



ISEL – INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

ADEETC – ÁREA DEPARTAMENTAL DE ENGENHARIA DE ELETRÓNICA E TELECOMUNICAÇÕES E DE
COMPUTADORES

MEET – MESTRADO EM ENGENHARIA ELETRÓNICA E TELECOMUNICAÇÕES

DISSERTAÇÃO

Desenvolvimento de um Modelo de Consumo Energético para Redes de Acesso Rádio 2G/3G/4G com Base em Dados Reais

ALEXANDRA ISABEL GALVÃO MOURATO

(Licenciada em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações e de
Computadores)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica
e Telecomunicações na área de especialização em Telecomunicações

Orientador: Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Co-orientação: Doutora Iola Maria Silvério Pinto

Mestre David Eduardo Correia Duarte

Presidente: Doutor Mário Pereira Véstias

Júri: Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Doutor António José Castelo Branco Rodrigues

Dezembro de 2017

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Pedro Vieira e Professora Doutora Iola Pinto, pela disponibilidade demonstrada ao longo do desenvolvimento da dissertação, tendo sido um apoio fundamental para a realização da mesma.

À Celfinet pelo apoio e informação disponibilizada, essencial para o desenvolvimento desta dissertação, a referir o Eng. Paulo Martins e Eng. David Duarte.

Agradeço a todos os meus colegas do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa pela amizade, apoio e motivação demonstrada ao longo desta caminhada.

Finalmente, gostaria de agradecer à minha família, especialmente aos meus pais por todo o apoio, permitindo-me chegar cada vez mais longe.

Resumo

Investigações anteriores mostram que cerca de 10% da energia consumida em todo o mundo é devido às Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), e gerada principalmente por recursos não renováveis. Devido ao aumento das despesas operacionais e do aquecimento global, a poupança de energia tornou-se um grande desafio para os futuros sistemas de telecomunicações. Assim, considera-se pertinente o desenvolvimento de estudos que viabilizem a obtenção de planos estratégicos sobre otimização dos sistemas. Estes estudos suportam a tomada de decisão no que respeita à configuração das redes compatível com a concretização de objetivos de poupança energética. O trabalho desenvolvido nesta dissertação visa propor modelos de consumo energético para estações-base 2G, 3G e 4G. A investigação surgiu no âmbito de uma rede real, permitindo verificar o efeito da variação do tráfego, voz e dados, no consumo energético de uma estação base, sendo o ponto de partida para os modelos. Foram consideradas outras variáveis tais como a potência de transmissão, disponibilidade das células e recursos alocados aos utilizadores. A modelação dos dados foi baseada em técnicas de aprendizagem supervisionada, designadamente foram utilizados modelos de regressão linear multivariáveis, tendo como objetivo final a estimativa do consumo energético. Este é comparado com medidas reais extraídas de equipamentos de monitorização energética instalados na estação base. De modo a validar os resultados, foram utilizadas métricas como a correlação de Pearson, *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) e *Root Mean Square Error* (RMSE). Dependendo do modelo, os erros médios entre a potência medida e a estimada variam entre 2,2 e 4,0%. A análise dos resultados obtidos sugeriu a possibilidade de desligar a tecnologia 3G na banda dos 2100 MHz através da transferência do tráfego para as outras bandas, permitindo assim uma poupança de 578 euros de custos energéticos, por ano por estação.

Palavras-chave: Comunicações Móveis, Rede de Acesso Rádio, Eficiência Energética, Tráfego.

Abstract

Previous research studies have shown that about 10% of the world-energy is consumed by *Information Communication Technology* (ICT) infrastructures, mainly generated by non-renewable sources. Combining global warming with the *Operational Expenditure* (OPEX) of mobile operators, it is demanding to understand and to develop strategies to reduce the consumed energy. An effort to increase the energy efficiency of these technologies has become a major challenge for the future telecommunications systems. The aim of this paper is to develop energy consumption models for 2G, 3G and 4G base stations. We investigate in a real network, the effect of traffic variations, voice and data, on base station power consumption. Were considered other variables such as the base station transmit power, cell availability, or resources allocated to users were also considered in the models. The models consider supervised learning techniques, namely multivariable linear regression models were used, and the result is the predicted base station power consumption, which is compared with real measurements extracted with energy monitoring equipment installed on site. In order to proceed with validation, metrics such as the Pearson correlation, Mean Absolute Percentage Error (MAPE) and Root Mean Square Error (RMSE) were used. Depending on the model, the errors between measured and predicted power vary between 2,2 and 4%. The analysis of the obtained results suggested the switch-off of 2100 MHz band of 3G technology was possible by swapping their traffic to other technologies, allowing a 578 euros saving on a year.

Keywords: Mobile Communications, Radio Access Networks, Energy Efficiency, Traffic.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Estrutura do documento	4
1.4	Publicações	4
2	Estado da Arte	5
2.1	Redes de Acesso Rádio	6
2.2	<i>Global System for Mobile Communications</i>	7
2.2.1	Arquitetura	8
2.2.2	Capacidade	9
2.3	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>	10
2.3.1	Arquitetura	10
2.3.2	Capacidade	12
2.4	<i>Long Term Evolution</i>	13
2.4.1	Arquitetura	13
2.4.2	Capacidade	15
2.5	Indicadores de Desempenho	18
2.6	Soluções de Monitorização e Otimização Energética	19
2.6.1	<i>Smart Metering</i>	19
2.6.2	<i>Energy Harvesting</i>	19
2.6.3	<i>Energy Saving</i>	20
3	Metodologia	23
3.1	Análise Descritiva dos Dados	24
3.2	<i>Machine Learning</i>	24
3.2.1	Modelos de Regressão Linear Múltipla	25
3.2.2	Pressupostos do Modelo	27
3.2.3	Diagnóstico e Análise de Resíduos	27

3.2.4	Validação do Modelo e Indicadores de Desempenho	28
4	Caracterização e Monitorização	31
4.1	Equipamento de Medida	32
4.2	Caracterização das Estações Base	33
4.3	Análise do Tráfego	35
4.4	Análise do Consumo Energético	38
4.4.1	Impacto Ambiental	40
4.5	Indicadores de Desempenho	41
5	Modelos de Consumo e Poupança Energética	43
5.1	Modelos de Consumo Energético	44
5.1.1	Modelo GU900	45
5.1.2	Modelo U2100	50
5.1.3	Modelo LTE	54
5.2	Otimização do Consumo Energético para GSM	60
5.3	Otimização do Consumo Energético por <i>switch-off</i> do UMTS 2100 MHz	63
6	Conclusões	67
6.1	Síntese	68
6.2	Trabalho Futuro	69
A	Aplicação dos Modelos	75

Lista de Figuras

1.1	Consumo energético dos sistemas de comunicação [6].	3
2.1	Estação Base do tipo distribuída (adaptado de [8]).	6
2.2	Arquitetura da rede GSM (adaptado de [9]).	8
2.3	Arquitetura da rede UMTS (adaptado de [10]).	11
2.4	Arquitetura da rede LTE (adaptado de [12]).	13
2.5	<i>Resource Block</i> (adaptado de [14]).	15
2.6	Constelações de símbolos em quadratura e fase.	16
3.1	Exemplos do sobre-ajustamento e sub-ajustamento.	25
3.2	Reta de regressão linear.	26
4.1	Sensor de corrente de Efeito de Hall (adaptado de [4]).	32
4.2	Diagrama genérico da estação base.	33
4.3	Distribuição das células por tecnologia.	34
4.4	Evolução do tráfego durante o dia.	35
4.5	Evolução do tráfego durante a semana.	36
4.6	Consumo energético dos equipamentos da Estação Base.	38
5.1	Aplicação do modelo GU900, abordagem I.	45
5.2	Aplicação do modelo GU900, abordagem II.	46
5.3	Aplicação do modelo GU900, abordagem III.	48
5.4	Validação do modelo GU900, abordagem III.	49
5.5	Aplicação do modelo U2100, abordagem I.	50
5.6	Aplicação do modelo U2100, abordagem II.	51
5.7	Aplicação do modelo U2100, abordagem III.	52
5.8	Validação do modelo U2100, abordagem III.	53
5.9	Aplicação do modelo LTE, abordagem I à banda dos 800 MHz.	55
5.10	Aplicação do modelo LTE, abordagem I à banda dos 1800 MHz.	55
5.11	Aplicação do modelo LTE, abordagem II à banda dos 800 MHz.	56
5.12	Aplicação do modelo LTE, abordagem II à banda dos 1800 MHz.	57

5.13	Aplicação do modelo LTE, abordagem III à banda dos 800 MHz.	58
5.14	Aplicação do modelo LTE, abordagem III à banda dos 1800 MHz.	58
5.15	Validação do modelo LTE, abordagem III.	59
5.16	Potência transmitida nos <i>timeslots</i> com a ativação da <i>feature</i> na portadora do BCCH.	60
5.17	Ativação da <i>feature</i> de otimização do consumo energético do BCCH.	61
5.18	Variação do rácio de queda de chamadas em 2G para o <i>cluster</i> de células. . .	62
5.19	Variação do rácio de chamadas bloqueadas em 2G para o <i>cluster</i> de células. .	62
5.20	Transferência do tráfego U2100 para as outras tecnologias.	63
5.21	Configuração dos <i>transceivers</i> da estação base B.	64
5.22	Transferência de tráfego do UMTS 2100 MHz.	65
6.1	Equipamentos da estação base.	69

Lista de Tabelas

2.1	<i>Channel Elements</i> por serviço.	12
2.2	Características da largura de banda no LTE.	16
2.3	<i>Throughput</i> para LTE em Mbps relativo a cada modulação.	17
4.1	Caracterização das estações base.	35
4.2	Distribuição do tráfego de voz/dados ao longo do dia.	36
4.3	Volume de tráfego diário por tecnologia.	37
4.4	Consumos diários dos equipamentos da Estação Base.	39
4.5	Consumo/custo médio e impacto ambiental da estação base B.	40
5.1	Métricas da aplicação do modelo GU900.	48
5.2	Indicadores de qualidade do ajuste da regressão do Modelo GU900.	49
5.3	Testes dos pressupostos para o Modelo GU900.	49
5.4	Métricas da aplicação do modelo U2100.	53
5.5	Indicadores de qualidade do ajuste da regressão do Modelo U2100.	53
5.6	Testes dos pressupostos para o Modelo U2100.	54
5.7	Métricas da aplicação do modelo LTE.	58
5.8	Indicadores de qualidade do ajuste da regressão do Modelo LTE.	59
5.9	Testes de raiz unitária para o Modelo U2100.	59
A.1	Indicadores de desempenho do modelo GU900 para as três abordagens.	75
A.2	Indicadores de desempenho do modelo U2100 para as três abordagens.	76
A.3	Indicadores de desempenho do modelo LTE para as três abordagens.	76

Acrónimos

2G <i>Second Generation</i>	DC <i>Direct Current</i>
3G <i>Third Generation</i>	DL <i>Downlink</i>
3GPP <i>Third Generation Partnership Project</i>	EDGE <i>Enhanced Data Rates For GSM Evolution</i>
4G <i>Fourth Generation</i>	EIR <i>Equipment Identity Register</i>
5G <i>Fifth Generation</i>	EPC <i>Evolved Packet Core</i>
AC <i>Alternating Current</i>	eNB <i>Evolved NodeB</i>
ACF <i>Função de Autocorrelação</i>	E-UTRAN <i>Evolved UTRAN</i>
AMR <i>Adaptive Multi-Rate</i>	FCCH <i>Frequency Correction Channel</i>
AUC <i>Authentication Center</i>	FDMA <i>Frequency Division Multiple Access</i>
BBU <i>BaseBand Unit</i>	GGSN <i>Gateway GPRS Support Node</i>
BCCH <i>Broadcast Channel</i>	GMSC <i>Gateway MSC</i>
BSC <i>Base Station Controller</i>	GPRS <i>General Packet Radio Services</i>
BS <i>Base Station</i>	GSM <i>Global System for Mobile Communications</i>
BSS <i>Base Station Subsystem</i>	HLR <i>Home Location Register</i>
CCCH <i>Common Control Channel</i>	HSCSD <i>High Speed Circuit Switched Data Service</i>
CE <i>Channel Element</i>	HSDPA <i>High Speed Downlink Packet Access</i>
CN <i>Core Network</i>	HSPA <i>High Speed Packet Access</i>
CPRI <i>Common Public Radio Interfaces</i>	
CS <i>Circuit Switched</i>	

HSS <i>Home Subscriber Server</i>	PACF <i>Função de Autocorrelação Parcial</i>
HSUPA <i>High Speed Uplink Packet Access</i>	PCRF <i>Policy Control and Charging Rules Function</i>
HWN <i>Heterogeneous Wireless Network</i>	PDN-GW <i>Packet Data Network Gateway</i>
ICT <i>Information Communication Technology</i>	PLMN <i>Public Land Mobile Network</i>
IoT <i>Internet Of Things</i>	PM <i>Performance Management</i>
IP <i>Internet Protocol</i>	PS <i>Packet Switched</i>
ITU <i>International Telecommunication Union</i>	PRB <i>Physical Resource Block</i>
KPI <i>Key Performance Indicators</i>	QAM <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
LB <i>Largura de Banda</i>	QoE <i>Quality of Experience</i>
LTE <i>Long Term Evolution</i>	QoS <i>Quality of Service</i>
MAPE <i>Mean Absolute Percentage Error</i>	QPSK <i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
ME <i>Mobile Equipment</i>	R99 <i>Release 99</i>
MELECON <i>Mediterranean Electrotechnical Conference</i>	RAN <i>Radio Access Network</i>
MIMO <i>Multiple-Input Multiple-Output</i>	RAT <i>Radio Access Technology</i>
MME <i>Mobility Management Entity</i>	RB <i>Resource Block</i>
MS <i>Mobile Station</i>	RE <i>Resource Element</i>
MSC <i>Mobile Switching Center</i>	RF <i>Radio Frequency</i>
NSS <i>Network Switching System</i>	RMSE <i>Root Mean Square Error</i>
OFDM <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	RNC <i>Radio Network Controller</i>
OMC <i>Operations and Maintenance Center</i>	RRU <i>Remote Radio Unit</i>
OMS <i>Operations and Maintenance Subsystem</i>	SCH <i>Synchronization Channel</i>
OPEX <i>Operational Expenditure</i>	SGSN <i>Serving GPRS Support Node</i>
	SGW <i>Serving Gateway</i>
	SIM <i>Subscriber Identity Module</i>
	SISO <i>Single-Input Single-Output</i>
	SMS <i>Short Message Service</i>

SDCCH *Stand-alone Dedicated Control Channel*

SSE *Sum of Squared Error*

TCH *Traffic Channel*

TDMA *Time Division Multiple Access*

TIC *Tecnologias de Informação e Comunicação*

TMA *Tower Mounted Amplifier*

TRX *Transceiver*

Tx *Transmission Link*

UE *User Equipment*

UL *Uplink*

UMTS *Universal Mobile Telecommunications System*

URSI *União Radio Científica Internacional*

USIM *UMTS Subscriber Identity Module*

UTRAN *UMTS Terrestrial RAN*

VLR *Visitor Location Register*

VoLTE *Voice over LTE*

WCDMA *Wideband Code Division Multiple Access*

Lista de Símbolos

β_i	Coefficientes
λ	Ritmo de chamadas
ρ	Tráfego oferecido
$\bar{\tau}$	Tempo médio
C	Número de canais TCH
CO_2	Dióxido de carbono
DN	Identificação do dia/noite
e	Diferença entre os valores medidos e estimados
E	Energia consumida
$F_{Amb.}$	Identificação do tipo de ambiente
F_{BCCCH}	<i>Feature</i> de otimização do consumo de potência
F_C	Fator de emissão
H	Identificação da hora da amostra
k	Número de variáveis independentes
LB	Largura de banda
N_{PRB}	Número de PRB
p_B	Probabilidade de bloqueio
P'_{GU900}	Potência estimada para o modelo GU900
P'_{LTE}	Potência estimada para o modelo LTE
P'_{U2100}	Potência estimada para o modelo U2100
P_T	Potência transmitida
R	Correlação
SSE	<i>Sum of Squared Error</i>
$T_{CS_{GSM}}$	Tráfego de voz GSM
$T_{CS_{UMTS}}$	Tráfego de voz UMTS
T_{GPRS}	Tráfego de dados GPRS
T_{HSDPA}	Tráfego de dados HSDPA
T_{LTE}	Tráfego LTE
$T_{PS_{UMTS}}$	Tráfego de dados UMTS
T_{R99}	Tráfego de dados R99
X	Matriz de variáveis independentes
x_i	Variáveis independentes
W	Identificação do fim de semana
y	Variável dependente medida
y_i'	Variável dependente estimada

1

Introdução

1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Estrutura do documento	4
1.4	Publicações	4

1.1 Motivação

A indústria de telecomunicações móveis conta com inúmeras despesas, tanto operacionais como de capital, pois a prestação de serviços móveis a vários milhares de milhões de utilizadores em todo o mundo está associada com um custo de consumo de energia. A evolução tecnológica do lado do consumidor, baseada numa enorme troca de dados, necessita de uma estrutura de rede altamente disponível com recursos abundantes. Isto é possível devido às novas e mais eficientes Radio Access Technologies (RATs), e devido à melhoria da eficiência da comunicação entre a *Radio Access Network* (RAN) e o *core* da rede.

Atualmente, a maioria dos operadores de comunicações operam simultaneamente em diferentes RATs e diferentes faixas de frequência, levando ao conceito de *Heterogeneous Wireless Networks* (HWNs). Este facto, associado à necessidade de maior capacidade, de modo a satisfazer os utilizadores, ávidos por grandes volumes de dados, como acesso à Internet e *streams* de vídeos, leva os operadores a planear a rede com uma densidade de estações base ainda maior, aumentando assim os custos.

Estima-se que num futuro próximo ocorra um aumento de 51% do consumo de energia global, e consequentemente na área das redes móveis, [1]. Pode-se ainda referir que, até ao final de 2030, é esperado um crescimento até 1700 TWh no consumo de energia.

A indústria das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) é responsável por cerca de 10% do consumo global de energia, [2]. Em redes de comunicações móveis, as *Base Station* (BS) consomem a maior parte da energia entre todos os componentes do sistema, tendo as operações de amplificação de energia e refrigeração um consumo de aproximadamente 70% da energia, [3]. Hoje em dia, cerca de 80% do consumo de energia de um operador de redes móveis provém das estações base instaladas, [4].

Os operadores constataram que a rede de acesso rádio representa 60%, [5], do consumo total de energia da rede. Assim, os estudos que visam a medição precisa do consumo energético estão a ganhar bastante importância, não só globalmente, mas também de forma mais detalhada, medindo o consumo específico de energia nos principais componentes que constituem cada BS. Além disso, estão disponíveis estatísticas de rede que permitem medir os principais indicadores de desempenho, *Key Performance Indicators* (KPI), nos diferentes cenários e tecnologias.

Nos últimos anos, apesar do desenvolvimento de equipamentos mais eficientes, o consumo de energia continua a aumentar devido à introdução de novas tecnologias, bem como à crescente procura de clientes em termos de *Quality of Service* (QoS) e *Quality of Experience* (QoE), o que se traduz numa procura de maior capacidade e menor latência nos serviços.

A Figura 1.1 apresenta a tendência do crescimento do consumo de energia por parte da utilização global das comunicações.

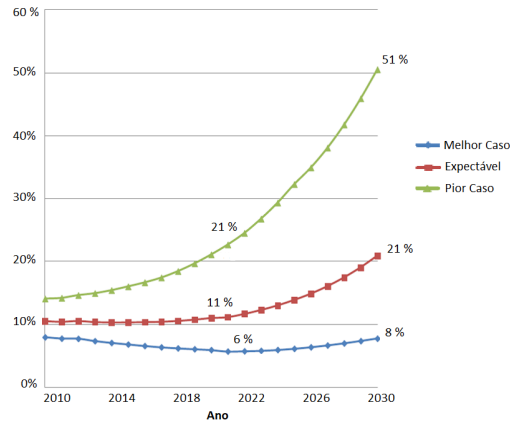


Figura 1.1: Consumo energético dos sistemas de comunicação [6].

Neste âmbito, para diminuir os custos de energia, os operadores necessitam de medir o consumo dos seus equipamentos e realizar *upgrades* de *hardware* e *software*.

Por exemplo, as BS's situadas em áreas residenciais proporcionam um maior serviço durante a noite, quando comparado com o serviço fornecido ao longo do dia. Já no caso das BS's localizadas em áreas de indústria ou escritórios, apresentam-se completamente carregadas durante o dia e têm um volume de tráfego muito menor durante a noite. Assim, em função da localização da BS é possível economizar a sua carga de utilização, uma vez que existem largos períodos de baixa utilização de recursos.

Devido ao aumento das despesas operacionais e do aquecimento global, a poupança de energia tornou-se um grande desafio para os futuros sistemas de telecomunicações. Como tal, é necessário apresentar estudos sobre planos estratégicos na sua otimização para que deste modo as empresas comecem a ponderar certas alterações na rede, [7].

1.2 Objetivos

O trabalho desenvolvido nesta dissertação visa propor um modelo de consumo energético para estações base *Second Generation* (2G), *Third Generation* (3G) e *Fourth Generation* (4G) que correspondem nomeadamente às tecnologias *Global System for Mobile Communications* (GSM), *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) e *Long Term Evolution* (LTE). Para tal, é necessário fazer uma caracterização das estações envolvidas, tanto ao nível de configuração como de perfil de tráfego gerado. Serão analisados os vários componentes de *hardware* presentes nas estações, como as *Remote Radio Unit* (RRU), *BaseBand Unit* (BBU) e *Transmission Link* (Tx). Tendo em consideração as características de cada tecnologia, será elaborado um modelo de consumo energético para a banda partilhada dos 900 MHz entre o GSM e o UMTS (GU900), um para o UMTS 2100 MHz (U2100) e outro para o LTE 800/1800 MHz (LTE).

