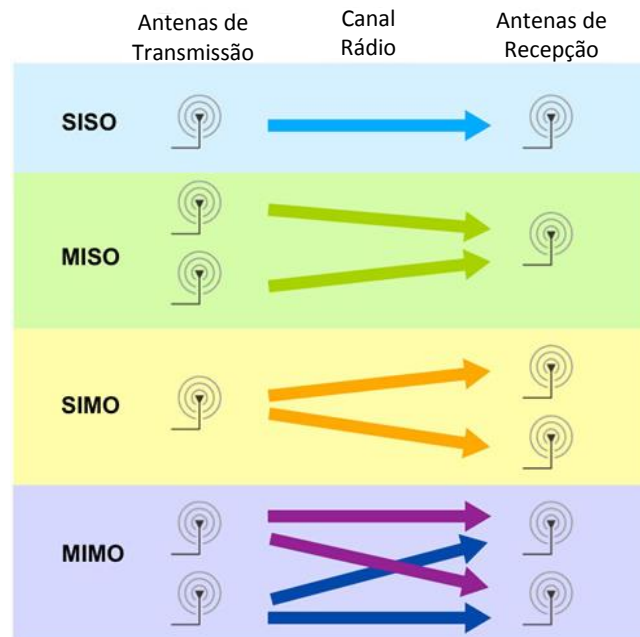


Figura 2.4 – Evolução da tecnologia MIMO (extraída de [10]).

Estes sistemas podem suportar débitos mais elevados para a mesma energia de transmissão e respeitando a mesma taxa de erro [BER (*Bit Error Rate*)] ou seja, para se obter o mesmo rendimento de um sistema SISO, um sistema MIMO requer menos energia de transmissão, podendo, por isso, acreditar-se que estes sistemas são mais eficientes do que os sistemas SISO. No entanto, o consumo de energia do circuito de um sistema MIMO poderá ser superior ao de um sistema SISO uma vez que requer mais transmissores e receptores RF e um maior processamento de sinal [11].

Vários estudos foram realizados acerca da eficiência energética dos sistemas MIMO [12], sendo possível retirar as seguintes conclusões:

- A transmissão utilizando potência máxima, é a forma ideal para se obter uma boa eficiência espectral mas só existirão vantagens na eficiência energética em cenários com más condições de canal.
- Em grande parte dos casos, para se aumentar a eficiência energética, é necessário reduzir a potência de emissão e a generalidade das potências recebidas o que provoca uma redução da eficiência espectral, demonstrando assim que terá de existir um ponto de equilíbrio entre estas duas métricas.

- O balanceamento deste ponto de equilíbrio é a chave para maximizar o potencial benefício da utilização de um sistema MIMO em virtude de um sistema SISO.
- Com a utilização de modelos teóricos de consumo de energia, os sistemas MIMO poderão melhorar bastante a eficiência energética de uma rede.
- Na prática, através da utilização de modelos realistas de consumo de energia, as melhorias na eficiência energética providenciadas por sistemas MIMO, em relação às providas por sistemas SISO, irão ser resultado de uma otimização da eficiência espectral quando ambas as técnicas utilizam o mesmo esquema de alocação de energia.
- Um sistema MIMO 2x2 não é necessariamente preferível, sob o ponto de vista da eficiência energética, quando comparado a um sistema SISO e a utilização de mais de 2 antenas de transmissão poderá provocar um decréscimo de eficiência.

2.2.2 Cooperação Entre Estações Base

A cooperação entre estações base proporciona uma abordagem competitiva para aumentar a eficiência energética de uma rede, aumentando a sua eficácia espectral. Os ganhos de eficiência espectral estão fortemente relacionados com a macro diversidade disponibilizada aos utilizadores que estão localizadas no extremo da célula, onde os gastos de energia de uma única estação base são bastante significativos. O efeito da macro diversidade é aproveitado tanto no canal ascendente como no descendente [6].

A cooperação entre as estações base pode ser realizada sob o ponto de vista de controlo, ou de dados. Na primeira opção, as estações base vizinhas utilizam uma parte da largura de banda, com o objectivo de coordenar as suas atribuições de recursos e decisões de escalonamento, de modo a minimizar a interferência entre elas, sendo esta uma importante fonte de desperdício de energia. Na segunda opção, cooperação sob o ponto de vista dos dados, as estações base vizinhas funcionam como uma só antena sobre os recursos que estão abrangidos pela cooperação. Para que tal seja possível, os dados que são enviados e recebidos de e pelos utilizadores são compartilhados usando um canal de transmissão de alta velocidade. Apesar de grande parte da poupança de energia obtida pela cooperação entre estações base ser obtida através do aumento da eficiência espectral, é necessário ter em consideração os custos adicionais associados a estas técnicas. Estes custos estão relacionados com os componentes

necessários para permitir a ligação entre células e com o processamento extra que será necessário [6].

2.2.2.1 Reutilização de Fracções da Frequência

A reutilização de fracções da frequência é uma estratégia que tem sido estudada com o objectivo de atenuar a interferência gerada nas redes baseadas em OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), que utilizam esquemas simples de reutilização de frequências [13].

Além dos factores de reutilização convencionais, por ex. 1 ou 3, muitos outros esquemas de reutilização, mais avançados, são propostos para que seja possível atingir um equilíbrio entre a eficiência espectral obtida pela reutilização do espectro e a eficiência espectral obtida usando, de uma forma adaptativa, esquemas de codificação e de modulação mais complexos.

Estes esquemas de reutilização de frequência avançados podem ser classificados em três categorias principais:

- Reutilização de fracções de frequência totalmente isolada;
- Reutilização de fracções de frequência parcialmente isolada;
- Reutilização de fracções de frequência dinâmica.

No primeiro caso, a célula é dividida em duas partes geográficas. A parte central utiliza um FR (factor de reutilização) = 1 e na extremidade da célula é usado um FR superior, por ex. 3, para um cenário de três sectores. Este esquema melhora o desempenho na extremidade da célula mas, ao mesmo tempo, prejudica o rendimento devido ao FR = 3. Poderá ser verificado na Figura 2.5 um exemplo simplificado da aplicação desta técnica.

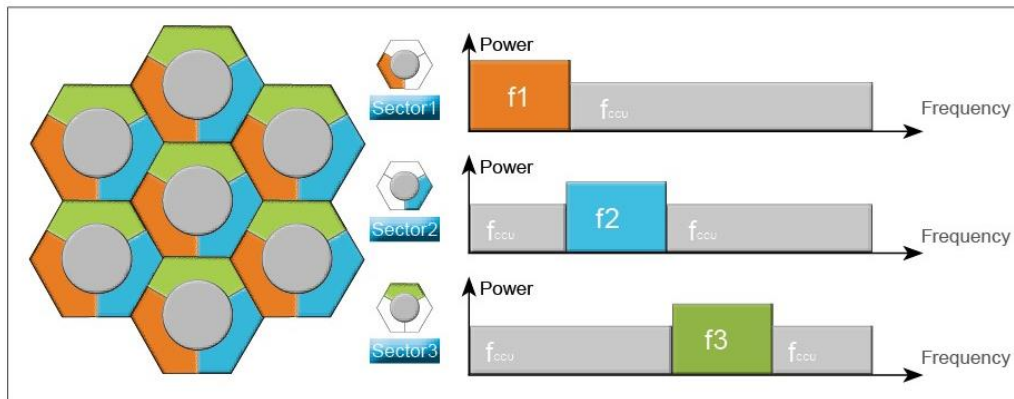


Figura 2.5 – Representação da reutilização de frações de frequência totalmente isolada (extraído de [14]).

Em sistemas que utilizem reutilização de frações de frequência parcialmente isolada, todas as células usam todas as subportadoras mas na parte exterior da célula é utilizado um grupo de portadoras com baixo consumo de energia. Esta mesma portadora poderá ser utilizada na célula adjacente com alta potência. Este cenário provoca um melhor rendimento do que o anterior devido à utilização de um $FR = 1$, mas o seu desempenho degrada-se rapidamente quando a carga do sistema aumenta.

No terceiro caso, a célula não é dividida em áreas geográficas nem existe uma divisão de subportadoras. São, neste caso, criados grupos virtuais de portadoras para serem usadas em grupos virtuais de utilizadores. Estes grupos virtuais de subportadoras e utilizadores correspondentes são determinados dinamicamente verificando as condições do canal para cada utilizador, em cada subportadora, em cada estação base. Apesar deste cenário apresentar em média, melhores resultados que os dois anteriores, o mesmo não se verifica na extremidade da célula. Além disso, existem requisitos necessários para a implementação desta técnica como a necessidade de uma cooperação global, baseada numa sinalização complexa e a necessidade de um poder computacional enorme, que a tornam efectivamente impraticável.

Cada um destes esquemas de reutilização é o ideal para um cenário específico, preenchendo os critérios de alto desempenho para algumas métricas, ao mesmo tempo que sacrifica o desempenho em outras métricas [13].

2.2.2.2 Escalonamento Coordenado

Esta técnica é baseada na atribuição de recursos (canais, bandas, tempo e potência) no canal descendente, de um sistema coordenado de múltiplas células [12]. Nos esquemas

convencionais de alocação de recursos, estes são mantidos ortogonais entre as células interferentes. Esta abordagem, indicada para cenários de interferência limitada, está longe de ser ideal, no caso de transmissões ponto a ponto, bem separadas espacialmente, onde a reutilização dos recursos é mais justificada. Além disso, se os recursos são reutilizados dentro das células adjacentes a necessidade de coordenação entre os recursos de rádio torna-se ainda mais fundamentada.

Foi proposta e avaliada no projecto EARTH, uma ferramenta para partilha e alocação de recursos sequenciais e coordenados entre os sectores interferentes de estações base adjacentes. No canal descendente, as diferentes estações base revezam-se para alocar os recursos sequencialmente, deixando margens específicas para "a próxima estação base de sequência" e respeitando a alocação da "estação base anterior". Esta ordem é alterada ao longo do tempo para garantir a equidade.

2.2.2.3 Impacto das Arquitecturas de Rede

As técnicas de coordenação de múltiplas células dependem da sinalização entre estações base e, eventualmente, de uma troca de dados do utilizador. Assim sendo, esta cooperação requer requisitos específicos na infra-estrutura de rede. A escolha de uma tecnologia de transmissão de dados para o *core* da rede depende das exigências de capacidade e latência que o operador móvel requer [12].

Serão indicadas de seguida quatro técnicas possíveis para interligação com a rede, cada uma delas com diferentes características em termos de custo e desempenho, e mais importante neste ponto, o consumo de energia. Considere-se então, e tendo como referência a Figura 2.6,

- (A) PON (*Passive Optical Network*),
- (B) AON (*Active Optical Network*) [também referido como P2P (*Point-to-point*)],
- (C) FTTN (*Fibre-to-the-node*),
- (D) MW (*Microwave links*).

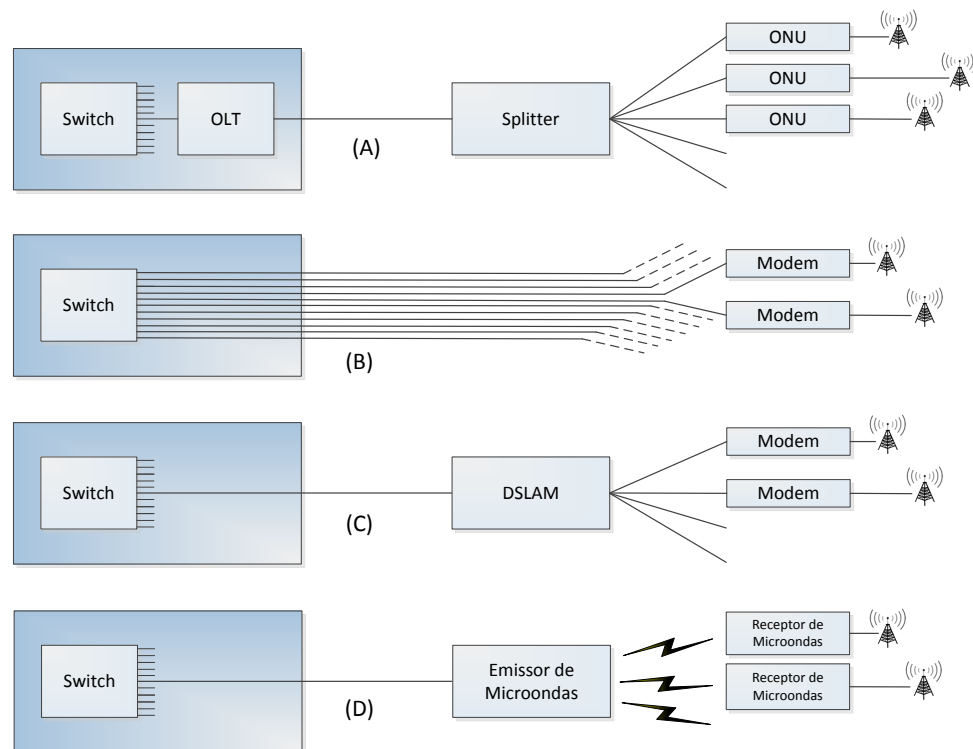


Figura 2.6 – Representação das diferentes técnicas de interligação com o core da rede.

Segundo o projecto EARTH a tecnologia PON é mais eficiente do que outras tecnologias em termos absolutos. Por outro lado, assim que o número de estações base ligadas aumenta, a tecnologia AON torna-se mais competitiva e pode, potencialmente, proporcionar um melhor desempenho no consumo de energia, com o aumento da largura de banda requerida por estação base. Este será um parâmetro importante a ter em conta, já que a cooperação entre estações base é susceptível de introduzir um aumento do tráfego, exigindo, por isso, um aumento da largura de banda disponível.

2.2.3 Reconfiguração de Redes Adaptativas

A análise do tráfego em redes actuais e as previsões da sua tendência de crescimento demonstram que as estações base vão continuar a usar apenas uma pequena fracção da sua capacidade. Verifica-se que, em média, os recursos não são totalmente utilizados, nem mesmo cumprindo as fortes exigências relativas aos baixos valores de latência e da probabilidade de bloqueio. Além destas verificações, a análise da variação diária do tráfego de dados nas redes actuais mostra que existem longos períodos durante um dia em que a carga média da rede pode ser de 5 ou 10 vezes menor do que o valor pico obtido nas horas de maior ocupação. Pode-se concluir assim que uma boa parte do consumo diário de energia tem como objectivo

permitir a capacidade total do sistema, mesmo quando os requisitos reais de tráfego são muito menores [6].

Para que se reduza esse excesso, é necessária uma gestão inteligente da rede a fim de economizar a energia. Um caminho promissor para reduzir o consumo de energia das redes móveis é, dinamicamente, seguindo a variação diária de tráfego, reduzir o número de elementos activos na rede.

A gestão de uma rede que tenha em consideração a eficiência energética poderá desligar/ligar ou reconfigurar recursos de rede, mas terá também de controlar a carga de tráfego, a utilização de recursos e a qualidade de serviço em todas as células, para que as acções de economia de energia não sejam perceptíveis para os utilizadores ao nível da qualidade de cobertura ou de serviço.

Serão aqui apresentadas quatro possíveis técnicas para se efectuar essa gestão:

2.2.3.1 Gestão Dinâmica da Largura de Banda

A gestão dinâmica da largura de banda é baseada numa adaptação gradual da largura de banda utilizada para o tráfego necessário, ou seja, existe uma adaptação do número máximo de blocos que são usados durante cada sub-trama de LTE. A potência máxima total de transmissão pode ser reduzida quando são usados menos blocos. Poderá então ser modificado o ponto de funcionamento do amplificador de potência adaptativo através da redução da tensão de alimentação de modo a que o amplificador opere mais de perto ao seu ponto de funcionamento mais eficiente.

Esta técnica pode ser complementada, em termos de poupança de energia, pela minimização de interferência entre células. Tal pode ser conseguido através da coordenação entre células, verificando qual a parte não utilizada da largura de banda. Para facilitar a gestão desta coordenação, é sugerido um esquema de reutilização parcial com factor 3, que considera a alocação de largura de banda máxima de 10 MHz para todas as células. Para que este esquema de alocação possa ser implementado, é necessário que cada célula da rede utilize, no escalonamento, um conjunto pré-configurado de blocos em primeiro lugar. Se os recursos pré-configurados se esgotarem, serão utilizados os recursos da célula vizinha. Em seguida, os recursos da célula vizinha são usados, até que estejam todos a ser utilizados, numa largura de banda máxima de 10MHz [6].

2.2.3.2 Sectorização Dinâmica

As redes móveis actuais são constituídas principalmente por macro células, sendo estas as principais responsáveis pela cobertura e pelo transporte de grande parte do tráfego. Estas células estão densamente instaladas nas áreas urbanas de modo a suportarem as crescentes exigências de tráfego. O objectivo dos operadores é a reutilização dos sites já existentes, tanto tempo quanto possível, mesmo existindo actualizações na rede, criando novos sites compostos por micro células somente quando deixa de ser possível manter a qualidade de serviço apenas com as macro. Efectuando uma análise ao tráfego, verifica-se que uma rede dimensionada para suportar os picos de tráfego, tem um grande excedente de capacidade nas horas menos exigentes, como por exemplo à noite.

Em redes urbanas, as macro células estão próximas umas das outras, provocando uma limitação da capacidade, em períodos de grande tráfego, devido à interferência entre as mesmas. Nas situações em que não existe uma carga muito elevada na rede, a interferência é baixa e os receptores funcionam, normalmente, com uma elevada margem sobre o ruído térmico. Nestes casos, pode-se tolerar uma determinada perda extra nas ligações de rádio e as macro células podem alterar o esquema de sectorização, usando menos, mas maiores sectores. Por exemplo, a partir de uma configuração tri-sectorizada passa para uma configuração omni-direccional. Ao desligar sectores, será também permitido desligar unidades de rádio. Visto estas unidades representarem uma parte dominante no consumo total de energia, irá ser assim aumentado o potencial de economia de energia nas macro células.

O operador poderá estimar a margem da relação sinal-ruído em estações base com pouca carga e identificar os nós onde a sectorização dinâmica pode ser aplicada sem o risco de uma degradação considerável do serviço. Visto que o principal objectivo dos operadores é garantir um determinado nível no serviço, em todas as redes, os recursos de rádio apenas deverão ser desligado ou colocados em *standby* quando é esperado que o tráfego se mantenha abaixo de um determinado limiar durante um determinado período de tempo, voltando a ser ligados quando esse limiar for ultrapassado [15].

2.2.3.3 (Des)Ligar Células em Redes com uma só Camada

Através da análise do consumo de energia de uma rede móvel, verifica-se que o elemento que mais contribui para um elevado consumo de energia é a própria estação base, sendo este consumo repartido por vários componentes, como por exemplo, o amplificador de potência, a

unidade de banda-base ou os sistemas de arrefecimento. A energia consumida numa estação base para satisfazer as exigências de tráfego, é inferior à quantidade de energia que se perde na antena e na sua fonte de alimentação.

Na busca de métodos que permitam aumentar a eficiência energética na infra-estrutura de uma rede móvel, foi estudada a hipótese da aplicação de diversos esquemas onde são geridos os tempos em que as estações base estão ligadas ou desligadas, proporcionando assim uma poupança considerável de energia consumida. Ou seja, o número de estações base é reduzido de uma forma dinâmica, havendo, por isso, menos nós de rede em uso a qualquer momento. Poderá ser efectuada também uma gestão da potência necessária para cada uma delas, levando a um ajuste e configurando correctamente, de acordo com as exigências actuais da rede.

A redução do tráfego em algumas partes de uma rede móvel deve-se principalmente à combinação de dois efeitos: o típico comportamento dia-noite dos utilizadores e a deslocação diária dos mesmos das áreas residenciais para os locais onde se situam os escritórios, locais esses, muitas vezes, com uma grande concentração de empresas, resultando na necessidade de disponibilização de grande capacidade em ambas as áreas, por vezes, de pico de uso, mas resultando também na possibilidade de redução da capacidade durante o período em que a área é pouco povoada (dia para áreas residenciais e noite para as zonas de escritório).

Quando algumas células são desligadas, assume-se que a cobertura de rádio e o provisionamento de serviços podem ser assegurados pelas células que permanecem activas, possivelmente com recurso a um pequeno aumento na potência emitida, de modo a garantir que o serviço está disponível em toda a área sem comprometer o nível de *QoS* esperado [16].

Esta hipótese só é aplicável devido à densa implementação da rede, que foi realizada de modo a suportar as exigências nos picos de tráfego. Nestes casos, a cobertura não é limitada pela potência de transmissão mas sim pela capacidade da célula, provocando uma redução deliberada na dimensão da mesma.

2.2.3.4 Adaptabilidade em Redes Heterogéneas

Tem vindo a existir, ano após ano, um aumento considerável de tráfego, nas redes móveis, estando as redes heterogéneas em destaque quando se pensa na implementação e modernização da rede, especialmente em ambientes urbanos densamente povoados. Estas redes são compostas por uma camada de cobertura dimensionada para servir os serviços de

conversação e de baixo tráfego de dados, e uma camada de capacidade dimensionada para suportar valores mais elevados de tráfego de dados. Um exemplo de uma rede heterogénea encontra-se representado na Figura 2.7.

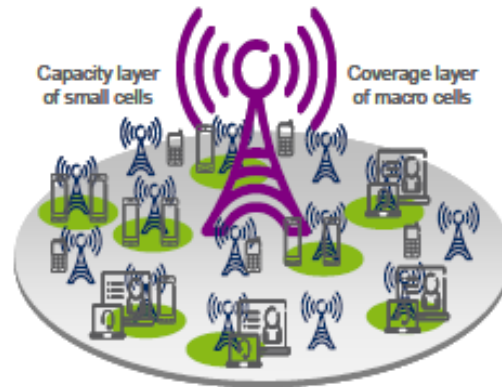


Figura 2.7 – Exemplo da constituição de uma rede heterogénea (extraído de [12]).

Nestas redes, se a camada de cobertura forma uma camada sólida que cobre a área urbana, pode-se esperar que os recursos da camada de capacidade, na maioria das vezes, serão inevitavelmente subutilizados e será então benéfico aplicar as técnicas de poupança de energia na camada de capacidade, de forma a reduzir a energia usada [17].

2.2.4 Gestão Adaptativa de Recursos de Rádio

As operações de escalonamento de pacotes em redes HSPA e LTE são consideradas peças-chave para se garantir o QoS , quando se pensa em maximizar a capacidade do sistema. O objectivo de um algoritmo de gestão da organização de recursos é atribuir estes recursos como a potência de transmissão para os diferentes utilizadores em cada subtrama de forma a otimizar um conjunto de métricas como por exemplo, *throughput*, atraso ou probabilidade de bloqueio, tendo sempre em conta as diferentes restrições para cada cenário (por exemplo, no canal descendente, a estratégia de atribuição é limitada pela potência total de transmissão disponível na estação base).

Até agora, os algoritmos de escalonamento de pacotes têm vindo a ser estudados de modo a otimizar a capacidade e o QoS , mas, no contexto do presente trabalho, também a eficiência energética deve ser considerada pois é possível obter uma poupança de energia significativa quando se aplicam os algoritmos adequados e, especialmente, quando se consideram modelos avançados de gestão de potência ao nível dos componentes da rede.

2.2.4.1 Ferramenta de Escalonamento Baseada na Comutação da Subtrama MBSFN

O protocolo MBSFN (*Multicast Broadcast Single Frequency Network*) tem como objectivo auxiliar o serviço E-MBMS (*Evolved Multimedia Broadcast Multicast Service*) quando aplicado em redes multi-celulares LTE. No modo MBSFN, os dados de tráfego *multicast* são transmitidos em várias células de forma síncrona com a mesma frequência [18].

Uma das possibilidades da utilização de técnicas de escalonamento é a colocação da estação base em *standby* através da utilização das tramas MBSFN sendo assim possível desactivar quer a sinalização de dados quer a de controlo. Esta abordagem é muito útil, pois é compatível com o padrão LTE. A ideia principal desta técnica é configurar dinamicamente o rácio de tramas MBSFN de acordo com as condições de tráfego. Quanto maior for o volume de tráfego, menor é a proporção de tramas MBSFN, sendo a utilização deste tipo de tramas mais evidenciado em cenários onde não se verificam grandes exigências a nível da carga requerida.

2.2.4.2 Escalonamento Priorizado

Com o aumento da capacidade necessária para suportar as exigências de tráfego, têm surgido diferentes algoritmos de escalonamento de recursos rádio. De entre os algoritmos mais clássicos, destacam-se o MCI (*Maximum Channel to Interference Ratio*), ou o PF (*Proportional Fair*), que foram projectados para sistemas baseados em OFDMA com o objectivo de se obter ganhos no espaço, no tempo, na frequência e na diversidade multi-utilizador dos sistemas *wireless*, permitindo assim atingir os objectivos específicos para cada utilizador, respeitando sempre o *QoS* proposto. Estes objectivos poderão variar desde os valores máximos de carga suportados pela célula até valores proporcionais de carga para cada utilizador [19].

O algoritmo MCI efectua uma alocação dos recursos para os utilizadores com maior capacidade momentânea instantânea, enquanto o algoritmo PF tenta equilibrar a alocação de recursos e serve utilizadores com uma capacidade momentânea, proporcionando justiça na distribuição de recursos a longo prazo (taxas de dados iguais entre todos os utilizadores).

Por outro lado, alguns algoritmos de escalonamento são projectados para suportar as exigências específicas de *QoS*. Por exemplo, o algoritmo EDF (*Earliest Deadline First*) foi pensado para alocar os pacotes de acordo com o seu tempo restante de vida (TTL),

concedendo assim prioridade aos fluxos de tráfego com restrições de tempo definidas pelo *QoS*, independentemente da qualidade momentânea do canal.

Outros algoritmos de escalonamento foram ainda projectados para lidar com a coexistência de tráfego em tempo real e não tempo real (tráfego misto). Um dos mais utilizados é o MLWDF (*Modified Largest Weighted Deadline First*) desenhado para ter em consideração tanto as restrições de atraso de tráfego como as condições instantâneas do canal. O objectivo da sua criação foi manter o tempo de atraso inferior e o rendimento superior aos valores pré-definidos com determinadas probabilidades.

Existe também um algoritmo de escalonamento multi-utilizador muito eficaz, que poderá ser aplicado em cenários de redes heterógenas. O algoritmo *Green Scheduling* divide o processo de alocação de recursos em quatro etapas. Na primeira etapa, identifica-se quais os pacotes prioritários e não prioritários. Esta classificação é efectuada através da análise do TTL dos pacotes. Na etapa dois, são atribuídos recursos apenas aos pacotes que tenham alta probabilidade de perder os seus requisitos de *QoS*, independentemente da qualidade momentânea da ligação e do seu potencial para economizar energia. De seguida, se ainda existirem pacotes que não tenham sido processados, irá existir, numa terceira fase a atribuição destes, pelos utilizadores com melhor qualidade de ligação momentânea, independentemente das suas restrições de *QoS*. Finalmente, no quarto passo, irá existir uma adaptação na eficiência energética da transmissão, de forma a economizar a energia de no canal descendente [19].

Todos estes algoritmos de escalonamento foram projectados para maximizar a capacidade do sistema, reduzir o consumo geral de energia e, ao mesmo tempo, superar a diferença entre a qualidade de serviço solicitada (*QoS*) e os recursos limitados da rede.

2.2.4.3 Handovers Verticais

Os *handovers* verticais referem-se à passagem automática de uma tecnologia de transmissão rádio para outra, a fim de manter uma comunicação. O mecanismo de *handover* vertical permite que um dispositivo terminal tenha a possibilidade de mudar de rede, entre diferentes tipos (por exemplo, entre redes 3G e 4G) de forma a ser completamente transparente para as aplicações do utilizador [20].

A gestão do *handover* tem como objectivo controlar a mudança do ponto de acesso, com o objectivo de manter a ligação do dispositivo, que se pode encontrar em movimento, durante a transmissão de dados. O problema é agravado pela presença de pontos de acesso que adoptem diferentes tecnologias, daí a importância dos *handovers* verticais.

Por esse motivo, e de forma a garantir aos utilizadores uma total mobilidade e um serviço ininterrupto, é necessária uma mobilidade entre as diferentes tecnologias de acesso rádio. Na Figura 2.8 poderá ser verificada a diferença entre *handover* vertical e horizontal.

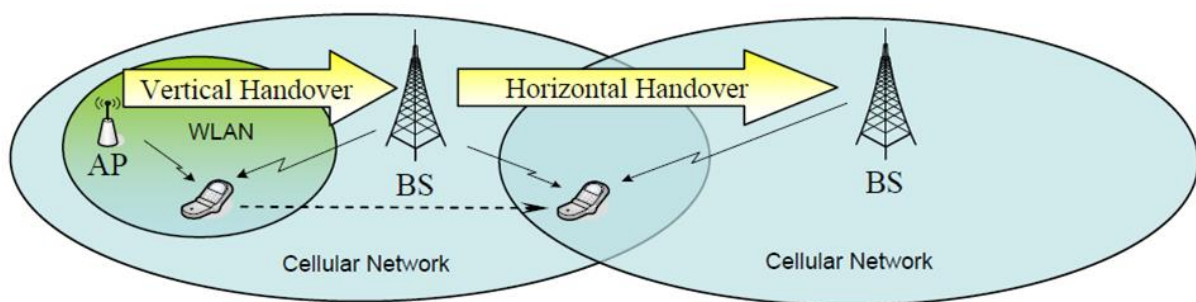


Figura 2.8 – Exemplo de *Handover* vertical e horizontal (extraído de [21]).

O processo de *handover* vertical envolve três fases principais, sendo estas, descoberta do sistema, a decisão e execução do *handover*. Durante a fase de detecção do sistema, o terminal móvel determina quais as redes que podem ser usadas. Estas redes podem também anunciar os débitos suportados e os seus parâmetros de *QoS*. Na fase de decisão, o terminal móvel determina se as conexões devem continuar a usar a rede actual ou se deverão ser transferidos para outra rede. Esta decisão pode depender de vários parâmetros ou métricas, incluindo o tipo de aplicação (por exemplo, conversação, *streaming*), largura de banda mínima e atraso exigido pela aplicação, custo de acesso, energia de transmissão e as preferências do utilizador. Durante a fase de execução, as ligações do terminal móvel são reencaminhadas da rede existente para a nova rede de forma contínua. Esta fase inclui também a autenticação, autorização e transferência de informações do utilizador [20].

2.2.4.4 Transmissão Descontínua e Controlo de Potência

Uma estação base é composta por vários componentes diferentes, como por exemplo, processadores de banda base, transmissores e receptores, amplificador de potência, cabo de alimentação e antenas, fonte principal, conversores de tensão e unidades de refrigeração,

sendo que destes, o componente que mais energia consome é o amplificador de potência. Mesmo quando não há dados a ser transmitidos, o amplificador de potência requer uma fonte de alimentação DC para assegurar o seu ponto de operação fixo. Actualmente, a fonte de alimentação é configurada de forma a fornecer valores constantes de energia, ao longo do dia, independentemente dos valores de tráfego e, por conseguinte, durante uma grande parte do dia, a energia é desperdiçada.

A redução de potência pode ser conseguida de duas formas. A primeira forma consiste em adaptar o ponto de operação do amplificador enquanto a carga de sinal não atinge o nível máximo. Para um pacote de dados, as potências de transmissão mais baixas podem ser conseguidas aumentando a duração da transmissão. A segunda abordagem consiste em desactivar o amplificador de potência sempre que não existam dados ou sinalização a ser transmitidos. Para a exploração do modo de suspensão, é vantajoso ter durações de transmissão curtas que permitam depois que o amplificador se mantenha mais tempo em *standby*. Verificou-se que ambas as estratégias podem ser optimizadas em conjunto e que, num cenário de consumo mínimo, as duas poderão ser aplicadas [22].

2.3 Quantificação de Eficiência Energética

A eficiência de um sistema de comunicação é geralmente medida em termos de eficiência espectral, que está directamente relacionada com a capacidade do canal, sendo medida em bits/s/Hz. Esta métrica indica a eficiência de um espectro de frequência limitada, mas não fornece qualquer visão sobre a eficiência da energia que é consumida. Num contexto de economia de energia, este aspecto torna-se muito importante e, por conseguinte, deve ser integrado na estrutura de avaliação de desempenho por meio de indicadores de eficiência energética. Por exemplo, a potência necessária para satisfazer as necessidades de uma certa área (P/A), medido em $[kW/km^2]$, a capacidade de bits por Joule (bits/J), de Joule por bit (J/bit) e a tradicional relação entre a energia de bit e densidade espectral de potência (E_b/N_0), medida em $[J/bit]$ ou $[W/bps]$, poderão ser alguns desses indicadores [23].

Para que seja possível calcular o custo da electricidade consumida, será necessário converter a Potência [Watt] para Energia, em kilowatt Hora [kWh] usando a expressão:

$$E_{[kWh]} = \frac{P_{[W]} * t_{[h]}}{1000}$$

Para que depois se calcule qual o custo associado ao consumo de energia, considerando o valor de 0,14€/kWh [24]

2.4 Estação Base

A arquitectura de uma estação base depende de vários factores, como a função que vai desempenhar, as condições climatéricas do local onde será instalada e principalmente as características físicas do local, por exemplo, os equipamentos a colocar no topo de um edifício serão diferentes dos colocados no meio de um terreno em ambiente rural.

As estações base são, de um modo geral, constituídas por diversos componentes, sendo os principais:

- RU (*Radio Unit*) – Responsável pela recepção, transmissão, amplificação e filtragem do sinal RF.
- DU (*Digital Unit*) – Unidade onde é efectuado o controlo do processamento, responsável também pelo controlo do relógio, comunicação e sincronismo com a rede de transporte ou com GPS (caso exista), processamento de Banda Base. Efectua a interligação entre RUs sendo também a principal interface de manutenção e de rede do site (LAN).
- Sistema de Alimentação – Os actuais sistemas de alimentação são soluções eficientes para a distribuição da energia pela Estação Base e, num futuro próximo, poderão também fornecer energia a outros componentes do site. Estes sistemas utilizam unidades de distribuição de energia, PDU (*Power Distribution Units*), controladas por disjuntores, permitindo assim, controlar a energia utilizada em determinadas unidades podendo mesmo desligar temporariamente as unidades AC e DC, bem como outros componentes, enquanto estes não se encontrarem em uso, com o objectivo de economizar energia e aumentar a capacidade das baterias. Toda esta gestão é efectuada por *software*.
- Sistema alternativo de alimentação – baterias.
- Sistema de climatização.

- Sistemas opcionais: Controlo de Antenas, TMA, Unidade de Gestão de Alarmes, Balun e GPS.

Ao longo da última década, a arquitectura das células foi evoluindo, sendo agora possível substituir a forma como estas eram organizadas, com grandes rádios localizados num local afastado das antenas, por uma arquitectura em que uma parte do sinal RF pode ser processada em unidades localizadas numa posição mais próxima da antena – RRU (*Remote Radio Unit*). Esta separação do processamento vai provocar uma redução da pegada ecológica do equipamento e uma maior eficiência nas operações de rede.

Na Figura 2.9 encontra-se representada a evolução da arquitectura das Estações Base. Conforme se verifica, nas arquitecturas convencionais, são usados cabos coaxiais para transmitir o sinal de alta frequência da base até à antena, sendo necessária a utilização de amplificadores. Uma das vantagens dos sistemas de rádio remotos é a possibilidade de utilização de fibra óptica, FTTA (*Fiber-To-The-Antenna*) na ligação das RRUs com os restantes módulos da estação base, não sendo necessários os amplificadores usados na ligação por cabo coaxial.

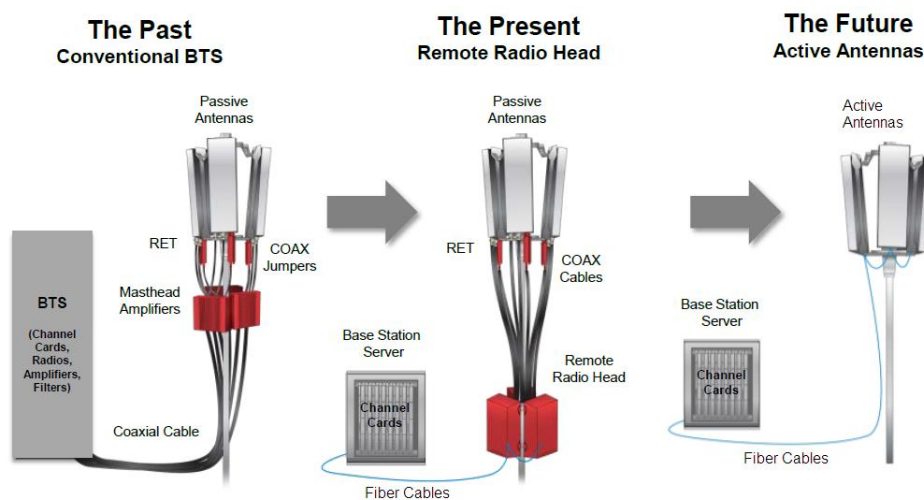


Figura 2.9 – Evolução da Arquitectura das Estações Base (extraído de [25]).

A evolução da tecnologia irá permitir que as antenas não sejam meramente elementos passivos na rede. A integração de elementos eléctricos activos na antena irá permitir que esta tenha um maior contributo no desempenho da estação base, permitindo aos operadores

aumentar a capacidade e cobertura da rede e aumentar também a eficiência energética do conjunto [26].

Consumo de potências nas estações base.

Poderão ser verificadas nas Figuras 2.10, 2.11 e 2.12 as representações gráficas da evolução do consumo de energia de uma estação base: GSM, WCDMA e LTE respectivamente, de acordo com a variação da percentagem de carga da mesma. Confirma-se que a potência consumida pela estação base aumenta com o aumento do tráfego processado. Verifica-se, no entanto, que mesmo quando não existe carga, a estação base continua a consumir energia, pois está sempre a transmitir sinalização, permitindo assim cobertura e possibilitando uma maior mobilidade aos utilizadores.

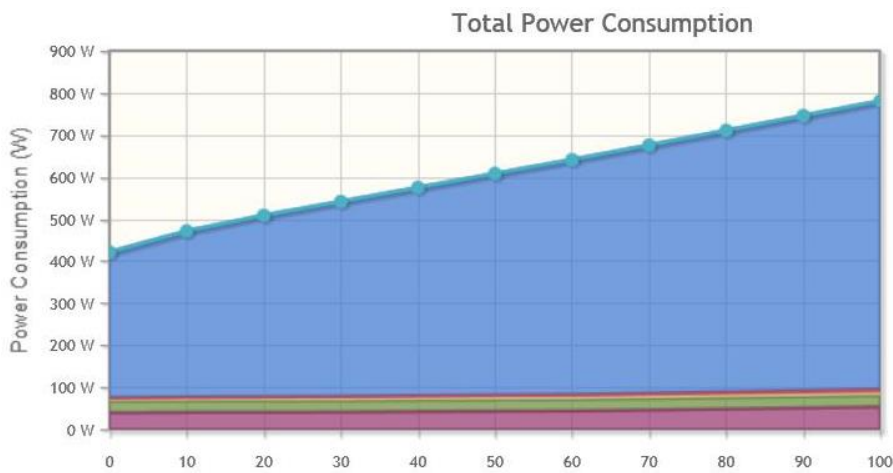


Figura 2.10 – Representação gráfica da variação da potência consumida em função da percentagem de carga – GSM.

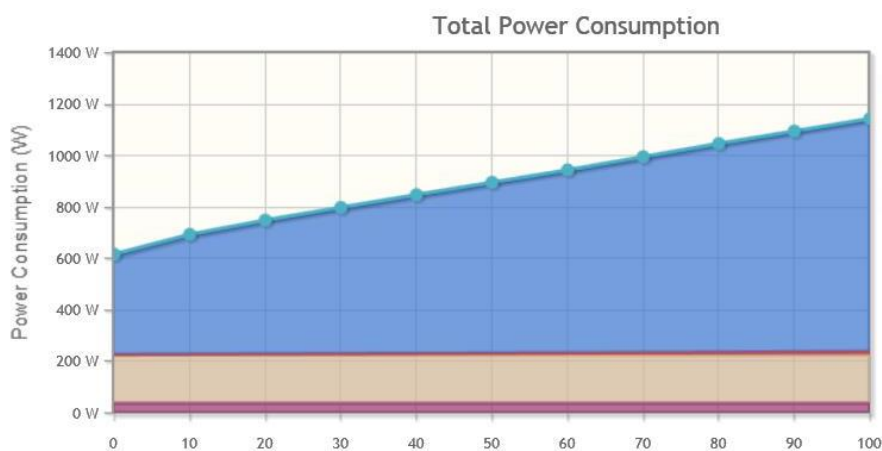


Figura 2.11 – Representação gráfica da variação da potência consumida em função da percentagem de carga – WCDMA.

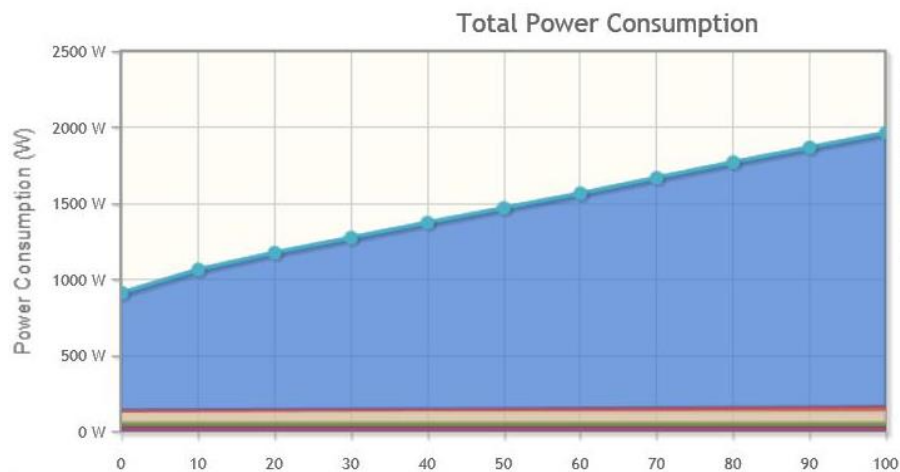


Figura 2.12 – Representação gráfica da variação da potência consumida em função da porcentagem de carga – LTE.

Após análise das Figuras anteriores serão deduzidas as equações que irão ser depois usadas para calcular a potência consumida – P , em função do valor da porcentagem de carga – L . Estas equações serão deduzidas usando como referência os valores de potência consumida para os casos de porcentagem de carga igual a 0 e igual a 100 e terão a seguinte forma:

$$P = P_{(L=0)} + mL \quad (2.1)$$

Em que:

$$m = \frac{P_{(L=100)} - P_{(L=0)}}{100}$$

$L \rightarrow$ porcentagem de carga

Foi também calculada a potência consumida pela estação base quando os componentes rádio forem colocadas em *standby*, tendo em conta que são estes os responsáveis pela maior porcentagem de consumo de energia. Considerou-se que utilizam 10% da potência que seria consumida numa situação em que não existisse carga e que não se encontrassem em *standby*. Para o cálculo do valor desta potência foram usadas as seguintes equações:

$$P_{(Standby)} = P_{RRU(Standby)} + P_{parcial} \quad (2.2)$$

Em que:

$$P_{RRU(Standby)} = P_{RRU(L=0)} \times 10\% \quad (2.3)$$

$$P_{RRU} = P_{total} - P_{parcial} \quad (2.4)$$

Os valores de $P_{(L=0)}$, $P_{(L=100)}$, m e $P_{(standby)}$ de cada tecnologia, serão deduzidos e calculados no Capítulo 3

2.5 *Self Organising Networks*

Com o aumento da complexidade das redes de rádio usadas nas diversas tecnologias de comunicações móveis, o planeamento da rede terá de ser efectuado de uma forma, cada vez mais simples e eficiente. Processos como o planeamento, a configuração, a gestão, a optimização e a reparação irão necessitar de ser automatizados para que se consiga obter melhorias na rede [27].

Como consequência desta necessidade, o conceito de redes que se organizem automaticamente – SON (*Self Organising Networks*) tem vindo a aumentar, quer de interesse, quer o seu próprio uso. Devido ao facto destas redes terem a capacidade de monitorizar o seu desempenho, elas próprias poderão optimizar os seus processos, providenciando assim uma melhor prestação e uma maior eficiência, permitindo um aumento dos benefícios para os operadores.

Este aumento de benefícios surge com a redução dos custos, obtida, não só, reduzindo a intervenção humana no planeamento, implementação e gestão da rede (OPEX), mas também com a optimização de recursos (CAPEX). Outro factor importante para o aumento dos benefícios será a protecção das receitas que surgirá reduzindo o número de erros humanos.

Existem três áreas sobre as quais estas redes actuam:

- Auto-Configuração – Irá possibilitar que as estações base tenham um comportamento baseado no conceito *Plug and Play*. O objectivo será reduzir o máximo possível a intervenção humana no processo de configuração, permitindo também que o nível de conhecimento dos instaladores não seja necessariamente tão elevado.
- Auto-Optimização – Uma vez que o sistema esteja implementado, será necessário optimizar as características e processos de operação para que se encontrem de acordo com os requisitos da rede

- Auto-Reparação – Poderá surgir, em qualquer sistema, uma alteração das condições para as quais o sistema terá sido desenvolvido. No caso de uma rede de comunicações móveis poderá existir alguma alteração, temporária ou não, do ambiente que rodeia uma determinada estação base, provocada, por exemplo, por um evento, por uma catástrofe natural ou simplesmente pelo desenvolvimento normal do ambiente que a rodeia. Estas alterações poderão provocar falhas no serviço, causando assim constrangimento nos utilizadores. Com a adopção de redes SON é possível que a rede altere as suas características para que se adapte às novas condições do ambiente, evitando assim as falhas referidas antes. Esta adaptação poderá passar pela alteração das áreas das células, aumentando ou diminuindo o nível de potência de células adjacentes ou variando a elevação da antena, por exemplo.

Apesar do grande investimento que é necessário para a implementação destas redes o retorno provocado será ainda maior devido à crescente necessidade de sistemas mais complexos e robustos [27].

2.6 Operations Support Systems

O termo OSS (*Operations Support Systems*) refere-se, geralmente, aos sistemas responsáveis pelas funções de gestão, inventário, planeamento e reparação das redes de serviços de telecomunicações.

Originalmente, os OSSs eram sistemas autónomos, baseados em *mainframes* destinados a apoiar os funcionários de um operador nas suas tarefas diárias tornando os processos manuais mais eficientes.

Actualmente, os operadores são obrigados a gerir um conjunto muito mais complexo de serviços e tecnologias de rede, de forma a manterem-se competitivos no mercado das telecomunicações. Como resultado, estão a ser desenvolvidas novas gerações de OSSs, utilizando tecnologia de topo, para tratar da gestão de informações e dados da empresa. Estes sistemas tornam estas informações um recurso mais acessível e útil na gestão do negócio, prestando serviços e oferecendo um extraordinário atendimento ao cliente. [28]

3 Modelos e Algoritmos Desenvolvidos

3.1 Cálculos de Potências e Custos

Para que fosse possível o cálculo das potências utilizadas e dos respectivos custos, foi necessário verificar qual o valor máximo de tráfego que cada tecnologia tem a capacidade de processar. Este cálculo foi efectuado tendo em conta o débito suportado por cada uma. Foram considerados os seguintes valores:

$$DB_{2G} = 0.26 \text{ [Mbps]} \quad DB_{3G} = 14 \text{ [Mbps]} \quad DB_{4G} = 100 \text{ [Mbps]}$$

Foram depois calculados os valores máximos de tráfego suportados por cada tecnologia, num intervalo de 15 minutos, visto este ser o intervalo de tempo das amostras analisadas, tendo-se obtido os seguintes valores:

$$\text{Trafego Máximo}_{2G} = 29.25 \text{ [MB]}$$

$$\text{Trafego Máximo}_{3G} = 1575 \text{ [MB]}$$

$$\text{Trafego Máximo}_{4G} = 11250 \text{ [MB]}$$

Para o cálculo das potências e, conforme referido no Capítulo 2, após análise das Figuras 2.10, 2.11 e 2.11 e aplicando a equação (2.1), foram retirados os valores de $P_{(L=0)}$ e $P_{(L=100)}$ de cada tecnologia, permitindo assim obter as equações de potência em função da percentagem de carga. Na Tabela 3.1 encontram-se estes valores e as equações finais.

Tabela 3.1 – Equações de potência em função da percentagem de carga.

GSM	WCDMA	LTE
$P_{(L=100)} = 790 \text{ [W]}$ $P_{(L=0)} = 428 \text{ [W]}$ $m = \frac{790 - 428}{100} = 3.62$ $P_{GSM} = 428 + 3.62L$	$P_{(L=100)} = 1133 \text{ [W]}$ $P_{(L=0)} = 610 \text{ [W]}$ $m = \frac{1133 - 610}{100} = 5.23$ $P_{WCDMA} = 610 + 5.23L$	$P_{(L=100)} = 1928 \text{ [W]}$ $P_{(L=0)} = 928 \text{ [W]}$ $m = \frac{1928 - 928}{100} = 10$ $P_{LTE} = 928 + 10L$

Para a obtenção de $P_{(Standby)}$ de cada tecnologia, foram utilizadas as equações (2.2), (2.3) e (2.4) e os resultados são os indicados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Cálculo de $P_{(Standby)}$ para cada tecnologia.

GSM	WCDMA	LTE
$P_{parcial} = 80 \text{ [W]}$	$P_{parcial} = 214.3 \text{ [W]}$	$P_{parcial} = 176.5 \text{ [W]}$
$P_{RRU} = 428 - 80 = 348 \text{ [W]}$	$P_{RRU} = 610 - 214.3$ $= 395.7 \text{ [W]}$	$P_{RRU} = 928 - 176.5$ $= 751.5 \text{ [W]}$
$P_{RRU (Standby)} = 348 \times 10\%$ $= 34.8 \text{ [W]}$	$P_{RRU (Standby)} = 395.7 \times 10\%$ $= 39.6 \text{ [W]}$	$P_{RRU (Standby)} = 751.5 \times 10\%$ $= 75.2 \text{ [W]}$
$P_{(Standby)} = 34.8 + 80$ $= 114.8 \text{ [W]}$	$P_{(Standby)} = 39.6 + 214.3$ $= 253.9 \text{ [W]}$	$P_{(Standby)} = 75.2 + 176.5$ $= 251.7 \text{ [W]}$

Para que sejam calculados os custos associados ao consumo de energia será necessário converter a potência em energia, conforme referido no capítulo 2. Esta conversão é efectuada para cada amostra, correspondendo a intervalos de 15 minutos. Uma vez obtido o valor em kWh de cada amostra, antes e após aplicação do algoritmo desenvolvido, será efectuada a soma de todos os valores obtendo-se o valor total de energia e podendo assim ser calculado o custo associado ao consumo de energia, considerando o valor de 0,14€/kWh. Será depois feita a diferença de valores antes e após aplicação do algoritmo e poderá assim ser confirmado qual o valor que se poupará com a aplicação da técnica desenvolvida.

3.2 Critérios de Selecção

Após o estudo das diferentes técnicas apresentadas no Capítulo 2, foi realizada uma tabela (Tabela 3.3) com os vários parâmetros que se consideraram mais importantes na escolha de uma ou mais destas para implementar no simulador. Os parâmetros escolhidos foram a dificuldade de implementação da técnica respectiva, tendo em consideração o cenário actual da rede. A poupança de energia que se obteria após aplicação da mesma, a possibilidade de aplicação em simultâneo com outras técnicas, a degradação do QoS e por fim o custo associado à sua implementação. A cada um destes parâmetros foi atribuída uma classificação

que poderia ter um de três níveis (☹️ – mau; 😐 – médio (suficiente) e 😊 – bom). Esta classificação foi baseada nas conclusões verificadas no projecto EARTH.

Tabela 3.3 – Resumo das diferentes técnicas estudadas.

Tecnologia		Implementação	Poupança de Energia	Conflitos com Outras Tecnologias	QoS	Custo	Avaliação Final
Combinação Ideal da Dimensão das Células		😊	☹️ (10%)	😊	😊	☹️	😊
Evolução Para Redes com Múltiplas Tecnologias de Acesso Rádio		😊	☹️ (5%)	😊	😊	😊	😊
Utilização de Retransmissores/Repetidores		😊	😊 (31%)	😊	😊	😊	😊
Antenas MIMO e Adaptativas		😊	☹️ (10%)	😊	😊	😊	😊
COOPERAÇÃO ENTRE ESTAÇÕES BASE	Reutilização de Fracções da Frequência	😊	☹️ (8%)	☹️	😊	😊	☹️
	Escalonamento Coordenado	☹️	☹️ (8%)	😊	😊	😊	☹️
	Impacto das Arquitecturas de Rede	☹️	😊	😊	😊	😊	😊
RECONFIGURAÇÃO DE REDES ADAPTATIVAS	Gestão Dinâmica da Largura de Banda	😊	😊 (29%)	😊	😊	😊	😊
	Sectorização Dinâmica	😊	😊 (30%)	☹️	😊	😊	😊
	(Des)Ligar Células em Redes com uma só Camada	😊	😊 (20%)	☹️	☹️	😊	😊
	Adaptabilidade em Redes Heterogéneas	☹️	😊 (35%)	😊	😊	😊	😊
GESTÃO ADAPTATIVA DE RECURSOS DE RÁDIO	Ferramenta de Escalonamento Baseada na Comutação da Subtrama MBSFN	☹️	😊 (20%)	😊	😊	😊	😊
	Escalonamento Priorizado	😊	☹️ (10%)	😊	😊	😊	😊
	Handovers Verticais	😊	☹️ (10%)	😊	😊	😊	😊
	Transmissão Descontínua e Controlo de Potência	😊	😊 (45%)	😊	😊	😊	😊

Foi depois decidido, juntamente com a Ericsson, que a técnica a desenvolver nesta Dissertação seria uma mistura de duas das técnicas que constam na Tabela 3.3. Adaptabilidade em Redes Heterogéneas e *Handover* Vertical. Foram estas as técnicas escolhidas pois, das técnicas estudadas, estas seriam as que mais facilmente poderiam ser implementadas pela Ericsson e não estariam já a ser desenvolvidas.