Após a análise dos resultados, dos modelos, será possível estabelecer uma estratégia para

reduzir o consumo de energia, alterando parâmetros que controlam o comportamento da rede, garantindo a qualidade de serviço aos utilizadores e não degradando os seus principais KPI. Será analisada a ativação de uma *feature* de poupança energética na tecnologia GSM.

Finalmente, após a análise de capacidade das três tecnologias, será proposto o *switch-off* de uma tecnologia de modo a reduzir custos energéticos do operador.

O trabalho será desenvolvido com base em estatísticas reais de um operador móvel e medidas de consumo de energia extraídas de sensores instalados nos equipamentos das estações base. O presente estudo é apresentado em parceria com a CELFINET, empresa portuguesa de consultoria em telecomunicações.

1.3 Estrutura do documento

A dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos. No capítulo 1 realiza-se uma breve introdução sobre o âmbito em que se insere esta dissertação, a sua motivação e quais os seus objetivos principais. No capítulo 2 apresentam-se as várias áreas consideradas no desenvolvimento do trabalho e descrevem-se os resultados de estudos já realizados. No capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada para a realização dos modelos desenvolvidos. No capítulo 4 é realizada uma breve descrição do equipamento de medida, é feita uma caracterização das estações base e uma monitorização dos dados. O capítulo 5 apresenta os modelos desenvolvidos, bem como os resultados obtidos, algumas sugestões de poupança energética e respetiva análise crítica. No capítulo 6 descrevem-se as principais conclusões, bem como algumas ideias para desenvolvimento de trabalho futuro. No final do documento é incluído um anexo com tabelas auxiliares para uma consulta mais detalhada.

1.4 Publicações

Durante o desenvolvimento desta dissertação foram elaborados e submetidos dois artigos científicos para uma conferência nacional (11.º Congresso do Comité Português da *União Radio Científica Internacional* (URSI)) e uma internacional (IEEE *Mediterranean Electrotechnical Conference* (MELECON) 2018).

- Mourato, A., Duarte, D. e Vieira, P., “Desenvolvimento de um Modelo de Consumo Energético para Redes de Acesso Rádio 2G/3G/4G com Base em Dados Reais”, 11º Congresso do Comité Português da URSI, Lisboa, Portugal, 24 de Novembro de 2017 (Apresentado);
- Mourato, A., Duarte, D., Vieira, P. e Pinto, I., “A Novel and Realistic Power Consumption Model for Multi-Technology Radio Networks”, IEEE Melecon 2018, Marraquexe, Marrocos, 2 a 7 de Maio de 2018 (Submetido).

2

Estado da Arte

2.1	Redes de Acesso Rádio	6
2.2	<i>Global System for Mobile Communications</i>	7
2.2.1	Arquitetura	8
2.2.2	Capacidade	9
2.3	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>	10
2.3.1	Arquitetura	10
2.3.2	Capacidade	12
2.4	<i>Long Term Evolution</i>	13
2.4.1	Arquitetura	13
2.4.2	Capacidade	15
2.5	Indicadores de Desempenho	18
2.6	Soluções de Monitorização e Otimização Energética	19
2.6.1	<i>Smart Metering</i>	19
2.6.2	<i>Energy Harvesting</i>	19
2.6.3	<i>Energy Saving</i>	20

Neste capítulo são apresentadas as várias áreas consideradas no desenvolvimento do trabalho, as quais fornecem informação técnica e científica necessária para compreensão do mesmo. Foram estudados os aspetos essenciais à poupança energética e analisadas formas sustentáveis de energia para alimentar vários dispositivos. É dada uma visão geral da constante evolução tecnológica ao nível da medição da rede elétrica, bem como se descrevem resultados importantes de alguns trabalhos já desenvolvidos na comunidade científica.

2.1 Redes de Acesso Rádio

No planeamento de uma rede de acesso rádio, dada por todo o suporte físico necessário à comunicação, são definidos três objetivos: capacidade, cobertura e QoS. Para garantir cobertura e capacidade suficiente numa determinada zona, é necessário procurar o local mais adequado para a instalação da antena, podendo ser, por exemplo, no cimo de uma torre ou no topo de um edifício.

A Figura 2.1 exemplifica uma estação base mais antiga e uma mais atual.

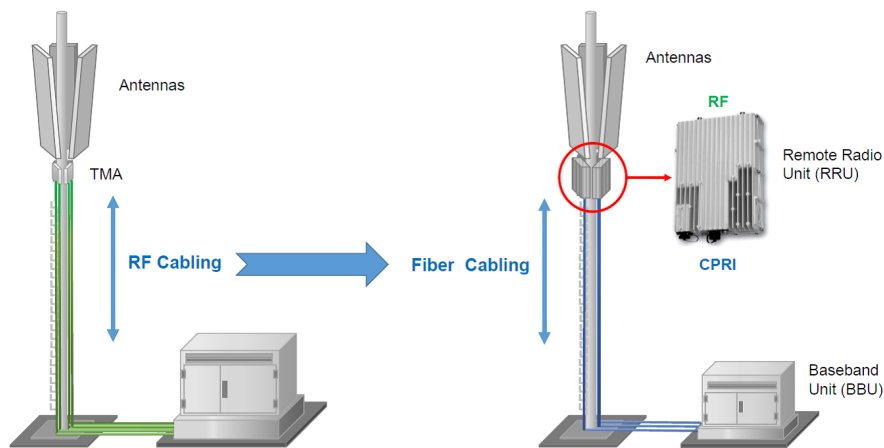


Figura 2.1: Estação Base do tipo distribuída (adaptado de [8]).

Numa estação base convencional (e mais antiga), os equipamentos rádio ficam na base da torre, transmitindo sinais de *Radio Frequency* (RF) através de cabo coaxial para a antena que se encontra no topo, mas passando previamente por um *Tower Mounted Amplifier* (TMA), de maneira a reduzir o ruído inserido e conseqüentemente melhorar a sensibilidade da BS.

As atuais estações base têm uma arquitetura distribuída em que o rádio é dividido em dois elementos principais, BBU e RRU. A BBU é a unidade que executa funções rádio no domínio digital de banda-base. Pode estar instalada em ambientes *indoor*, como um escritório ou uma residência, ou num *cabinet* devidamente protegido no exterior, presente na base da torre. Este equipamento utiliza *Common Public Radio Interfaces* (CPRI)¹ e tipicamente fibra ótica

¹CPRI: Cooperação industrial entre cinco principais fornecedores de BS's que define e especifica a interface pública disponível entre os blocos de construção de uma BS típica.

para comunicar com as RRU. A RRU modula e desmodula sinais de banda base e processa os dados. Estas são instaladas junto às antenas no topo da torre.

Geralmente, a estação base tem vários equipamentos de transmissão, que permitem a interconexão entre a BS e o controlador da rede, ou entre BS's. A transmissão pode ser realizada por fibra ótica, ou, quando se justifica, por feixes hertzianos. Na estação base existe ainda um retificador responsável pela conversão de *Alternating Current* (AC) para *Direct Current* (DC) de modo a fornecer energia para o equipamento rádio, apresentando perdas de 3 a 8%. Atualmente existem três tecnologias de acesso rádio em utilização, GSM, UMTS e LTE, sendo nesta secção fornecida uma visão geral das mesmas.

2.2 *Global System for Mobile Communications*

Numa primeira fase o sistema GSM foi desenvolvido para transmitir voz, no entanto, atualmente suporta a transferência de dados, juntamente com a transmissão de *Short Message Service* (SMS). Na Europa, o sistema opera nas bandas dos 900 MHz e 1800 MHz, no entanto, a maioria dos operadores optou por libertar a banda dos 1800 MHz para dar lugar a tecnologias mais recentes e mais eficientes, como o LTE.

Esta tecnologia foi implementada globalmente e está estabelecida como o principal recurso de comunicação para voz, por oferecer todas as ferramentas necessárias para os operadores, no entanto, no caso do serviço de dados, encontra-se bastante desatualizada.

Foi em 1987 que 15 operadores de um grupo de 13 países, incluindo Portugal, assinaram o acordo que daria início ao desenvolvimento do GSM. Trata-se de uma tecnologia móvel líder em número de utilizadores a nível mundial, e suporta atualmente cerca de 2,5 mil milhões de pessoas.

Inicialmente o ritmo de transmissão máximo para serviços de dados era de 9,6 kbps, valor bastante reduzido. Assim, o desejo por maiores taxas de dados foi a motivação para introduzir serviços mais flexíveis e com maiores débitos.

Assim, o primeiro aperfeiçoamento foi o *High Speed Circuit Switched Data Service* (HSCSD) que permitiu um aumento de débito para 115 kbps, ótimo para aplicações que exigissem uma taxa de *bits* constante e um atraso de transmissão constante, [9].

A segunda solução a surgir foi o *General Packet Radio Services* (GPRS), projetado para suportar transferências intermitentes de dados e transmissão ocasional de grandes volumes. Na altura permitiu aumentar o débito para 171 kbps. O último passo foi o sistema *Enhanced Data Rates For GSM Evolution* (EDGE) que teve como principal função o aumento da eficiência do sistema GPRS, permitindo um aumento de débito para 384 kbps por utilizador.

2.2.1 Arquitetura

Uma das principais intenções desta rede foi montar uma arquitetura abrangente, formada por interfaces abertas e padronizadas. Deste modo, esta estrutura extremamente flexível permitiu que fosse possível integrar componentes de diferentes fabricantes, e assim, promover a concorrência e, conseqüentemente, a diminuição do custo para o utilizador.

De uma forma geral, a rede GSM pode ser dividida em três sub sistemas: acesso rádio, rede principal e rede de gestão. Assim, os respetivos subsistemas designam-se: *Base Station Subsystem* (BSS), *Network Switching System* (NSS) e *Operations and Maintenance Subsystem* (OMS).

A Figura 2.2 ilustra a arquitetura associada ao GSM.

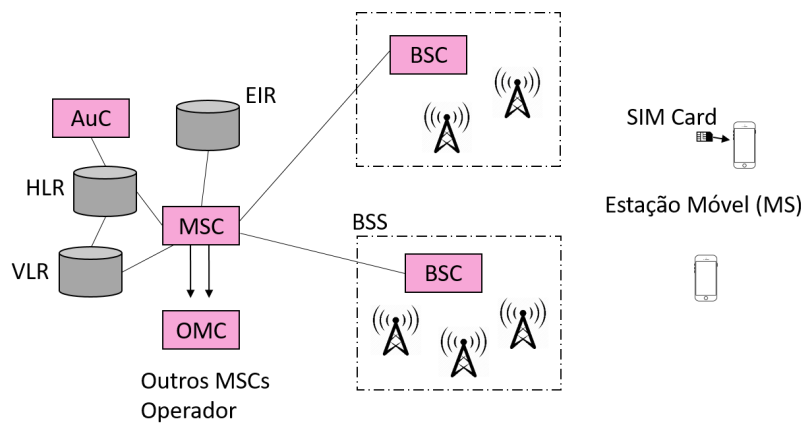


Figura 2.2: Arquitetura da rede GSM (adaptado de [9]).

Um utilizador possui um *Mobile Station* (MS) que tem associado um cartão *Subscriber Identity Module* (SIM) permitindo efetuar/receber ligações, através da comunicação com uma BS. A BS contém equipamentos transmissores e recetores, como antenas e amplificadores, bem como alguns componentes para processamento de sinal.

Habitualmente existem várias BS's que são controladas por uma *Base Station Controller* (BSC), na qual reside o controlo essencial e a inteligência de todo o protocolo, como por exemplo, a alocação de canal rádio e gestão de transferências. Assim, as BS e os BSC estão conectadas por *links* de rádio ponto a ponto, formando assim a rede de acesso.

O tráfego dos utilizadores é encaminhado através do *Mobile Switching Center* (MSC), onde são realizadas todas as funções de comutação que incluem a pesquisa de caminho, reencaminhamento de dados e processamento de recursos de serviço, gere também os recursos rádio e mobilidade dos utilizadores.

De modo a registar informações associadas aos utilizadores, existem bases de dados, *Home Location Register* (HLR) e *Visitor Location Register* (VLR) para utilizadores de uma dada célula e utilizadores visitantes, respetivamente.

Para que a autenticação dos assinantes seja possível existe o *Authentication Center* (AUC). O *Equipment Identity Register* (EIR) é a base de dados que armazena a identificação do dispositivo móvel. E por fim, é através do *Operations and Maintenance Center* (OMC) que o operador controla o sistema.

O método utilizado pelo GSM para gerir as frequências baseia-se na combinação das tecnologias *Time Division Multiple Access* (TDMA) e no *Frequency Division Multiple Access* (FDMA). Uma ou mais destas frequências é atribuída a cada estação base e dividida novamente, em termos de tempo, utilizando TDMA, em oito *timeslots - frame*. O terminal utiliza um *timeslot* para receção e outro para emissão, sendo que se encontram separados temporalmente para que o dispositivo não receba e transmita ao mesmo tempo.

Um canal físico é dado por uma sequência TDMA que é utilizado para transportar canais de tráfego, controlo e sinalização. O canal *Traffic Channel* (TCH) é utilizado para transmitir tráfego de voz e dados. Os canais de controlo e sinalização são divididos em:

- *Stand-alone Dedicated Control Channel* (SDCCH): utilizado para transferir controlo de sinalização de chamadas;
- *Broadcast Channel* (BCCH): possui informações codificadas que identificam a rede, incluindo a identidade da BS, alocação de frequência e lista de canais em utilização;
- *Frequency Correction Channel* (FCCH): transporta informações da BS para sincronização da frequência;
- *Synchronization Channel* (SCH): transporta informações da BS para sincronização da *frame*;
- *Common Control Channel* (CCCH): responsável por transferir informações de controlo entre todos os dispositivos e BS's.

2.2.2 Capacidade

Para garantir serviço suficiente para todos os utilizadores, no planeamento de capacidade, o tráfego é estimado para a *busy hour*, hora do dia com maior volume de tráfego gerado, ou seja, quando a rede está com uma ocupação elevada.

Para calcular o tráfego associado a um canal, existem dois conceitos: a probabilidade de bloqueio e os circuitos disponíveis. A probabilidade de bloqueio é a probabilidade de todos os canais estarem ocupados quando uma ligação é realizada. Dado o tráfego e o número de circuitos/canais, é possível calcular a probabilidade de bloqueio com base na teoria de Erlang-B², [9]:

$$p_B = \frac{\frac{\rho^C}{C!}}{\sum_{x=0}^C \frac{\rho^x}{x!}} \quad (2.1)$$

²Erlang: Representa a quantidade de tráfego transportada por um canal que está completamente ocupado. Por exemplo, um canal rádio que esteja ocupado 30 minutos durante uma hora transporta 0,5 Erlangs de tráfego.

onde p_B é a probabilidade de bloqueio, ρ é o tráfego oferecido e C é o número de canais (TCH). É possível definir o tráfego, em Erlangs:

$$\rho[\text{Erlang}] = \lambda \times \bar{\tau} \quad (2.2)$$

onde λ é ritmo de chamadas e $\bar{\tau}$ é o tempo médio que um utilizador ocupa um canal, ou seja a duração da chamada.

2.3 *Universal Mobile Telecommunications System*

Com a evolução da Internet surgiu a evolução do GSM para o UMTS, termo utilizado para definir todas as tecnologias rádio 3G desenvolvidas no *Third Generation Partnership Project* (3GPP). A terceira geração evoluiu no sentido de oferecer tráfego de alta velocidade no acesso à Internet, tornando possível serviços como o envio de imagens e video-conferência de alta qualidade.

Tanto a geração GSM como UMTS são capazes de operar em dois domínios distintos: *Circuit Switched* (CS) para tráfego de voz e *Packet Switched* (PS) para tráfego de dados.

O *Wideband Code Division Multiple Access* (WCDMA) é a tecnologia rádio usada para fornecer acesso múltiplo aos recursos da rede, [10]. Inicialmente este esquema utilizou o espectro dos 1920 aos 1980 MHz para *Uplink* (UL) e 2110 aos 2170 MHz para *Downlink* (DL), tendo canais de 5 MHz de largura de banda em torno de uma portadora de 2 GHz, com taxas até 2 Mbps para utilizadores com pouca mobilidade, e até 144 kbps em situações de alta mobilidade. No entanto, foram adicionadas novas bandas pela *International Telecommunication Union* (ITU), como a dos 806 aos 960 MHz, 1710 aos 1885 MHz e 2500 aos 2690 MHz, [11]. O UMTS pode ainda ser implementado na banda do 2G.

A *Release 99* (R99) foi a primeira versão das especificações da tecnologia 3G. Quando se constatou a necessidade de maiores taxas de dados surgiu o *High Speed Packet Access* (HSPA) como atualização do WCDMA. A introdução do HSPA foi realizada por etapas: a *Release 5* introduziu o *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) que permitiu uma maior taxa de transferência de dados variando entre 0,9 a 14,4 Mbit/s e a *Release 6* introduziu o *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA) que permitiu uma taxa de transferência de dados de 0,72 a 5,76 Mbit/s. De modo a enfrentar mais uma vez o avanço tecnológico o HSPA evoluiu para HSPA+ (*Release 7*), trazendo melhorias ao nível do atraso, capacidade e cobertura, permitindo velocidades de transmissão de dados até 14,4 Mbps.

2.3.1 *Arquitetura*

Os elementos da rede UMTS, ilustrados na Figura 2.3, são agrupados na *UMTS Terrestrial RAN* (UTRAN) que lida com todas as funcionalidades associadas ao rádio, na *Core Network*

(CN), responsável por alterar e realizar a rota das ligações, tanto voz como dados, para redes externas e *User Equipment* (UE) que interagem com o utilizador e a interface de rádio.

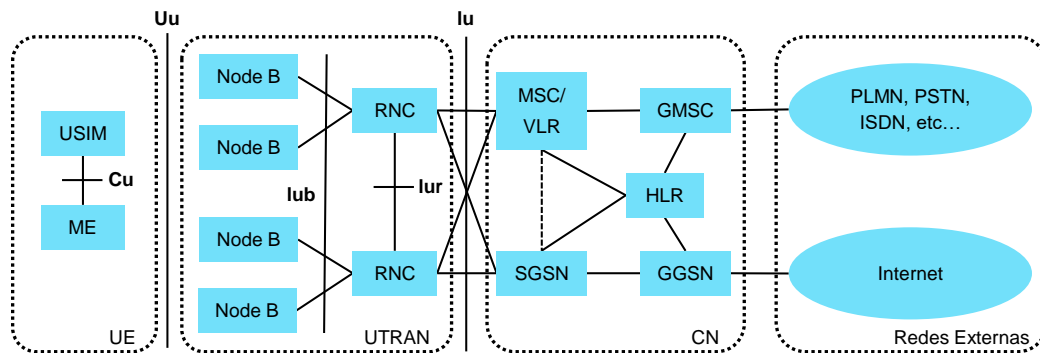


Figura 2.3: Arquitetura da rede UMTS (adaptado de [10]).

Tanto o UTRAN como o UE consistem em novos protocolos, no caso do CN a definição é a mesma que foi adotada no GSM, facilitando a sua introdução.

O UE é constituído por dois componentes, o *Mobile Equipment* (ME), terminal rádio utilizado para a comunicação, e o *UMTS Subscriber Identity Module* (USIM), cartão que contém a identidade do utilizador, executa algoritmos de autenticação e armazena chaves.

Também o UTRAN consiste em duas partes: *NodeB* que converte o fluxo de dados entre as interfaces lub e Uu e participa na gestão dos recursos rádio e *Radio Network Controller* (RNC) que possui e controla os recursos rádio de todo o seu domínio, ou seja, é o ponto de acesso do serviço para todos os serviços que a UTRAN fornece à CN.

Uma rede móvel é oficialmente designada como *Public Land Mobile Network* (PLMN). Uma rede UMTS pode ser composta por várias sub redes designadas PLMN, cada uma dessas sub redes contém todos os elementos necessários para uma rede UMTS, e portanto uma PLMN é suficiente para ter uma rede UMTS.

Os elementos da CN são:

- HLR: Base de dados do operador móvel que inclui detalhes de assinantes, como o número associado, detalhes de cobrança, parâmetros do estado do dispositivo móvel, bastante útil caso um SMS não seja entregue. Estes dados estão acessíveis por todos os MSC e VLR;
- MSC/VLR: atendem o UE na sua localização atual para serviços de comutação de circuitos. O VLR armazena o perfil de serviço do utilizador visitante e o MSC troca as transições de comutação de circuito do utilizador visitante;
- *Serving GPRS Support Node* (SGSN): é semelhante ao MSC/VLR, mas é utilizado para serviços de comutação de pacotes;
- *Gateway MSC* (GMSC): oferece interfaces para várias redes externas (PLMN);

- *Gateway GPRS Support Node* (GGSN): é o ponto que liga o CN da PLMN a redes de comutação de pacotes externas.

As interfaces utilizadas para comunicar entre elementos da rede são:

- *Cu*: Interface elétrica entre o cartão SIM e o ME;
- *Uu*: Interface rádio WCDMA que permite o UE aceder à parte fixa da rede;
- *Iu*: liga a UTRAN à CN;
- *Iur*: permite *soft handovers*³ entre RNC;
- *Iub*: conecta o *NodeB* ao RNC.

De maneira a motivar a concorrência entre diferentes fabricantes, todas as interfaces são abertas e padronizadas.

2.3.2 Capacidade

Um *Channel Element* (CE) é o recurso de banda base necessário para o NodeB (BS na tecnologia UMTS) fornecer capacidade para um canal de voz. Quanto maior o número de CE's disponível numa estação base, maior será a capacidade disponível para os utilizadores. O número de CE's varia com o tipo de serviço, voz ou dados, com o débito binário, bem como com o número de utilizadores em simultâneo. O número máximo de CE's num NodeB, para UL e DL, é limitado pelo *hardware* e pela licença de capacidade paga pelo operador.

Os recursos são geridos tanto pelo NodeB como pelo RNC, garantindo um uso adequado. O NodeB gere os recursos dinamicamente e rapidamente ajusta o número de CE's que podem ser consumidos com base no serviço usado. Por exemplo, no caso do serviço de voz *Adaptive Multi-Rate* (AMR) a 12,2 kbps, tanto para UL como DL, é necessário apenas um CE para estabelecer um canal rádio. No caso de serviços de dados R99, são necessários mais recursos, de acordo com a Tabela 2.1 para um determinado fabricante de equipamentos.

Tabela 2.1: *Channel Elements* por serviço.

Serviço	UL CE	DL CE
AMR 12,2k	1	1
CS 64k	3	2
PS 64k	3	2
PS 128k	5	4
PS 384k	10	8

³Handover: Processo que ocorre quando um dispositivo móvel é transferido de uma célula para outra sem perder a sua ligação. Assegura a mobilidade.

2.4 Long Term Evolution

O surgimento da quarta geração de redes móveis marca uma forte mudança nas comunicações, tratando-se de um sistema de comunicações móveis totalmente novo. Implementaram-se redes exclusivamente comutadas por pacotes, [12], colocando os serviços de dados como principal área de negócio dos operadores móveis.

Em suma, o LTE especifica débitos superiores, maior eficiência espectral, menor latência, flexibilização da largura de banda do canal, redução dos custos e compatibilidade com outras gerações de redes. Apresenta um débito máximo de 100 Mbps para DL e 50 Mbps para UL.

2.4.1 Arquitetura

O LTE, contrariamente ao UMTS, não suporta ligações através de comutação de circuitos. Esta arquitetura de rede considera a implementação de serviços baseados totalmente em pacotes *Internet Protocol* (IP), ou seja, cada serviço é construído em cima de IP. Por se basear neste protocolo, com a transição de redes combinando comutação de circuitos e pacotes, a arquitetura do sistema deve ser simples.

Como tal, o conceito LTE consiste na rede de acesso rádio, [13], *Evolved UTRAN* (E-UTRAN), e no núcleo da rede, *Evolved Packet Core* (EPC), caracterizado pela simplicidade.

A rede utilizada é considerada mais simples do que as redes anteriores, uma vez que os pacotes são processados e encaminhados no núcleo EPC, o que melhora a taxa de transmissão e o tempo de latência.

A Figura 2.4 ilustra a arquitetura de uma rede LTE.

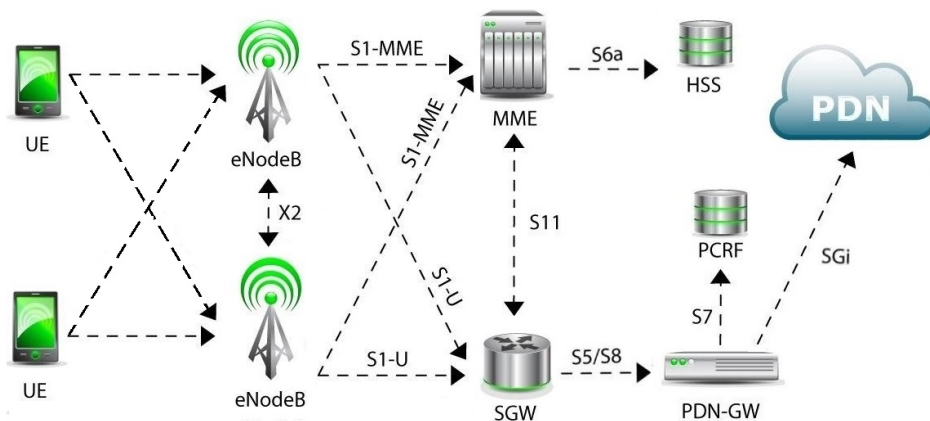


Figura 2.4: Arquitetura da rede LTE (adaptado de [12]).

A E-UTRAN é apenas constituída por vários *Evolved NodeB* (eNB) (BS na tecnologia LTE). Ao contrário da tecnologia anterior, não existe qualquer controlador centralizado para o tráfego dos utilizadores. Todas as tarefas e funcionalidades de rádio passam a ser realizadas nos eNB's.

A rede EPC é formada por:

- *Mobility Management Entity* (MME): equivalente ao HLR e ao VLR na rede UMTS. Neste nó é processada a sinalização entre o UE e o núcleo da rede. Através da interação com o *Home Subscriber Server* (HSS) realiza a gestão do acesso do UE à rede;
- HSS: responsável pelo registo e pelo controlo das informações de cada dispositivo móvel;
- *Serving Gateway* (SGW): realiza a transição entre a rede de acesso rádio e a rede EPC. Encaminha os pacotes de dados para o eNB e realiza a contabilização e o controle dos dados do utilizador;
- *Packet Data Network Gateway* (PDN-GW): serve como ponto de entrada/saída do tráfego de dados do UE e de interface entre as redes LTE e as redes de pacotes exteriores. É responsável pela atribuição de endereços IP aos UE;
- *Policy Control and Charging Rules Function* (PCRF): responsável pela política de controlo, tomada de decisão de pedidos multimédia e controlo de tarifação de serviços de dados.

Analisando a arquitetura verifica-se a existência das seguintes interfaces:

- *X2*: para que seja possível a realização de *handovers* entre eNBs e realiza a gestão de carga e interferência;
- *S1*: interfaces entre o núcleo e as redes de acesso rádio;
- *S11*: realiza a troca de sinalização entre o SGW e o MME;
- *S6a*: permite a transferência de dados de subscrição e de autenticação entre o MME e o HSS;
- *S5/S8*: realiza a ligação em termos de plano de utilizador e a gestão dessa ligação entre SGW e PDN-GW;
- *SGi*: interface entre o PDN-GW e as redes externas, permitindo, por exemplo, o acesso à Internet.

Existe ainda uma interface (não ilustrada na Figura 2.4) entre o PCRF e o PDN-GW que permite a transferência das políticas de QoS e das regras de tarifação.

De modo a superar o efeito de desvanecimento de multipercurso⁴ existente no UMTS, esta rede utiliza *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) para a transmissão do

⁴Desvanecimento multipercurso: Nas comunicações móveis, o sinal que chega ao recetor é fruto da composição de ondas eletromagnéticas que percorreram trajetórias distintas através de diferentes mecanismos de propagação, resultando assim em flutuações no nível de sinal recebido.

sinal. Para transportar dados o OFDM utiliza um grande número de subportadoras para a transmissão. Esta pode ser realizada por um número de subportadoras paralelas, [14]. No LTE cada subportadora é de 15 kHz, sendo um *Resource Block* (RB) um conjunto de 12 subportadoras consecutivas com um total de 180 kHz, o que no domínio do tempo, equivale a 7 símbolos OFDM. Dependendo da largura de banda da portadora, o LTE suporta um número variável de RB's.

A Figura 2.5 ilustra um *Resource Block*.

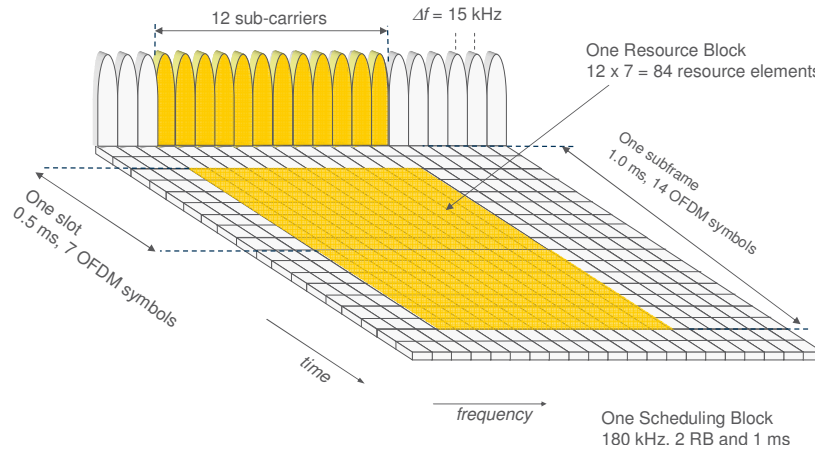


Figura 2.5: *Resource Block* (adaptado de [14]).

Inicialmente o LTE foi concebido para oferecer apenas serviços de dados. Embora a voz tenha vindo a perder relevância nos últimos anos, continua a gerar grandes receitas para os operadores móveis. Então surgiu a iniciativa de criação de um padrão nativo LTE que suportasse voz, designado *Voice over LTE* (VoLTE). Esta norma prevê mecanismos para suportar comunicações multimédia, como voz, vídeo em tempo real, texto, transferência e partilha de ficheiros.

Esta abordagem insere o serviço de voz em IP, sendo assim totalmente baseado em comutação de pacotes. Este facto permite que não haja dependência de outras redes 2G ou 3G para assegurar o serviço. Assim, existindo cobertura LTE num determinado território, os operadores poderão finalmente deixar de investir nas redes anteriores.

2.4.2 Capacidade

Os eNB's transmitem e recebem tráfego dos utilizadores através do canal rádio associado, sendo o volume diretamente proporcional à largura de banda do canal. O 3GPP definiu canais de 5, 10 e 20 MHz, entre outros. De modo a estimar o débito de pico máximo disponível de uma estação LTE, é necessário perceber como esta maximiza os recursos disponíveis no canal rádio. O principal fator prende-se com a qualidade do sinal recebido pelo terminal móvel, [15]. Quanto mais próximo o terminal se encontrar da estação base, melhor a qualidade do sinal,

maximizando, deste modo, o débito recebido. Os débitos são também afetados por outros fatores, como o número de utilizadores em simultâneo, mobilidade, interferência ou espaço *indoor / outdoor*. O padrão LTE define três tipos de modulação: *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK), *16-Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) e *64-QAM*, como ilustrado na Figura 2.6.

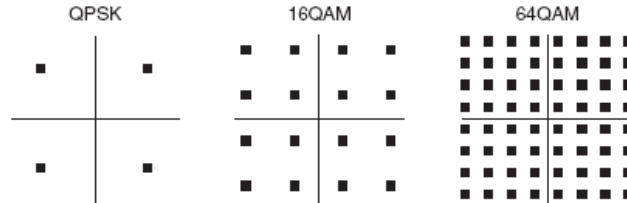


Figura 2.6: Constelações de símbolos em quadratura e fase.

Quanto mais perto da fronteira da área de cobertura da célula, o terminal se encontrar, menos robusta será a modulação, tipicamente QPSK, diminuindo assim o débito recebido. Por outro lado, o uso de esquemas de múltiplas antenas, tanto no emissor como no recetor, *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) permite aumentar o desempenho. É importante lembrar que o débito máximo é um valor teórico, ou seja, é o débito em condições rádio ideais.

A Tabela 2.2 resume o número de RB's, máxima Largura de Banda (LB) ocupada, banda de guarda e número de *Resource Element* (RE)'s que varia em função da largura de banda utilizada.

Tabela 2.2: Características da largura de banda no LTE.

LB [MHz]	5	10	20
Nº de RB's	25	50	100
Máxima LB ocupada [MHz]	4,5	9	18
Banda de guarda [kHz]	250	500	1000
Nº de RE's	4200	8400	16800

Relembrando a Figura 2.5 da secção 2.4 do capítulo 2 e assumindo uma largura de banda de 20 MHz, o número de REs de uma *subframe* (1 ms) é dado por, [12]:

$$12_{Subportadoras} \times 7_{SimbolosOFDMA} \times 100_{RB's} \times 2_{slots} = 16800_{RE's}. \quad (2.3)$$

Assumindo uma modulação de 64-QAM sem codificação, o débito binário é dado por:

$$6_{bits/simbolo} \times 16800_{RE's} / 1_{ms} = 100,8 \text{ Mbps}. \quad (2.4)$$

A Tabela 2.3 resume os valores teóricos de *throughput* para as largura de banda típicas, tendo em conta a codificação e o esquema de antenas.

Tabela 2.3: *Throughput* para LTE em Mbps relativo a cada modulação.

Esquema	LB [MHz]	QPSK	16-QAM	64-QAM
SISO	5	8,4	16,8	25,2
	10	16,8	33,6	50,4
	20	33,6	67,2	100,8
MIMO 2x2	5	16,8	33,6	50,4
	10	33,6	67,2	100,8
	20	67,2	134,4	201,6
MIMO 4x4	5	33,6	67,2	100,8
	10	67,2	134,4	201,6
	20	134,4	268,8	403,2

Na sequência da Equação 2.4 e considerando o esquema MIMO 2x2, o débito binário é o dobro, ou seja, 201,6 Mbps. Neste ponto, é necessário subtrair a sobrecarga relacionada com a sinalização, sincronização e codificação, estima-se que seja cerca de 25%, [16]. Assim, o máximo débito binário (*throughput*), em condições rádio ideais, pode ser dado por:

$$0,75 \times 201,6 = 151,2 \text{ Mbps.} \quad (2.5)$$

Este valor de débito binário máximo teórico pode ainda subir para 302,4 Mbps ao considerar MIMO 4x4.

2.5 Indicadores de Desempenho

Os KPI são métricas que permitem avaliar o desempenho da rede rádio, a fim de proporcionar uma melhor utilização dos recursos, permitindo identificar lacunas no funcionamento da rede, possibilitando assim a sua otimização.

São especificados através da definição e medição de certos parâmetros de entrada/saída do sistema interno da rede e também através da manutenção e operações do operador, sendo que os obrigatórios são definidos pelo 3GPP, [17]. As unidades de medida obrigatórias associadas aos KPI são dadas em percentagem, intervalo de tempo, Erlang e kbps.

Os KPI são reportados pela BS e podem ser medidos a cada quarto de hora ou noutro intervalo relevante. Alguns KPI são específicos de cada fabricante de equipamentos.

As suas categorias são definidas da seguinte forma:

- Acessibilidade: medem a probabilidade de um utilizador aceder dentro de tolerâncias especificadas aos serviços solicitados;
- Retenção: avaliam a capacidade da rede para manter a qualidade dos serviços solicitados por um utilizador num determinado nível;
- Integridade: indicam o grau em que um serviço é fornecido sem deficiências excessivas, ou seja, são relativos à qualidade da ligação;
- Mobilidade: capacidade do sistema para permitir o movimento dentro da rede, ou seja, relativo a *handovers*;
- Utilização: indica a utilização dos recursos da rede, como a taxa de transferência na interface específica.

Além das categorias dos KPI ainda existe o tipo de medida que é recolhida:

- Média: reflete um valor de medição médio com base em vários resultados da amostra;
- Rácio: reflete a percentagem de ocorrência de um caso específico;
- Cumulativo: reflete uma medida cumulativa, ou seja, acumulada ao longo do tempo.

2.6 Soluções de Monitorização e Otimização Energética

2.6.1 *Smart Metering*

As redes elétricas existentes atualmente não são capazes de satisfazer a procura crescente de um fornecimento de eletricidade fiável a longo prazo. A *Smart Grid* liga as tecnologias inovadoras de informação e comunicação com os componentes tradicionais de eletricidade, tal implica que grande quantidade de informação seja manipulada.

A medição inteligente é vital para alcançar objetivos de eficiência energética. Os *smart meters* são medidores digitais que substituem os medidores analógicos utilizados nas casas dos consumidores, e permitem registar o consumo elétrico, obter leituras precisas, em tempo real e transmitir essa informação ao fornecedor de energia, [18].

A monitorização remota é possível através da integração de equipamentos de medida inteligentes utilizando *Internet Of Things* (IoT), fundamental para manter uma empresa interligada e informada, permitindo assegurar que o seu sistema executa a sua função. Desta forma é possível controlar remotamente, melhorar a eficiência, reduzir a probabilidade de erro humano subsequentes ao controlo manual, [19].

Permitem ainda a redução da necessidade de serviços de mão de obra acrescidos, relacionados com a leitura dos contadores, uma vez que as empresas fornecedoras de eletricidade não necessitam de visitar cada residência para obter cada leitura, e sim, em vez disso fazê-lo por controlo remoto.

Assim, os *smart meters* permitem também tomar decisões relativas à poupança de energia, ajudarão a criar um mundo de eletricidade mais eficiente, mais confiável e mais sustentável para as gerações futuras.

Neste âmbito, as empresas de telecomunicações devem tomar conhecimento do consumo energético das BS's, de modo a encontrar a melhor estratégia a adotar a fim de maximizar a redução de energia desperdiçada.

2.6.2 *Energy Harvesting*

Nos últimos anos, a obtenção de uma forma sustentável de alimentação de dispositivos autónomos e portáteis, é cada vez mais, uma questão de preocupação, e várias fontes alternativas de energia têm sido exploradas.

Energy Harvesting é uma forma de recolha de energia útil a partir de energia dissipada, [20], sendo uma técnica promissora para fornecer soluções para a escassez dos combustíveis fósseis. Este não é de todo um novo conceito, um dos primeiros métodos a surgir foi a conversão de energia solar em energia elétrica.

Assim, este conceito foi estendido a muitas outras fontes, como a energia RF, piezoelétrica, térmica, entre outras, [21]. Deste modo, é possível utilizar energia proveniente de diferentes

frequências RF, como estações de transmissão de televisão, estações de transmissão de satélite, estações base, *wireless* e radares.

A conversão de sinais RF para energia elétrica útil é bastante desafiadora devido à extensa banda e devido aos sinais de baixa intensidade tipicamente existentes, [22]. Foram reportados sistemas capazes de absorver energia suficiente para alimentar circuitos eletrônicos simples.

Neste âmbito, a colheita de energia solar e eólica foi introduzida na indústria das telecomunicações como fonte de energia das BS's em ambiente rural. Por exemplo, no Tibete foi estabelecido o maior *cluster* de energia solar do mundo, [23]. Além disso, cerca de 79% das BS's do Tibete são alimentadas por energia solar o que revela grande potencial do *Energy Harvesting* nas comunicações sustentáveis do futuro.

2.6.3 *Energy Saving*

A constante evolução das tecnologias rádio (2G, 3G, 4G e mais recentemente *Fifth Generation* (5G)) resulta em novas funcionalidades implementadas na rede, muitas vezes sem analisar o real impacto na eficiência energética.

O aumento significativo de tráfego deve-se, em grande parte, aos avanços tecnológicos que os dispositivos móveis têm apresentado, tornando-os dotados de uma enorme capacidade de acesso a dados e também devido à elevada taxa de penetração deste tipo de equipamentos nas redes.

Torna-se, portanto, cada vez mais importante para o operador móvel ter conhecimento do consumo energético da sua rede rádio em tempo real, não só de uma forma global, mas especificamente ao nível do consumo dos principais elementos que a integram.

A monitorização do consumo de energia é uma ótima ferramenta para entender como ordenar melhor esse consumo, analisar o que foi publicado no âmbito da poupança de energia, permitindo conhecer os métodos utilizados e os resultados alcançados, assim no contexto da investigação será demonstrado o que foi realizado no âmbito da poupança energética.

Diversos estudos foram realizados neste contexto, nomeadamente foi analisado o modo de economia de energia, [24], consistindo em desligar os transmissores rádio quando o volume de tráfego diminui, mais concretamente durante o período da noite. Neste estudo verifica-se que em casos de baixo tráfego, quando implementado este método, a energia consumida reduz-se cerca de 40%, o que se traduz na redução de 10 a 20% do consumo dos equipamentos rádio.

Muitos fabricantes têm desenvolvido soluções de parametrização por forma a reduzir o consumo energético das BS's dos operadores. Estas soluções passam, por exemplo, por desligar portadoras RF em períodos de tráfego reduzido ou por reduzir o número de antenas ativas com a passagem de MIMO para *Single-Input Single-Output* (SISO). Neste contexto, o mais complexo é efetuar essa otimização sem afetar a QoE dos utilizadores, e ainda mais, tendo em conta que estão envolvidos equipamentos de diversos fabricantes.

De uma forma resumida, o indicador QoE tem como objetivo responder à questão: Quão boa é a qualidade de serviço da rede, de forma a responder às expectativas dos utilizadores? Enquanto que a QoS é tipicamente descrita por KPI, ou seja, relacionados com o serviço prestado e o estado da rede.

Num estudo foi realizada a monitorização do consumo de energia tendo em conta parâmetros ambientais (temperatura, ruído e radiação global), o tráfego associado e consumo do sistema de arrefecimento das BS's, [25]. Neste estudo verificou-se que a energia consumida segue a carga associada ao tráfego, nos casos de padrões de tráfego ligeiramente diferentes, num período de 24 horas, refletem diferentes comportamentos sociais dos utilizadores.

Neste estudo chegou-se à conclusão que o ar condicionado associado ao arrefecimento do sistema consome cerca de 40% da energia total consumida. Foi também realizado um algoritmo para a desativação dos transmissores que permitiu poupar 20% de energia.