3.3 Algoritmo a Desenvolver

A técnica a desenvolver consiste então numa análise do valor de tráfego de cada geração, 4G e 3G, em tempo real e, caso esse valor seja, num determinado instante, inferior a um limiar, todo o tráfego dessa tecnologia irá ser encaminhado para a seguinte (4G → 3G → 2G), sendo depois colocados em *standby* os componentes possíveis, associados a essa tecnologia, de modo a poupar energia. Estes componentes irão ser novamente ligados quando o valor de tráfego pretendido para essa tecnologia for suficientemente elevado, de forma a justificar o aumento no consumo de energia resultante desta acção, ou quando a percentagem de ocupação de uma determinada tecnologia se encontre a 100% durante o tempo indicado em $T_{100\%}$. A Figura 3.1 representa o diagrama de blocos geral do sistema, onde poderão ser verificados os dados necessários de entrada e quais os resultados que se irão obter. Será depois efectuada uma explicação detalhada de cada um dos blocos.

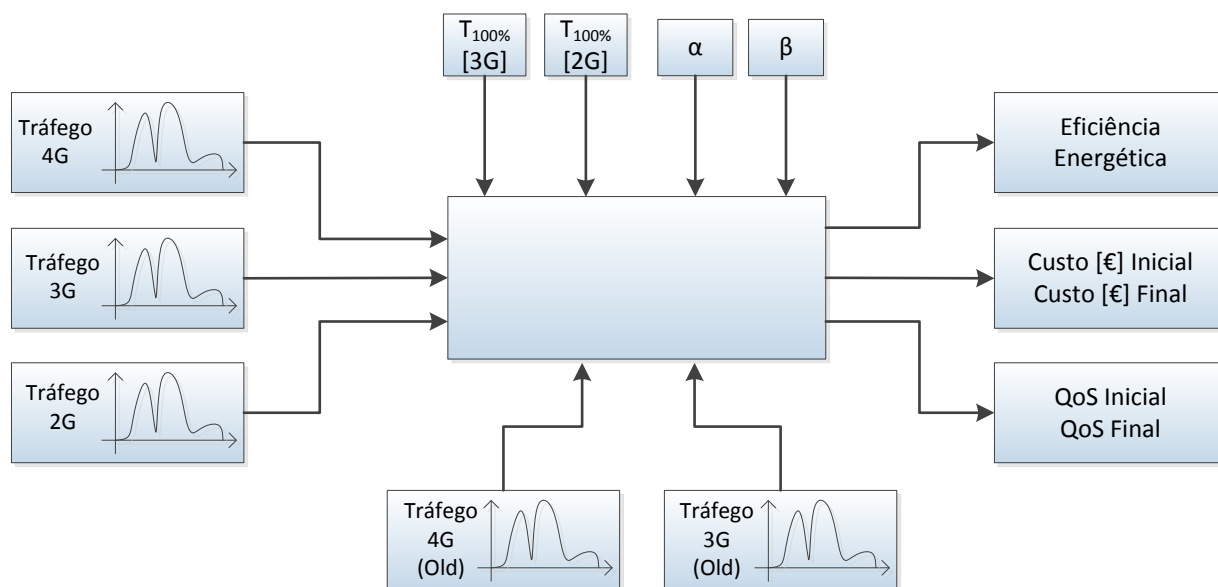


Figura 3.1 – Diagrama de Blocos do Simulador (entradas e saídas).

3.3.1 Variáveis de entrada do simulador

- Tráfego 4G/3G/2G

Estes valores de tráfego encontram-se registados em ficheiro de texto e serão carregados conforme a escolha do cenário pretendido por parte do utilizador. Existem cinco cenários possíveis, sendo que três correspondem a cenários reais obtidos em três zonas do país com ambientes distintos, são estas:

- Ambiente Urbano – Picheleira, Lisboa;

- Ambiente Suburbano – Birre, Cascais;

- Ambiente Rural – Turquel, junto a Alcobaça.

Os outros dois cenários são compostos por dados fictícios, criados especificamente para testar várias situações diferentes, especialmente casos em que o tráfego é bastante elevado, pois nos cenários reais a carga é sempre bastante reduzida.

Todos os cenários apresentam os valores de tráfego em intervalos de 15 minutos, pois foi este o valor mínimo dos dados fornecidos.

- Tráfego 4G/3G (Old)

Estas variáveis representam o tráfego do dia anterior dos diferentes cenários. Estes valores irão ser utilizados como um histórico e irão servir para determinar se será viável alterar o estado de uma tecnologia, num determinado instante, com base no tráfego, no mesmo instante e no instante seguinte, do dia anterior.

O formato dos dados usados para estas variáveis será igual ao usado nas variáveis Tráfego.

- $T_{100\%}$ 3G/2G

Este tempo, escolhido pelo utilizador, representa o tempo em que uma tecnologia poderá estar com uma carga de 100%, após receber o tráfego de outra que terá sido desligada. Isto é, quando se colocam em *standby* os componentes rádio de uma determinada tecnologia, irá existir uma transferência do tráfego que estava a ser processado, passando a ser processado por outra tecnologia. Poderá então existir o caso de não ser possível processar todo o tráfego transferido, só sendo este processado quando a tecnologia tiver essa possibilidade. Quando esta situação se verificar, a carga estará a 100% e poderão ser necessários vários instantes de

tempo até que o tráfego seja todo processado. O $T_{100\%}$ define quantos instantes de tempo a tecnologia estará numa situação de carga a 100%.

Caso o tempo de carga a 100% exceda o valor de $T_{100\%}$, serão ligados os componentes da tecnologia que tinha sido anteriormente desligada.

- α e β

Estas variáveis são os valores de percentagem de carga de 4G e 3G respectivamente, definidos pelo utilizador, a partir dos quais será feita a análise se irão ou não ser desligadas as tecnologias correspondentes.

3.3.2 Variáveis de saída do simulador

- Eficiência Energética

Este valor será obtido comparando os valores da potência e da energia consumidas pela estação base, ao longo de um dia, antes e depois da aplicação do algoritmo.

Serão também calculados os valores da relação W/bps ao longo do dia, antes e depois da aplicação do algoritmo. Quanto menor for este valor, mais eficiente será o sistema.

- Custo Inicial/Final

Será calculada a diferença do custo antes e após aplicação do algoritmo. O valor do custo será calculado fazendo a conversão do valor total de potência consumida para kWh e aplicando um valor de 0.14€/kWh, conforme indicado no Capítulo 2.

- QoS Inicial/Final

Como medida de QoS, será calculado o valor do atraso que poderá existir no processamento do tráfego. Este atraso será provocado quando existir sobrecarga de uma tecnologia, provocando assim a existência de tráfego que só poderá ser processado nas amostras seguintes. Visto as amostras de entrada estarem a ser analisadas em períodos de 15 minutos, os valores do atraso serão também referentes aos mesmos períodos, sendo depois calculado o valor médio em segundos durante um dia.

3.4 Algoritmo Desenvolvido

Na Figura 3.2 está representado um fluxograma de todo o processo com destaque nos diversos testes e decisões a ser tomadas. Todo o processo de decisão irá ser explicado mais à frente.

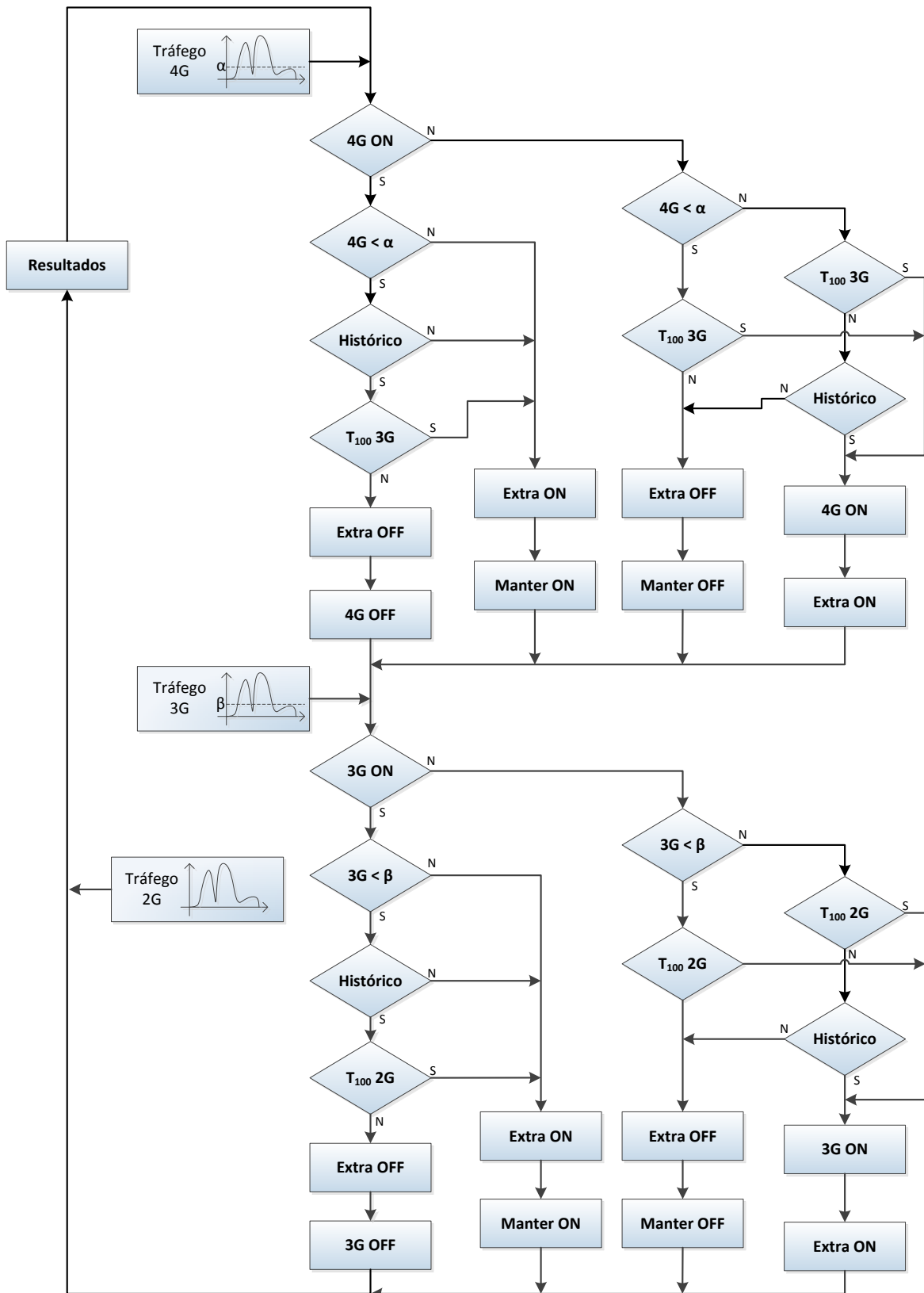


Figura 3.2 – Fluxograma do Algoritmo do Simulador.

Tendo como base o fluxograma da Figura 3.2, irá de seguida ser explicado, passo a passo, o algoritmo criado.

Após escolha do cenário pretendido por parte do utilizador, são carregados para memória os valores de tráfego a ser analisados, das três gerações, bem como os valores de tráfego do dia anterior, das mesmas células.

Uma vez carregados os valores, é efectuada uma série de testes onde se decidirá se a tecnologia fica ligada ou em *standby*. Os testes serão sempre realizados em primeiro lugar para o 4G e serão depois realizados testes semelhantes para o 3G.

Os dois primeiros testes realizados confirmam se a percentagem de carga da tecnologia é superior ou inferior ao limiar definido (α no caso do 4G e β no caso do 3G) e se a respectiva tecnologia se encontra ligada ou desligada no instante a ser analisado. Estes dois testes permitem identificar quatro estados distintos indicados de seguida. De salientar que os testes que irão ser expostos de seguida são referentes à análise de tráfego 4G, sendo que os testes referentes ao 3G são idênticos, não estando, por isso, aqui explicitados.

- $4G > \alpha$ & $4G ON$

Situação em que o valor do tráfego de entrada é superior ao limiar definido pelo utilizador (α no caso do 4G e β no caso do 3G) e os componentes dessa tecnologia encontram-se ligados.

- $4G > \alpha$ & $4G OFF$

Neste caso o valor do tráfego de entrada é também superior ao limiar definido pelo utilizador, mas os componentes da tecnologia já se encontram em *standby*.

- $4G < \alpha$ & $4G ON$

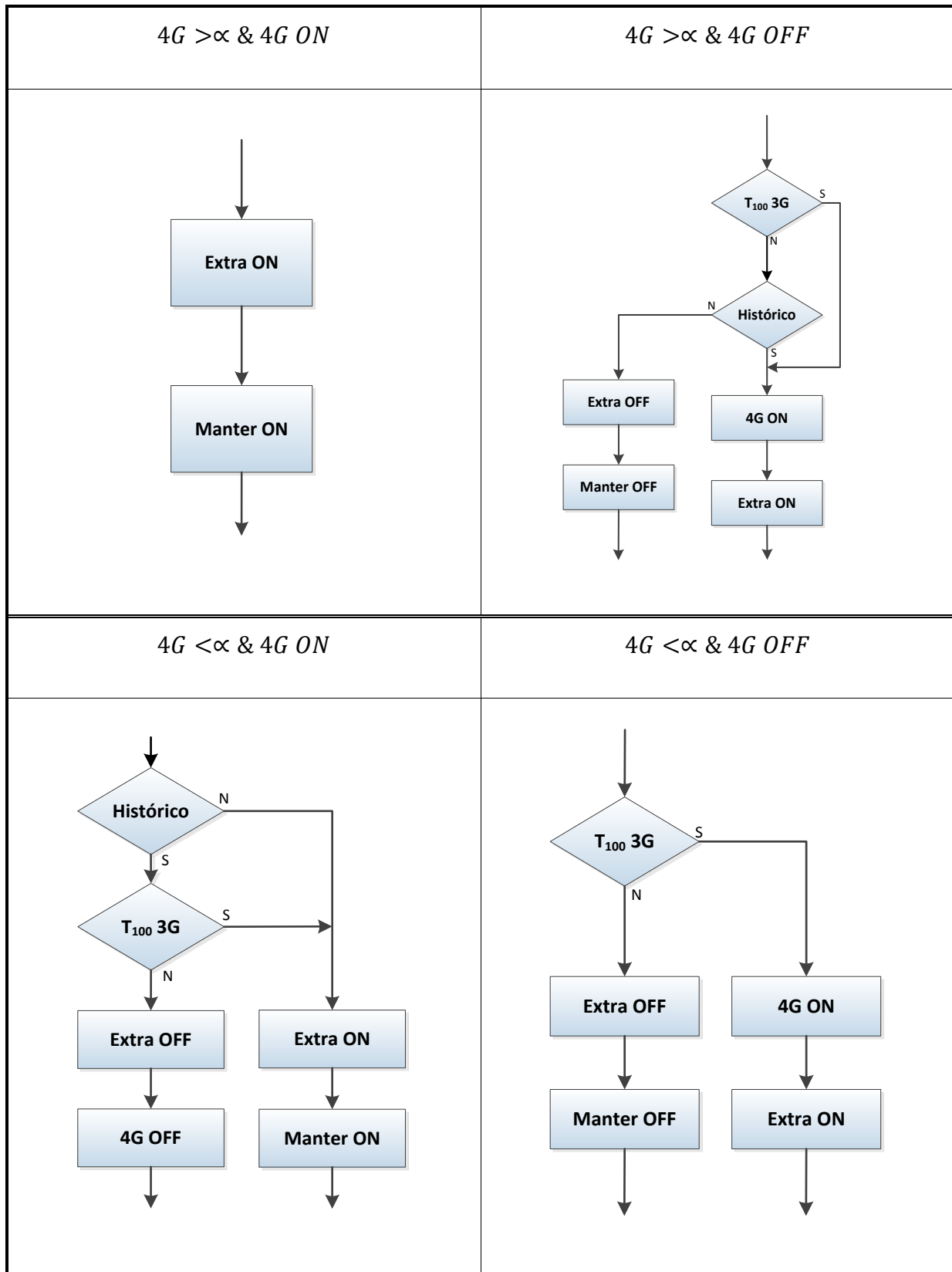
Esta situação verifica-se quando os componentes estão ligados, mas o valor de tráfego no instante em questão é inferior ao limiar definido anteriormente.

- $4G < \alpha$ & $4G OFF$

Verifica-se neste estado que os componentes já se encontram em *standby* e que o valor de tráfego no instante em questão é inferior ao limiar definido.

Após ser verificado qual o estado no instante que está a ser analisado, irá ser executada uma sequência específica de acções – Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Diferentes acções para cada estado.



Cada bloco indicado no fluxograma da Figura 3.1 e na Tabela 3.4 representa um conjunto de acções que serão também detalhadas de seguida.

- `extra OFF / extra ON`

A variável `extra` representa a quantidade de tráfego a transferir entre as diferentes tecnologias, quando estas são ligadas ou desligadas;

- `Extra OFF` – Esta função é utilizada quando se decide desligar uma tecnologia e o tráfego que ainda se encontra a ser processado por esta terá de ser transferido para a tecnologia referente à geração anterior. Visto esta ter uma menor capacidade, irão existir, em alguns casos, pedidos de clientes que não poderão ser imediatamente processados, gerando assim atraso na rede, e provocando assim uma degradação de QoS devido a estas decisões. A diferença entre a soma do tráfego que já se encontra a ser processado pela tecnologia e o que é transferido de outra, e a capacidade máxima da tecnologia, será então armazenado como tráfego `extra`.
- `Extra ON` – Função onde é determinada a quantidade de tráfego a ser transferido para a tecnologia a ligar ou que já se encontra ligada. Caso a soma da quantidade de tráfego a transferir, com o tráfego actual, seja superior à capacidade máxima da tecnologia, irá apenas ser transferido o suficiente para que a capacidade máxima seja obtida, e o restante irá ser transferido no(s) próximo(s) ciclo(s).

- `Manter ON / Manter OFF`

Situação verificada quando não existe alteração no estado da tecnologia a ser analisada;

- `Manter ON` – Neste caso irá apenas ser somado o tráfego `extra`, caso exista, ao tráfego actual da tecnologia em questão.
- `Manter OFF` – Esta função define que o tráfego da tecnologia a ser analisada será igual ao valor de sinalização e que irá ser somado ao tráfego da tecnologia referente à geração anterior, o valor do tráfego `extra`, caso exista.

- 4G ON / 4G OFF

Situação verificada quando existir uma alteração de estado, neste caso no 4G, após serem efectuados todos os testes necessários.

- 4G ON – O processo de ligar uma tecnologia, implica apenas somar o valor do tráfego extra que já estará acumulado, caso exista, ao valor do tráfego actual da mesma tecnologia.
- 4G OFF – Será, neste caso, necessário definir o valor de tráfego de 4G como sendo o valor mínimo, necessário à sinalização desta tecnologia, sendo que o restante tráfego irá ser somado ao tráfego que já está a ser processado pelo 3G.

- Histórico

Conjunto de testes que permitem verificar se será viável a alteração de estado de determinada geração ou se a variação que existiu no valor do tráfego terá sido apenas momentânea, não se justificando assim a alteração o estado da tecnologia. Estes testes consistem na verificação de duas situações distintas: análise dos valores de tráfego de um determinado número de amostras imediatamente anteriores e previsão do futuro com base na análise das amostras correspondentes ao mesmo período e imediatamente posterior do dia anterior.

- T_{100} 3G

Este teste compara o número de amostras em que a percentagem de utilização de uma determinada tecnologia se encontra a 100% com o valor definido pelo utilizador, não permitindo assim que exista uma sobrecarga na rede. Caso se verifique esta sobrecarga, irão ser ligados os componentes que se encontram em *standby*.

- Cálculo do atraso

Conforme foi referido, o atraso será provocado quando uma geração não tem capacidade para processar todo o tráfego pendente na rede. O valor de atraso será o número de amostras que será necessário analisar para que todo o “extra”, gerado por uma determinada amostra, seja processado.

3.5 Aplicação

Com o objectivo de simplificar a execução do algoritmo indicado em cima e a interacção com o utilizador, foi criada uma aplicação cujo interface gráfico está representado na Figura 3.3. Aqui será possível alterar todos os parâmetros referidos anteriormente de forma a testar qual a melhor combinação de valores para *Alpha*, *Beta* e $t_{100\%}$. Será também possível optar por um dos vários cenários disponíveis e visualizar os resultados finais na coluna do lado direito.

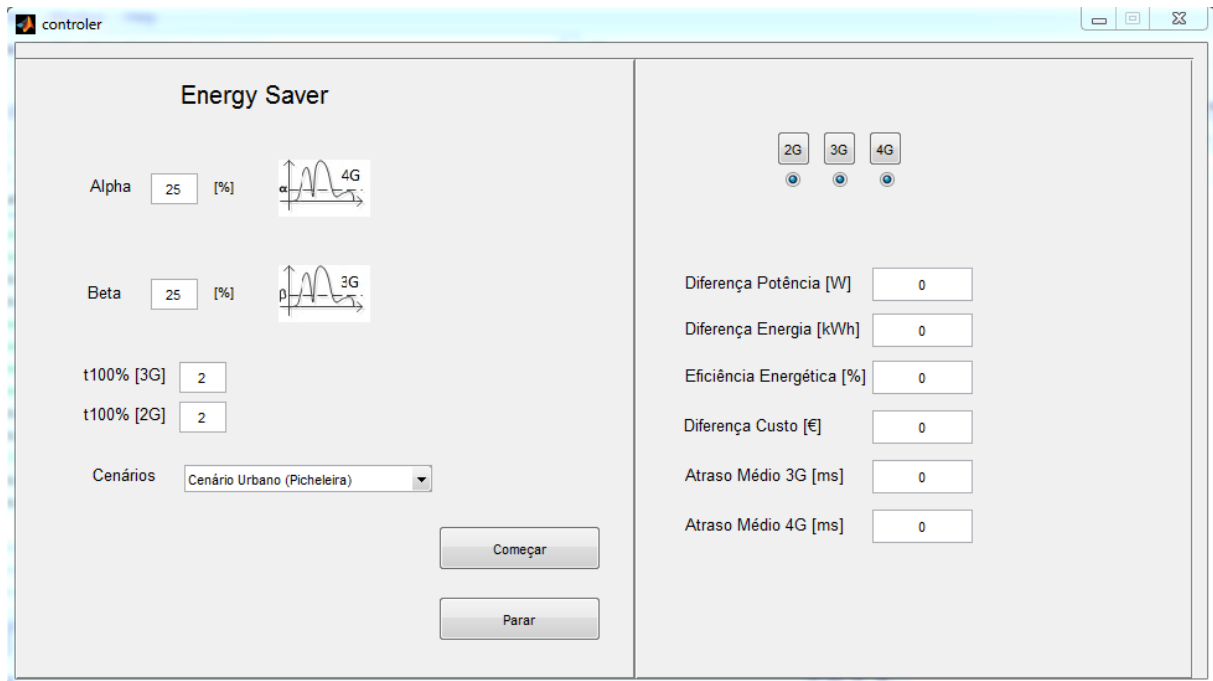


Figura 3.3 – Interface Gráfico da Aplicação.

Será de seguida apresentada uma breve descrição de quais os cálculos efectuados para a obtenção dos valores apresentados na coluna da direita.

- “Diferença Potência [W] ” – Diferença entre a potência consumida na estação base antes e depois da aplicação do algoritmo. A potência consumida é calculada fazendo o somatório das potências instantâneas em cada amostra, para cada tecnologia. Estas potências instantâneas são obtidas aplicando as equações indicadas no subcapítulo 3.1, que relacionam o valor da potência com a percentagem de tráfego de entrada. Este cálculo poderá então ser representado pela equação seguinte:

$$\Delta P = \sum P_{antes\ ES} - \sum P_{após\ ES}$$

- “Diferença de Energia [kWh] ” – Após o cálculo dos valores da energia, efectuados conforme indicado no subcapítulo 3.1, é feita a diferença do somatório destes antes e após aplicação do algoritmo, podendo ser representado pela equação:

$$\Delta E = \sum E_{antes\ ES} - \sum E_{após\ ES}$$

- “Eficiência Energética [%]” – Percentagem de energia que se irá poupar. Este valor é calculado da seguinte forma:

$$EE[\%] = 100 - \frac{\sum E_{após\ ES}}{\sum E_{antes\ ES}} * 100$$

- “Diferença Custo [€]” – Ao ser calculado o valor de energia consumida a cada amostra, é também calculado o custo dessa energia. Serão depois somados todos os valores dos custos, antes e depois da aplicação do algoritmo e será feita a diferença entre estes somatórios, obtendo-se assim o valor final da poupança.

$$\Delta Custo = \sum Custo_{antes\ ES} - \sum Custo_{após\ ES}$$

- “Atraso Médio 3G/4G” – Conforme indicado no subcapítulo 3.3.2, o atraso irá surgir quando existir uma sobrecarga de tráfego numa determinada tecnologia. Este será contabilizado tendo em conta o número de amostras extra, que serão necessárias para processar o tráfego num determinado instante. Após a obtenção desse valor é calculado o valor médio de todas as amostras de um dia e, tendo em conta que estas estão representadas em intervalos de 15 minutos (900 segundos), será depois feita a conversão para segundos e depois para milissegundos.

$$Atraso [s] = \frac{\sum amostras_{(atraso)}}{total\ amostras} / 900$$

4 Cenários e Resultados

Com o objectivo de testar, na aplicação desenvolvida, a influência das diferentes variáveis de entrada nos vários cenários, foram efectuadas diversas simulações cujos resultados serão apresentados neste capítulo e também nos Anexos B, C e D. Devido ao facto de existir um número elevado de resultados obtidos, irão ser colocadas nos anexos apenas algumas das representações gráficas obtidas.

Serão simulados cinco cenários de teste diferentes, sendo que, destes, três são cenários reais de zonas distintas do país (urbana, suburbana e rural) e os outros dois são cenários fictícios, criados para possibilitar a simulação de diversas situações diferentes. Para cada um dos indicados foram efectuadas diversas simulações distintas variando os valores de α , β e $t_{100\%}$.

Em todos os cenários reais, foi apenas possível obter valores em intervalos de 15 minutos, sendo por isso este o tempo dos intervalos dos cenários fictícios. Todos os cenários representam as 24 horas de um dia e os resultados apresentados para a diferença de potência, diferença de energia, eficiência energética e diferença de custo representam valores acumulados durante essas 24 horas. Os valores de atraso representam o valor médio por segundo e encontram-se expressos em milissegundos.

Nos subcapítulos seguintes serão apresentados os resultados obtidos mais relevantes para a confirmação da eficiência do sistema nos diferentes cenários.

4.1 Urbano

Para a simulação de um cenário urbano, foram retirados dados de uma célula localizada na Picheleira, em Lisboa. Na Figura 4.1 está representado o tráfego inicial das três tecnologias estudadas.

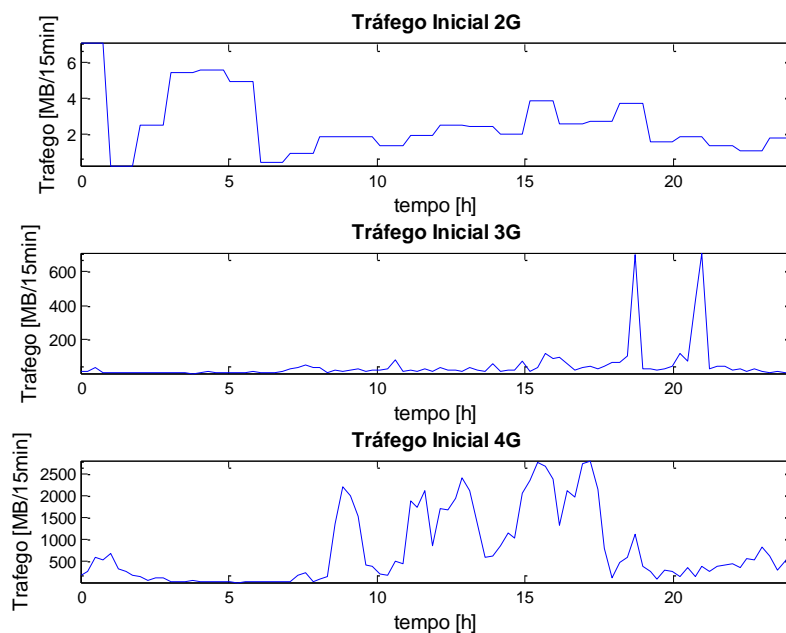


Figura 4.1 – Representação gráfica do tráfego de entrada – Cenário Urbano.

Para este cenário irão ser efectuados várias simulações em que se irá variar os valores de α e β e também os valores de $t_{100\%}$.

Após a execução do algoritmo, obtiveram-se os valores indicados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, para o cenário urbano e com valores de $t_{100\%}$ iguais a 0, 1 e 5, respectivamente.

Tabela 4.1 – Resultados cenário urbano $t_{100\%}=0$

Cenário Urbano					
	$\alpha=85$ & $\beta=85$	$\alpha=85$ & $\beta=15$	$\alpha=15$ & $\beta=85$	$\alpha=15$ & $\beta=15$	$\alpha=50$ & $\beta=50$
Diferença Potência [W]	40265.5	38244.6	38511.2	36657.6	39345.6
Diferença Energia [kWh]	10.066	9.561	9.628	9.164	9.836
Eficiência Energética [%]	20.176	19.164	19.297	18.368	19.715
Diferença Custo [€]	1.41	1.34	1.35	1.28	1.38
Atraso Médio 3G [ms]	0				
Atraso Médio 4G [ms]	0				

Tabela 4.2 – Resultados cenário urbano $t_{100\%}=1$.

Cenário Urbano					
	$\alpha=85$ & $\beta=85$	$\alpha=85$ & $\beta=15$	$\alpha=15$ & $\beta=85$	$\alpha=15$ & $\beta=15$	$\alpha=50$ & $\beta=50$
Diferença Potência [W]	33374.2	33456.2	32435.9	32517.9	33374.2
Diferença Energia [kWh]	8.343	8.364	8.109	8.129	8.343
Eficiência Energética [%]	16.723	16.764	16.253	16.294	16.723
Diferença Custo [€]	1.17	1.17	1.13	1.14	1.17
Atraso Médio 3G [ms]	0.012				
Atraso Médio 4G [ms]	0.093	0.093	0.046	0.046	0.093

Tabela 4.3 – Resultados cenário urbano $t_{100\%}=5$.

Cenário Urbano					
	$\alpha=85$ & $\beta=85$	$\alpha=85$ & $\beta=15$	$\alpha=15$ & $\beta=85$	$\alpha=15$ & $\beta=15$	$\alpha=50$ & $\beta=50$
Diferença Potência [W]	36861.7	37074.9	35660.5	35873.8	36861.7
Diferença Energia [kWh]	9.215	9.269	8.915	8.968	9.215
Eficiência Energética [%]	18.471	18.578	17.869	17.976	18.471
Diferença Custo [€]	1.29	1.30	1.25	1.25	1.29
Atraso Médio 3G [ms]	0.093	0.058	0.093	0.058	0.093
Atraso Médio 4G [ms]	0.278	0.278	0.139	0.139	0.278

Verifica-se que para este cenário os valores ideais das variáveis de entrada são $\alpha=85$, $\beta=85$ e $t_{100\%}=0$, pois são os que permitem obter maiores valores de eficiência energética, (20.176%) e, consequentemente, maior poupança no custo associado ao consumo de energia (2.41 €), não existindo atraso para este caso.

Como esperado, verifica-se que o atraso aumenta, com o aumento de $t_{100\%}$. Para o caso em que este valor é igual a 5, ou seja, em que o 3G poderá estar até 5 amostras de tempo com o tráfego a 100% até que o 4G volte a ligar, irá existir um atraso médio máximo de 0.278 ms para os casos em que o valor de α é superior a 15%.

Serão de seguida apresentadas as representações gráficas dos resultados para o caso onde se verificou a máxima eficiência energética no cenário urbano ($\alpha=85$, $\beta=85$ e $t_{100\%}=0$). Em todas as figuras, encontram-se os valores obtidos antes e depois da aplicação do algoritmo nas diferentes tecnologias. Não será apresentada a representação gráfica do atraso pois como o valor de $t_{100\%}$ é zero, não existirá sobrecarga na rede, não existindo assim atraso.

A Figura 4.2 representa a percentagem de ocupação de um site, antes e após a aplicação do algoritmo. Verifica-se que o 4G apenas será ligado durante o dia, nos períodos compreendidos entre as 9h e 10h, entre as 11h e as 14h e entre as 15h e as 19h. Em relação ao 3G, verifica-se que irão existir mais oscilações entre ligado e desligado. Esta situação deve-se ao facto de, quando o 3G desliga, o 2G não tem capacidade para suportar todo o tráfego durante algum tempo, sendo necessário voltar a ligar o 3G logo de seguida.

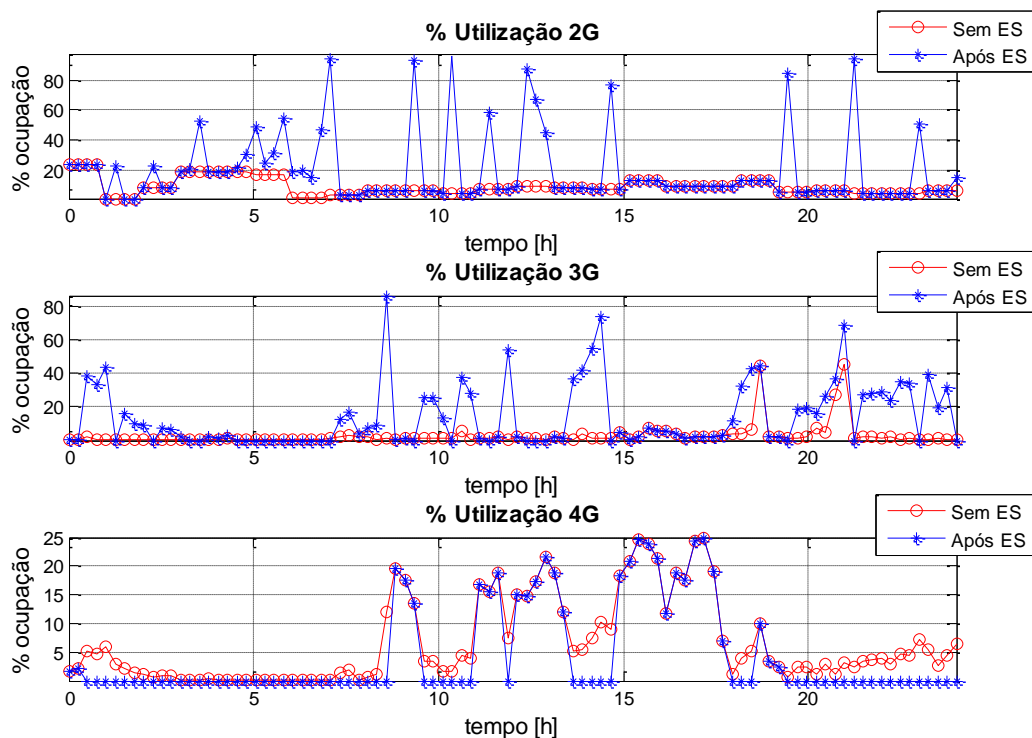


Figura 4.2 – Percentagem de utilização no cenário urbano ($\alpha=85$, $\beta=85$ e $t_{100\%}=0$).

Na Figura 4.3 encontram-se representadas as potências consumidas na estação base para as diferentes tecnologias e a soma destas. Pode-se verificar, na representação da potência total, que, em grande parte do dia, a potência consumida, após aplicação do algoritmo é inferior à consumida antes da aplicação do mesmo. Esta diminuição deve-se principalmente a aplicação do algoritmo no 4G, sendo esta a tecnologia que provoca maior diferença de valores.

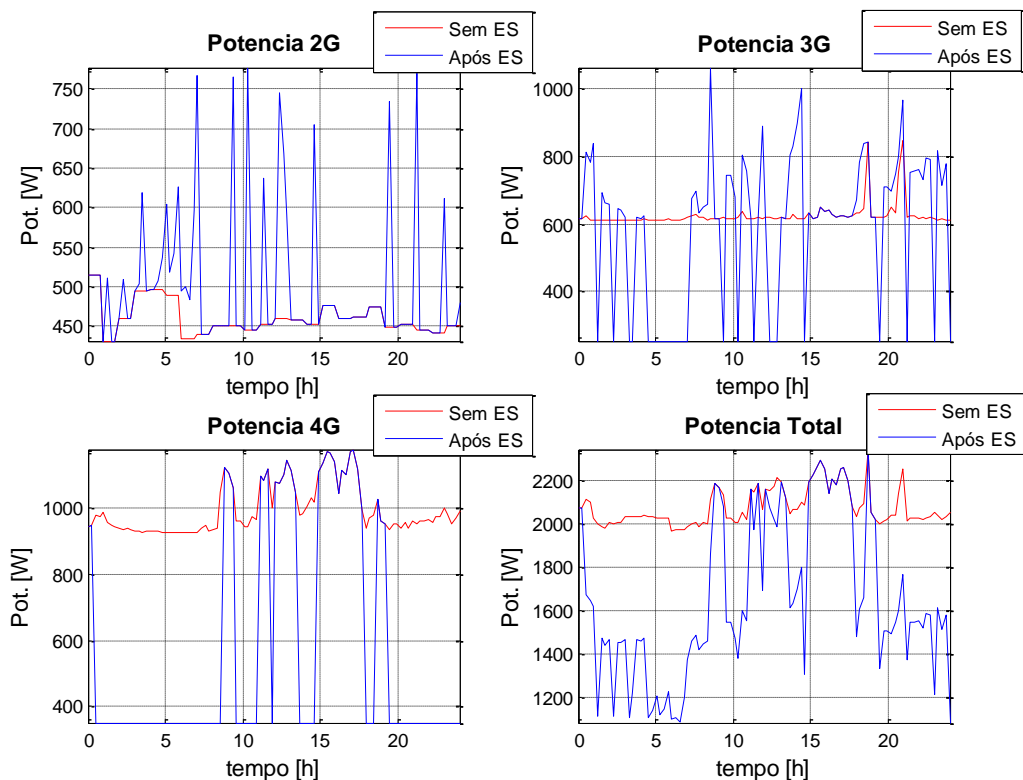


Figura 4.3 – Potência consumida no cenário urbano ($\alpha=85$, $\beta=85$ e $t_{100\%}=0$).

A Figura 4.4 representa a relação W/bps ao longo do dia. Esta relação serve para quantificar a potência necessária para se processar 1 bit por segundo. Verifica-se também que existe apenas diferença no 4G e no 3G pois foram as tecnologias onde foi aplicado o algoritmo. No 2G os valores mantiveram-se idênticos antes e depois da aplicação do mesmo.

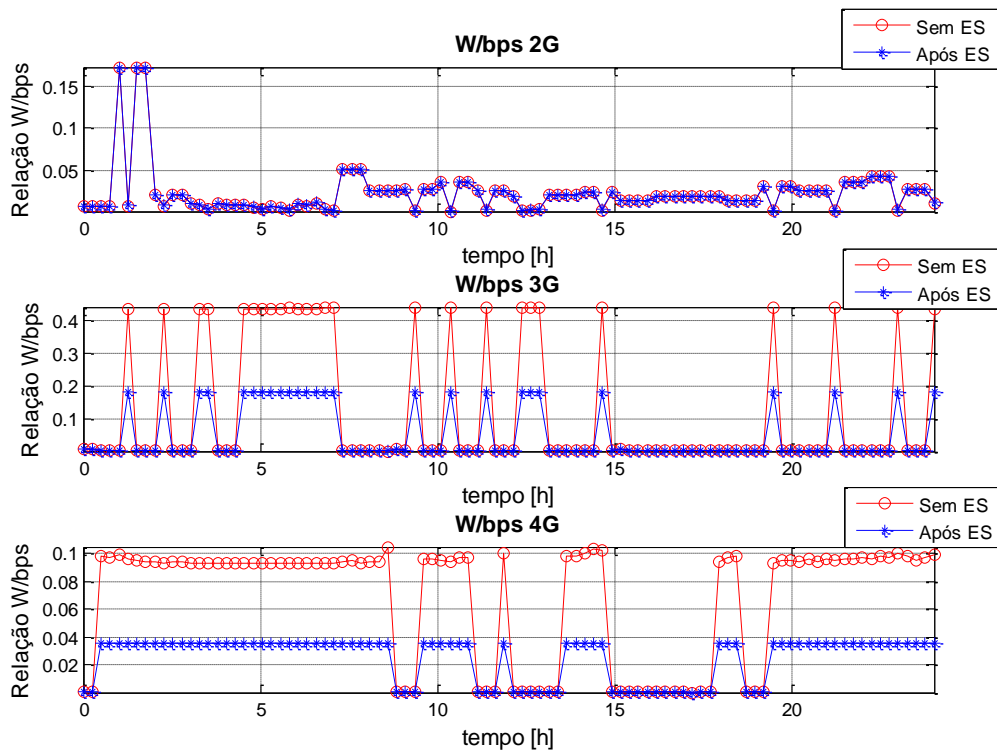


Figura 4.4 – Relação W/bps no cenário urbano ($\alpha=85$, $\beta=85$ e $t_{100\%}=0$).

4.2 Suburbano e Rural

De forma a testar o comportamento da aplicação nos cenários suburbano e rural, foram recolhidos valores de uma célula em Birre, Cascais (suburbano) e outra em Turquel, junto a Alcobaça (rural). Nas Figura 4.5 e 4.6 encontram-se representados os tráfegos para os quais irão ser feitas as análises destes dois cenários. Devido ao facto do tráfego nas duas células ser bastante reduzido, os valores das variáveis de saída não irão diferenciar com a variação dos valores de α e β . Por esse motivo, irão ser apresentados apenas os valores obtidos para $\alpha=15\%$ e $\beta=15\%$, variando apenas o valor de $t_{100\%}$. Estes resultados poderão ser verificados na Tabela 4.4.

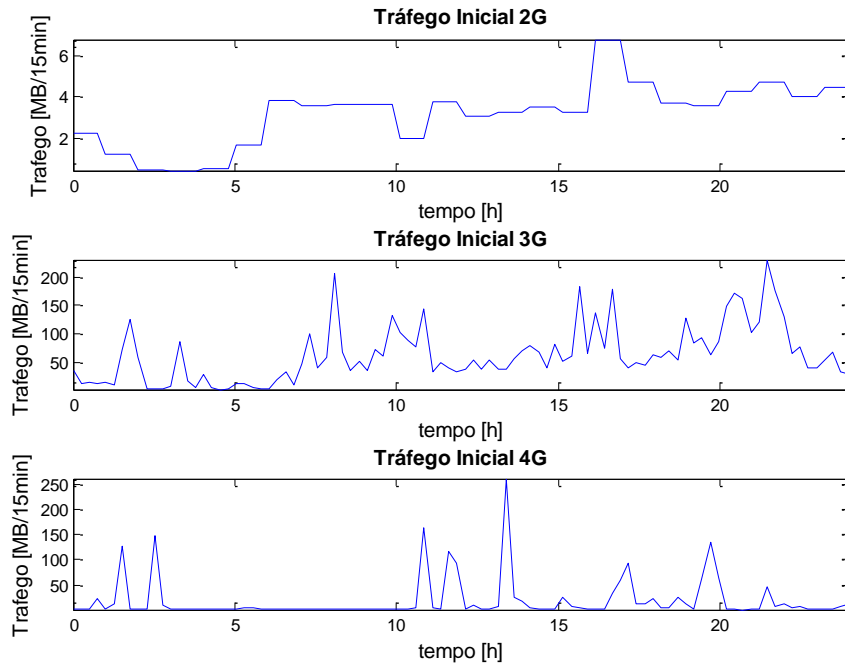


Figura 4.5 – Representação gráfica do tráfego de entrada – Cenário Suburbano.

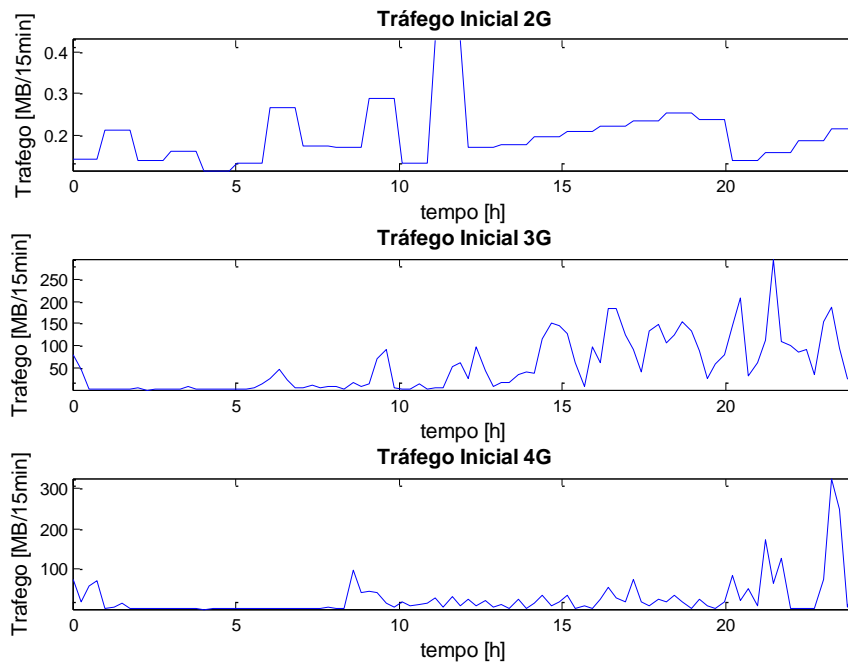


Figura 4.6 – Representação gráfica do tráfego de entrada – Cenário Rural.

Tabela 4.4 – Resultados cenário suburbano e rural para $\alpha=15\%$ e $\beta=15\%$.

	Cenário Suburbano			Cenário Rural		
	$t_{100\%=0}$	$t_{100\%=1}$	$t_{100\%=5}$	$t_{100\%=0}$	$t_{100\%=1}$	$t_{100\%=5}$
Diferença Potência [W]	56534	53978.2	54212.4	62385.2	53958.3	61485.4
Diferença Energia [kWh]	14.133	13.495	13.553	15.596	13.489	15.371
Eficiência Energética [%]	29.039	27.726	27.847	32.678	28.264	32.206
Diferença Custo [€]	1.98	1.89	1.90	2.18	1.89	2.15
Atraso Médio 3G [ms]	0	0.012	0.069	0	0.012	0.104
Atraso Médio 4G [ms]	0					

Verifica-se que também nestes dois cenários, os melhores resultados são obtidos para um valor de $t_{100\%=0}$. A percentagem de eficiência energética é, nestes casos de 29.039% para o cenário suburbano e de 32.678% no cenário rural. Esta diferença deve-se principalmente à transferência de tráfego do 3G para o 2G, permitindo assim que os componentes rádio do 3G se mantivessem desligados por mais tempo. Relativamente ao tráfego do 4G, e conforme se poderá confirmar na Figura 4.7, foi todo transferido para o 3G pois os valores não eram suficientemente elevados, de forma a justificar o funcionamento dos componentes desta tecnologia. Por este motivo o 4G manteve-se desligado durante todo o dia, após aplicação do algoritmo.

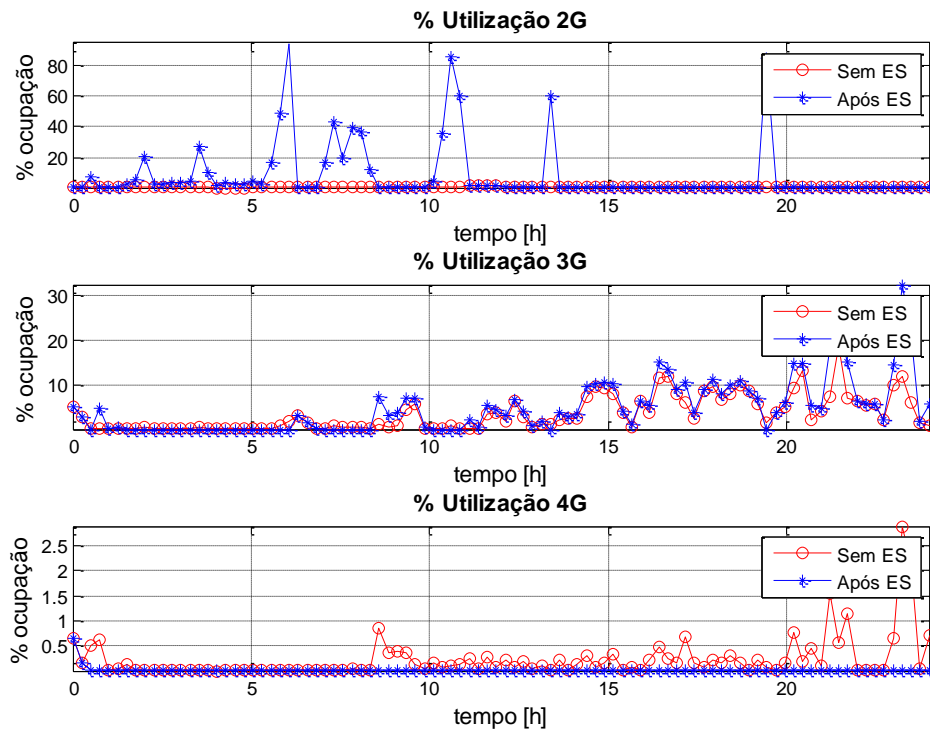


Figura 4.7 – Percentagem de utilização no cenário rural ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=0$).

Na Figura 4.8 encontra-se um exemplo de um caso em que existe atraso. Este exemplo representa um cenário Rural, com valores de $\alpha=15\%$, $\beta=15\%$ e $t_{100\%}=5$. Verifica-se neste caso que existiram duas situações em que foram necessárias duas amostras extra e uma outra situação em que foram necessárias cinco amostras extra para que o tráfego fosse todo processado nos respectivos instantes. Calculando o valor médio ao longo do dia, verifica-se que existiria um atraso de 0.104 ms em cada amostra, caso a duração destas fosse de 1 segundo.

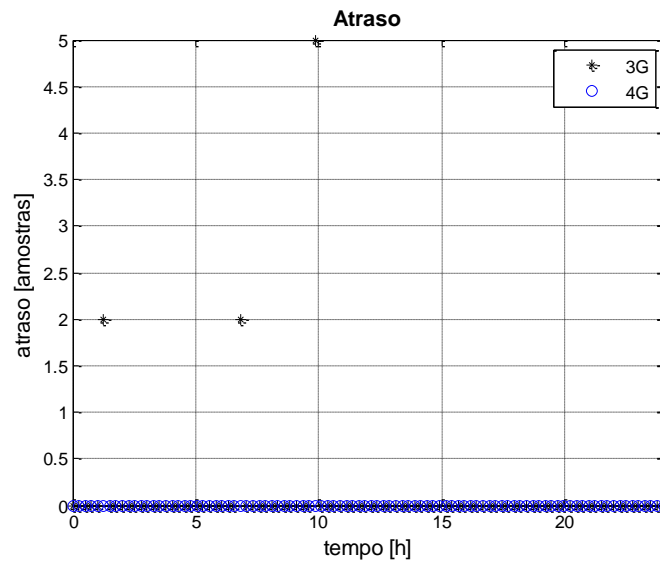


Figura 4.8 – Representação gráfica do atraso no cenário rural ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=5$).

4.3 Fictício 1

Para que se testasse o real desempenho do algoritmo foram criados dois cenários fictícios, sendo que a principal diferença entre eles, é o tráfego gerado em 4G. No cenário Fictício 1, cuja representação gráfica se encontra na Figura 4.9, optou-se por atribuir valores muito reduzidos ao tráfego de 4G, numa primeira fase e valores mais elevados, com vários picos, no resto do dia.

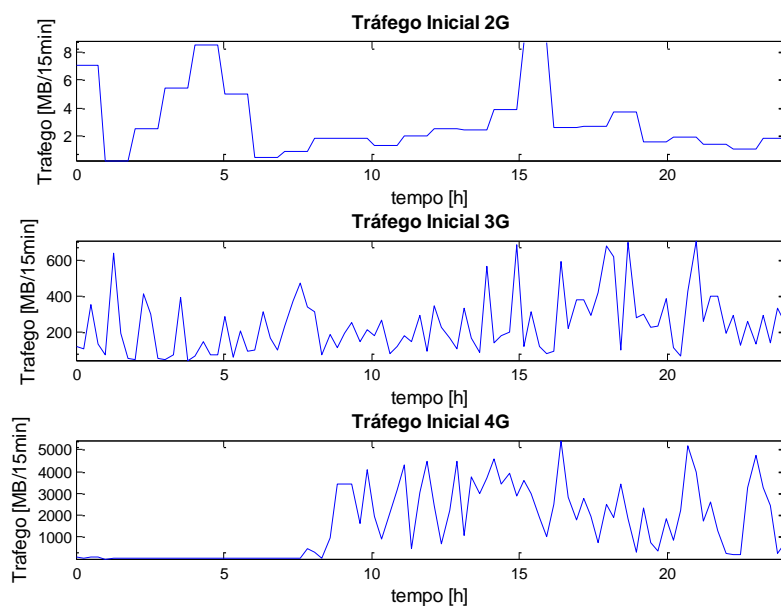


Figura 4.9 – Representação gráfica do tráfego de entrada – Cenário Fictício 1.