Noutros estudos fez-se recurso à cooperação entre BS's, [26], ou seja, quando uma BS é desligada, esta liberta os seus recursos associados aos canais para as suas BS's vizinhas, permitindo assim estender eficientemente a cobertura de rede, verificando-se cerca de 50% de poupança energética.

Neste âmbito realizaram-se estudos nos quais foram abordadas técnicas de *sleep mode* em BS's que conduzem ao *switch off* de parte do equipamento das BS, tendo como vantagem o baixo custo de implementação, uma vez que esta técnica é implementada via *software*, [27] [28] [29].

De modo a efetuar análises realísticas da eficiência energética, a pequena e grande escala, é essencial conhecer a requisição de tráfego existente na rede e identificar a sua variação, [30].

Uma vez que a carga de tráfego nas redes móveis varia significativamente durante o dia, [31], é importante quantificar a influência dessas variações nas BS's. Segundo a literatura, constata-se que o consumo energético depende fortemente do tráfego gerado, tornando assim possível a construção de um modelo de consumo energético tendo em conta esse mesmo volume de tráfego.

Nos estudos [32] [33] [34] verificou-se que o tráfego e a potência consumida estão altamente correlacionados, obtendo-se um modelo de consumo energético que considerou o tráfego gerado no âmbito do GSM.

Outro trabalho de investigação, [35], teve como objetivo abordar o problema de atribuição de potência em redes multi-célula e multi-portadora, de modo a otimizar a eficiência energética, considerando modelos realísticos de consumo de potência em BS.

3

Metodologia

3.1	Análise Descritiva dos Dados	24
3.2	<i>Machine Learning</i>	24
3.2.1	Modelos de Regressão Linear Múltipla	25
3.2.2	Pressupostos do Modelo	27
3.2.3	Diagnóstico e Análise de Resíduos	27
3.2.4	Validação do Modelo e Indicadores de Desempenho	28

3.1 Análise Descritiva dos Dados

A análise exploratória dos dados permite descrever alguns padrões e características dos dados que são fundamentais para a sua modelação. Não existe um procedimento padrão para construir um modelo confiável, mas bons modelos surgem dos dados e adaptam-se a novas informações.

Uma vez que os dados são séries temporais, foram utilizadas medidas descritivas adequadas à caracterização das mesmas, tornando assim possível caracterizar os padrões de tráfego, e de outras variáveis independentes. Uma série temporal é um conjunto de observações onde cada observação foi registada a um determinado instante do tempo. Os dados das séries temporais têm como especial característica o facto das observações sucessivas não serem independentes, [36], pelo que a sua análise deve ter em conta a ordem em que as observações foram recolhidas. Efetivamente, cada observação na variável medida é uma observação bivariada com o tempo como segunda variável.

Na análise preliminar de dados temporais é notável a informação obtida através da representação gráfica da série. Através de um gráfico, pode-se imediatamente perceber a necessidade de explicar a tendência, comportamento sazonal, flutuações irregulares e *outliers* da série temporal, e até verificar um tipo de transformação apropriada para aplicar aos dados para estabilizar a sua variância. Por forma a complementar a análise da representação gráfica de uma série temporal, são utilizadas a Função de Autocorrelação (ACF) e a Função de Autocorrelação Parcial (PACF), [37].

Uma série designa-se estacionária, [37], quando as suas propriedades, como a tendência e a sazonalidade, não dependem do tempo. Ou seja, uma série temporal estacionária não tem padrões previsíveis a longo prazo, as suas propriedades dependem apenas do momento em que foi observada.

Caso a série não seja estacionária, é usual utilizar a diferenciação até se tornar estacionária. Para obter resíduos estacionários, ou seja, resíduos em que a sua média e variância não variem ao longo do tempo, é necessário remover a tendência e as componentes sazonais.

3.2 *Machine Learning*

O *Machine Learning* é uma metodologia que integra um conjunto vasto de algoritmos de análise de dados que automatiza o desenvolvimento de modelos analíticos, utilizando algoritmos que aprendem interativamente a partir dos dados sem ser explicitamente programado. A capacidade de aprendizagem automática por parte dos computadores é importante porque conforme os modelos são expostos a novos dados, o modelo torna-se capaz de se adaptar de forma independente.

A amostra de dados é dividida num conjunto de dados utilizados para treinar o modelo

e a restante fração para testar o modelo ajustado. Para treino são utilizados 70% dos dados, e para avaliação do desempenho preditivo os restantes 30%, não utilizados no ajustamento do modelo. O conjunto de dados de treino é usado à entrada do algoritmo de aprendizagem, sendo utilizado para testar cada hipótese. O conjunto de dados de teste é usado para determinar o desempenho final do modelo.

Ao desenvolver o modelo, é importante garantir que este pode ser generalizado para diferentes conjuntos de dados. O problema de sobre-ajustamento traduz-se, posteriormente, na falta de capacidade do modelo se adequar a conjuntos de dados diferentes aos do ajustamento. Neste tema podem ser consideradas três diferentes situações, como ilustrado na Figura 3.1. A primeira (Figura (a)) não se encaixa adequadamente nos dados. A segunda (Figura (b)) demonstra-se apropriada aos dados. A terceira (Figura (c)) é a hipótese mais complexa, visto que a curva passa por todos os dados de treino, ajustando-se demasiado, correspondendo assim, a um problema de sobre-ajustamento. Neste caso, a segunda hipótese é preferível, dado que se torna mais generalizada para novos conjuntos de dados.

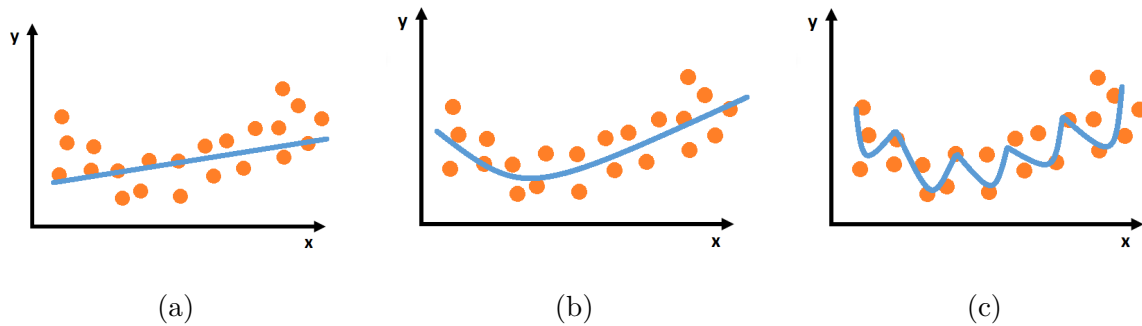


Figura 3.1: Exemplos do sobre-ajustamento e sub-ajustamento.

Neste âmbito, existem muitos algoritmos de predição que dependem do tipo de dados e da forma como o modelo deve prever os dados. No presente estudo, está-se perante modelos supervisionados, uma vez que se tem presente o resultado esperado, ou seja, a potência medida. No desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o modelo de regressão linear múltipla ou multivariável.

3.2.1 Modelos de Regressão Linear Múltipla

Muitos dos problemas em engenharia envolvem explorar as relações existentes entre duas ou mais variáveis, [38]. Considera-se que duas variáveis quantitativas estão linearmente associadas quando a alteração do valor de uma (dita independente) provocar alterações no valor da outra (dita dependente). A regressão linear simples considera apenas um preditor x e uma variável dependente y . A variável y está relacionada com x pela Equação 3.1.

$$y = \beta_0 + x\beta_1 + \varepsilon, \tag{3.1}$$

onde o valor esperado de y é obtido pela soma de uma função linear de x com um termo aleatório que representa o erro, ε . Este permite suportar a variabilidade da variável y que não é explicada pela função linear em x . Os coeficientes de regressão β indicam as contribuições dos preditores para a variação em y . O coeficiente β_0 é o termo independente e o coeficiente β_1 representa a variação média de y provocada por uma variação unitária de x .

A Figura 3.2 representa a reta de regressão ilustrando o método dos mínimos quadrados, onde os desvios (ε_i) entre os valores observados e estimados devem ser mínimos.

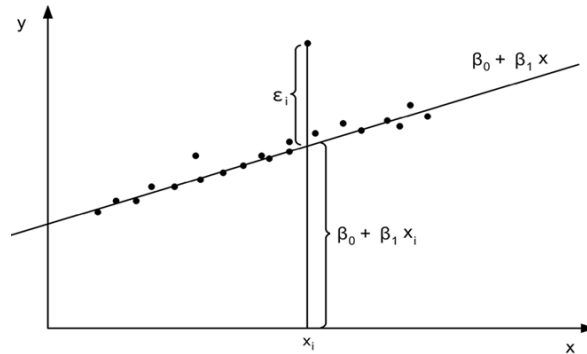


Figura 3.2: Reta de regressão linear.

Muitas aplicações de análise de regressão envolvem situações em que existe mais do que uma variável regressora, ou seja, existem x_i variáveis explicativas, e nestes casos trata-se de um modelo de regressão múltipla. Para cada observação, o modelo de regressão linear múltipla pode ser dado por:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_n x_{in} + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3.2)$$

onde y_i representa o valor da variável resposta na observação i , x_i são os valores da i -ésima observação das n variáveis explicativas, β_i são os coeficientes da regressão e ε_i corresponde aos erros aleatórios ou resíduos.

Método dos Mínimos Quadrados

No método dos mínimos quadrados é minimizada a *Sum of Squared Error* (SSE), em função dos coeficientes. A cada observação $(y_i, x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})$ está associado um erro e o objetivo é encontrar os coeficientes $(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n)$ que minimizem a soma dos quadrados dos resíduos, SSE.

$$SSE = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_{1i} - \beta_2 x_{2i} - \dots - \beta_n x_{ni})^2 \quad (3.3)$$

Para determinar os coeficientes $(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n)$ de modo a minimizar o SSE , resolve-se o seguinte sistema de equações:

$$\frac{\partial SSE}{\partial \beta_0} = 0 \quad \wedge \quad \frac{\partial SSE}{\partial \beta_1} = 0 \quad \wedge \quad \dots \quad \wedge \quad \frac{\partial SSE}{\partial \beta_n} = 0. \quad (3.4)$$

ou seja, os coeficientes estimados são dados por:

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T y. \quad (3.5)$$

3.2.2 Pressupostos do Modelo

Na construção de um modelo de regressão devem-se considerar os pressupostos inerentes à utilização do modelo de regressão linear para fins inferenciais. A verificação de pressupostos é realizada com recurso à análise dos resíduos, [39], através de testes e de métodos gráficos, que permitem verificar a existência de distribuição mais assimétricas, *outliers*, distribuição normal, variância e relação das variáveis. Assim, assume-se que o modelo deve satisfazer os seguintes pressupostos, [40]:

- Homoscedasticidade¹ dos resíduos;
- Independência estatística dos resíduos;
- Normalidade da distribuição dos resíduos;
- Linearidade dos parâmetros.

3.2.3 Diagnóstico e Análise de Resíduos

Para averiguar sobre o pressuposto de homoscedasticidade utiliza-se a representação gráfica dos resíduos *versus* valores ajustados. Este gráfico deve apresentar pontos dispostos aleatoriamente distribuídos em torno do zero, sem qualquer tipo de padrão definido. Para verificar a homoscedasticidade é também utilizado o teste de Breusch Pagan, [41].

Para analisar o pressuposto de independência dos resíduos pode-se observar a representação gráfica dos resíduos no momento t versus os resíduos no momento $t-1$. A existência de um padrão retilíneo neste gráfico é indicativa de presença de autocorrelação. Para analisar o grau de dependência dos dados é também utilizada ACF, dada pela correlação entre valores sucessivos da mesma série temporal, [37]. É também possível utilizar o teste de Durbin

¹Homoscedasticidade: Fenómeno estatístico que ocorre quando o modelo apresenta variâncias para Y e X iguais para todas as observações, ou seja, não apresenta forte dispersão dos dados em torno de uma reta.

Watson, [40], que permite testar a hipótese de ausência de autocorrelação e cuja estatística de teste toma valores entre zero e quatro. Caso o valor da estatística de teste seja próximo de zero então existe autocorrelação dos resíduos.

A normalidade dos resíduos pode ser analisada através de alguns gráficos, nomeadamente o P-P *plot* e o histograma dos resíduos normalizados. No gráfico P-P *plot* visualiza-se a distribuição de probabilidades dos valores observados com os valores esperados, representada por uma diagonal, seguindo uma distribuição normal. Caso a normalidade se verifique, as observações registadas aproximam-se dessa diagonal, sem nenhum afastamento significativo. No histograma de resíduos procura-se uma aproximação evidente em relação à forma simétrica da distribuição normal. Existem ainda alguns testes de normalidade, como os testes de Shapiro Wilk, Anderson Darling e Jarque Bera, [40], que permitem verificar se a distribuição de probabilidade associada a um conjunto de dados pode ser aproximada pela distribuição normal, [42].

Para analisar a linearidade é verificada se a relação entre variáveis independentes e a variável dependente é linear, com base em gráficos de dispersão e também por análise dos resíduos.

3.2.4 Validação do Modelo e Indicadores de Desempenho

De modo a validar a qualidade do ajuste da regressão são analisados alguns indicadores, designadamente para a regressão simples, o coeficiente de determinação R^2 e para a regressão múltipla deve utilizar-se como indicador de variabilidade explicada pelas variáveis independentes, o coeficiente de determinação ajustado R_a^2 , [43].

A hipótese nula é a de que o coeficiente é nulo, ou seja, nesse caso, a correspondente variável explicativa não tem capacidade explicativa sobre a variável dependente. Como resultado da realização deste teste surge o valor-p, que é um indicador da concordância entre a hipótese nula e a evidência da amostra. Assim, quando o valor-p é baixo (ser baixo assume-se inferior ou igual ao nível de significância escolhido, usualmente 0,05), rejeita-se a hipótese nula. Assim, no caso deste teste, valores-p inferiores ao nível de significância fixado, significam que a variável correspondente ao coeficiente em teste é importante, ou seja, tem associação linear com a variável dependente.

O coeficiente de correlação de Pearson é um indicador da existência de associação linear entre duas variáveis quantitativas, sendo obtido como se descreve em (3.6).

$$R = \frac{n \sum(x.y) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}}, -1 \leq R \leq 1 \quad (3.6)$$

onde x e y são duas variáveis quantitativas distintas e n o número de observações. Quanto mais próximo de 1 estiver o valor absoluto do coeficiente de correlação, maior é a associação

entre as duas variáveis. O sinal do coeficiente indica o sentido da associação, se positivo as duas variáveis variam no mesmo sentido, e se negativo variam em sentidos opostos.

O coeficiente de determinação R^2 é uma medida de variabilidade explicada, e portanto, permite quantificar a capacidade explicativa do modelo, variando entre 0 e 1. Mas deve-se ter em conta que $R^2 \simeq 1$ não significa que o modelo se encontre bem ajustado, pois a adição de uma variável faz aumentar o valor deste coeficiente, mesmo que tenha muito pouco poder explicativo sobre a variável de resposta.

Assim, é preferível utilizar o coeficiente de determinação ajustado, dado por (3.7), sendo uma medida ajustada do coeficiente de determinação e que penaliza quando variáveis pouco explicativas são adicionadas, ou seja, caso se adicione variáveis inúteis, o R_a^2 diminuirá, caso contrário irá aumentar. Logo,

$$R_a^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-(k+1)} \right) (1 - R^2) \quad (3.7)$$

onde n é o número de observações e k é o número de regressores/variáveis independentes consideradas no modelo.

Para avaliar os resultados obtidos após a utilização do modelo desenvolvido, consideram-se três métricas: *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), *Root Mean Square Error* (RMSE) e o valor do coeficiente de correlação linear.

De modo a medir a diferença entre a previsão (y_i') e a observação (y_i), para a i -ésima observação, é utilizada a métrica de erro definida por:

$$e_i = y_i' - y_i. \quad (3.8)$$

Como um indicador relativo do erro médio o MAPE, obtém-se por:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{e_i}{y_i} \right| \right) \times 100. \quad (3.9)$$

O indicador de erro MAPE é bastante útil, uma vez que simplifica a interpretação de resultados, pois é independente da escala de medida e é facilmente aplicável.

O RMSE é obtido pela raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre o valor previsto e o observado, sendo dado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i)^2}. \quad (3.10)$$

A utilização e interpretação do RMSE é mais apropriada quando a variável resposta segue distribuição normal, pois nesse caso o modelo segue uma distribuição normal, tornando-o

mais sensível à existência de *outliers*, permitindo mostrar desvios mais significativos. Mas apresenta a desvantagem de apresentar um valor absoluto, sendo mais intuitivo utilizar o MAPE. Neste ponto de validação de resultados, o coeficiente de correlação é utilizado para quantificar o grau de dependência entre as estimativas obtidas e os valores observados.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os *softwares* SQL Server® para extração de dados dos servidores, R® e Matlab® para criação e análise dos modelos.

Os testes estatísticos bilaterais consideraram-se significativos quando os respectivos valores p forem inferiores ao nível de significância de 0,05.

4

Caracterização e Monitorização

4.1	Equipamento de Medida	32
4.2	Caracterização das Estações Base	33
4.3	Análise do Tráfego	35
4.4	Análise do Consumo Energético	38
4.4.1	Impacto Ambiental	40
4.5	Indicadores de Desempenho	41

Neste capítulo é realizada uma breve descrição do equipamento de medida, caracterização das BS's, análise de dados e descrição dos contadores utilizados na construção dos modelos.

4.1 Equipamento de Medida

A monitorização energética de uma BS é um passo bastante importante na compreensão da gestão dos sistemas de telecomunicações. De modo a que seja possível sugerir ações para a redução do consumo, numa primeira fase é necessário que o operador possa medir e guardar os resultados dessas medições.

O equipamento de medida utilizado neste estudo designa-se *Datalogger*, propriedade da CELFINET, faz as medições nos diferentes equipamentos da BS, calcula as potências e envia os dados para um servidor, [4].

Para medir a corrente que flui através do cabo de alimentação de cada equipamento instalado na BS, a solução baseia-se em sensores de corrente de Efeito Hall, [44].

O Efeito Hall é o aparecimento de uma diferença de potencial num condutor elétrico, em que uma corrente flui quando um campo magnético perpendicular é aplicado. Sendo a corrente constante, a tensão de Hall é proporcional ao campo magnético. Um sensor de corrente de Efeito Hall une um circuito magnético, uma sonda Hall e circuitos eletrónicos para medir uma corrente que flui sem perturbação.

A Figura 4.1 ilustra o sensor de corrente de efeito de Hall.

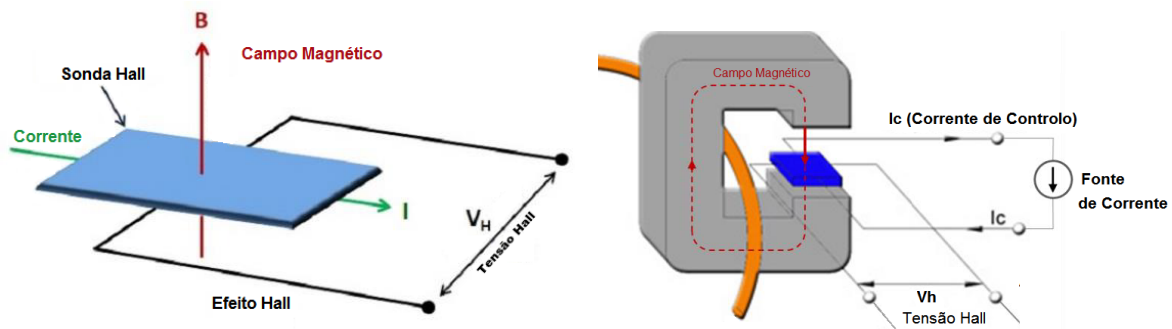


Figura 4.1: Sensor de corrente de Efeito de Hall (adaptado de [4]).

O campo magnético criado pela corrente a ser medida é orientado por um circuito magnético. A sonda Hall colocada no espaço livre do circuito magnético, fornece uma tensão, V_H , proporcional a esse campo magnético e proporcional à corrente a ser medida. Os circuitos eletrónicos amplificam esta tensão e digitalizam-na. O sensor de corrente mede valores instantâneos.

Para cada sensor a ser instalado, há a necessidade de cortar a potência desse ramo, mas esse tempo é tipicamente inferior a 2 minutos, ou seja, o tempo de inatividade da BS para uma instalação com 12 sensores, não deve ser superior a 30 minutos.

4.2 Caracterização das Estações Base

Os sensores permitem conhecer a potência consumida em watt e foram instalados em vários pontos da estação base. Como tal, a Figura 4.2 ilustra o diagrama de blocos com base nos sensores inseridos nas BS's que foram analisadas neste estudo.

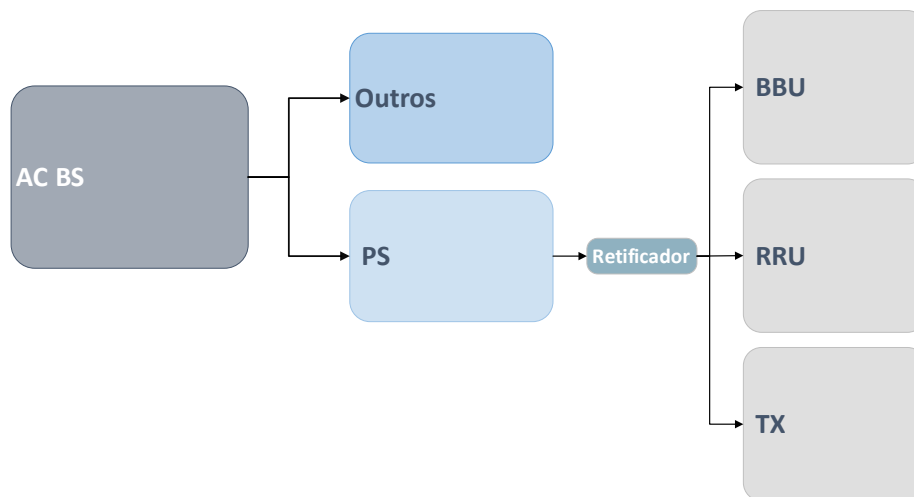


Figura 4.2: Diagrama genérico da estação base.