De forma a serem testados vários casos diferentes, e à semelhança do efectuado no cenário Urbano, serão aqui também atribuídos vários valores diferentes às variáveis de entrada α , β e $t_{100\%}$.

Na Tabela 4.5 estão indicados os valores que se obtiveram para as diferentes variáveis de saída, após atribuição de diversos valores diferentes a α e β , para um valor de $t_{100\%}=0$.

Tabela 4.5 – Resultados cenário Fictício 1 $t_{100\%}=0$.

Cenário Fictício 1					
	$\alpha=85$ & $\beta=85$	$\alpha=85$ & $\beta=15$	$\alpha=15$ & $\beta=85$	$\alpha=15$ & $\beta=15$	$\alpha=50$ & $\beta=50$
Diferença Potência [W]	21661.3	21661.3	18491.2	18491.2	21661.3
Diferença Energia [kWh]	5.415	5.415	4.623	4.623	5.415
Eficiência Energética [%]	10.149	10.149	8.663	8.663	10.149
Diferença Custo [€]	0.76	0.76	0.65	0.65	0.76
Atraso Médio 3G [ms]	0				
Atraso Médio 4G [ms]	0				

Verifica-se, neste caso, que os valores obtidos não dependem exclusivamente da escolha do valor de α , sendo que, para valores superiores a 50% o comportamento do sistema, após aplicação do algoritmo, será igual, independentemente do valor escolhido. O mesmo sucede para valores de α inferiores a 15%. Encontram-se, por isso, apresentados na Tabela 4.6 os resultados obtidos para valores de α compreendidos entre 15% e 50%. Não irão ser considerados os valores do atraso pois são sempre nulos devido a $t_{100\%}=0$.

Tabela 4.6 – Resultados cenário Fictício 1 $t_{100\%}=0$ ($15\% < \alpha < 50\%$).

Cenário Fictício 1			
	$\alpha=20$ & $\beta=20$	$\alpha=30$ & $\beta=30$	$\alpha=40$ & $\beta=40$
Diferença Potência [W]	18491.2	19391.1	22561.2
Diferença Energia [kWh]	4.622	4.848	5.640
Eficiência Energética [%]	8.663	9.085	10.570
Diferença Custo [€]	0.65	0.68	0.79

Confirma-se que para $t_{100\%}=0$, no cenário fictício 1, a variável que mais influência tem na eficiência do sistema é o α , e que deverá ser 40%. Para este caso obtém-se uma eficiência energética de cerca de 10.57%, equivalendo a uma poupança de 0.79€.

Serão agora apresentados na Tabela 4.7 os resultados para o mesmo cenário, mas desta vez para valores de $t_{100\%}=1$. Conforme se poderá verificar e como seria espectável, já irá existir atraso na rede neste caso.

Tabela 4.7 – Resultados cenário fictício 1 $t_{100\%}=1$.

Cenário Fictício 1					
	$\alpha=85$ & $\beta=85$	$\alpha=85$ & $\beta=15$	$\alpha=15$ & $\beta=85$	$\alpha=15$ & $\beta=15$	$\alpha=50$ & $\beta=50$
Diferença Potência [W]	24417.4	24346.8	18820.4	18749.8	24417.4
Diferença Energia [kWh]	6.104	6.087	4.705	4.687	6.104
Eficiência Energética [%]	11.440	11.407	8.818	8.785	11.440
Diferença Custo [€]	0.85	0.85	0.66	0.66	0.85
Atraso Médio 3G [ms]	0.012				
Atraso Médio 4G [ms]	0.162	0.162	0.012	0.012	0.162

Verifica-se que neste caso, os valores de saída não dependem apenas do valor de α mas também de β , ainda que o primeiro tenha uma maior influência. Não serão colocados aqui mais valores pois verificou-se que os cenários que apresentam maiores eficiência energética são os casos em que α e β têm um valor superior a 50%. Para estes casos obtêm-se uma eficiência de 11.44% equivalendo a uma poupança total de 0.85€. Verifica-se, no entanto, que para estes casos, o valor do atraso será mais elevado quando comparado aos casos em que a eficiência energética não é tão elevada. Num cenário em que $\alpha=50$ e $\beta=50$ obteve-se um atraso médio de 0.162 ms no processamento do tráfego de 4G, enquanto que no caso de $\alpha=15$ & $\beta=15$, o valor deste mesmo atraso já será 0.012 ms.

Na Figura 4.10, que representa a percentagem de ocupação das diferentes tecnologias. Verificam-se vários picos de tráfego no 3G. Estes picos devem-se ao tráfego transferido do 4G e têm apenas a duração de uma amostra devido ao valor de $t_{100\%}=1$.

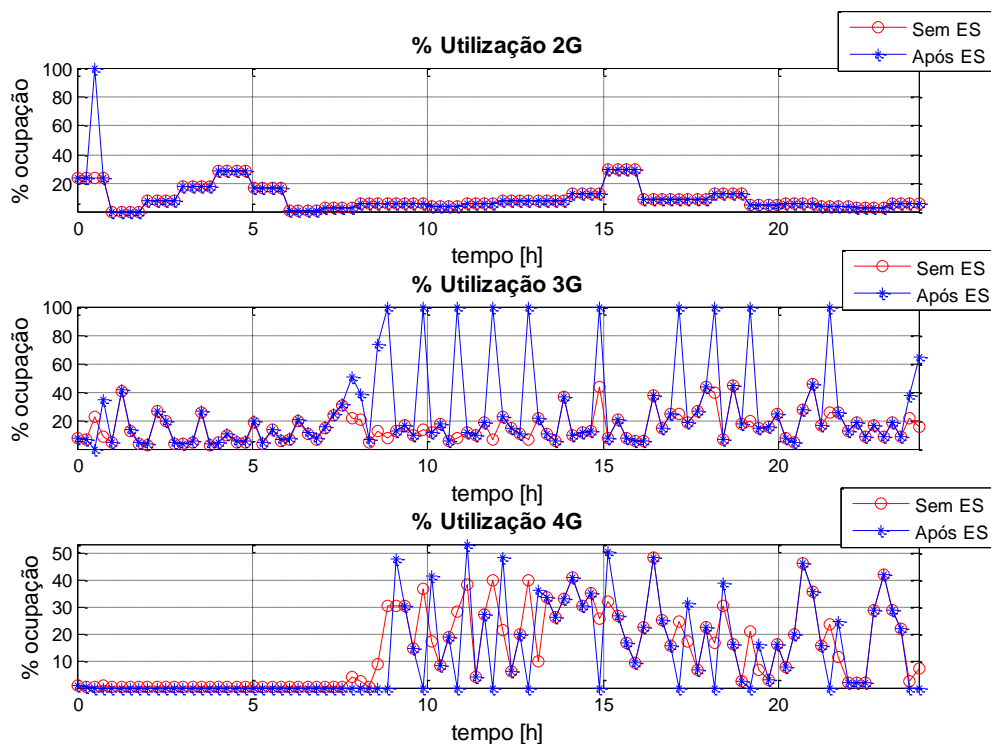


Figura 4.10 – Percentagem de utilização no cenário fictício 1 ($\alpha=40$, $\beta=40$ e $t_{100\%}=1$).

O último conjunto de testes efectuado para o cenário fictício 1, será para valores de $t_{100\%}=5$. Este será o caso onde se irão obter os maiores valores de atraso. Na Tabela 4.8 serão expostos os respectivos valores das variáveis de saída, obtidos após aplicação do algoritmo.

Tabela 4.8 – Resultados cenário fictício 1 $t_{100\%}=5$.

Cenário Fictício 1					
	$\alpha=85$ & $\beta=85$	$\alpha=85$ & $\beta=15$	$\alpha=15$ & $\beta=85$	$\alpha=15$ & $\beta=15$	$\alpha=50$ & $\beta=50$
Diferença Potência [W]	30745.6	30735.7	19901.9	19892	30745.6
Diferença Energia [kWh]	7.686	7.684	4.975	4.973	30745.6
Eficiência Energética [%]	14.405	14.400	9.324	9.319	14.405
Diferença Custo [€]	1.08	1.08	0.70	0.70	1.08
Atraso Médio 3G [ms]	0.058				
Atraso Médio 4G [ms]	0.463	0.463	0.058	0.058	0.463

Pode-se confirmar que neste caso, o comportamento é semelhante ao verificado para $t_{100\%}=1$. Os valores máximos de eficiência energética obtêm-se quando são atribuídos valores superiores a 50% a α e β e provocam uma poupança de 1.08€ por dia. São também obtidos, para estes valores de α e β , os valores máximos de atraso, podendo estes chegar aos 0.463 ms.

Na Figura 4.11 apresentada de seguida, encontra-se a representação gráfica do atraso para este cenário em que $t_{100\%}=5$. Poderá ser verificado que existem atraso em várias amostras devido à transferência de tráfego do 4G para o 3G.

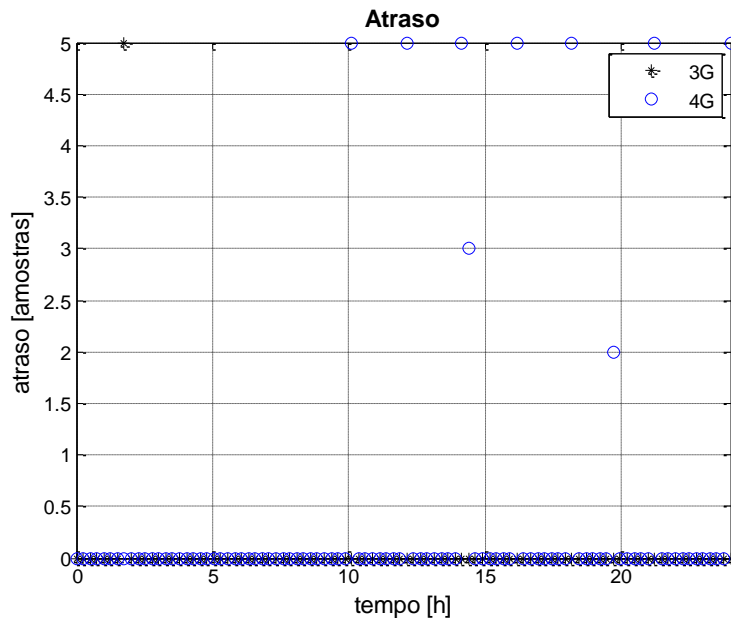


Figura 4.11 – Representação gráfica do atraso no cenário fictício 1 ($\alpha=85$, $\beta=85$ e $t_{100\%}=5$).

4.4 Fictício 2

Para o cenário fictício 2, representado na Figura 4.12, o objectivo foi simular um ambiente com elevada utilização de 4G, aumentou-se, por isso, ainda mais o tráfego 4G e reduziu-se o número de picos gerando assim mais tráfego.

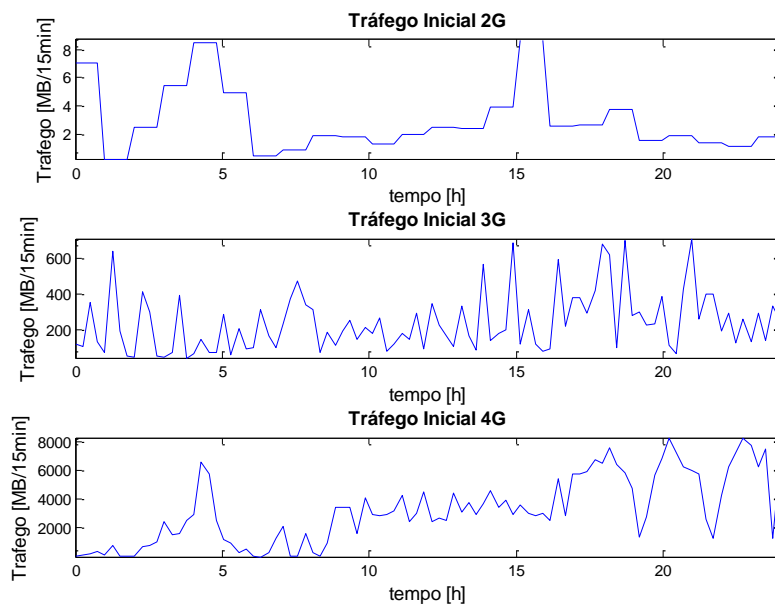


Figura 4.12 – Representação gráfica do tráfego de entrada – Cenário Fictício 2.

Conforme efectuado nos cenários anteriores, foram calculadas as variáveis de saída para $t_{100\%}=0$. As mesmas estão colocadas na Tabela 4.9. Confirma-se que o comportamento é idêntico ao verificado no cenário anterior – valores máximos de eficiência energética, neste caso na ordem dos 3.66%, para valores de α acima dos 50%.

Tabela 4.9 – Resultados cenário fictício 2 $t_{100\%}=0$.

Cenário Fictício 2					
	$\alpha=85$ & $\beta=85$	$\alpha=85$ & $\beta=15$	$\alpha=15$ & $\beta=85$	$\alpha=15$ & $\beta=15$	$\alpha=50$ & $\beta=50$
Diferença Potência [W]	8337.89	8337.89	7654.39	7654.39	8337.89
Diferença Energia [kWh]	2.084	2.084	1.9136	1.914	2.084
Eficiência Energética [%]	3.662	3.662	3.362	3.362	3.662
Diferença Custo [€]	0.29	0.29	0.27	0.27	0.29
Atraso Médio 3G [ms]	0				
Atraso Médio 4G [ms]	0				

Na Figura 4.13 encontra-se representada a potência instantânea consumida nas diferentes tecnologias. Verifica-se que só irá existir uma alteração no funcionamento da rede, provocado pela aplicação do algoritmo, no período da manhã, quando o tráfego 4G não é tão elevado.

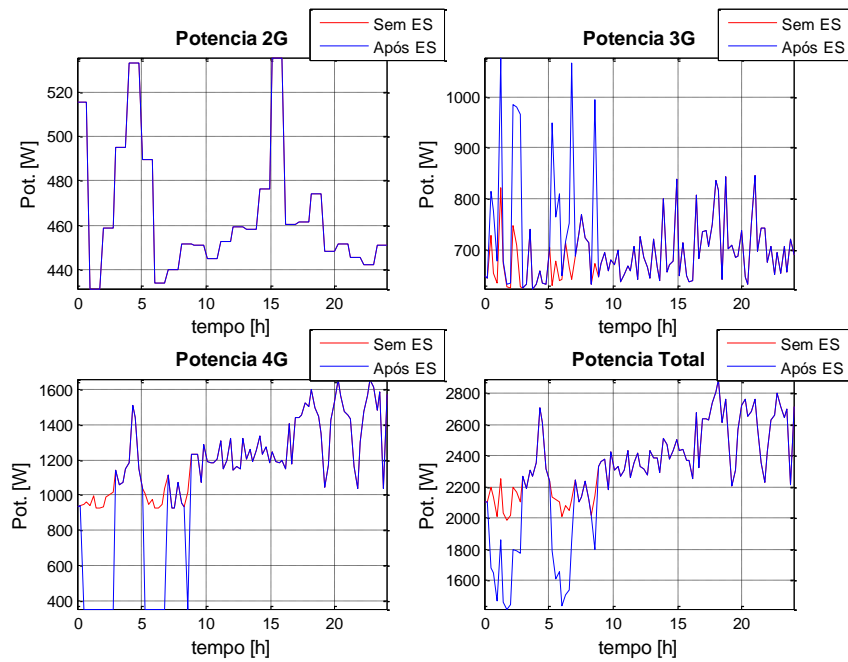


Figura 4.13 – Potência consumida no cenário fictício 2 ($\alpha=50, \beta=50$ e $t_{100\%}=0$).

À semelhança do efectuado nos cenários anteriores, foram também calculados os valores das variáveis de saída para $t_{100\%}=1$. Verifica-se na Tabela 4.10 que α e β deverão ser iguais a 85% para que se obtenha o maior valor de eficiência energética, sendo, neste caso, igual a 6.75% equivalendo a uma poupança de 0.54€. Também neste caso, se verifica que o valor do atraso é máximo para esta configuração de valores de α e β , podendo chegar aos 0.278 ms.

Tabela 4.10 – Resultados cenário fictício 2 $t_{100\%}=1$.

Cenário Fictício 2					
	$\alpha=85$ & $\beta=85$	$\alpha=85$ & $\beta=15$	$\alpha=15$ & $\beta=85$	$\alpha=15$ & $\beta=15$	$\alpha=50$ & $\beta=50$
Diferença Potência [W]	15378.6	15204.5	9921.73	9853.83	12319
Diferença Energia [kWh]	3.845	3.801	2.480	2.463	3.079
Eficiência Energética [%]	6.755	6.679	4.358	4.328	5.411
Diferença Custo [€]	0.54	0.53	0.35	0.34	0.43
Atraso Médio 3G [ms]	0.012	0	0.012	0.012	0.012
Atraso Médio 4G [ms]	0.278	0.278	0.035	0.035	0.127

Na Figura 4.14 encontra-se a representação gráfica do atraso para o valor de $t_{100\%}=1$, $\alpha=15$ e $\beta=15$. Verifica-se que existiram apenas três amostras do 4G que não foram processadas imediatamente após terem sido transferidas para o 3G. O mesmo se passou com a amostra indicada de 3G quando passou para 2G. Na Figura 4.15 podem-se confirmar estes picos de tráfego no 3G e no 2G e pode-se confirmar também que, a partir das 10h aproximadamente, já não existiu transferência de dados de uma tecnologia para a outra, ou seja, a poupança de energia que existiu neste cenário, foi toda verificada no período da manhã.

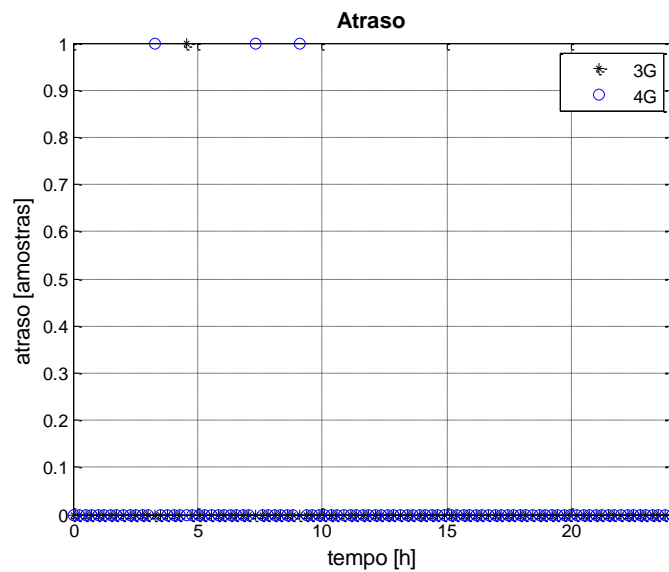


Figura 4.14 – Representação gráfica do atraso no cenário fictício 2 ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=1$).

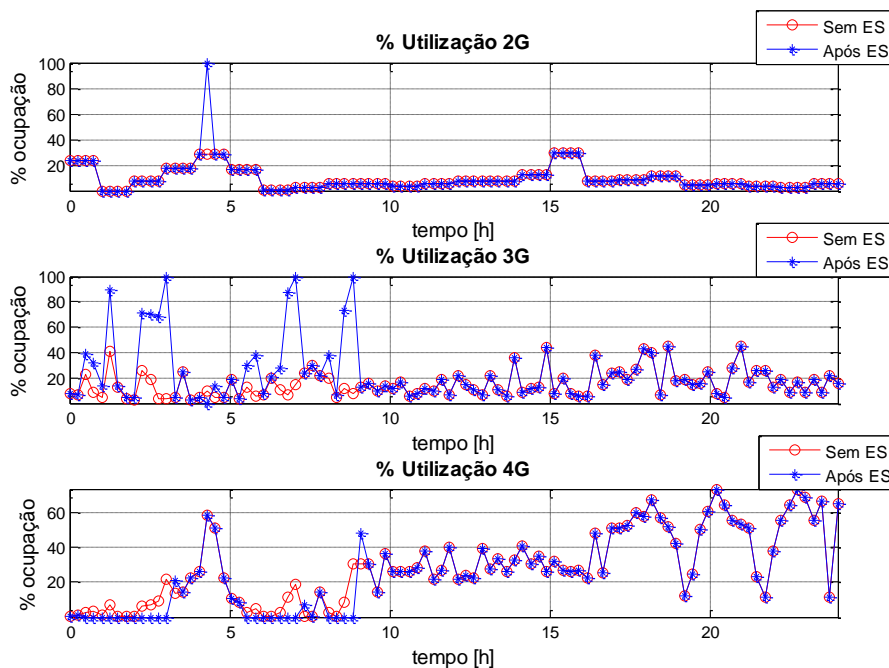


Figura 4.15 – Percentagem de utilização no cenário fictício 2 ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=1$).

Os últimos testes efectuados foram para o cenário fictício 2 com o valor de $t_{100\%}=5$. Os valores obtidos são os indicados na Tabela 4.11 e, conforme se verificou para os cenários anteriores, este é o valor testado de $t_{100\%}$ que provoca mais atraso. Para este cenário verifica-se que foi também para $\alpha=85$ e $\beta=85$ que se obteve o maior valor de eficiência energética.

Tabela 4.11 – Resultados cenário fictício 2 $t_{100\%}=5$.

Cenário Fictício 2					
	$\alpha=85$ & $\beta=85$	$\alpha=85$ & $\beta=15$	$\alpha=15$ & $\beta=85$	$\alpha=15$ & $\beta=15$	$\alpha=50$ & $\beta=50$
Diferença Potência [W]	26399.2	26114.8	13054	12769.6	17869
Diferença Energia [kWh]	6.599	6.529	3.263	3.192	4.467
Eficiência Energética [%]	11.596	11.471	5.734	5.609	7.849
Diferença Custo [€]	0.92	0.91	0.46	0.45	0.62
Atraso Médio 3G [ms]	0.093	0	0.093	0	0.093
Atraso Médio 4G [ms]	1.40	1.40	0.162	0.162	0.590

Na Figura 4.16 encontra-se bem visível a limitação provocada pelo $t_{100\%}=5$. Verifica-se que no caso do 3G, a partir da hora que existe mais tráfego, esta tecnologia vai receber o tráfego transferido de 4G. Quando o 3G se encontra com uma carga de 100% durante as 5 amostras (neste caso), o 4G é automaticamente ligado. Existe depois um período em que não é novamente desligado que corresponde à análise do histórico. Esta análise consiste em verificar o estado da tecnologia nas amostras anteriores e numa previsão da amostra seguinte com base no tráfego do dia anterior. Só após esta verificação, que neste caso será de três amostras, é que o 4G será novamente desligado, repetindo-se todo o processo.

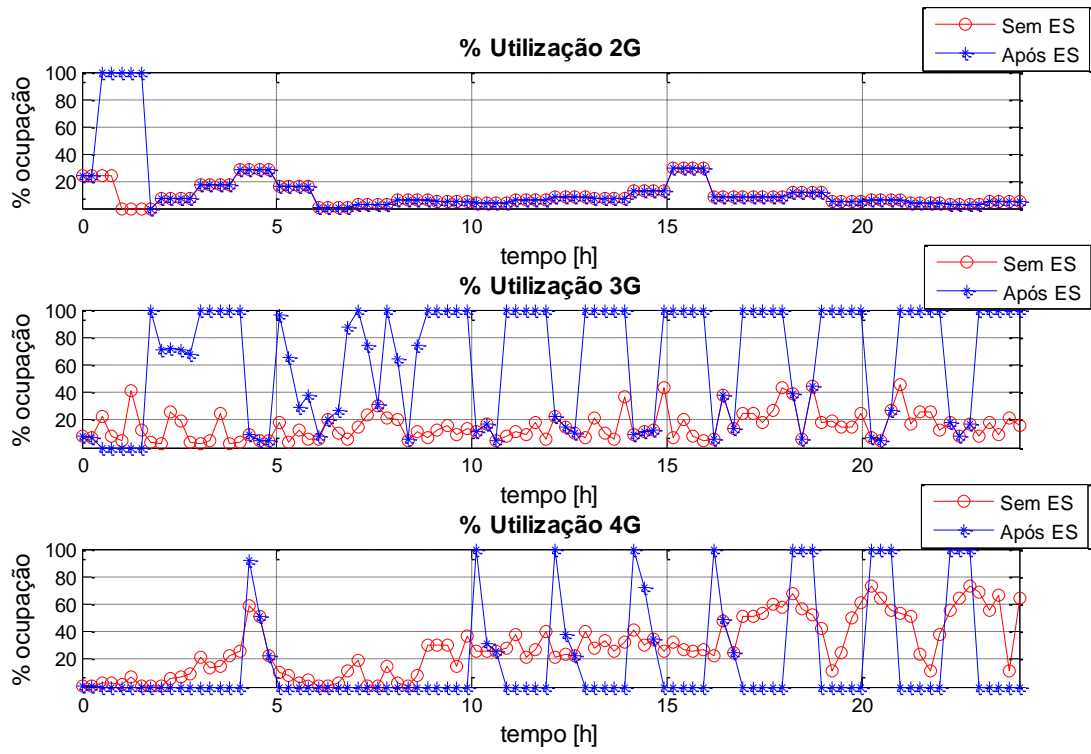


Figura 4.16 – Percentagem de utilização no cenário fictício 2 ($\alpha=85$, $\beta=85$ e $t_{100\%}=5$).

5 Conclusões

Após conclusão deste estudo, verifica-se que muito está a ser feito e ainda muito se pode fazer para aumentar a eficiência energética dos sistemas de telecomunicações móveis. No caso concreto desta dissertação e, após o estudo de diferentes técnicas, optou-se por aproveitar os conceitos de duas destas para o desenvolvimento de um algoritmo que permitisse a gestão de utilizadores de uma rede móvel, de forma a aumentar a eficiência energética.

O algoritmo desenvolvido consiste na colocação em *standby* dos componentes rádio, principais consumidores de energia de uma estação base, quando se verifica que o valor de tráfego é inferior a um determinado valor. De forma a garantir que todo o tráfego é processado e todos os pedidos dos utilizadores são respondidos, existirá um *handover* vertical, onde todos os utilizadores que se encontrem ligados a uma determinada tecnologia, irão migrar para outra, antes que a sua servidora seja desligada.

De forma a testar o algoritmo, foram utilizados cinco cenários diferentes em que três representam panoramas reais de diferentes zonas do país, e os restantes dois foram criados com o propósito de testar situações que não seria possível testar com os reais, nomeadamente situações futuras de tráfego 4G intenso, com e sem picos de utilização. Optou-se por colocar como parâmetros de entrada, os valores da percentagem de tráfego de 3G e 4G, a partir dos quais os componentes rádio poderão desligar/ligar. É também permitido ao utilizador final do simulador definir quais os tempos que determinada tecnologia poderá estar com uma ocupação de 100%, sem que exista uma migração do tráfego para outra, ligando-a.

Os resultados obtidos revelam que este algoritmo é mais eficaz nos cenários onde existe menos carga, onde supostamente o tráfego que iria ser processado por uma tecnologia poderá ser processado por outra, podendo assim ser desligada a anterior sem que cause atraso na rede. Em relação aos valores de α e β a escolher, não existe um valor que se possa considerar o ideal. Irá sempre depender do cenário a ser analisado e do valor do atraso que poderá existir, por exemplo, no caso do cenário fictício 1, para $t_{100\%}=1$, se optar por $\alpha=\beta=85\%$ irá obter uma eficiência energética de 11.44% mas com um atraso que poderá chegar aos 0.162 milissegundos por amostra. Caso se opte por $\alpha=\beta=15\%$, o valor da eficiência energética já será inferior (8.785%) mas por outro lado o atraso será de 0.012 milissegundos.

O mesmo é verificado para o $t_{100\%}$. Tomando como exemplo o cenário fictício 2, e para os valores de $\alpha=\beta=85\%$, se $t_{100\%}=0$ obtém-se um ganho de 3.662% sem atraso, caso $t_{100\%}=1$, o ganho já será de 6.755% mas o atraso será 0.278 milissegundos. Para $t_{100\%}=5$, o ganho terá o seu valor máximo, 11.596% mas o atraso também aumentará para 1.40 milissegundos.

Relativamente aos valores de w/bps, comprova-se que, após aplicação do algoritmo, esta relação ou se mantém igual ou diminui em grande parte dos cenários, para o 3G e para o 4G, revelando assim que será necessária uma menor energia para processar a mesma quantidade de informação após aplicação do algoritmo, sendo por isso uma rede mais eficiente. No 2G não se verificam alterações nesta relação pois não é aplicada qualquer técnica de aumento de eficiência energética nesta tecnologia.

A decisão de quais os valores de α , β e $t_{100\%}$ a usar deverá ser tomada de acordo com a política do operador tendo sempre em consideração a relação eficiência vs. atraso.

Existem algumas funcionalidades que não estão implementadas nesta versão do simulador, mas que poderão vir a ser implementadas futuramente, como por exemplo, a possibilidade de definir, não só o $t_{100\%}$, mas também um $t_{90\%}$. Este tempo não iria provocar uma diminuição do atraso, mas iria permitir que os componentes de uma determinada tecnologia não estivessem muito tempo a trabalhar quase no limite. Outra funcionalidade que poderia ser implementada seria a possibilidade de fazer a distinção entre dia útil e fim-de-semana/feriado, de forma a escolher qual o ficheiro a utilizar para verificação do histórico. Seria, neste caso necessário recorrer à base de dados onde ficam registados todos os valores de tráfego e comparar o tráfego actual, não com o do dia anterior, mas, por exemplo, com o tráfego de dois dias atrás (por exemplo comparar o de segunda-feira com o de sexta-feira). Esta funcionalidade não foi implementada pois existe apenas um ficheiro de verificação do histórico para cada cenário, que representa o tráfego do dia anterior. Não foi também tido em conta o tempo que os componentes demorariam a suspender e a voltar ao serviço e o tempo que o terminal móvel demoraria a registar na nova tecnologia. Estes pormenores não foram considerados pois estes tempos seriam valores na ordem dos segundos, enquanto os intervalos dos dados de entrada são períodos de 15 minutos, não influenciando, por isso, os resultados neste caso.

No geral, os resultados obtidos foram positivos e os valores de Eficiência Energética acima do esperado. Por exemplo, no cenário Urbano, com um $t_{100\%}=0$, foi possível obter um ganho de 20% na energia consumida, correspondendo a uma diferença de cerca de 1.4€ por dia, sem

qualquer atraso no processamento do tráfego da rede. Se for considerado que, em média, nesta célula, é sempre obtido este valor ao longo do ano, a poupança, no final dos 365 dias será de 511€, apenas para uma célula. No caso do cenário Rural, onde foram obtidos os valores mais elevados de eficiência energética, verificou-se um ganho de 32.68%, sem atrasos, correspondendo a uma poupança de 2.18€ por dia em cada célula, equivalendo, no final do ano, a uma diferença nos custos de cerca de 796€, também para uma célula apenas.

Anexo A

Tabela A.1 – Evolução das Comunicações Móveis

Geração	Throughput / Velocidades Máximas	Tecnologia (Família)	Multiplexagem / Meios de Acesso	Período de Utilização	Espectro utilizado (MHz)	Características
1G [3],[29]	10 kbps (pico)	AMPS, N-AMPS, TACS, ETACS (AMPS) NMT, ... (Outras)	FDM	1970 - 1980	800 - 900	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia utilizada apenas para serviços de voz. • Serviço analógico
2G [29], [30]	9,6 kbps	GSM, CSD (3GPP) cdmaOne (3GPP2) D-AMPS (AMPS) CDPD, ... (outras)	TDMA, CDMA	1980 -	850 / 900 / 1800 / 1900	<ul style="list-style-type: none"> • Serviço digital (Comutação de Circuitos) • Suporta serviços de dados e voz • Permite encriptação, detecção e correção de erros
2,5G / 2,75G [3], [30], [31], [32] [33]	14,4 kbps/canal 115,2kbps (pico) - HSCSD 40kbps/canal 171kbps (pico) - GPRS 384kbps - EDGE 1,3Mbps – EDGE Evolution	HSCSD (Com. Circuitos), GPRS, EDGE/EGPRS (3GPP) CDMA2000 (3GPP2) WiDEN (outras)	TDMA, CDMA	1990 -	850 / 900 / 1800 / 1900	<ul style="list-style-type: none"> • Comutação de Pacotes • Permite navegação na Internet (<i>Web Browsing</i>)
3G [30], [31]	2Mbps	UMTS, UTRA-TDD LCR (3GPP) CDMA2000 (3GPP2)	WCDMA-FDD, WCDMA-TDD, TD- SCDMA	2000 -	850 / 900 / 1900 / 2100	<ul style="list-style-type: none"> • Compatível com Comutação de Circuitos e/ou de Pacotes • Possibilidade de <i>streaming</i> de vídeo e videoconferência
3,5G / 3,75G / 3,9G [33]	42 Mbps - HSPA 84 Mbps - HSPA+ 200 Mbps - LTE	HSPA, HSPA+, LTE (3GPP) CDMA2000 (3GPP2) Mobile WiMAX (802.16e), MBWA (802.20) (IEEE)	WCDMA OFDMA (downlink), SC-FDMA (uplink)	2000 / 2008 / 2009 -	900 / 2100	<ul style="list-style-type: none"> • Introdução do conceito de MIMO
4G [3], [29], [34]	1 Gbps (Fixo) / 100Mbps (Móvel) - LTE-A -WiMAX 2	LTE Advanced (3GPP) WiMAX-Advanced (IEEE 802.16m) (IEEE)	OFDMA	2011 -	800 / 1800 / 2600	<ul style="list-style-type: none"> • "all-IP" • <i>Carrier Aggregation</i> - CA (Download de informação a partir de fontes diferentes, simultaneamente) • Aperfeiçoamento da utilização de técnicas MIMO • Possibilidade de utilização de repetidores (Relay Nodes).

Anexo B – Cenários Reais

- Urbano

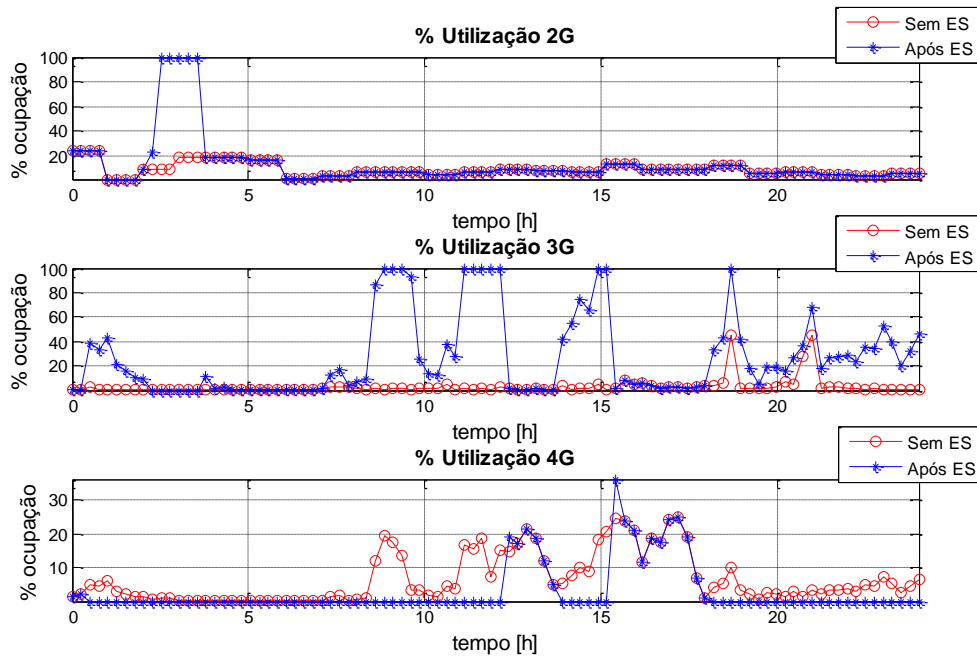


Figura B.1 – Percentagem de utilização no cenário urbano ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=5$).

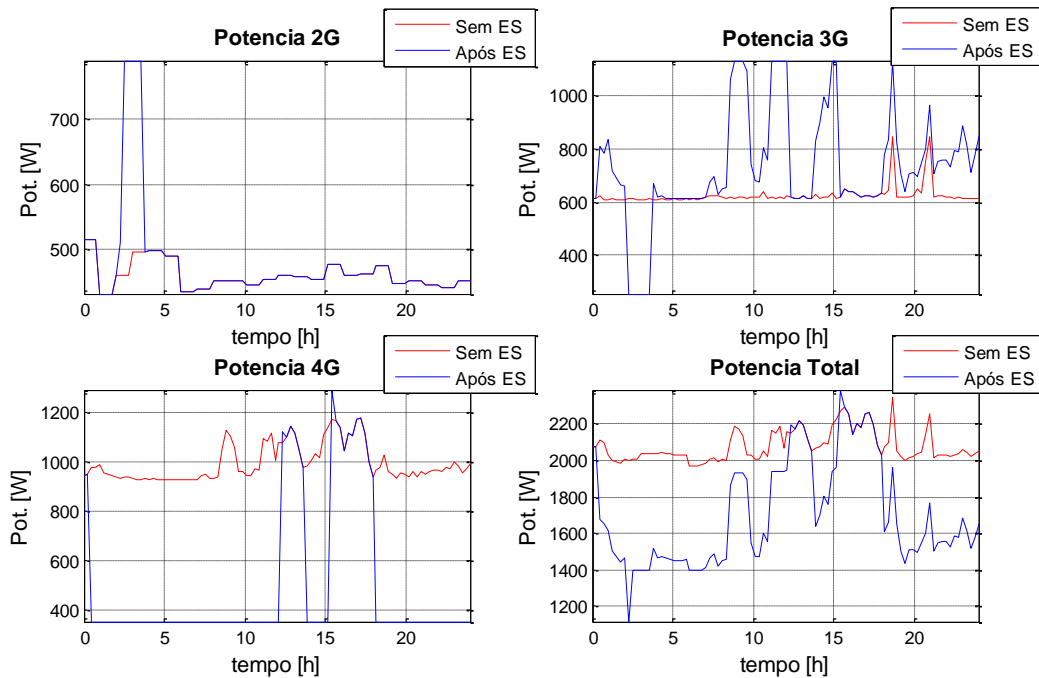


Figura B.2 – Potência consumida no cenário urbano ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=5$).

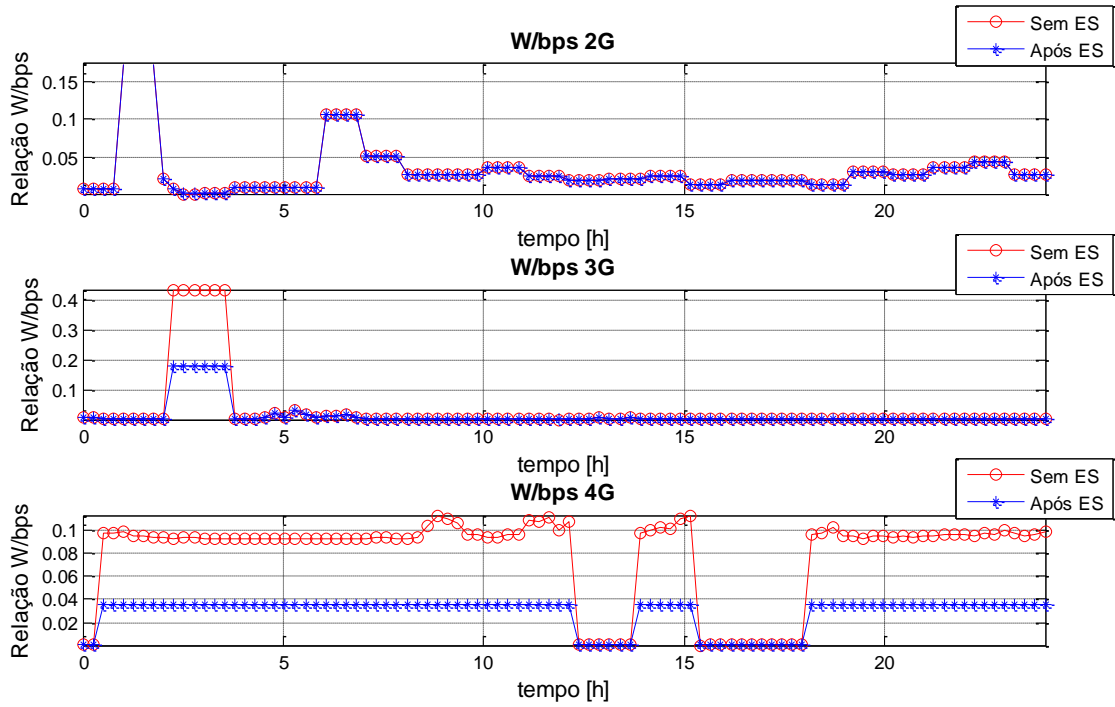


Figura B.3 – Relação W/bps no cenário urbano ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=5$).

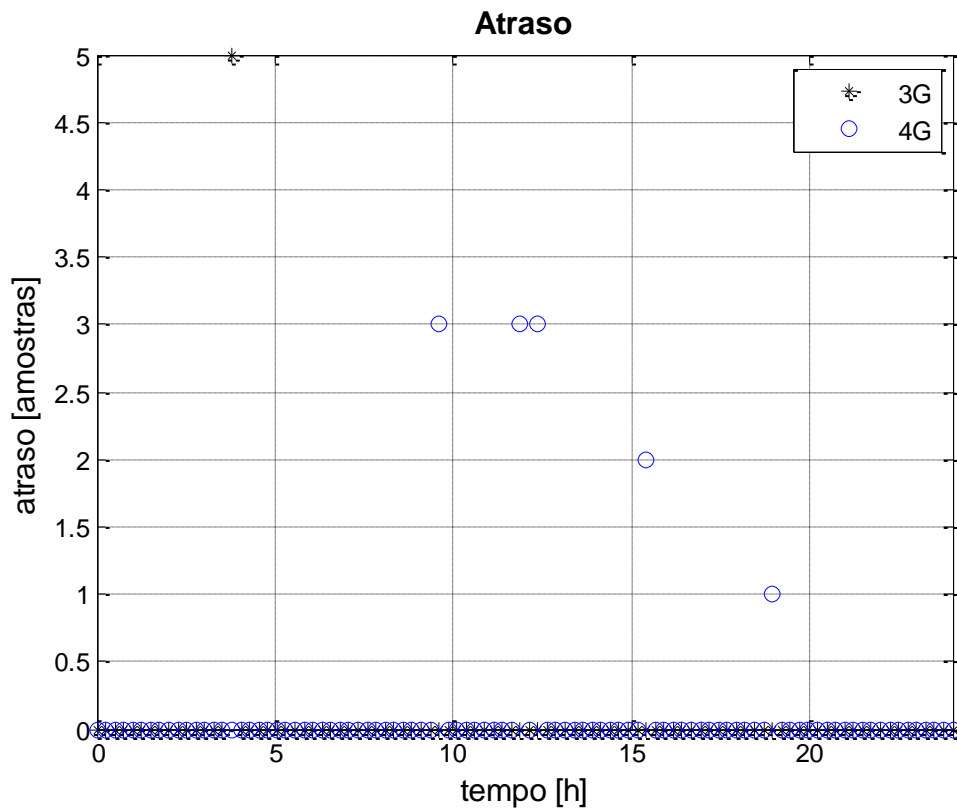


Figura B.4 – Atraso no cenário urbano ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=5$).

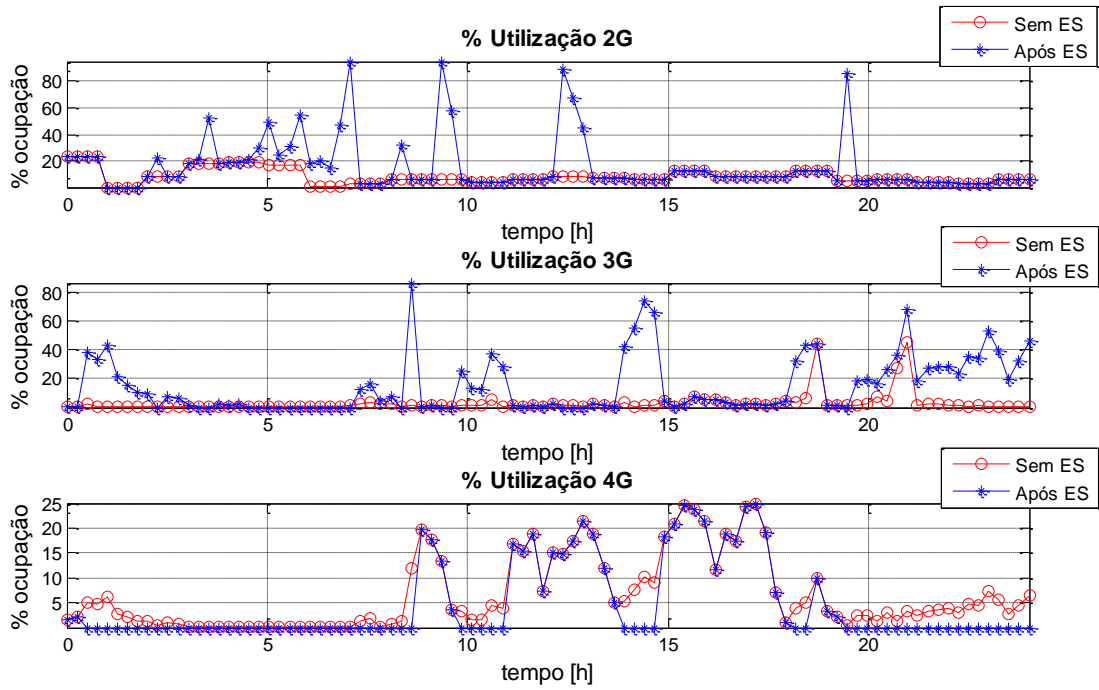


Figura B.5 – Percentagem de utilização no cenário urbano ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=0$).

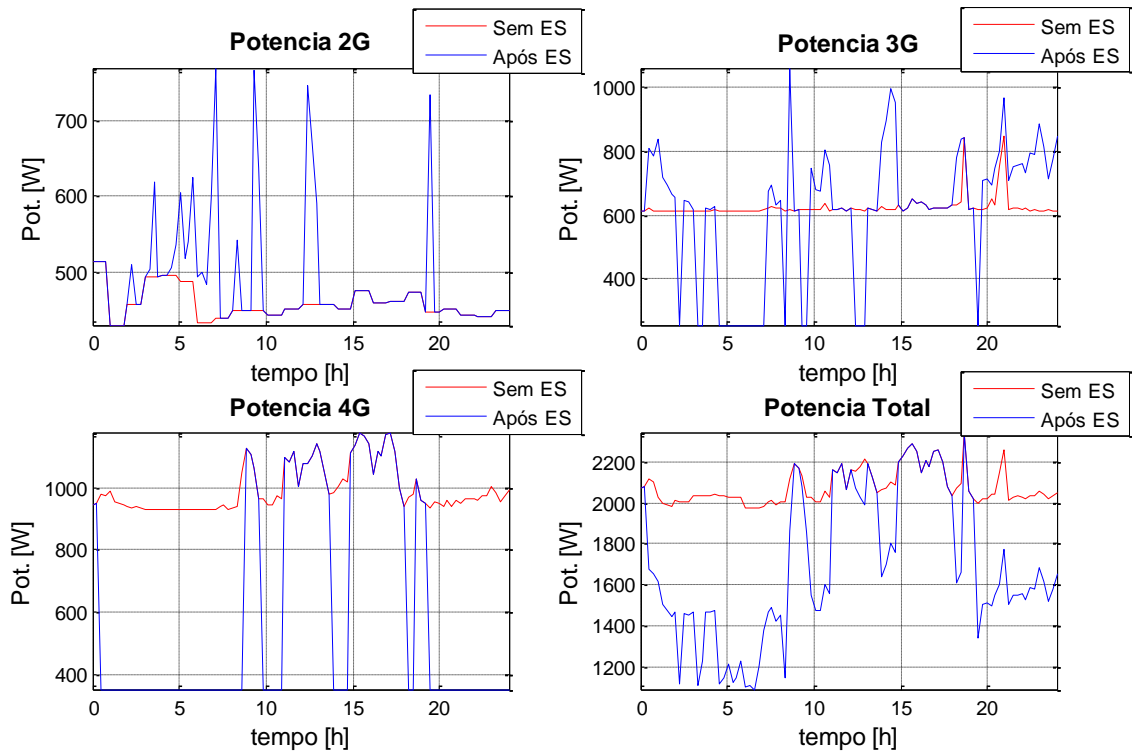


Figura B.6 – Potência consumida no cenário urbano ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=0$).

• **Suburbano**

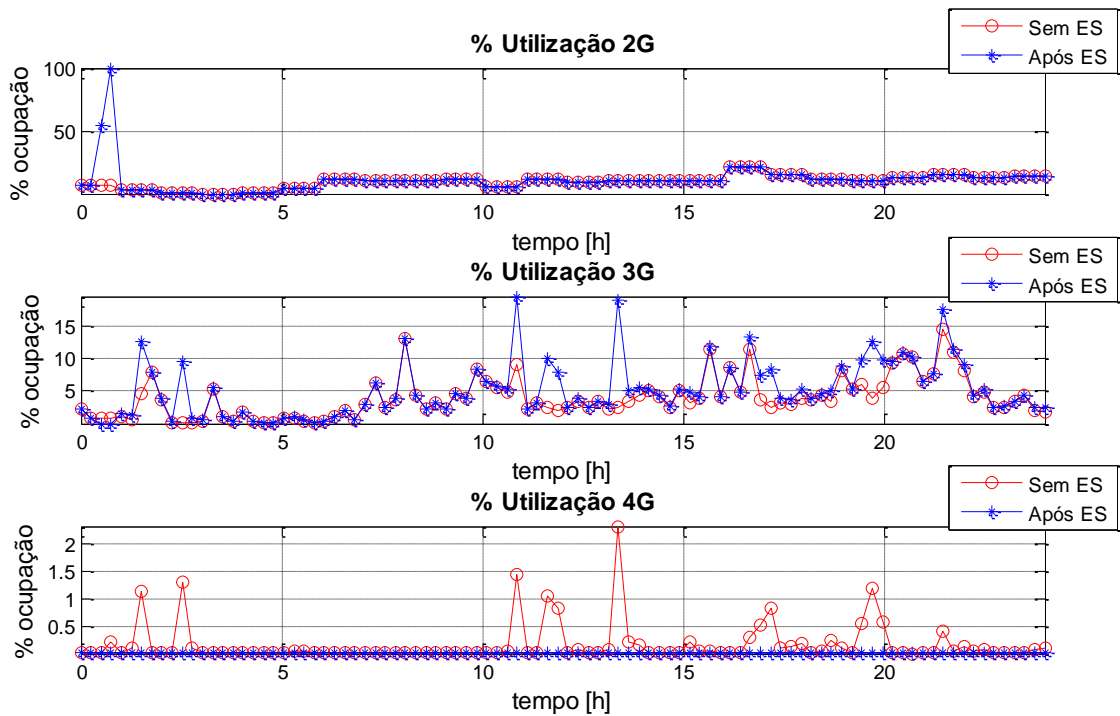


Figura B.7 – Percentagem de utilização no cenário suburbano ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=1$).

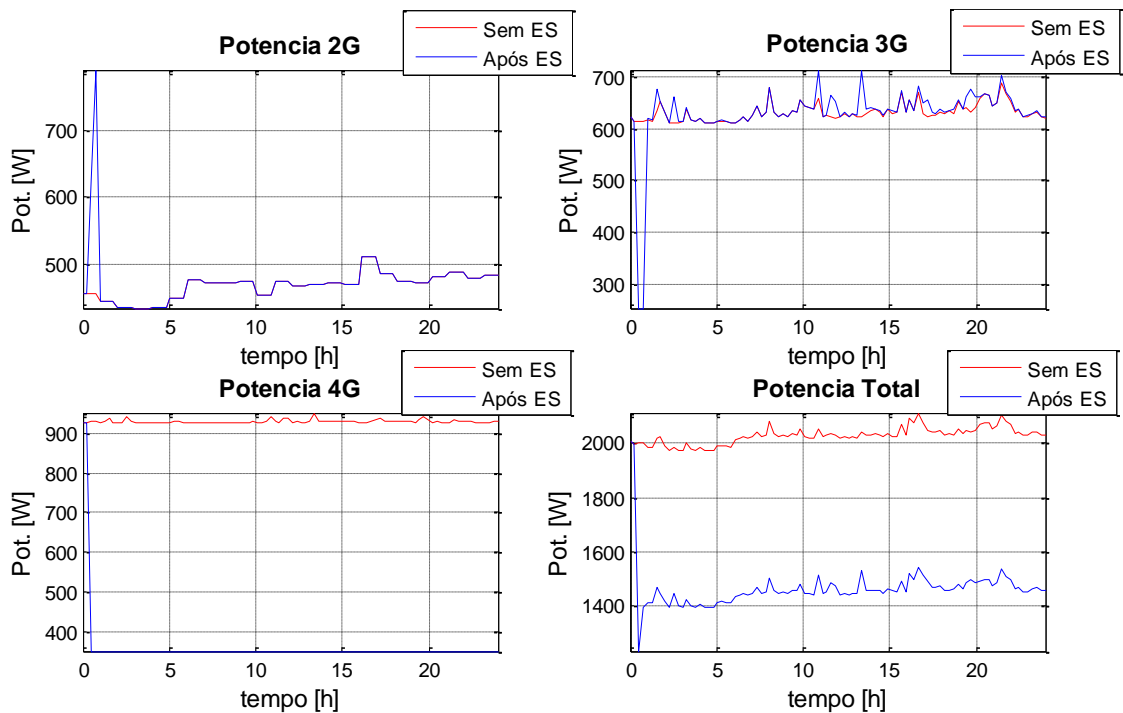


Figura B.8 – Potência consumida no cenário suburbano ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=1$).