Analisando o diagrama da Figura 4.2, tem-se o sensor designado “AC BS” onde é medida a potência total da BS, sendo o fluxo, nesse ponto, de corrente alternada¹. De seguida, essa potência divide-se, uma parte para o *Power Supply*, onde se colocou um sensor e o remanescente para outros componentes da BS, como o ar condicionado, alarmística e eventual iluminação, não tendo sensor instalado.

Posteriormente, existe um retificador que converte a tensão AC em DC, sendo que o levantamento dos indicadores de eficiência permitiu identificar perdas na ordem dos 3 a 8%, dependendo do retificador utilizado.

Seguidamente, foram colocados sensores nos equipamentos de processamento de banda base (BBU), nos equipamentos de processamento e modulação RF (RRU) e nos vários equipamentos de transmissão (Tx).

Este estudo conta com dados e estatísticas de *Performance Management* (PM), provenientes de seis BS's localizadas em vários tipos de ambientes: rural, suburbano e urbano.

As BS's podem operar em três diferentes tecnologias de acesso rádio: GSM, UMTS e LTE, sendo a banda dos 900 MHz partilhada entre 2G e 3G. A banda dos 2100 MHz é destinada ao UMTS, enquanto que as bandas dos 800 e 1800 MHz são atribuídas ao LTE. Devido ao facto do equipamento rádio (RRU) ser partilhado na banda dos 900 MHz entre GSM e UMTS, o sensor GU900 mediu a potência consumida por ambas as tecnologias.

¹Em AC, a carga elétrica muda de direção periodicamente, já no caso da DC, a corrente flui apenas numa direção.

Tipicamente, as BS's são trisetorizadas, ou seja, constituídas por três sectores, com várias células cada. Cada célula opera na tecnologia e na portadora associada. É ainda possível referir que existe uma RRU por banda e por setor. De modo a facilitar a compreensão, a Figura 4.3 ilustra a associação entre células, setores, bandas e tecnologias.

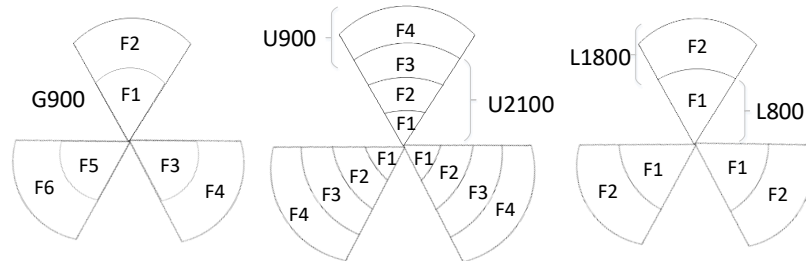


Figura 4.3: Distribuição das células por tecnologia.

Analisando a Figura 4.3 verifica-se que existem no GSM, pelo menos, três canais rádio (*Broadcast Channel* (BCCH)) para sinalização, um por setor, sendo o número de canais de tráfego (TCH) variável, [11]. Já no caso do UMTS, existem três portadoras, uma por setor. Na banda dos 2100 MHz, do UMTS, existem três portadoras em cada setor, ou seja, três células em cada direção. Por fim, no LTE, tem-se duas portadoras por setor, uma na banda dos 800 MHz e a outra na banda dos 1800 MHz.

De modo a validar os resultados, classificaram-se três classes de ambientes distintos: rural, suburbano e urbano. Num modelo deste tipo, aplicado a estações base, é crucial classificar, corretamente, o tipo de ambiente em que estas se encontram. Os modelos assumem que as características do ambiente, onde são previstos os consumos, são suficientemente semelhantes àquelas onde as medições foram realizadas. Posto isto, as estimativas são melhores quando a classificação do tipo de ambiente é realizada de forma correta. Estas categorias devem distinguir claramente a envolvente das estações base, no entanto, é sempre um processo com alguma subjetividade, variando por exemplo, de país para país.

Foi tomado, como referência, o modelo de Okumura-Hata, [45], modelo de propagação empírico, baseado inteiramente numa extensa série de medidas feitas em torno da cidade de Tóquio, Japão. Considera-se ambiente rural uma área aberta como parques, florestas (árvores não muito altas), rios, lagos/mar e terras agrícolas, ou uma área que esteja desobstruída num raio de 300 a 400 metros. Suburbana, uma área na periferia de uma cidade com a existência de alguns obstáculos próximos do dispositivo móvel, com habitações amplamente separadas. Por fim, um ambiente urbano é associado a cidades com uma grande densidade de edifícios, de dois ou mais andares. As zonas urbanas podem ainda ser categorizadas em cidades grandes, médias e pequenas, onde uma área com edifícios com uma altura média a rondar os 15 metros é definida como cidade grande. No entanto, para este trabalho, esta abordagem não foi considerada na classificação.

De forma a garantir confidencialidade do operador, a informação relacionada com a localização das estações base selecionadas, modelo e fabricante não será fornecida. A Tabela 4.1 apresenta as RRU existentes em cada BS.

Tabela 4.1: Caracterização das estações base.

BS's	Ambiente	Sensores			
		GU900	U2100	L800	L1800
A	Rural	✓	✓	-	✓
B	Suburbano	✓	✓	✓	✓
C	Suburbano	✓	✓	✓	✓
D	Rural	✓	-	-	✓
E	Urbano	✓	✓	✓	✓
F	Rural	✓	-	-	-

Adicionalmente, é possível referir que as BS's A e F apresentam dois setores ao nível da banda dos 900 MHz. Já a BS B apresenta dois setores no UMTS 2100 MHz.

4.3 Análise do Tráfego

Os dados de tráfego encontram-se estruturados em observações registadas de 15 em 15 minutos, ou seja, ao fim de um dia, dispõe-se de 96 observações coletadas. Relativamente ao GSM, o tráfego é diferenciado entre voz, por comutação de circuitos (CS), apresentado em Erlangs, e dados GPRS por comutação de pacotes (PS), em MByte. No caso do UMTS, tem-se mais uma vez tráfego de voz, mas dois tipos de tráfego de dados distintos, R99 e HSDPA, ambos em MByte. Finalmente, em LTE, numa rede puramente de comutação de pacotes, o tráfego de dados é expresso em MByte.

De modo a analisar a variação do tráfego, foi selecionada a estação base B. A Figura 4.4 apresenta a evolução do tráfego ao longo do dia.

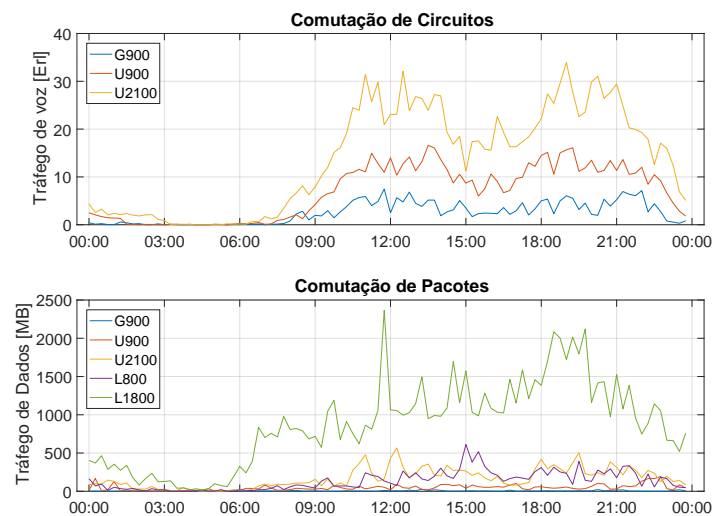


Figura 4.4: Evolução do tráfego durante o dia.

Ao analisar a Figura 4.4 verifica-se, como esperado, que o tráfego segue o padrão de mobilidade dos utilizadores, ou seja, é possível confirmar que o período de menor volume de tráfego ocorre durante a madrugada (00:00 - 07:00) e o de maior tráfego ocorre tanto no período da hora de almoço (11:00 - 14:00), como no final do dia de trabalho (18:00 - 21:00).

É ainda visível que as redes mais recentes geram um maior volume de tráfego, uma vez que apresentam maior qualidade de serviço/experiência ao utilizador. Verifica-se um maior volume de chamadas de voz na rede UMTS e um maior volume de dados, como acesso à Internet, na rede LTE. De seguida, na Figura 4.5, apresenta-se a variação do tráfego semanal, de voz e de dados.

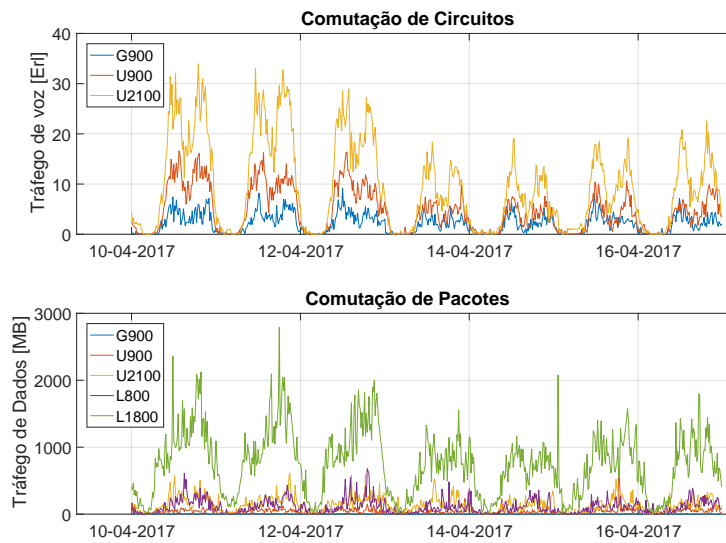


Figura 4.5: Evolução do tráfego durante a semana.

Geralmente, constata-se um volume de tráfego idêntico durante os dias úteis e uma diminuição no fim de semana. Curiosamente, no período de tempo ilustrado na Figura 4.5, verifica-se que, desde o dia 13 até ao dia 16 (de abril), ocorre um decréscimo de tráfego. Este período corresponde à época de Páscoa, sendo visível a diferença no padrão de tráfego semanal, pois ocorreu uma quebra no volume a partir de quinta-feira.

A Tabela 4.2 apresenta, em termos de percentagem, a utilização de voz e dados ao longo do dia.

Tabela 4.2: Distribuição do tráfego de voz/dados ao longo do dia.

Período	Voz [%]	Dados [%]
Manhã	29	25
Tarde	52	50
Noite	19	25

Estes períodos foram definidos de uma forma equitativa, de oito horas cada. Considerou-se manhã desde as 5h da madrugada até às 13h, típica hora de almoço. O período da tarde foi definido entre as 13h e as 21h, incluindo assim o início da noite e, conseqüentemente, a hora do jantar. Por fim, das 21h às 5h da madrugada, assume-se período da noite, onde o tráfego gerado deve ser inferior.

Devido ao padrão de mobilidade dos utilizadores, existe um maior volume de tráfego no período da tarde, tanto de voz como de dados (cerca de 50% em ambos), ou seja, metade do tráfego gerado durante as 24 horas do dia. Isto é expetável, uma vez que existe um grande volume de comunicações no período do almoço e ao final da tarde, após o horário laboral. À noite verifica-se ainda um volume de dados considerável, cerca de 25%, muito devido ao acesso à Internet pela faixa etária mais jovem.

Para uma análise mais pormenorizada do tráfego, a Tabela 4.3 apresenta os valores mínimos, máximos e médios associados ao tráfego de voz e dados, durante a semana da Figura 4.5.

Tabela 4.3: Volume de tráfego diário por tecnologia.

Período	Tecnologias	Mínimo		Máximo		Médio	
		[Erl]	[MB]	[Erl]	[MB]	[Erl]	[MB]
2 ^a f (10 de Abril)	G900	0	0,8	7,5	27,4	2,5	4,8
	U900	0	1,8	16,6	192,8	6,9	46,7
	U2100	0	1,1	33,9	565,7	13,8	168,6
	L800	-	0,6	-	611,8	-	136,3
	L1800	-	19,8	-	2363,7	-	870,0
3 ^a f (11 de Abril)	G900	0	0,9	8,2	20,5	2,5	4,2
	U900	0	2,8	16,2	126,0	6,4	44,6
	U2100	0	2,6	33,0	614,5	13,8	158,2
	L800	-	1,1	-	433,0	-	117,4
	L1800	-	107,3	-	2791,2	-	913,8
4 ^a f (12 de Abril)	G900	0	1,0	9,15	23,4	2,4	4,9
	U900	0	0,8	16,4	149,6	5,9	42,5
	U2100	0	1,6	28,9	601,0	12,1	155,8
	L800	-	0,5	-	679,0	-	143,1
	L1800	-	14,9	-	1997,0	-	906,1
5 ^a f (13 de Abril)	G900	0	0,9	5,2	20,8	1,6	3,2
	U900	0	0,8	9,8	231,6	3,3	34,3
	U2100	0	4,5	18,3	518,4	6,3	143,6
	L800	-	0,6	-	481,6	-	80,0
	L1800	-	21,3	-	1548,9	-	597,4
6 ^a f (14 de Abril)	G900	0	0,9	6,3	22,4	1,7	2,7
	U900	0	1,7	7,6	377,6	2,7	43,4
	U2100	0	1,3	19,1	346,9	5,5	102,1
	L800	-	0,5	-	359,6	-	92,9
	L1800	-	22,5	-	1163,4	-	588,6
Sábado (15 de Abril)	G900	0	0,8	7,9	20,6	2,0	2,8
	U900	0	0,8	10,6	705,3	3,2	49,7
	U2100	0	1,6	19,2	523,4	7,1	120,2
	L800	-	1,1	-	347,4	-	89,3
	L1800	-	23,9	-	2076,6	-	713,3
Domingo (16 de Abril)	G900	0	0,8	7,2	16,6	1,8	2,5
	U900	0	0,4	9,9	182,5	3,2	46,8
	U2100	0	2,4	22,6	336,9	7,4	122,4
	L800	-	1,6	-	387,0	-	115,8
	L1800	-	11,1	-	1796,8	-	643,9

Analisando a tabela 4.3, verifica-se que o LTE, na banda dos 1800 MHz, apresenta maior tráfego ao nível dos dados e o UMTS apresenta maior tráfego ao nível da voz.

4.4 Análise do Consumo Energético

Neste ponto, é importante identificar todos os equipamentos que contribuem para o consumo energético. Os dados de potência também se encontram estruturados em observações de 15 minutos, à semelhança do tráfego, sendo apresentados em watt. A Figura 4.6 representa a tendência diária dos consumos de energia dos diferentes equipamentos da BS B, relativo a uma semana, ou seja, os gastos dos equipamentos rádio, de processamento de banda base e de transmissão.

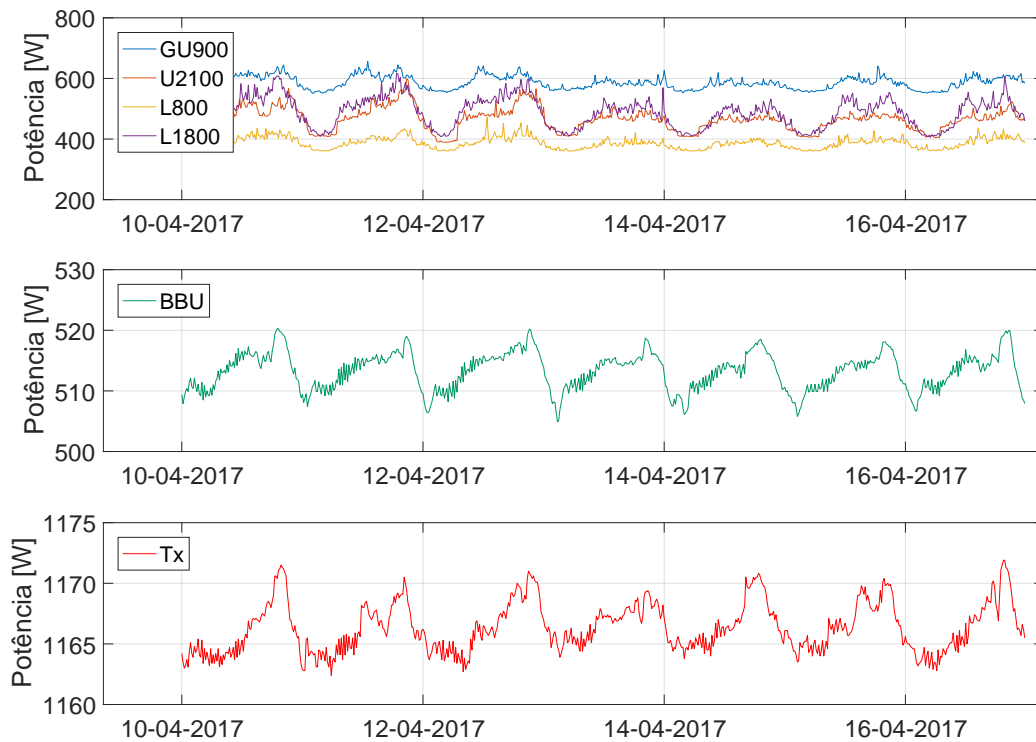


Figura 4.6: Consumo energético dos equipamentos da Estação Base.

É visível que a gama de valores da oscilação da BBU e do Tx é muito menor quando comparados com as RRU. Podem-se distinguir claramente duas tendências diferentes nos três tipos de equipamentos, um valor de consumo de energia constante de madrugada, e uma tendência oscilante durante o dia e nas *busy-hours*. Esta tendência é compreensível, uma vez que no período da noite existe pouco tráfego gerado pelos utilizadores. Analisando o período do dia, verifica-se claramente que o consumo evoluiu de acordo com o padrão de tráfego, existindo picos de consumo nas *busy-hours*.

Para uma análise mais pormenorizada do consumo energético, a Tabela 4.4 apresenta o

consumo diário dos equipamentos da Estação Base B, e verifica-se que é possível dividir o consumo energético em duas contribuições, isto é, aproximadamente 46% do consumo diário de energia é devido à transmissão e processamento de banda base e 54% da energia é utilizada para os equipamentos rádio.

Tabela 4.4: Consumos diários dos equipamentos da Estação Base.

Período	Equipamentos	Mínimo [W]	Máximo [W]	Médio [W]	Médio [%]
2 ^{af} (10 de Abril)	GU900	552,9	644,5	591,7	16,3
	U2100	389,5	567,3	472,7	13,0
	L800	360,1	436,0	392,6	10,8
	L1800	412,9	608,0	503,3	13,8
	BBU	507,9	520,3	513,8	14,1
	Tx	1163,0	1171,5	1165,9	32,0
3 ^{af} (11 de Abril)	GU900	550,9	656,2	592,9	16,3
	U2100	407,8	599,2	481,0	13,1
	L800	360,3	434,1	389,4	10,7
	L1800	410,9	616,9	503,1	13,8
	BBU	507,4	519,0	513,4	14,1
	Tx	1162,4	1170,5	1166,0	32,0
4 ^{af} (12 de Abril)	GU900	553,3	641,8	591,0	16,2
	U2100	389,5	565,2	471,8	13,0
	L800	360,2	471,2	392,7	10,8
	L1800	408,3	598,0	503,2	13,8
	BBU	506,4	520,2	513,8	14,1
	Tx	1162,7	1171,0	1166,4	32,1
5 ^{af} (13 de Abril)	GU900	559,5	613,0	578,8	16,2
	U2100	409,3	506,0	457,1	12,8
	L800	360,4	421,1	379,2	10,6
	L1800	410,7	569,3	474,0	13,3
	BBU	504,9	518,7	513,2	14,1
	Tx	1163,9	1169,4	1166,7	32,7
6 ^{af} (14 de Abril)	GU900	552,5	626,1	577,6	16,3
	U2100	408,1	493,2	449,9	12,7
	L800	360,1	403,9	379,7	10,7
	L1800	410,9	532,1	466,7	13,1
	BBU	506,1	518,1	512,7	14,4
	Tx	1163,8	1170,8	1166,6	32,8
Sábado (15 de Abril)	GU900	553,6	640,8	581,6	16,3
	U2100	406,4	491,1	453,0	12,7
	L800	360,3	426,8	383,2	10,7
	L1800	409,8	553,9	478,4	13,4
	BBU	505,8	518,1	512,6	14,3
	Tx	1163,5	1170,4	1166,6	32,6
Domingo (16 de Abril)	GU900	551,5	622,7	582,2	16,3
	U2100	404,9	522,9	456,8	12,7
	L800	361,4	436,4	387,5	10,8
	L1800	405,9	605,6	478,2	13,4
	BBU	506,7	520,0	513,1	14,3
	Tx	1162,8	1171,9	1166,2	32,5

Ao analisar os consumos médios de energia associados aos diferentes equipamentos, verifica-se que o consumo de energia dos equipamentos de transmissão é consideravelmente superior aos dos outros equipamentos.

4.4.1 Impacto Ambiental

Devido ao grave problema da poluição e, conseqüentemente, aumento do aquecimento global, é importante fazer um estudo, ainda que simplista, do impacto do consumo energético das estações base no meio ambiente. Nesta monitorização pode-se determinar as emissões de dióxido de carbono (CO_2), resultantes da produção de energia necessária ao seu funcionamento. O cálculo das emissões de dióxido de carbono baseiam-se na Equação 4.1, que considera a energia consumida E e um fator F_C que varia de acordo com o combustível de emissão.

$$CO_2 = E \times F_C \quad (4.1)$$

Para obter as emissões de CO_2 , considerou-se o carvão como combustível utilizado na geração de energia, com um fator de 94600 kg/TJ, [46]. De modo a conhecer o número de árvores necessárias para combater o valor de dióxido de carbono emitido, considera-se que cada uma, em média, elimina cerca de 20,3 kg de CO_2 , [47].

Assim, a Tabela 4.5 apresenta os cálculos efetuados, relativos à média de consumo (kWh e euros) e libertação de dióxido de carbono proveniente da energia produzida, necessária ao funcionamento dos vários equipamentos da BS: RRU, BBU e Tx. É necessário ter em conta que o valor do kWh pode variar bastante, dependendo do serviço. Para os cálculos apresentados, nesta tabela, utilizou-se o valor de 15 cêntimos, sendo este um valor de referência, tipicamente aplicado aos grandes operadores de comunicações móveis.

Tabela 4.5: Consumo/custo médio e impacto ambiental da estação base B.

Equip.	Diário		Mensal		Anual			
	[kWh]	[€]	[kWh]	[€]	[kWh]	[€]	[ton] CO_2	Árvores
GU900	14,04	2,11	421,28	63,19	5125,60	768,84	1,75	86
U2100	11,12	1,67	333,49	50,02	4057,50	608,63	1,38	69
L800	9,27	1,39	278,16	41,72	3384,20	507,64	1,15	57
L1800	11,68	1,75	350,42	52,56	4263,50	639,52	1,45	72
Total RRU	46,22	6,92	1383,4	207,50	16831	2524,6	5,73	283
BBU	12,33	1,85	369,53	55,43	4496	674,40	1,53	76
Tx	27,99	4,20	839,77	125,97	10217,24	1532,59	3,48	172
Total BS	86,42	12,96	2592,70	388,90	31544,05	4731,61	10,74	530

Verifica-se que, ao fim de um ano, uma estação base apresenta, em termos médios, um custo de 4732 euros. Indiretamente, são emitidos para a atmosfera aproximadamente 10,7 toneladas de CO_2 , resultante dos 31,5 mil kWh de energia produzida, utilizando o carvão como fonte não renovável, necessários ao seu funcionamento. De modo a eliminar este volume

de emissões, são necessárias cerca de 530 árvores para converter o dióxido de carbono em oxigénio.

Deve-se mencionar que toda a análise foi efetuada para uma semana da BS B, referida na Tabela 4.1, extrapolando a observação para mensal e anual.

A título de curiosidade, partindo de uma rede real de um operador móvel em Espanha, com cerca de 16 mil estações base, é possível extrapolar o consumo anual de uma estação para toda a rede. Com um custo anual de 4732 euros por estação, tem-se então 75,7 milhões de euros gastos na fatura energética em toda a rede. Valor este mais do que suficiente para o operador adotar medidas de poupança.

4.5 Indicadores de Desempenho

Na elaboração dos modelos, foram estudados vários *Key Performance Indicators* (KPI), sendo considerados relevantes oito deles, com uma granularidade de quinze minutos. Dos indicadores disponibilizados, classificaram-se como importantes os que seguem o padrão de consumo energético diário (elevada correlação), verificado através das medidas das estações base. Isto, levou a identificar os KPI de tráfego, tanto de voz como de dados, para todas as tecnologias presentes nas estações, como explicativos do consumo de energia. Posteriormente, foi possível identificar o KPI que reflete a alocação de recursos aos utilizadores, na tecnologia LTE, mais uma vez por seguir o padrão de consumo. A importância da disponibilidade das células prende-se com o facto de estas contribuírem para o consumo energético apenas quando se encontram ativas.

Estes dados estatísticos de desempenho foram coletados de um operador real, em Espanha, sendo fornecidos pela CELFINET.

A descrição dos KPI utilizados segue abaixo, [48]:

- 2G_VOICETRAFFIC: volume de tráfego de voz [Erlang] para a tecnologia GSM;
- 2G_TRAFFIC_PS_DL: volume de tráfego de dados GPRS [bytes] enviado em *downlink*;
- 3G_VOICETRAFFIC: volume de tráfego de voz em [Erlang] para a tecnologia UMTS;
- 3G_TRAFFIC_PS_R99_DL: volume de tráfego de dados R99 [bytes] enviado em *downlink*, sendo obtido pela soma de vários contadores associados aos diferentes tipos de serviços (8 a 384 kbps), baseando-se nos contadores VS.PS.INT.DL.X.TRAFFIC [bit];
- 3G_PS_TRAFF_HSDPA: volume de tráfego de dados HSDPA [bytes] enviado em *downlink*, sendo dado pelo contador VS_HSDPA_MeanChThroughput_TotalBytes;
- 4G_TRAFFIC_DL: volume de tráfego de dados [bytes] para a tecnologia LTE em *downlink*;

- UNAVAILABILITY: este contador indica a percentagem de tempo em que a célula esteve inativa;
- L_ChMeas_PRB_DL_Used_Avg: indica o número médio de *Physical Resource Block* (PRB) utilizados durante um intervalo de tempo definido. O número de PRB utilizados em *downlink* é determinado pelo volume de tráfego em *downlink* e a qualidade do canal.

5

Modelos de Consumo e Poupança Energética

5.1	Modelos de Consumo Energético	44
5.1.1	Modelo GU900	45
5.1.2	Modelo U2100	50
5.1.3	Modelo LTE	54
5.2	Otimização do Consumo Energético para GSM	60
5.3	Otimização do Consumo Energético por <i>switch-off</i> do UMTS 2100 MHz	63

Neste capítulo é descrita a construção e evolução dos modelos de consumo energético, juntamente com as respectivas validações. Estes modelos têm como finalidade estimar a energia consumida de cada BS, sem recorrer à instalação de sensores. Por último, são realizados testes que visam avaliar as previsões obtidas pelos modelos, e também a otimização dos mesmos, bem como uma sugestão de *switch-off* da tecnologia UMTS 2100 MHz.

5.1 Modelos de Consumo Energético

Inicialmente foram realizados testes para averiguar a relação entre o comportamento das séries do tráfego e as respectivas medidas de consumo energético, de modo a encontrar dependência entre ambos. Como resultado desta análise, obtiveram-se valores do coeficiente de correlação entre 70 e 90%, o que sugere que o tráfego é uma variável explicativa a considerar na modelação da potência.

Numa primeira abordagem, estimou-se o consumo das RRU apenas com o tráfego como variável independente. Com base em duas semanas de tráfego, três modelos foram desenvolvidos: GU900, U2100 e LTE, considerando todos os setores das BS's mencionadas na Tabela 4.1.

Numa segunda abordagem, estimou-se o consumo das RRU adicionando outras variáveis independentes, em função do modelo desejado.

Numa última abordagem, realizou-se a transformação da variável dependente e algumas variáveis independentes, de modo a ter em conta os pressupostos e melhorar os resultados. Esta investigação visa prever a potência à custa de certas variáveis, como o tráfego, então não seria viável a utilização de modelos de regressão com uma componente autorregressiva no erro, dado que se pretende usar o modelo para prever a potência em estações base, onde não se dispõe da potência medida. Uma vez que os dados estão organizados com uma base temporal, é expectável que o pressuposto de independência não seja verificado. Assim, a solução encontrada foi manter a utilização dos modelos de regressão linear, tentando encontrar soluções que permitissem minimizar a violação dos pressupostos. Pela análise descritiva dos dados, era visível a forte associação entre a potência e o tráfego, independentemente da característica temporal, presente nos dados. Assim, de modo a minimizar a violação do pressuposto de independência dos resíduos, procedeu-se a uma reorganização dos dados, removendo a sua orientação temporal, através de um processo de reordenação baseado num gerador de números pseudo-aleatórios.

As equações, ao longo desta secção, correspondem aos modelos desenvolvidos para as várias tecnologias e as figuras ilustram dois tipos de gráficos. No gráfico superior representa-se a potência medida (curva vermelha) e a potência estimada pelo modelo (curva verde), já no gráfico inferior é possível verificar o tráfego associado ao mesmo período de tempo. Nas tabelas encontram-se descritas métricas importantes para a validação dos modelos produzidos,

tais como, a correlação existente entre a potência real e potência estimada e o erro associado.

Por fim, é realizada uma validação dos modelos finais com base na análise dos pressupostos mencionados no Capítulo 2, verificando a validade dos pressupostos.

5.1.1 Modelo GU900

De modo a proceder à comparação e validação das várias abordagens desenvolvidas para o Modelo GU900, será realizado o teste à RRU do segundo setor da BS F, na banda dos 900 MHz, para o mesmo período de tempo (uma semana). Isto permite testar o modelo nas mesmas condições e verificar qual das abordagens apresenta os melhores resultados na estimativa do consumo energético.

Abordagem I

Numa primeira iteração, o modelo GU900, dado pela Equação 5.1, teve como variáveis independentes ambos os tráfegos de voz, $T_{CS_{GSM}}$ e $T_{CS_{UMTS}}$, bem como os tráfegos de dados T_{GPRS} relativo ao 2G, T_{HSDPA} e T_{R99} relativos ao 3G. O termo β_0 reflete a componente de potência constante, independente do tráfego gerado, consumida pelo equipamento se encontrar em funcionamento.

$$P'_{GU900} = \beta_0 + \beta_1 T_{CS_{GSM}} + \beta_2 T_{GPRS} + \beta_3 T_{CS_{UMTS}} + \beta_4 T_{HSDPA} + \beta_5 T_{R99} + \varepsilon \quad (5.1)$$

A aplicação do modelo GU900, ilustrada na Figura 5.1, representa a previsão de consumo de potência.

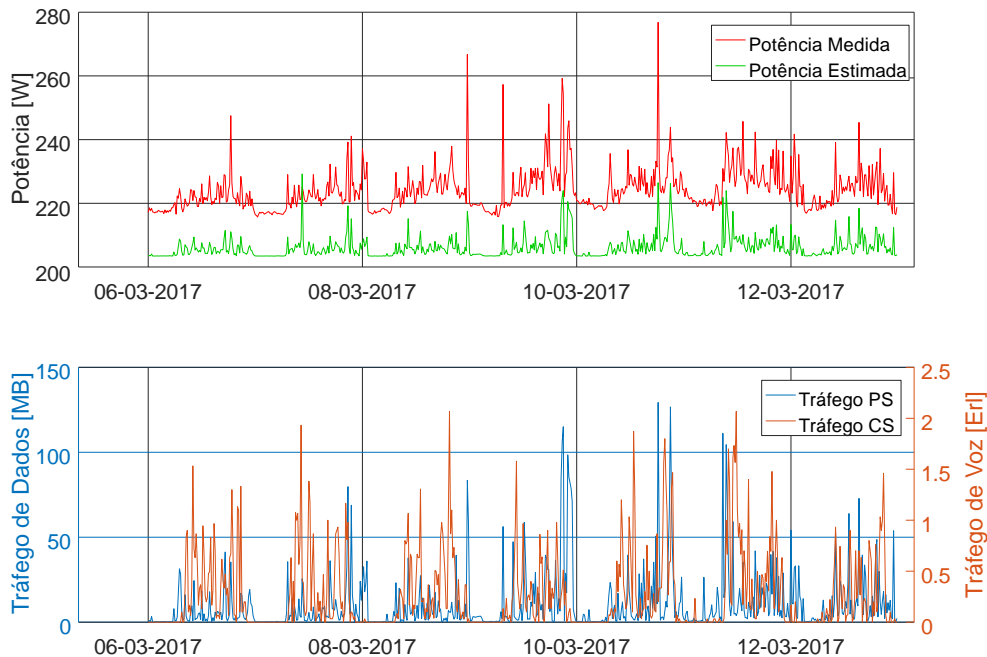


Figura 5.1: Aplicação do modelo GU900, abordagem I.

Após a análise da Figura 5.1, pode-se constatar que a potência estimada segue o mesmo andamento da potência medida. Verificou-se uma correlação em torno de 80%, um erro de 4% (MAPE) e 18,5 W (RMSE). Verifica-se que a potência consumida segue o padrão de tráfego, sendo o consumo mínimo, e praticamente constante, nos períodos da madrugada, atingindo picos nas *busy-hours*. É ainda visível que o modelo não se encontra totalmente bem adaptado.

As simulações efetuadas a todos os outros setores das BS's analisadas, permitiu identificar um erro em torno dos 9,8%.

Abordagem II

Numa segunda fase de aperfeiçoamento do modelo GU900, além do tráfego, adicionaram-se como variáveis independentes, a *feature* de otimização de consumo de potência do BCCH (F_{BCCH}) e a potência máxima de transmissão (P_T) de ambas as células, GSM e UMTS.

O modelo é assim dado pela Equação 5.2.

$$P'_{GU900} = \beta_0 + \beta_1 T_{CS_{GSM}} + \beta_2 T_{GPRS} + \beta_3 T_{CS_{UMTS}} + \beta_4 T_{PS_{UMTS}} + \beta_5 F_{BCCH} + \beta_6 P_T + \varepsilon \quad (5.2)$$

A Figura 5.2 apresenta a estimativa do consumo de potência ao longo da semana, resultante da segunda versão do modelo. É possível verificar a melhoria, relativamente aos valores do erro médio, ao adicionar ao modelo a potência de transmissão máxima das células e a *feature* que permite a poupança energética no *Transceiver* (TRX) do BCCH, como variáveis independentes.

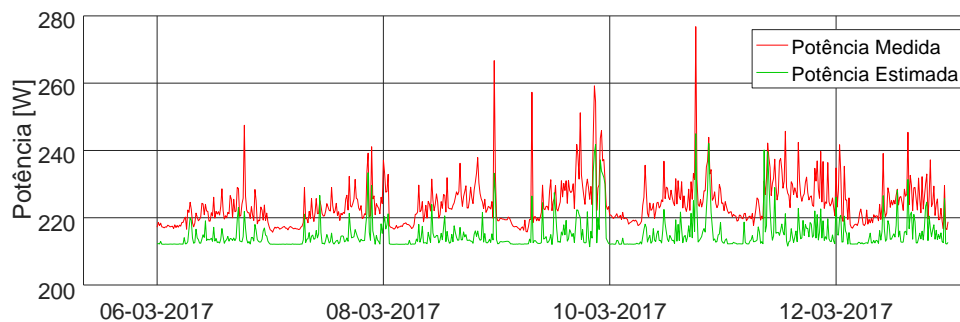


Figura 5.2: Aplicação do modelo GU900, abordagem II.

Na semana utilizada na simulação da Figura 5.2, a *feature* do BCCH encontra-se desativada¹. A RRU foi configurada com duas frequências para o GSM, 20 W para o TRX do BCCH e outros 20 W para o TRX dos canais de tráfego (TCH). Na portadora do UMTS 900 MHz, tem-se configurado 46 dBm (cerca de 39,8 W).

¹No Subcapítulo 5.2 segue um exemplo com a *feature* ativa.

A análise permite verificar que a correlação de 79,9% apresenta-se idêntica ao teste realizado anteriormente para o Modelo 5.1, mas por outro lado, obteve-se uma diminuição do erro de predição médio para 4% (MAPE), cerca de 9,9 W (RMSE).

Os testes realizados a todos os outros setores, das restantes estações, permitiram identificar um erro médio de predição de 7,7%, abaixo dos resultados obtidos com a abordagem I. Isto permitiu concluir que, tanto a potência de transmissão máxima como a *feature* do BCCH, são variáveis independentes necessárias ao modelo de modo a prever o consumo do equipamento.

Na análise dos resíduos dos modelos das abordagens I e II, verificou-se a não normalidade, a correlação entre resíduos em momentos de tempo consecutivos e também alguns problemas no que respeita à homoscedasticidade. Consequentemente, as estimativas dos coeficientes e os respetivos valores-p não são confiáveis como seria desejável, o que pode levar a predições pouco fiáveis. A abordagem III surgiu na tentativa de encontrar um modelo melhor no sentido da verificação dos pressupostos.

Abordagem III

Numa última iteração, foram realizadas diversas análises e experimentadas inúmeras transformações das variáveis originais, resultando na transformação logarítmica neperiana da variável dependente e aplicando, em algumas das variáveis independentes, raízes de ordem superior a dois, de modo a tornarem-se distribuídas normalmente. Isto permite que a violação do pressuposto de normalidade não seja tão acentuada.

Uma estação base em meio rural apresenta uma área de cobertura maior relativamente a uma estação base em meio urbano, dado que num tipo de ambiente rural a densidade de obstáculos é baixa, logo existe um menor número de estações base. Portanto, para permitir cobertura a utilizadores que se encontrem mais distantes, será necessário uma maior potência de emissão. Então, foi adicionada uma nova variável independente (F_{Amb}), permitindo distinguir o tipo de ambiente em que a BS se encontra instalada.

Assim, o modelo GU900 pode ser dado pela Equação 5.3:

$$\ln(P'_{GU900}) = \beta_0 + \beta_1 T_{CS_{GSM}}^{\frac{1}{6}} + \beta_2 T_{GPRS}^{\frac{1}{4}} + \beta_3 T_{CS_{UMTS}}^{\frac{1}{3}} + \beta_4 T_{PS_{UMTS}}^{\frac{1}{5}} \quad (5.3) \\ + \beta_5 F_{BCCH} + \beta_6 P_T + \beta_7 F_{Amb} + \varepsilon$$

A aplicação do modelo GU900, ilustrada na Figura 5.3, representa a previsão do consumo de potência proveniente da utilização do modelo 5.3.

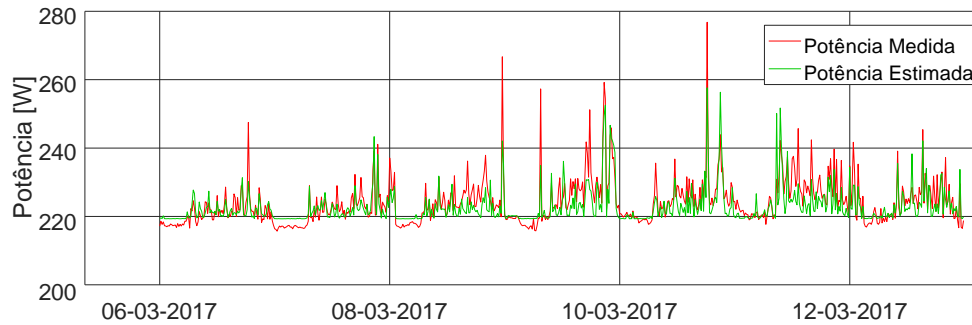


Figura 5.3: Aplicação do modelo GU900, abordagem III.

Analisando a Figura 5.3, verifica-se uma grande melhoria relativamente à abordagem anterior, uma vez que a potência estimada já se encontra praticamente sobreposta à potência medida, com uma correlação em torno dos 82%, um erro médio de 1,2% (MAPE) e 4 W (RMSE).

As simulações efetuadas a todos os outros setores das restantes BS's, em análise, permitiu identificar um erro médio em torno dos 4%. Verifica-se então que a terceira abordagem é a que apresenta melhores resultados, sendo visível na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Métricas da aplicação do modelo GU900.

Abordagem	Correlação [%]	MAPE [%]	RMSE [W]
I	74,93	9,28	20,53
II	59,92	7,09	16,14
III	82,12	3,99	10,2

Validação e Análise Estatística do Modelo Final

Relembrando o Capítulo 3, o valor p de cada termo independente testa a hipótese nula de que o coeficiente é igual a zero. Caso a hipótese nula não seja rejeitada (valor $p > 0,05$), essa variável independente não revela capacidade explicativa sobre a variável dependente. Adicionalmente, como indicador de variabilidade explicada, um valor de R_a^2 mais próximo de 1 indica que a estimativa resultou de um modelo bem ajustado. Posto isto, a Tabela 5.2 apresenta os indicadores de qualidade do ajuste da regressão, relativos ao modelo GU900, para a terceira abordagem, sendo esta abordagem o resultado do modelo final.

Tabela 5.2: Indicadores de qualidade do ajuste da regressão do Modelo GU900.

Variáveis	Valor p	R_a^2
$T_{CS_{GSM}}$	$p < 0.001$	0,79
T_{GPRS}	$p < 0.001$	
$T_{CS_{UMTS}}$	$p < 0.001$	
$T_{PS_{UMTS}}$	$p < 0.001$	
F_{BCCCH}	$p < 0.001$	
P_T	$p < 0.001$	
$F_{Amb.}$	$p < 0.001$	

A análise dos valores p revela que todas as variáveis independentes consideradas no modelo são significativas, uma vez que o seu valor é bastante inferior a 0,05, aproximadamente zero. Relativamente ao R^2 ajustado, este apresenta também um valor significativo, próximo de 0,8.

A Figura 5.4 e a Tabela 5.3 apresentam o diagnóstico do Modelo GU900.