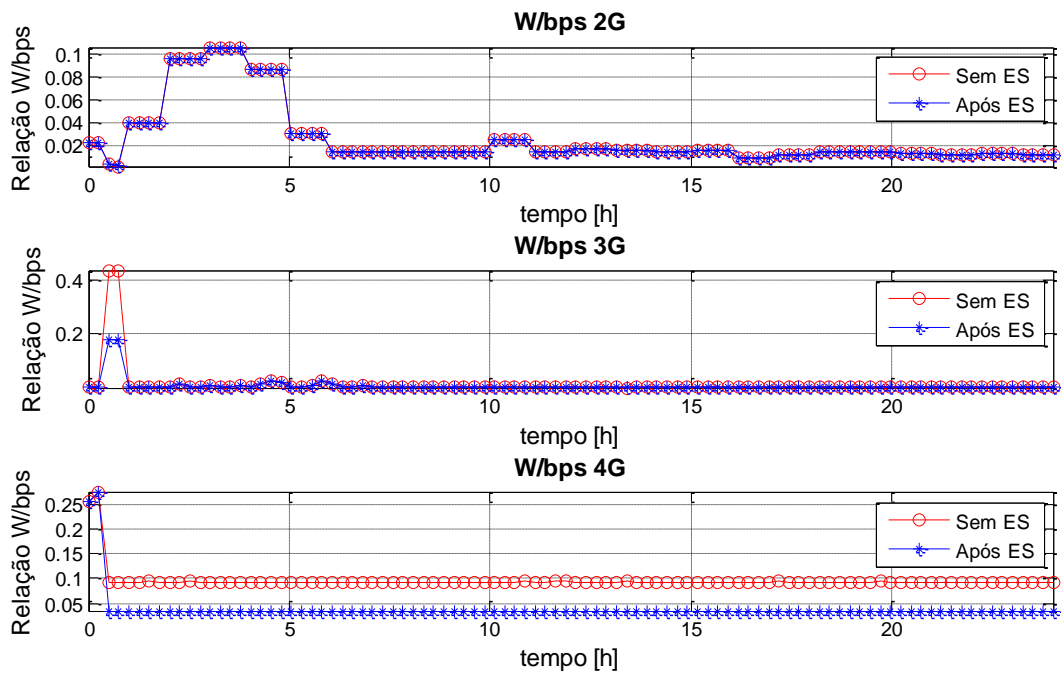


Figura B.9 – Relação W/bps no cenário suburbano ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=1$).

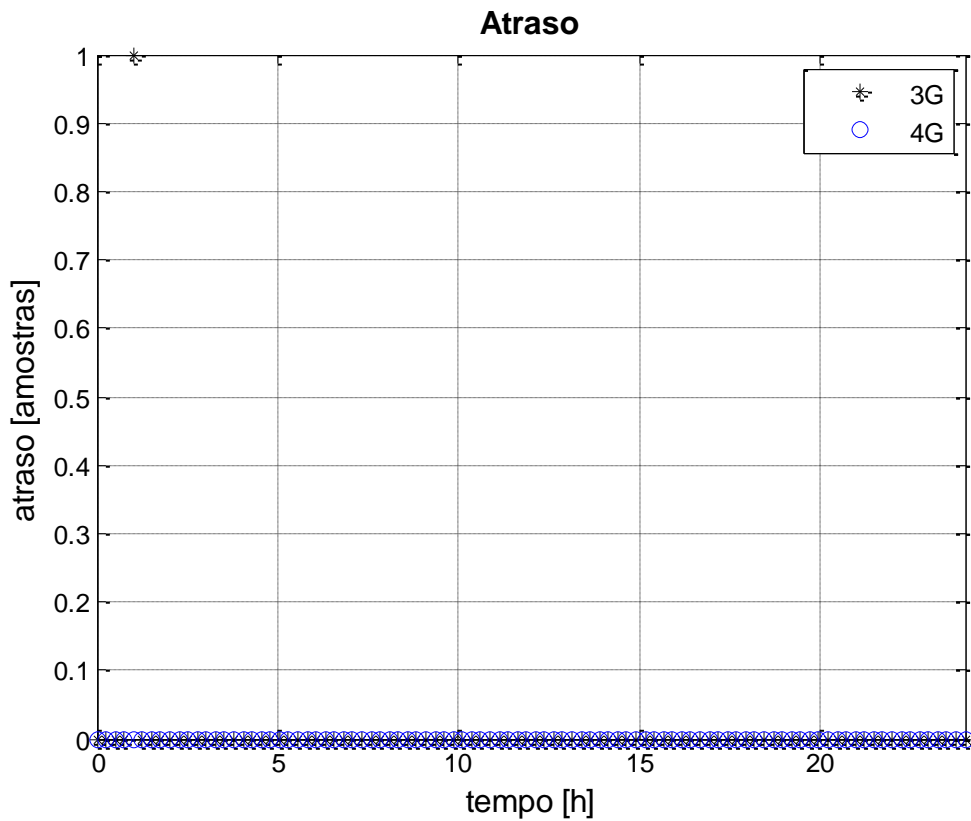


Figura B.10 – Atraso no cenário suburbano ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=1$).

• **Rural**

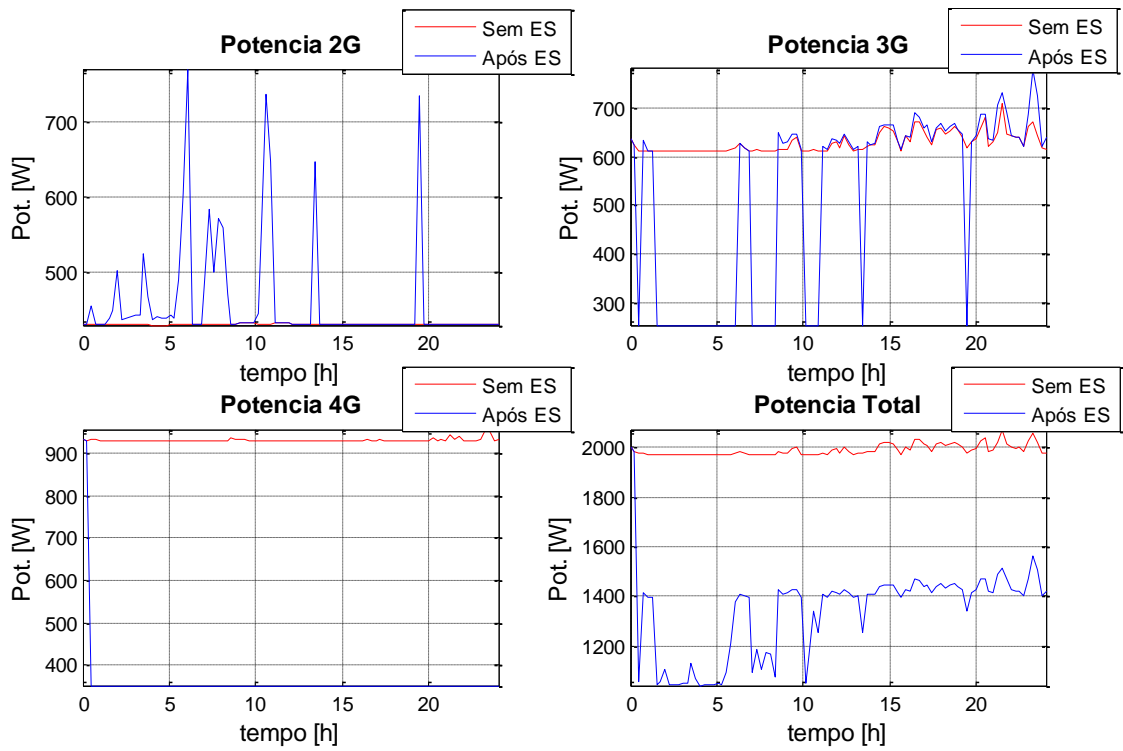


Figura B.11 – Potência consumida no cenário rural ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=0$).

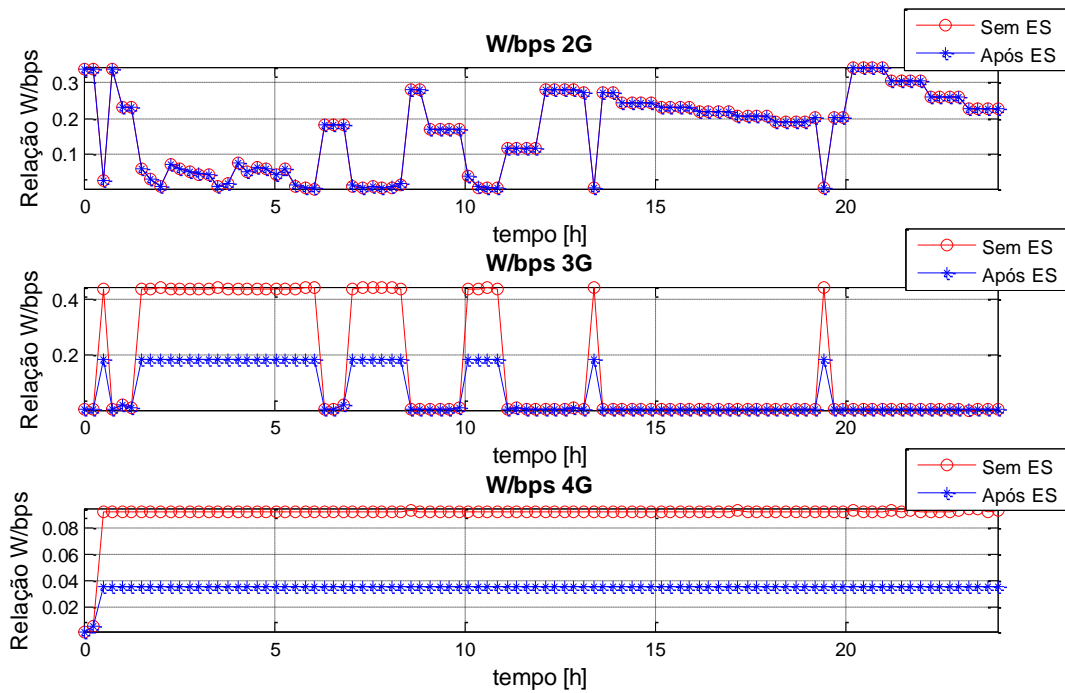


Figura B.12 – Relação W/bps no cenário rural ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=0$).

Anexo C – Cenário Fictício 1

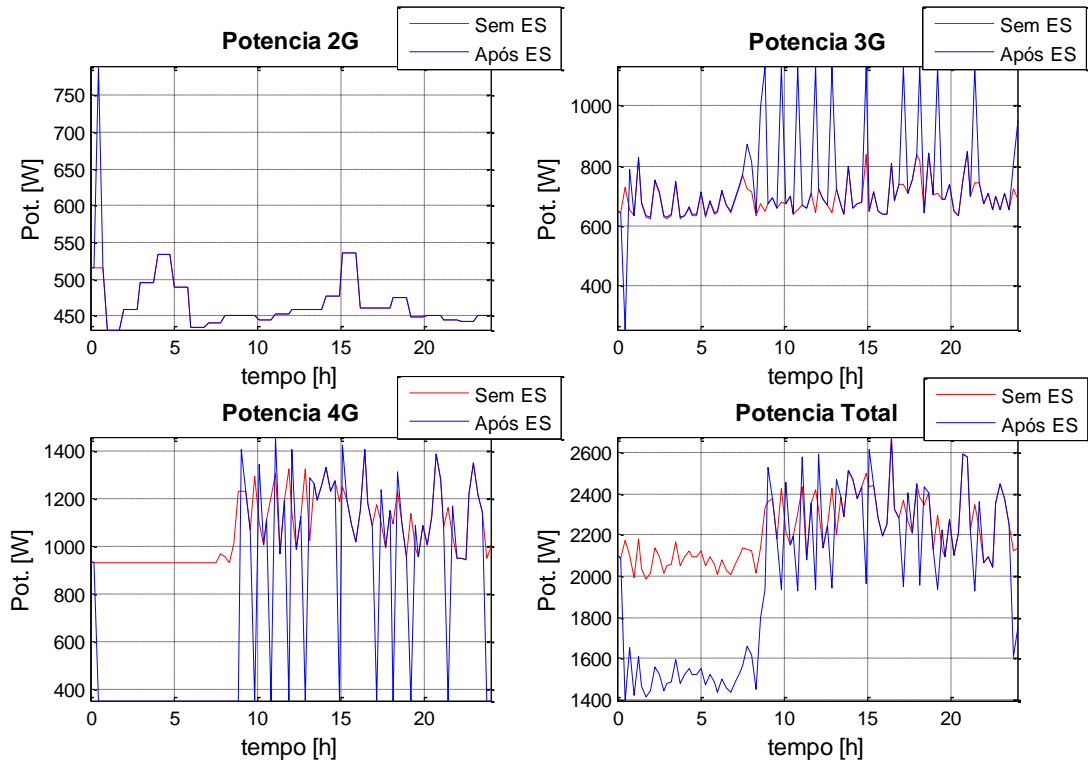


Figura C.1 – Potência consumida no cenário fictício 1 ($\alpha=40$, $\beta=40$ e $t_{100\%}=1$).

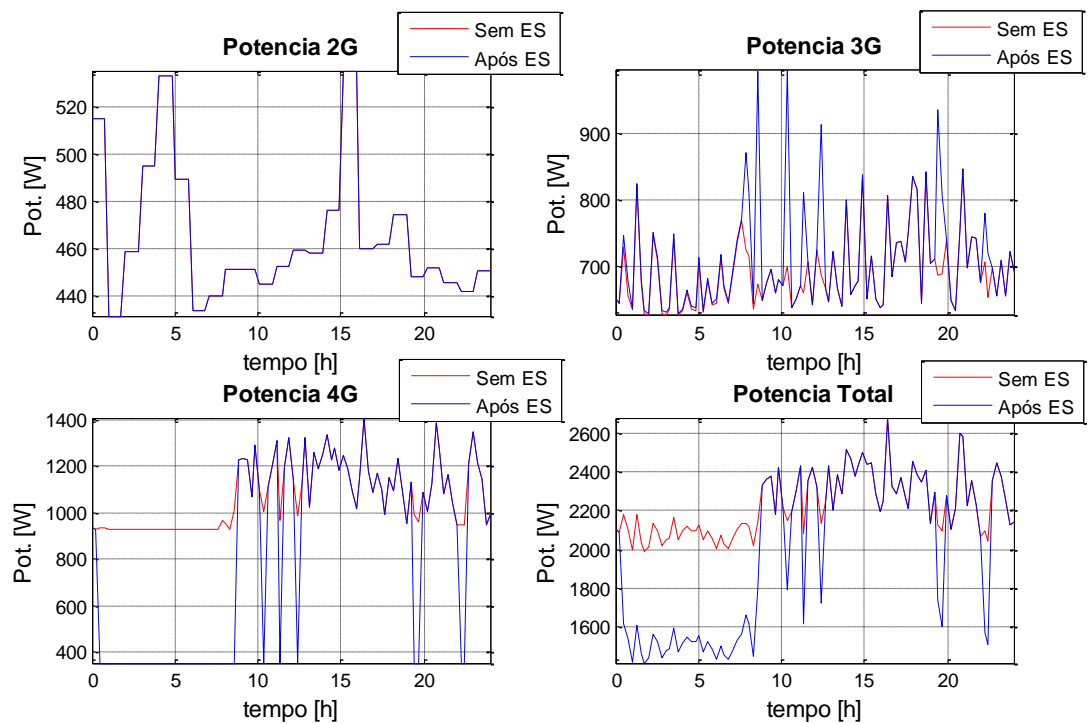


Figura C.2 – Potência consumida no cenário fictício 1 ($\alpha=85$, $\beta=85$ e $t_{100\%}=0$).

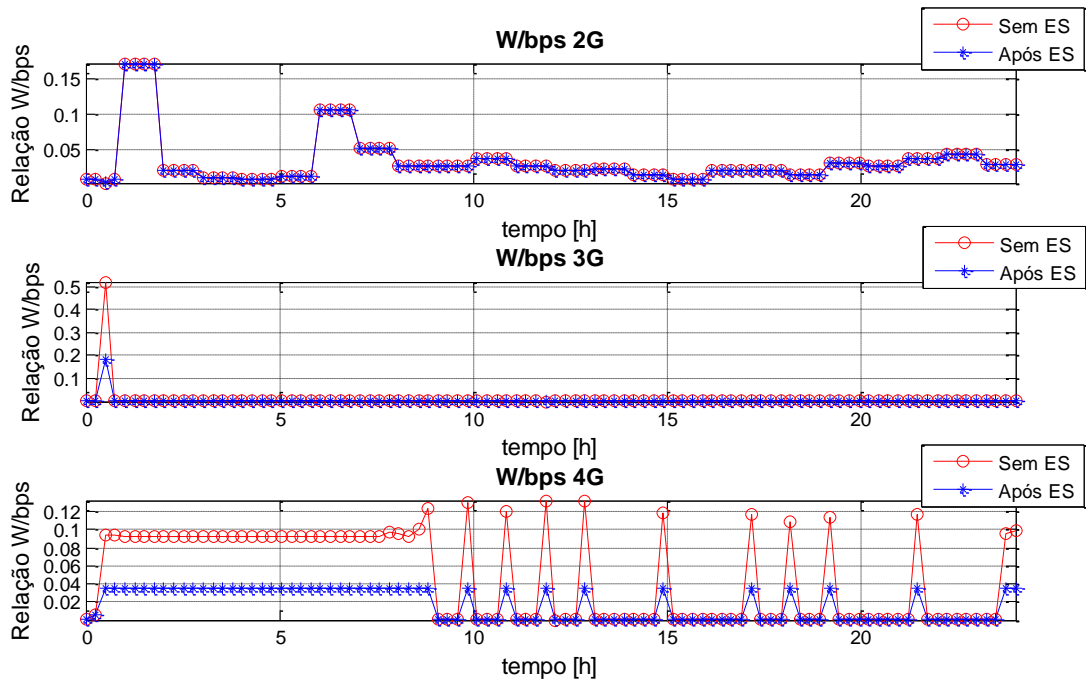


Figura C.3 – Relação W/bps no cenário fictício 1 ($\alpha=40$, $\beta=40$ e $t_{100\%}=1$).

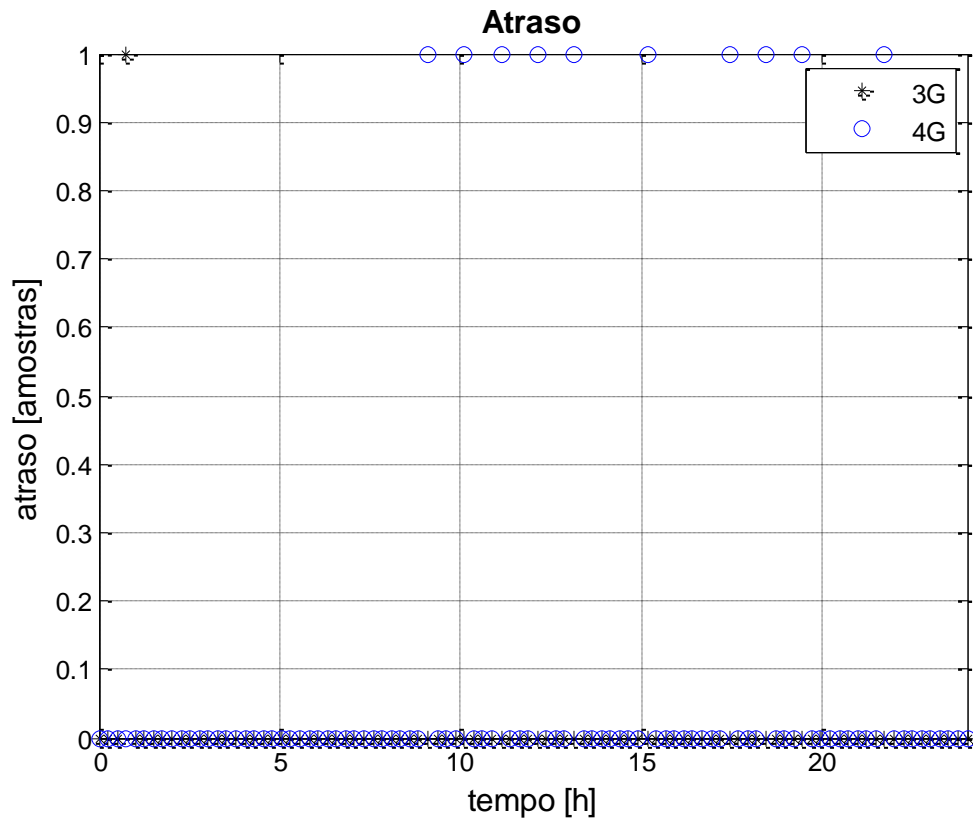


Figura C.4 – Atraso no cenário fictício 1 ($\alpha=40$, $\beta=40$ e $t_{100\%}=1$).

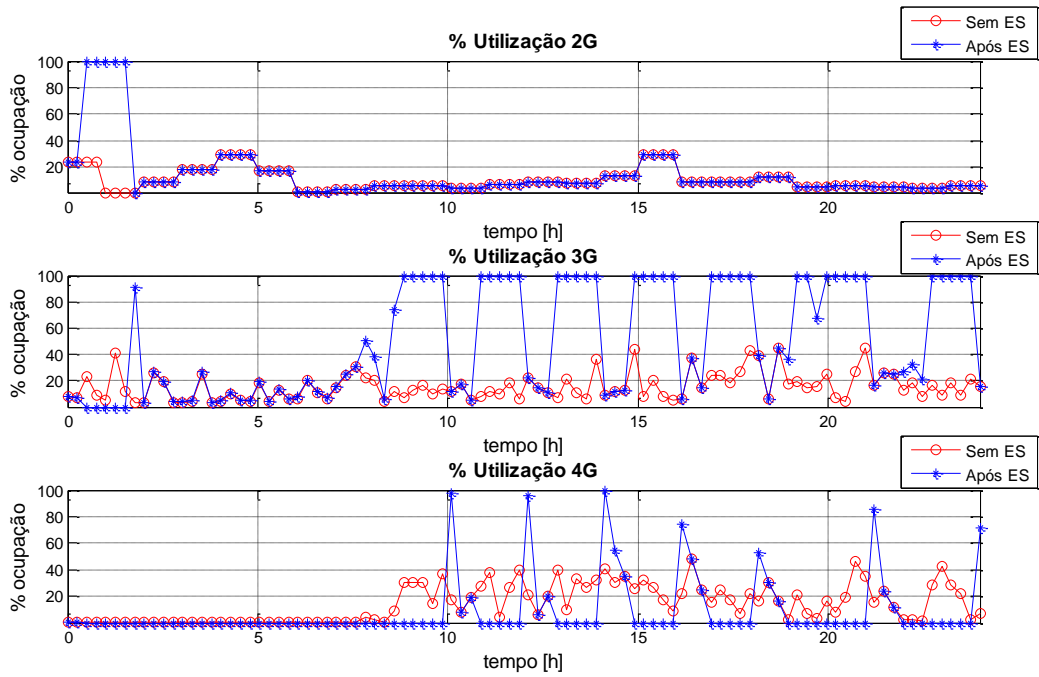


Figura C.5 – Percentagem de utilização no cenário fictício 1 ($\alpha=85$, $\beta=85$ e $t_{100\%}=5$).

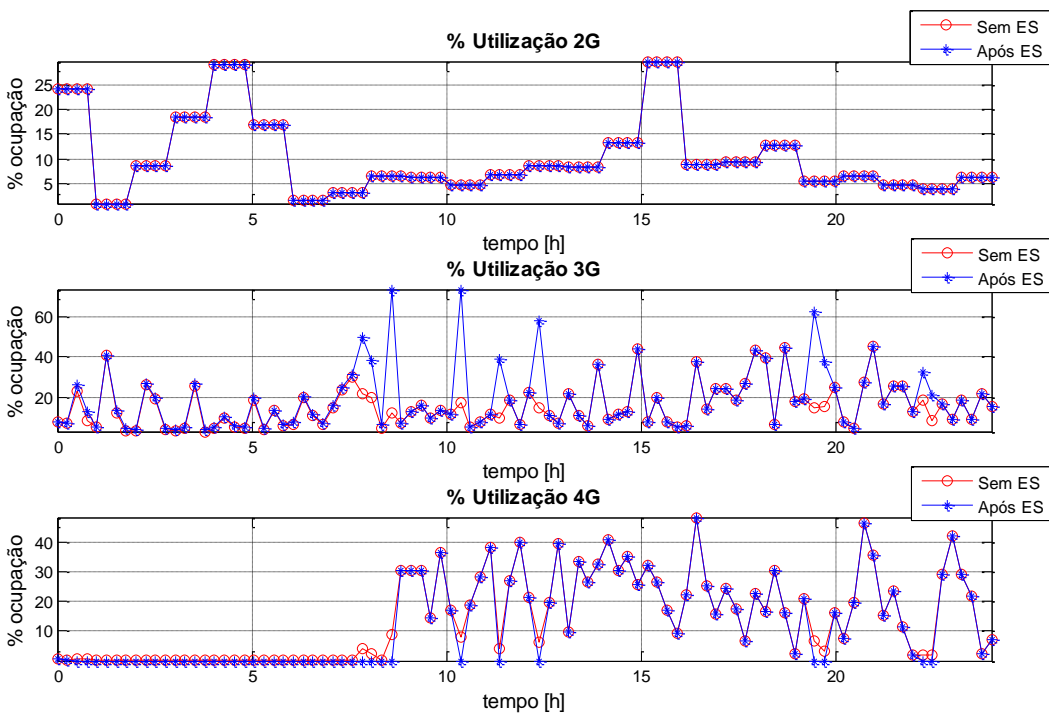


Figura C.6 – Percentagem de utilização no cenário fictício 1 ($\alpha=85$, $\beta=85$ e $t_{100\%}=0$).