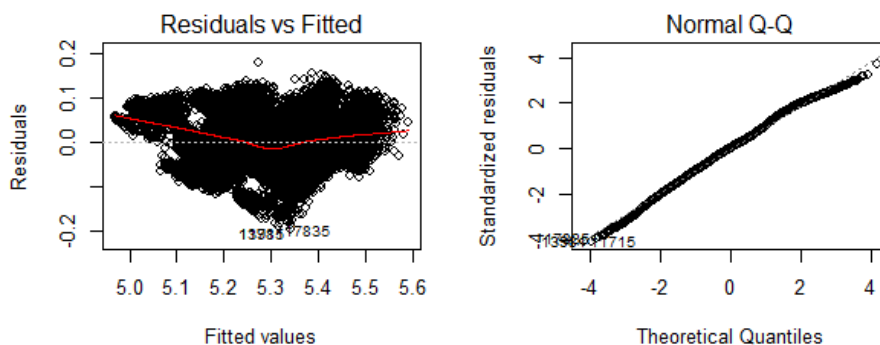


Figura 5.4: Validação do modelo GU900, abordagem III.

Tabela 5.3: Testes dos pressupostos para o Modelo GU900.

Testes	Valor p
Durbin Watson	0,8915
Anderson Darling	$2,2 \times 10^{-16}$
Jarque Bera	$2,4 \times 10^{-10}$
Breusch Pagan	$2,2 \times 10^{-16}$

Analisando o gráfico *Residual vs Fitted* da Figura 5.4 e o valor do teste Breusch Pagan da Tabela 5.3, constata-se que a condição de homoscedasticidade não se verifica. Os pontos do gráfico distribuem-se de forma aleatória em torno da reta que corresponde ao resíduo zero, mas não formam uma mancha de largura quase uniforme.

A observação do gráfico Normal Q-Q da Figura 5.4 indica que o pressuposto da normalidade é verificado, pois os resíduos estão aproximadamente em linha reta. No entanto, os

testes da Tabela 5.3 associados à normalidade, sugerem o contrário, mas estes testes são bastante sensíveis à detecção de não normalidade, ou seja, tendem a identificar não normalidade mesmo para pequenas diferenças.

Analisando o teste de Durbin Watson da Tabela 5.3, conclui-se que este modelo apenas verifica o pressuposto da independência estatística dos resíduos.

5.1.2 Modelo U2100

Para validação e efeitos comparativos do Modelo U2100, em todas as abordagens, é apresentado o teste efetuado à RRU do terceiro setor (3 células) da BS C, na banda dos 2100 MHz, para o mesmo período de tempo (uma semana).

Abordagem I

O modelo associado ao U2100 é dado pela Equação 5.4. Esta primeira abordagem considera o tráfego de dados (T_{HSDPA} e T_{R99}) e o tráfego de voz (T_{CSUMTS}) na banda dos 2100 MHz.

$$P'_{U2100} = \beta_0 + \beta_1 T_{CSUMTS} + \beta_2 T_{HSDPA} + \beta_3 T_{R99} + \varepsilon \quad (5.4)$$

A Figura 5.5 ilustra a aplicação do modelo U2100 (Equação 5.4).

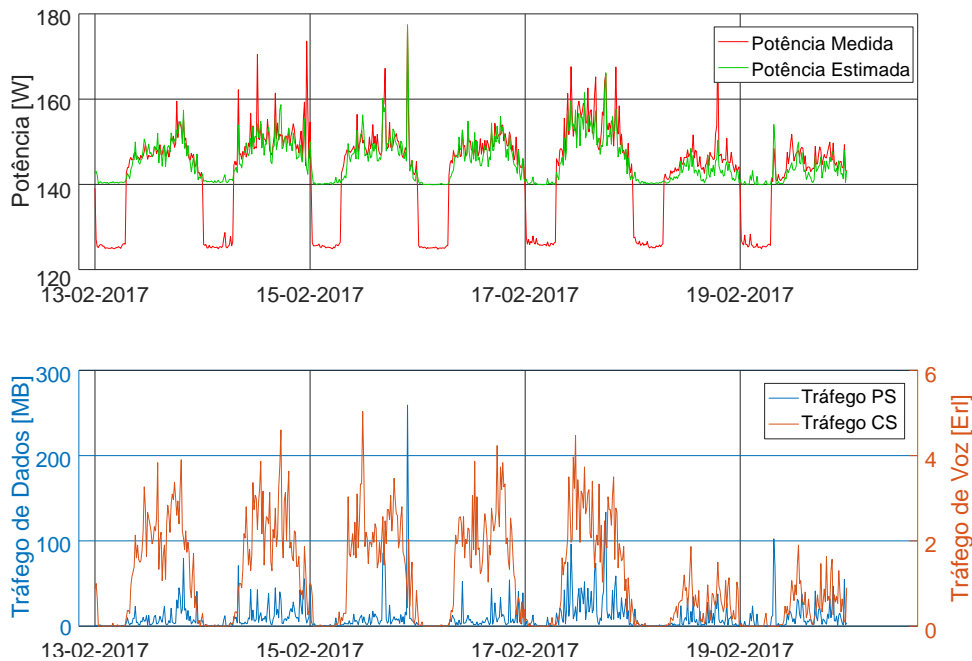


Figura 5.5: Aplicação do modelo U2100, abordagem I.

Verifica-se que apesar das curvas, potência medida e potência estimada, apresentarem uma boa correlação, cerca de 80%, o erro médio encontra-se em torno dos 4,4% (MAPE) e 8,4 W (RMSE). Identifica-se claramente, pela análise do gráfico, que o modelo se adapta quase na

perfeição nos períodos do dia, em que o consumo é nitidamente impulsionado pela variação do tráfego gerado, tanto de voz como de dados. O mesmo não acontece nos períodos da madrugada, baixa carga nas células, em que o modelo não acompanha o consumo real até aos 125 W, sensivelmente. Esta transição é o principal fator no erro anteriormente referenciado.

Os testes efetuados a todos os outros setores das BS's permitiram identificar um erro médio de 7,9%.

Abordagem II

Em estações base onde existem várias células no mesmo setor, é possível ativar o algoritmo que permite desligar portadoras em períodos de baixo volume de tráfego nas células, permitindo uma poupança de energia nesse período de tempo. Esta condição é verificada na banda dos 2100 MHz do UMTS que apresenta até três células por setor.

Com isto, é possível adicionar uma outra variável independente numa segunda versão do modelo. Além do tráfego gerado pelos utilizadores, considerou-se também o número de células ativas e a potência configurada por célula. Deste modo, durante a madrugada, da meia noite às 7h, não é considerada a potência transmitida pelas células inativas, não contribuindo assim para o consumo energético.

Assim, o modelo U2100 pode ser dado pela Equação 5.5, que além de entrar o tráfego de voz e dados, introduz ainda a potência transmitida (P_T).

$$P'_{U2100} = \beta_0 + \beta_1 T_{CSUMTS} + \beta_2 T_{HSDPA} + \beta_3 T_{R99} + \beta_4 P_T + \varepsilon \quad (5.5)$$

A Figura 5.6 ilustra a simulação do modelo 5.5.

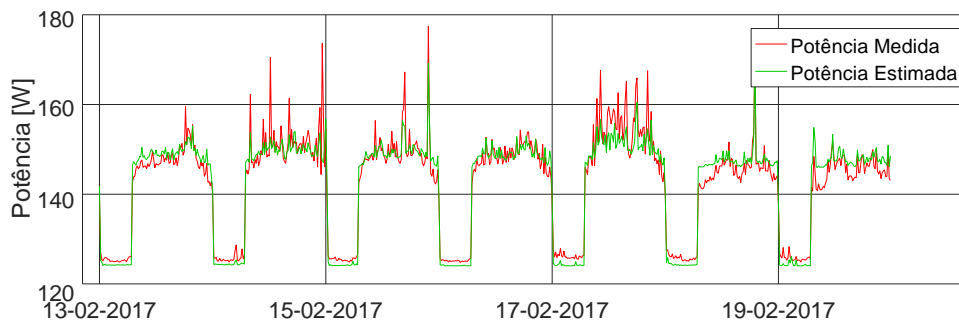


Figura 5.6: Aplicação do modelo U2100, abordagem II.

Analisando a Figura 5.6, referente à previsão do consumo energético ao longo da semana, de acordo com a última versão do modelo, verifica-se um acompanhamento da potência estimada nos períodos da madrugada. Ou seja, ao introduzir a potência de transmissão das células ativas no modelo, quando existe um *switch-off* das mesmas, verifica-se uma poupança

nesses períodos em torno dos 15 W, sendo identificado pelo modelo.

Verifica-se que a correlação nesta segunda simulação melhorou bastante, passando de 80% para 97%, ou seja, a evolução da potência estimada é muito próxima da potência medida, permitindo um erro de predição de apenas 1,4% (MAPE) e 2,8 W (RMSE).

Obteve-se um erro médio de 3,5% para as restantes estações base, bastante abaixo da primeira abordagem.

Abordagem III

Na terceira abordagem, dada pela Equação 5.6, além das variáveis independentes consideradas anteriormente, agregou-se o tráfego de dados HSDPA e R99 (T_{PSUMTS}), adicionou-se a hora (H), uma variável que distingue o dia e a noite (DN), outra o fim de semana (W) e finalmente o produto da hora com a potência transmitida ($P_T H$). À semelhança do modelo GU900, foram feitas algumas transformações de variáveis, por forma a validar os pressupostos da regressão linear. Mais uma vez foi aplicado o logaritmo à variável dependente, bem como raízes de ordem 3 ao tráfego. De modo a melhorar os resultados, foi introduzido o produto de duas *features* (potência transmitida e hora), método conhecido como engenharia de *features*. À semelhança do modelo GU900, também foi conferida alguma aleatoriedade aos dados que permitiram construir este modelo.

$$\ln(P'_{U2100}) = \beta_0 + \beta_1 T_{CSUMTS}^{\frac{1}{3}} + \beta_2 T_{PSUMTS}^{\frac{1}{3}} + \beta_3 P_T + \beta_4 H + \beta_5 DN + \beta_6 W + \beta_7 P_T H + \varepsilon \quad (5.6)$$

A Figura 5.7 apresenta a simulação do modelo, resultante da terceira abordagem.

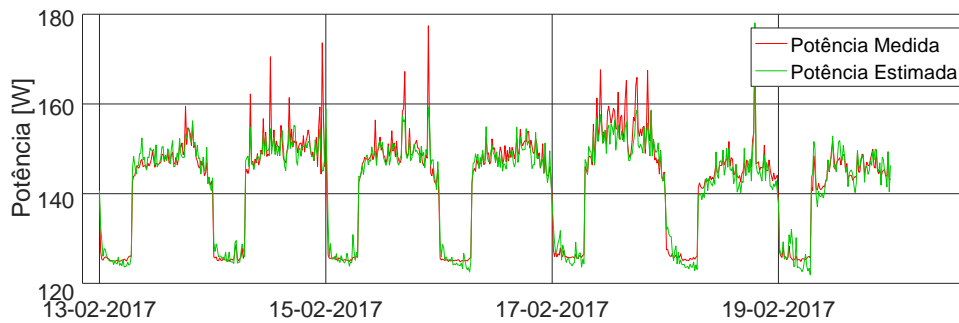


Figura 5.7: Aplicação do modelo U2100, abordagem III.

Analisando a Figura 5.7, verifica-se que o Modelo 5.6 se encontra bem ajustado, permitindo atingir correlações de 97,1% e um erro de predição de 1,2% (MAPE) e 2,7 W (RMSE). O modelo atinge um erro médio de 2,2%.

Na Tabela 5.4, é possível verificar o resumo das métricas que permitem identificar a viabilidade dos modelos, como a correlação de Pearson e os erros associados.

Tabela 5.4: Métricas da aplicação do modelo U2100.

Abordagem	Correlação [%]	MAPE [%]	RMSE [W]
I	74,58	5,57	11,24
II	95,67	2,22	4,45
III	95,72	2,22	4,67

Validação e Análise Estatística do Modelo Final

A Tabela 5.5 apresenta os indicadores de qualidade do ajuste da regressão do modelo U2100, para a terceira abordagem, sendo esta abordagem o resultado do modelo final.

Tabela 5.5: Indicadores de qualidade do ajuste da regressão do Modelo U2100.

Variáveis	Valor p	R_a^2
T_{CSUMTS}	$p < 0.001$	0,956
T_{PSUMTS}	$p < 0.001$	
P_T	$p < 0.001$	
H	$p < 0.001$	
DN	$p < 0.001$	
W	$p < 0.001$	
$P_T \times H$	$p < 0.001$	

A análise dos valores p revela que todas as variáveis independentes inseridas no modelo são significativas. Observando o valor R_a^2 verifica-se que o modelo se apresenta muito bem ajustado.

A Figura 5.8 e a Tabela 5.6 apresenta o diagnóstico do Modelo U2100.

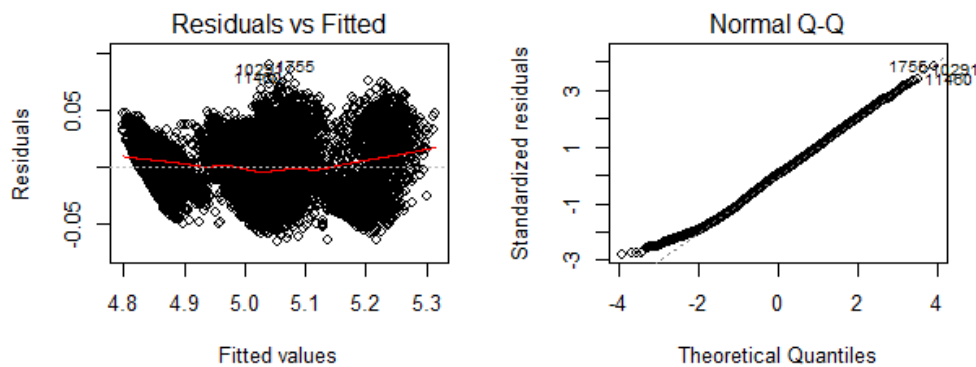


Figura 5.8: Validação do modelo U2100, abordagem III.

Tabela 5.6: Testes dos pressupostos para o Modelo U2100.

Testes	Valor p
Durbin Watson	0,9966
Anderson-Darling	$3,365 \times 10^{-12}$
Jarque Bera	$9,315 \times 10^{-10}$
Breusch-Pagan	$2,2 \times 10^{-16}$

Analisando o teste de Durbin Watson da Tabela 5.6 constata-se que este modelo verifica o pressuposto da independência da estatística. Tal como o modelo GU900, este modelo também enfrenta as mesmas adversidades, ou seja, observando o gráfico Normal Q-Q da Figura 5.8, os seus resíduos parecem independentes e distribuídos normalmente sobre a reta, mas os testes da normalidade presentes na Tabela 5.6 constataam o contrário.

Relativamente à homoscedasticidade, os pontos do gráfico Residual vs Fitted da Figura 5.8 distribuem-se de forma aleatória em torno da reta, formando uma mancha de largura quase uniforme, mas o teste Breusch Pagan da Tabela 5.6 verifica o contrário, apontando para a falha do pressuposto.

5.1.3 Modelo LTE

Para validação e efeitos comparativos do modelo LTE, em todas as abordagens, é apresentado o teste efetuado à RRU do terceiro e segundo setor da BS B, na banda dos 800 e 1800 MHz, respetivamente, para o mesmo período temporal. Deve-se notar que os testes foram realizados com o mesmo conjunto de dados usado para treinar o modelo, devido à falta de indicadores de desempenho necessários à utilização do modelo.

Abordagem I

Numa primeira fase do modelo, dado pela Equação 5.7, considerou-se apenas o tráfego de dados (T_{LTE}) associado à célula desta tecnologia/banda.

$$P'_{LTE} = \beta_0 + \beta_1 T_{LTE} + \varepsilon \quad (5.7)$$

As Figuras 5.9 e 5.10 representam os testes efetuados ao modelo 5.7, nas bandas dos 800 e 1800 MHz, respetivamente.

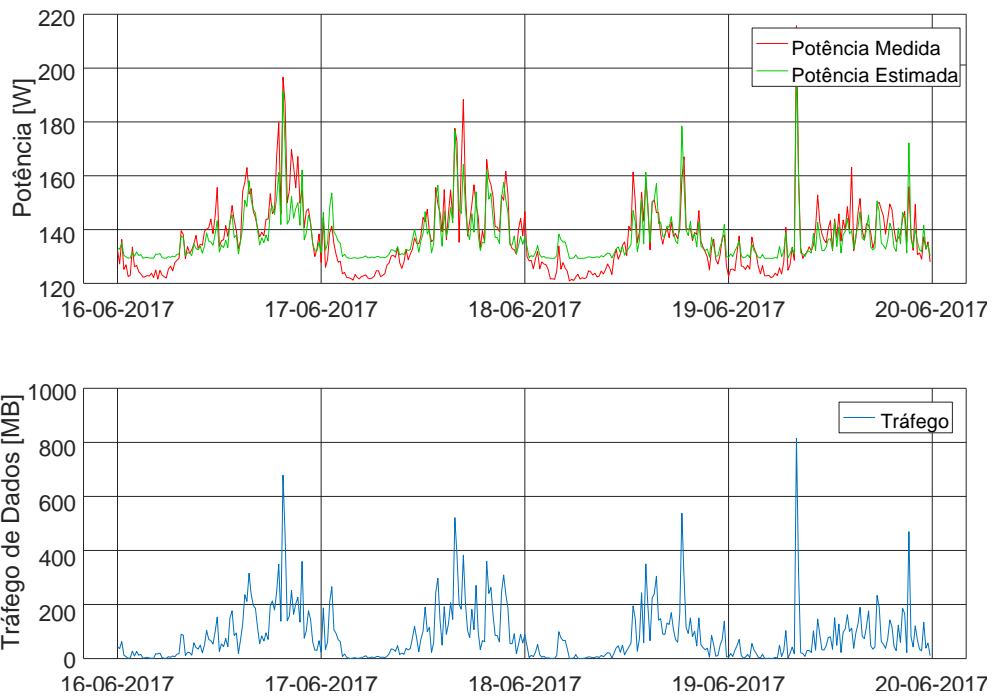


Figura 5.9: Aplicação do modelo LTE, abordagem I à banda dos 800 MHz.

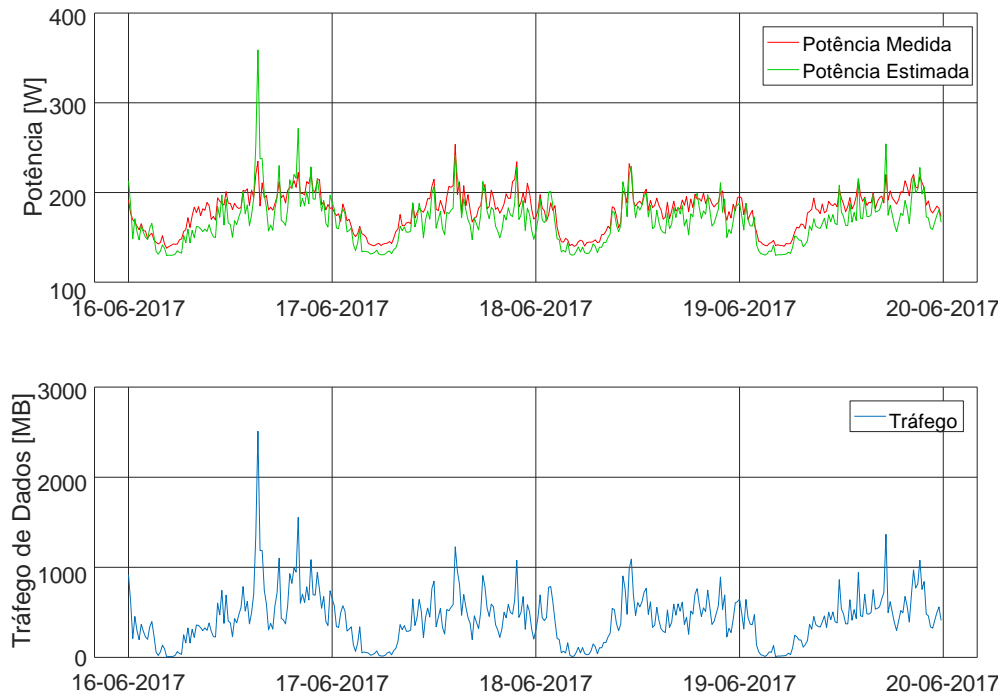


Figura 5.10: Aplicação do modelo LTE, abordagem I à banda dos 1800 MHz.

O modelo LTE, abordagem I foi testado apenas para quatro dias por ausência de dados de tráfego. Na aplicação do modelo 5.7 às bandas 800 e 1800 MHz, acima ilustradas, verifica-se

que as curvas de potência medida e estimada pelo modelo apresentam boas correlações, cerca de 90 e 87%, mas com erros de predição de 3,6 e 7,7% (MAPE) e 6,2 e 17,1 W (RMSE), respetivamente. Em termos médios, os testes efetuados apresentam um erro de 7,9%.

Abordagem II

Numa segunda iteração, chegou-se à conclusão que adicionar o número de PRB (N_{PRB}) seria vantajoso para o modelo, uma vez que se passou a considerar o número médio de recursos alocados aos utilizadores nessa célula. Ainda, de modo a utilizar o mesmo modelo para as duas bandas, adicionou-se uma variável ao modelo que reflete a largura de banda (LB). Tem-se 10 e 20 MHz para as bandas dos 800 e 1800 MHz, respetivamente.

Devido à falta de KPI, utilizou-se o mesmo conjunto de dados para treinar e testar o modelo LTE.

Assim, o modelo LTE é dado pela Equação 5.8:

$$P'_{LTE} = \beta_0 + \beta_1 T_{LTE} + \beta_2 N_{PRB} + \beta_3 LB + \varepsilon \quad (5.8)$$

Por forma a analisar o modelo desenvolvido, as Figuras 5.11 e 5.12 apresentam as simulações efetuadas.