Anexo D – Cenário Fictício 2

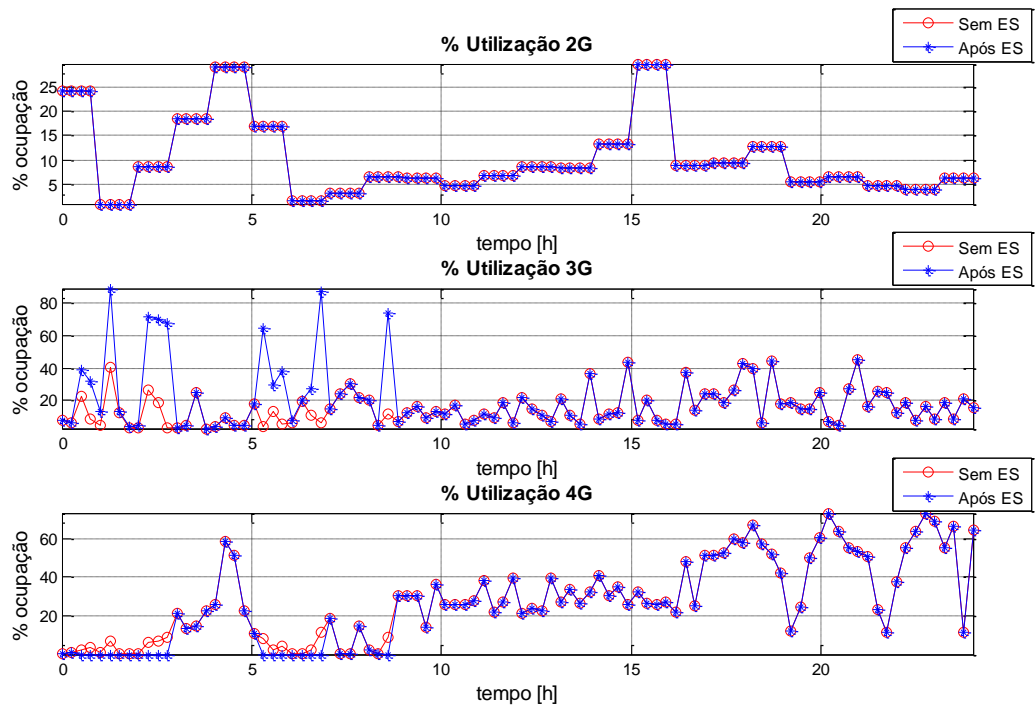


Figura D.1 – Percentagem de utilização no cenário fictício 2 ($\alpha=50$, $\beta=50$ e $t_{100\%}=0$).

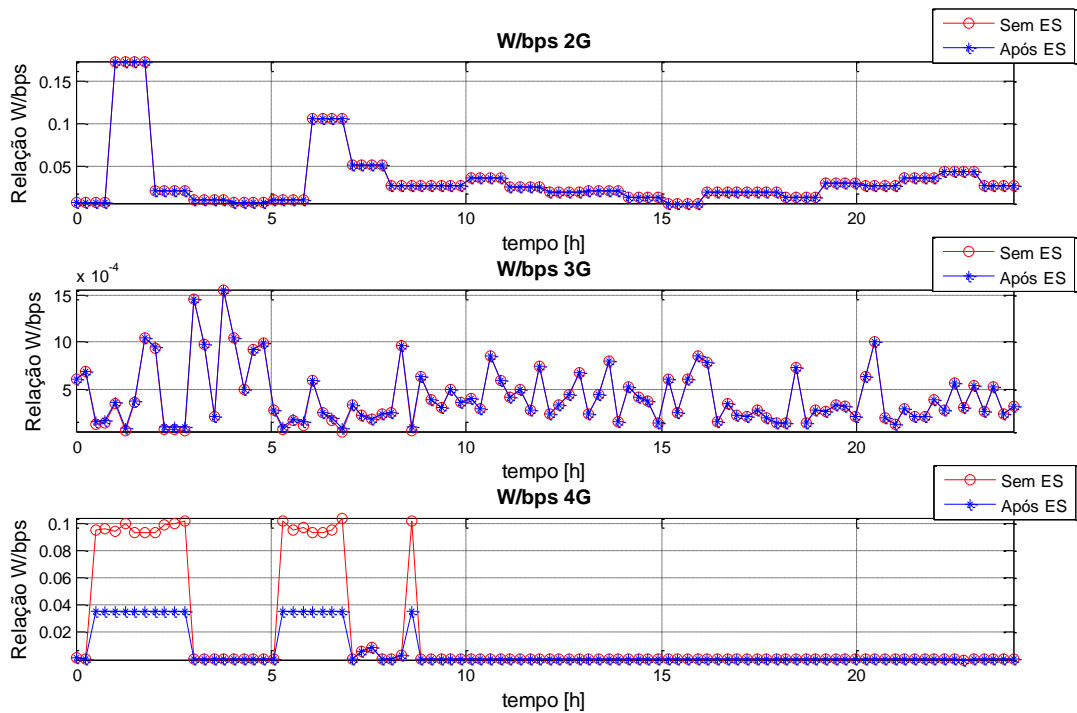


Figura D.2 – Relação W/bps no cenário fictício 2 ($\alpha=50$, $\beta=50$ e $t_{100\%}=0$).

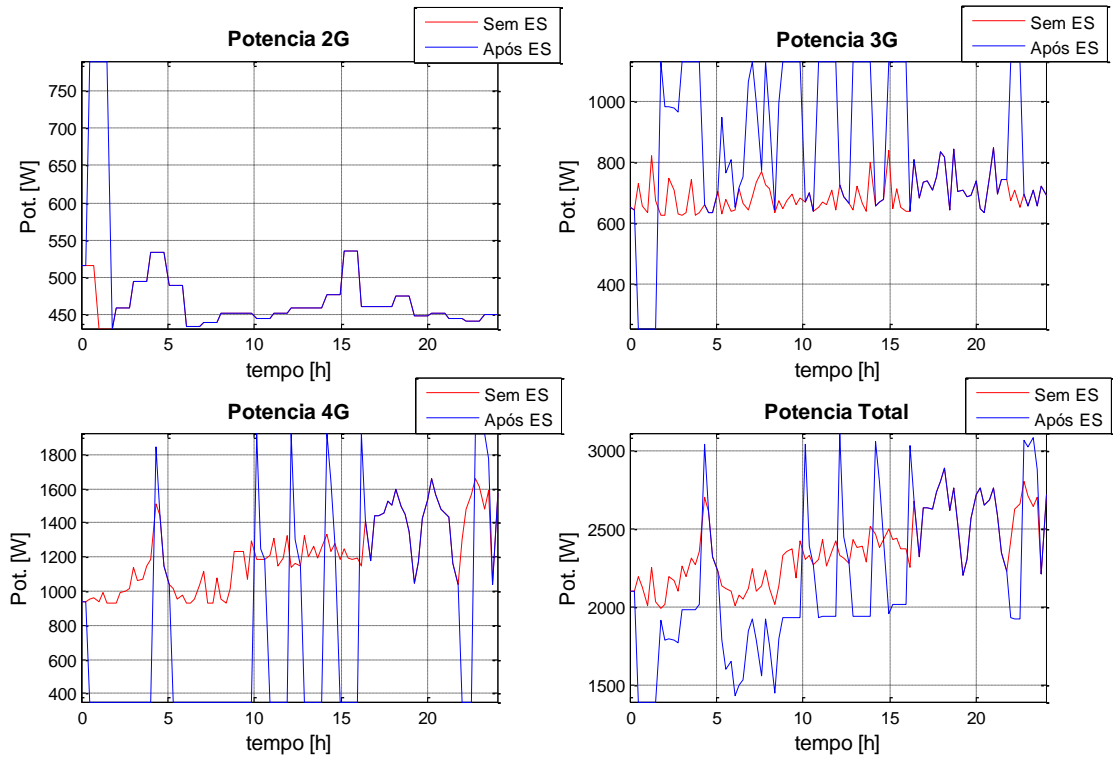


Figura D.3 – Potência consumida no cenário fictício 2 ($\alpha=50$, $\beta=50$ e $t_{100\%}=5$).

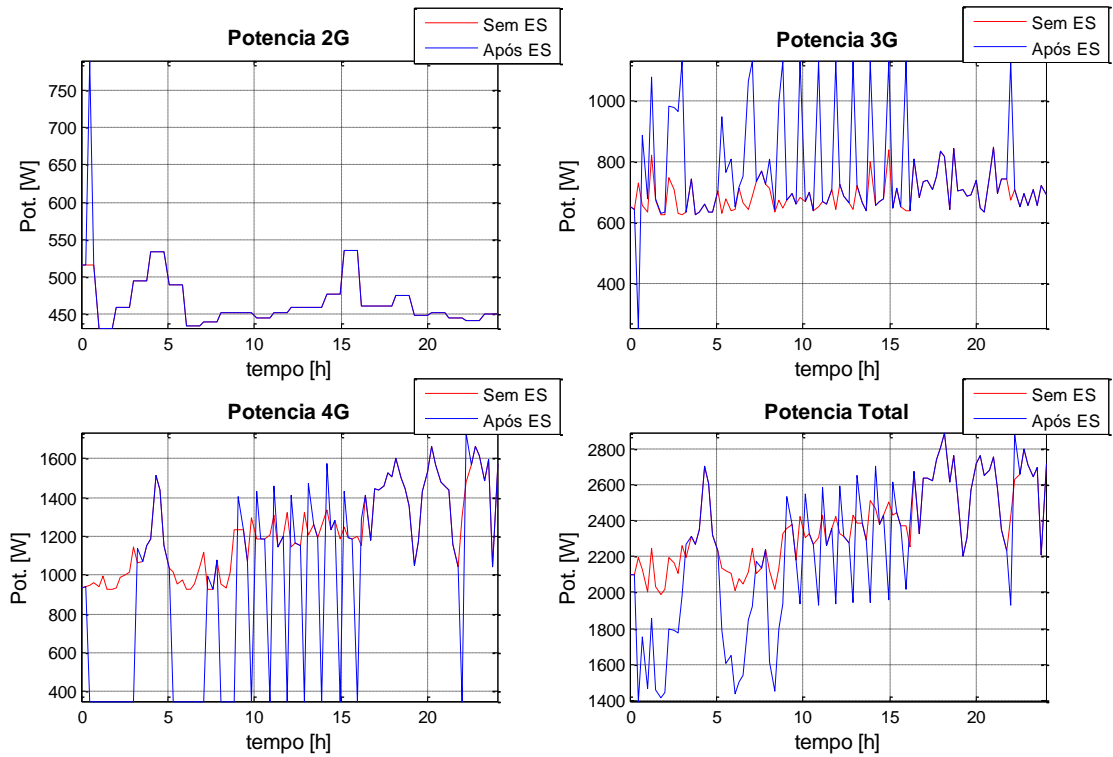


Figura D.4 – Potência consumida no cenário fictício 2 ($\alpha=50$, $\beta=50$ e $t_{100\%}=1$).

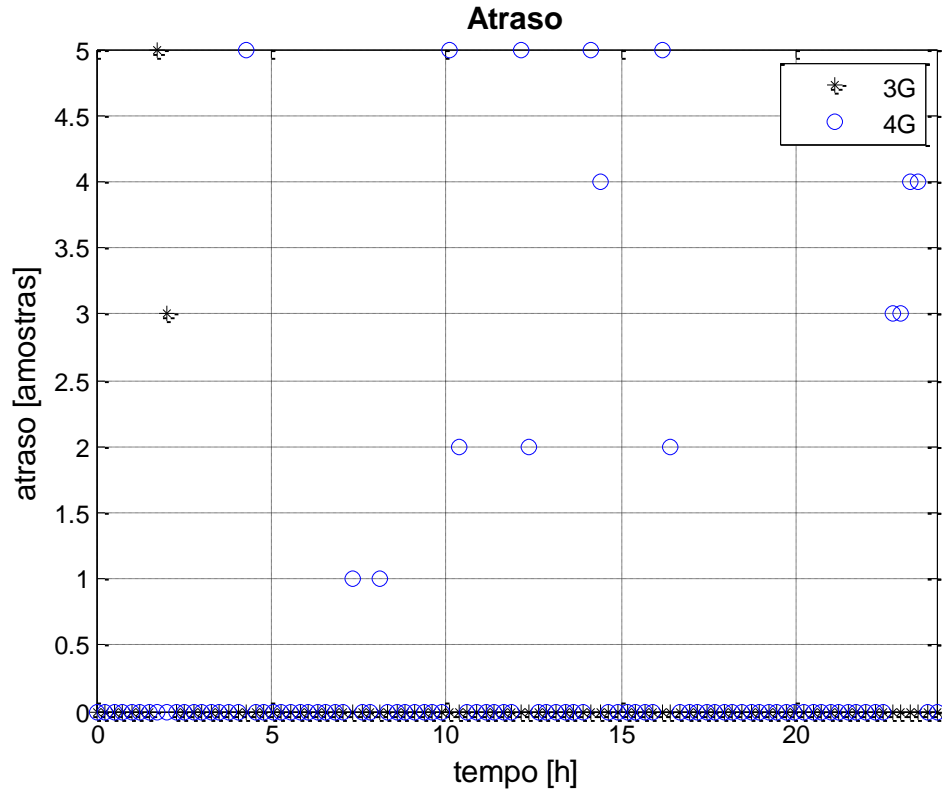


Figura D.5 – Atraso no cenário fictício 2 ($\alpha=50$, $\beta=50$ e $t_{100\%}=5$).

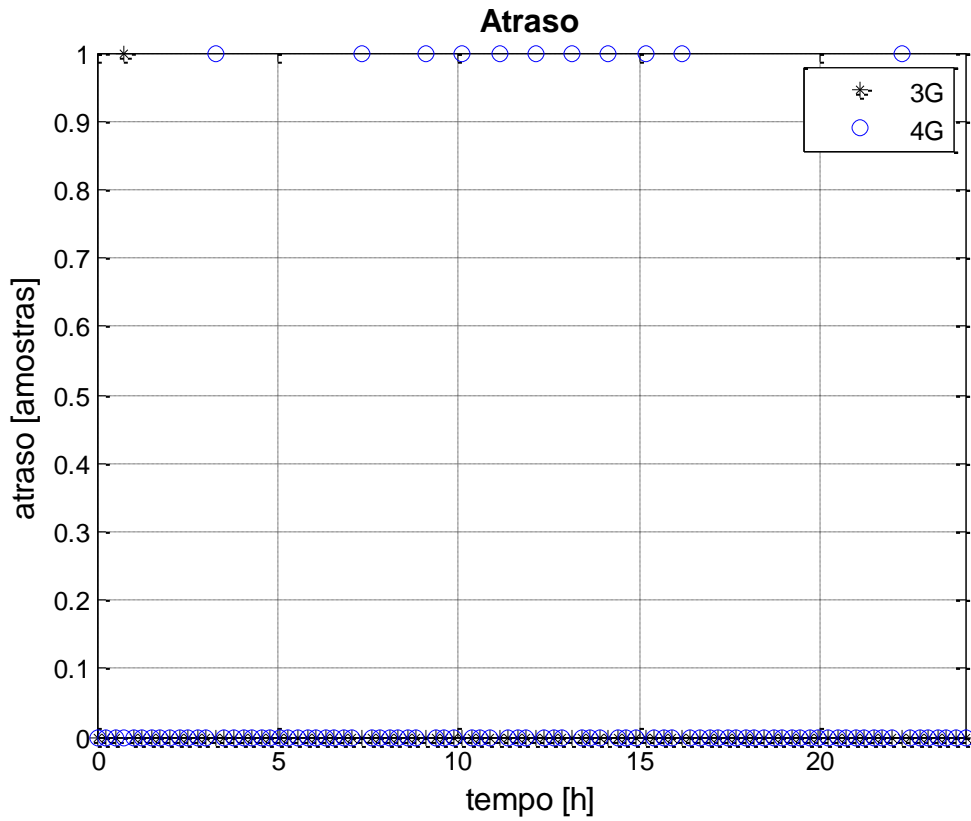


Figura D.6 – Atraso no cenário fictício 2 ($\alpha=50$, $\beta=50$ e $t_{100\%}=1$).

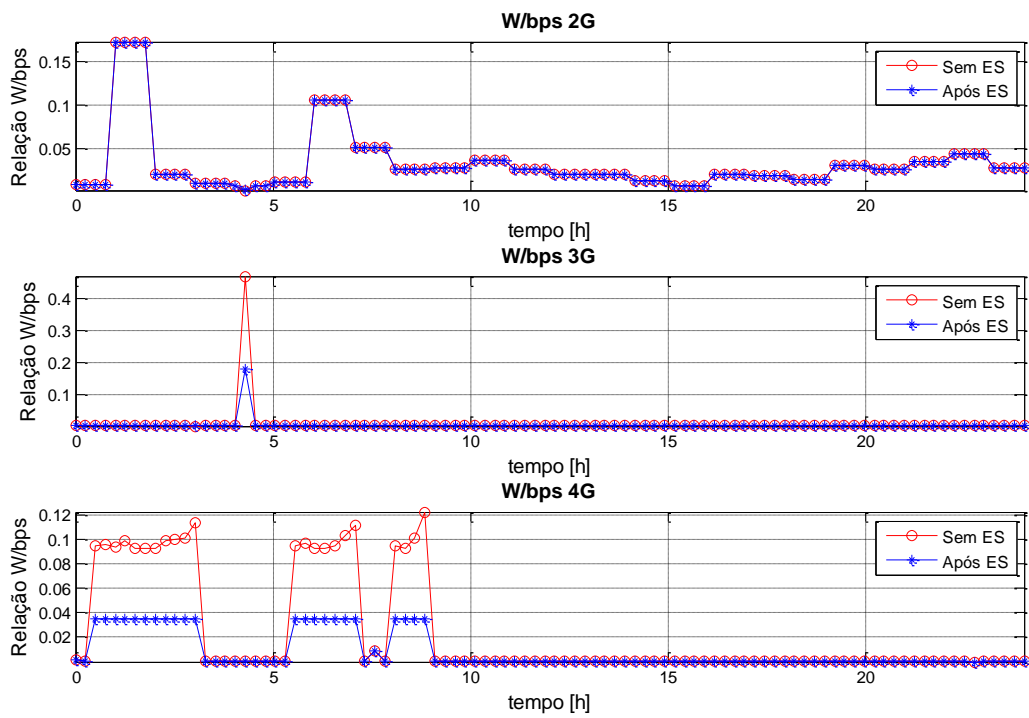


Figura D.7 – Relação W/bps no cenário fictício 2 ($\alpha=15$, $\beta=15$ e $t_{100\%}=1$).

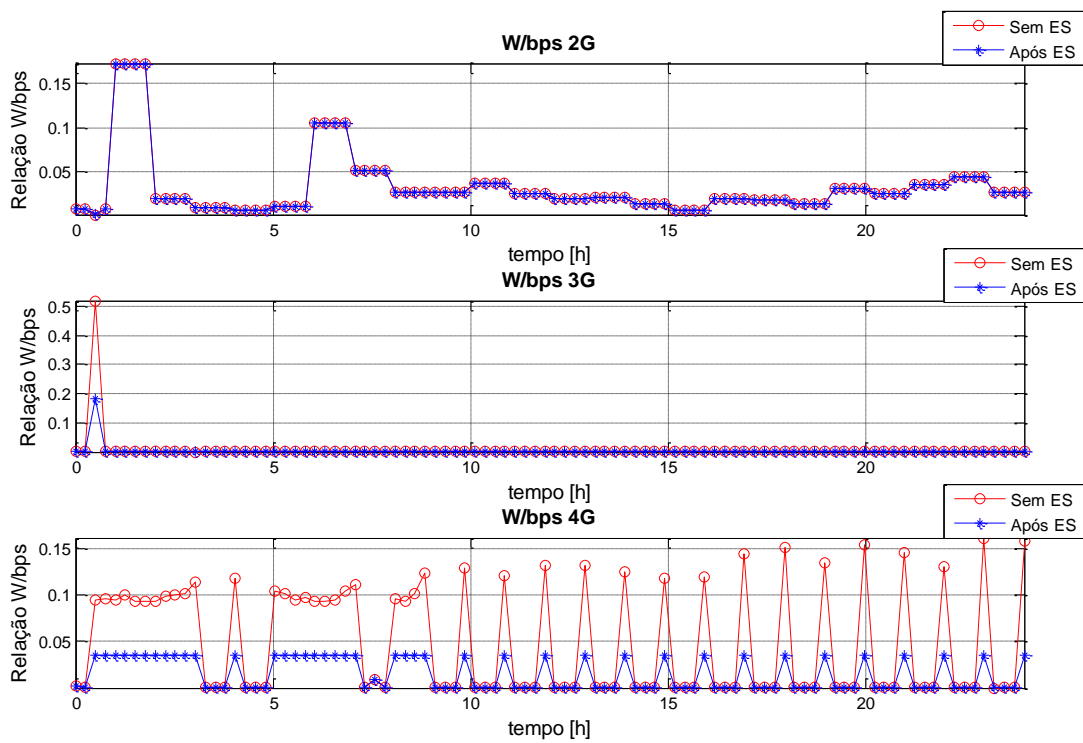


Figura D.8 – Relação W/bps no cenário fictício 2 ($\alpha=85$, $\beta=85$ e $t_{100\%}=1$).

Referências

- [1] A. Fehske, G. Fettweis, J. Malmudin, G. Biczók, "The Global Footprint of Mobile Communications: The Ecological and Economic Perspective", *IEEE Communications Magazine* • August 2011
- [2] Z. Hasan, H. Boostanimehr, V. K. Bhargava, "Green Cellular Networks: A Survey, Some Research Issues and Challenges", IEEE
- [3] A. Kumar, Y. Liu, J. Sengupta, Divya, "Evolution of Mobile Wireless Communication Networks: 1G to 4G", *IJECT Vol. I, Issue I, Dezembro 2010*
- [4] G. P. Fettweis and E. Zimmermann, "ICT energy consumption - trends and challenges," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, Lapland, Finland, September 2008.
- [5] EARTH project deliverable, D3.1 "Most Promising Tracks of Green Network Technologies", 2010
- [6] EARTH project deliverable, D3.2 "Green Network Technologies", 2011
- [7] S. Landström, A. FuruskÅr, K. Johansson, L. Falconetti and F. Kronstedt, "Heterogeneous networks – increasing cellular capacity", *Ericsson Review*, 2011
- [8] <http://cnl.sogang.ac.kr/research/hetnet.jpg> (27/10/2013)
- [9] H. Ong, "A Generalized Cooperative and Cognitive Radio Resource Management Architecture for Future Wireless Networks", School of Electrical Engineering and Computer Science, August 2010
- [10] <http://cdn2.artwhere.net/microwave-eetimes.com/imf/c/eyJtYXNrIjoiNDQ1eDQyOCJ9/images/01-edit-photo-uploads/2012/2012-october/2012-10-22-teconnect-fig1.jpg> (27/10/2013)
- [11] A. S. Gowda, A. Goldsmith, "Energy Efficiency of MIMO systems", *Wireless Communications*
- [12] EARTH project deliverable, D3.3 "Final Report on Green Network Technologies", 2012

- [13] A. Imran, M.A.Imran, R.Tafazolli, "A Novel Self Organizing Framework for Adaptive Frequency Reuse and Deployment in Future Cellular Networks", Center of Communication System Research, University of Surrey, UK
- [14] <http://www.zte.com.cn/cn/events/ltelatam2012/articles/solutions/201204/W020120417324269751162.jpg> (27/10/2013)
- [15] L. Hévízi and I. Gódor, "Power saving in mobile networks by dynamic base station sectorization", in Proc. IEEE PIMRC'11, W-GREEN workshop, Toronto, Canada, Sep. 2011.
- [16] M. A. Marsan, L. Chiaraviglio, D. Ciullo, M. Meo, "Optimal Energy Savings in Cellular Access Networks", Electronics Department, Politecnico di Torino, Italy & IMDEA Networks, Madrid, Spain
- [17] A. Vidács and I. Gódor, "Power Saving Potential in Heterogeneous Cellular Mobile Network", in Proc. IEEE PIMRC'11, W-GREEN Workshop, Toronto, Canada, Sep. 2011.
- [18] C. Wu, X. Sun, T. Zhang, "A Power-saving Scheduling Algorithm for Mixed Multicast and Unicast Traffic in MBSFN", School of Network Education & Beijing Key Laboratory of Network System Architecture and Convergence - Beijing University of Posts and Telecommunications
- [19] E. Calvanese Strinati, P. Greco, "Green Resource Allocation for OFDMA Wireless Cellular Networks", CEA, LET!, MINATEC, F-38054 Grenoble, France
- [20] M. Kaur Gondara, S. Kadam, "Requirements of Vertical Handoff Mechanism in 4G Wireless Networks", Computer Science Department, University of Pune, Pune
- [21] <http://3.bp.blogspot.com/WTiHmAFIfzY/Tklk1gXhZWI/AAAAAAAAAA0/jBhrOpedBTI/s1600/Untitled.png> (27/10/2013)
- [22] A. Ambrosy, O. Blume, H. Klessig, W. Wajda, "Energy saving potential of integrated hardware and resource management solutions for wireless base stations", Alcatel-Lucent Bell Labs & Vodafone Chair Mobile Communications Systems, Tech. University Dresden
- [23] F. Héliot, M. Ali Imran, R. Tafazolli, "On the Energy Efficiency Gain of MIMO Communication under Various Power Consumption Models", Centre for Communication

Systems Research (CCSR), Faculty of Electronics & Physical Sciences, University of Surrey, Guildford GU2 7XH, UK

[24] <http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/2013> (25/09/2013)

[25] <http://commscopeblogs.com/2012/02/22/fiber-to-the-antenna/> (10/08/2013)

[26] "Active Antenna Systems - A step-change in base station site performance", White paper, Nokia Siemens Networks, 2012

[27] <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/105-son> (27/10/2013)

[28] "Operations Support Systems (OSSs)", Agilent Technologies, *Web ProForum Tutorials*

[29] A Survey Report on "Generations of Network: 1G, 2G, 3G, 4G, 5G", Advanced Computer Network Lab

[30] <http://www.electronicsforu.com/EFYLinux/efyhome/cover/jun2003/Mobile-tech.pdf> (10/08/2013)

[31] http://electronicsforu.com/electronicsforu/circuitarchives/view_article.asp?sno=1384&id=12101 (10/08/2013)

[32] <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/mobile/gprs> (10/08/2013)

[33] <http://www.3gpp.org/Technologies/Keywords-Acronyms/article/gprs-edge> (10/08/2013)

[34] 3gamericas (2010). "Transition to 4G: 3GPP Broadband Evolution to IMT-Advanced", Rysavy Research/3GAmericas