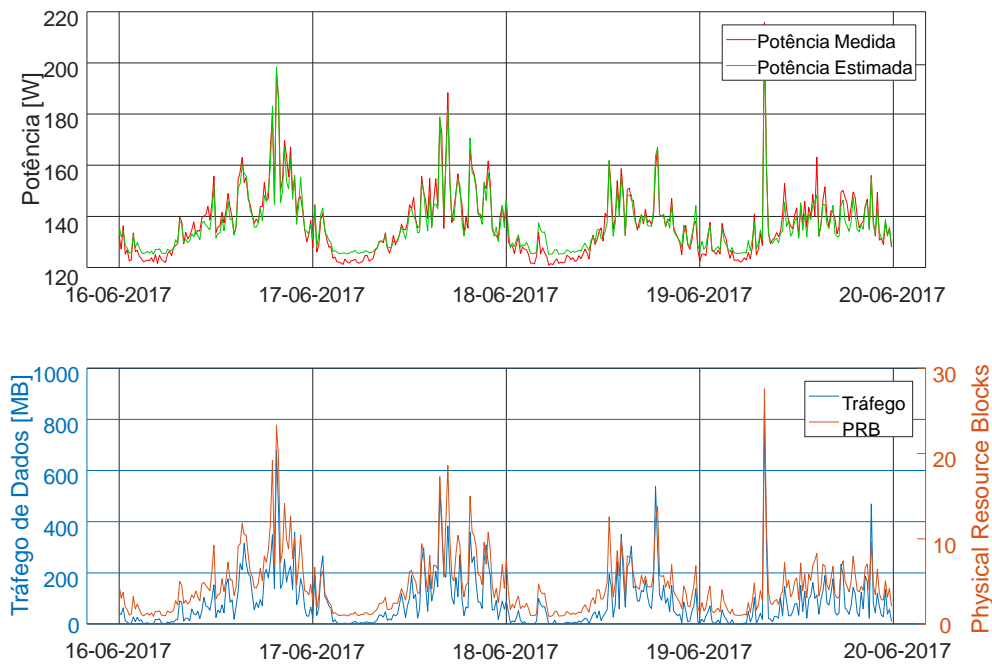


Figura 5.11: Aplicação do modelo LTE, abordagem II à banda dos 800 MHz.

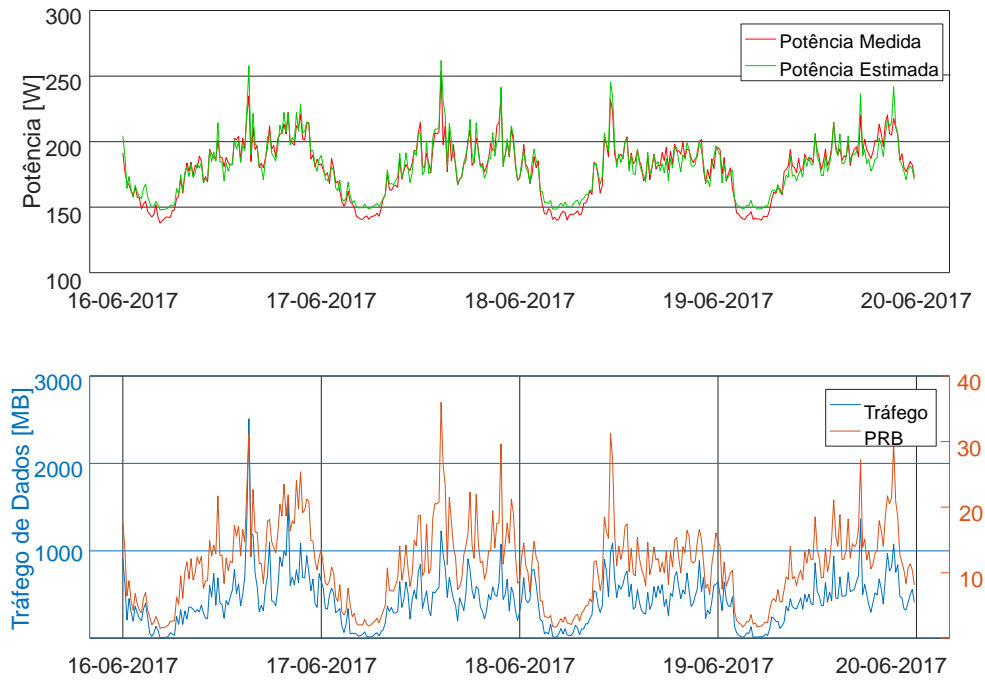


Figura 5.12: Aplicação do modelo LTE, abordagem II à banda dos 1800 MHz.

Os testes efetuados permitiram concluir que o modelo se encontra relativamente bem ajustado para ambas as bandas, atingindo erros de predição de 3,3 e 6,7 W (RMSE), 1,9 e 3,1 (MAPE) e fortes correlações de 97,1 e 95,5%, para as bandas de 800 e 1800 MHz, respetivamente.

Os testes realizados para todos os outros setores das BS's estudadas permitiram identificar um erro médio de cerca de 3,7%.

Abordagem III

Nesta terceira abordagem do modelo são consideradas as mesmas variáveis independentes, mas com transformações, tanto nas variáveis independentes como na variável dependente, como é visível na Equação 5.9. À semelhança dos modelos GU900 e U2100, também foi conferida alguma aleatoriedade aos dados que permitiram construir este modelo.

$$\frac{1}{P'_{LTE} + 1} = \beta_0 + \beta_1 T_{LTE}^{\frac{1}{5}} + \beta_2 \ln(N_{PRB}) + \beta_3 LB + \varepsilon \quad (5.9)$$

As Figuras 5.13 e 5.14 representam os testes efetuados ao modelo 5.9, nas bandas 800 e 1800 MHz, respetivamente.

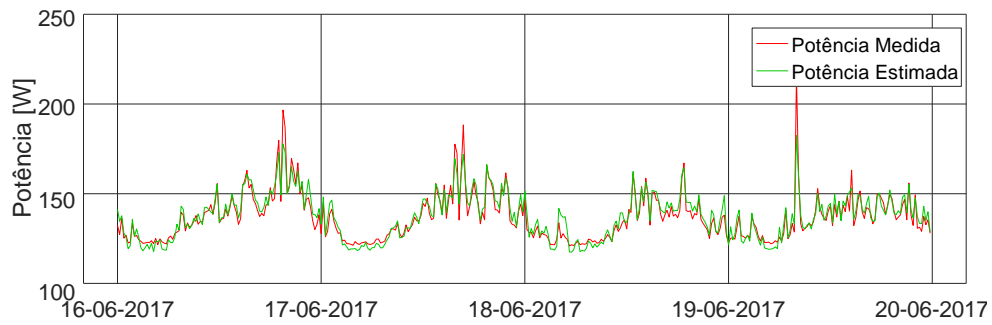


Figura 5.13: Aplicação do modelo LTE, abordagem III à banda dos 800 MHz.

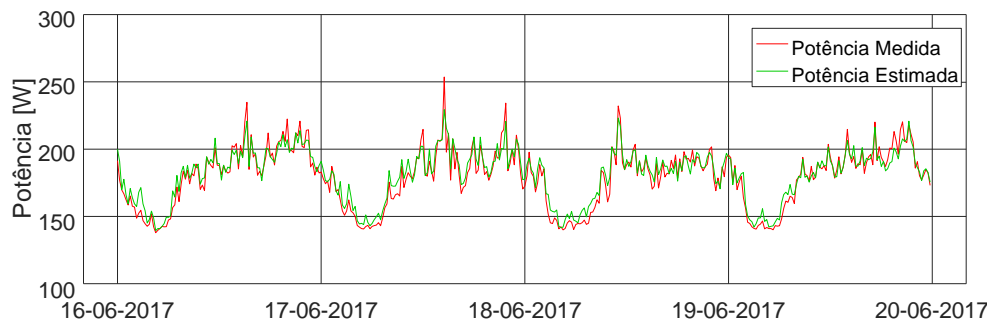


Figura 5.14: Aplicação do modelo LTE, abordagem III à banda dos 1800 MHz.

Analisando as Figuras 5.13 e 5.14, verifica-se que o modelo LTE abordagem III se encontra bem ajustado, permitindo atingir correlações de 94,7 e 97%, atingindo erros de predição de 2,2 e 2,8% (MAPE) e 4,2 e 6,2 W (RMSE), para as bandas de 800 e 1800 MHz, respetivamente.

Em média, o modelo permite atingir um erro de 2,7%.

A Tabela 5.7 resume os valores médios de correlação e erros de predição das versões descritas anteriormente.

Tabela 5.7: Métricas da aplicação do modelo LTE.

Abordagem	Correlação [%]	MAPE [%]	RMSE [W]
I	81,82	6,47	13,07
II	95,87	2,88	5,93
III	96	2,68	5,98

Validação e Análise Estatística do Modelo Final

A Tabela 5.8 apresenta os indicadores de qualidade do ajuste da regressão do modelo LTE, para a terceira abordagem, sendo esta abordagem o resultado do modelo final.

Tabela 5.8: Indicadores de qualidade do ajuste da regressão do Modelo LTE.

Variáveis	Valor p	R_a^2
Tráfego	0,0141	0,9677
Nº de PRB	$p < 0.001$	
Largura de Banda	$p < 0.001$	

A análise dos valores p revela que todas as variáveis independentes inseridas no modelo são significativas, uma vez que se encontra abaixo de 0,05. Ao introduzir os PRB, o tráfego perdeu importância, mas não o suficiente para ser removido do modelo. O valor de R_a^2 demonstra que o modelo se encontra bem ajustado, aproximadamente 0,97.

Através da Figura 5.15 e a Tabela 5.9 é possível fazer o diagnóstico do modelo LTE.

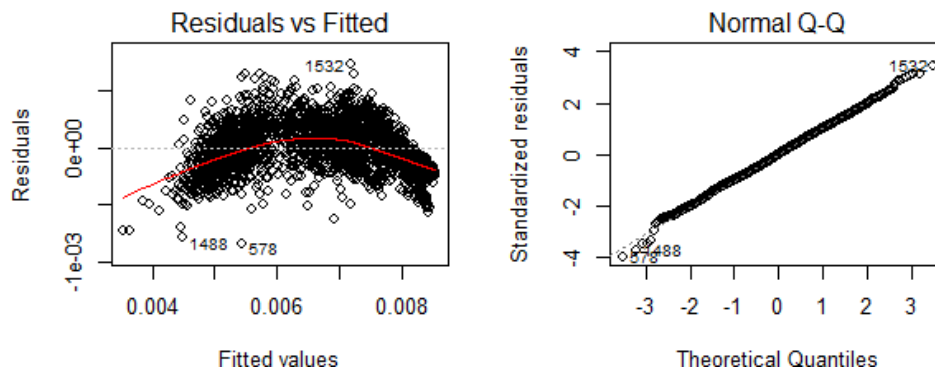


Figura 5.15: Validação do modelo LTE, abordagem III.

Tabela 5.9: Testes de raiz unitária para o Modelo U2100.

Testes	Valor p
Durbin Watson	0,9552
Shapiro Wilk	0,216
Anderson-Darling	0,2381
Jarque Bera	0,7755
Breusch-Pagan	0,1266

Segundo a análise da Figura 5.15 e da Tabela 5.9, ao contrário dos modelos anteriores, constata-se que o modelo LTE, abordagem III verifica todos os pressupostos. Observando os testes associados aos pressupostos da independência, normalidade e homoscedasticidade dos resíduos, os valores- p associados são superiores ao valor de 0,05, logo as hipóteses nulas são rejeitadas.

5.2 Otimização do Consumo Energético para GSM

No sistema GSM, os *timeslots* no TRX do BCCH estão constantemente a transmitir sinais na potência configurada para possíveis seleções de células e transferências de MSs. Portanto, o módulo de RF que contém o TRX do BCCH é um dos componentes da BS que mais consome.

De modo a diminuir o consumo de energia e manter o desempenho da rede, é estudada a *feature* de otimização do consumo energético do BCCH. Assim, é possível introduzir uma forma de redução do consumo através da diminuição da potência RF transmitida na maioria dos *timeslots*. Com a ativação desta *feature*, a potência de transmissão nos *timeslots* alheios ao *timeslot* do BCCH (*non-BCCH*) pode ser reduzida em certos períodos de tempo, diminuindo deste modo a potência consumida pelo equipamento de rádio. Por um lado, permite reduzir a potência de transmissão nos *timeslots non-BCCH* que se encontram em modo *idle* (*timeslot* 1 ao 7). Por outro, permite fazer o controlo da potência transmitida em modo dedicado, ou ocupado, (*timeslot* 1 ao 7). Esta *feature* não introduz ganhos relativos quando o tráfego gerado apresenta grandes volumes, como por exemplo na *busy-hour*, mas é bastante eficaz em períodos onde existe uma baixa carga na célula, como de madrugada.

A Figura 5.16 ilustra o comportamento da potência transmitida com a ativação da *feature*.

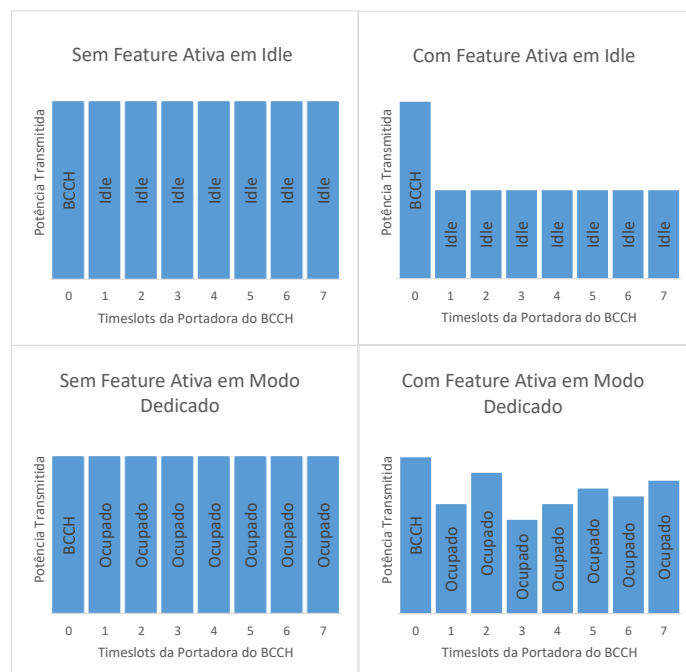


Figura 5.16: Potência transmitida nos *timeslots* com a ativação da *feature* na portadora do BCCH.

Como é visível na Figura 5.16, quando os *timeslots* se encontram em modo *idle*, a *feature* diminui a potência de transmissão em função do valor configurado no parâmetro (exemplo:

3 dB e 6 dB). Já em modo dedicado, a *feature* aplica o controlo de potência até ao valor máximo configurado no parâmetro.

Assim, considerando o efeito da *feature*, na Figura 5.17 é possível observar o resultado da sua ativação na BS A.

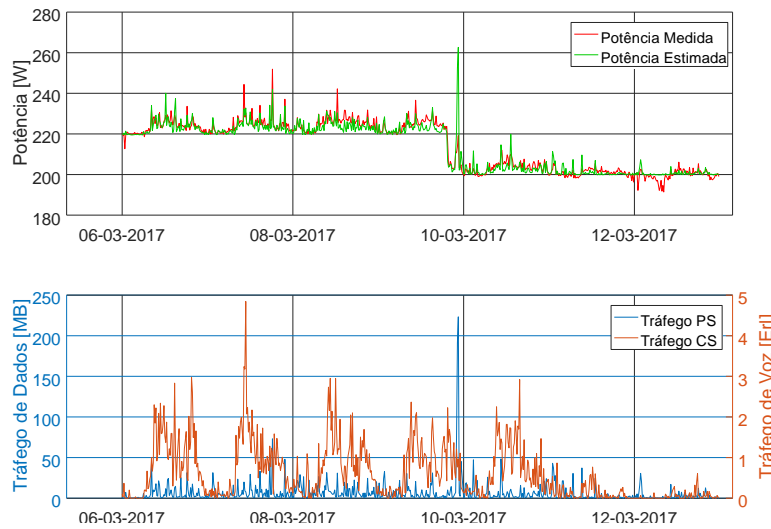


Figura 5.17: Ativação da *feature* de otimização do consumo energético do BCCH.

Na estação base onde foi previsto o consumo da Figura 5.17, foi configurado 3 dB de redução na potência de transmissão, na *feature* referida. Verifica-se que o tráfego se mantém constante, de 6 a 10 de Março (segunda a sexta), tendo uma quebra nos dias 11 e 12 (sábado e domingo). Esta quebra segue o padrão de tráfego semanal habitual. Como expectável, no fim de semana o volume de tráfego é menor, ou seja, a ativação da *feature* não alterou o comportamento do tráfego no sector da BS.

Verifica-se que a ativação da *feature*, como uma diminuição de 3 dB na potência de transmissão, permitiu uma redução de 10,1% no consumo energético deste equipamento rádio. Após esta verificação, a *feature* foi aplicada às restantes células do *cluster*², cerca de 40 em torno da BS A.

Um dos problemas das redes rádio para os utilizadores é a queda de chamadas, dada pelo término das mesmas sem que nenhuma das partes da ligação a tenha efetuado. Este fenómeno pode ocorrer devido à falta de cobertura, interferência, ou por vezes falta de capacidade. Os operadores têm diferentes formas de quantificar a queda de chamadas, mas de uma forma geral o KPI *Call Drop Rate* é o mais utilizado, e pode ser dado pelo rácio entre o número de queda de chamadas e o total de chamadas efetuadas com sucesso.

Por outro lado, as chamadas bloqueadas são ligações mal sucedidas devido à falta de recursos na rede, sendo dada pelo rácio entre chamadas bloqueadas e o total de chamadas efetuadas com sucesso.

²Cluster: Conjunto de células contíguas que juntas possuem o total de canais do sistema.

De modo a analisar o desempenho da rede após esta alteração, foram observados alguns KPI associados ao *cluster* acima referido. Assim, nas Figuras 5.18 e 5.19 vêm ilustrados os rácios de queda de chamadas e de chamadas bloqueadas para a tecnologia GSM.

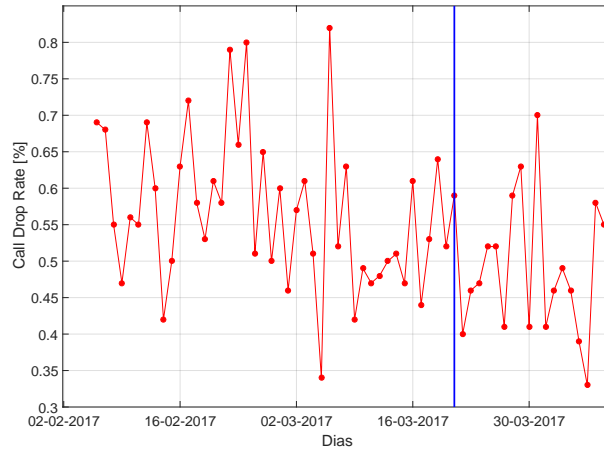


Figura 5.18: Variação do rácio de queda de chamadas em 2G para o *cluster* de células.

Pela Figura 5.18, e tendo em conta que a ativação da *feature* foi realizada a 21 de Março (linha vertical azul), verifica-se que não houve impacto neste KPI. Anteriormente, o rácio da queda de chamadas tinha um valor médio de 0,57%, sendo de 0,49% após a ativação, ou seja, conclui-se que é possível economizar energia sem degradar este KPI, um dos mais importantes em GSM.

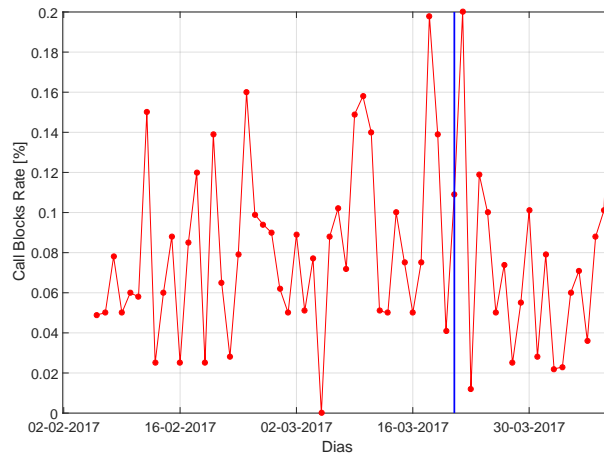


Figura 5.19: Variação do rácio de chamadas bloqueadas em 2G para o *cluster* de células.

Analisando a Figura 5.19, mais uma vez constata-se que a ativação da *feature* não provocou impacto no desempenho da rede, pois o KPI *Call Blocks Rate* anteriormente à ativação da *feature* apresentava um valor médio de 0.082%, sendo posteriormente de 0,076%.

Em síntese, esta abordagem demonstra a capacidade de redução do consumo energético da rede, mantendo o desempenho praticamente inalterado. Após esta validação, a *feature* foi ativada em toda a rede do operador.

5.3 Otimização do Consumo Energético por *switch-off* do UMTS 2100 MHz

Dada a situação de transição entre gerações de comunicações móveis, e mesmo o possível *switch-off* de tecnologias, foi realizado um estudo simplista ao nível da capacidade na estação base B. Por razões históricas seria o GSM a primeira tecnologia a ser desligada, no entanto é uma rede estável, fiável, com boa cobertura de voz. Em termos de dados, o GPRS ainda é muito utilizado ao nível dos terminais de pagamento automático móvel, sobretudo para comerciantes ou prestadores de serviços com grande mobilidade geográfica.

Desta forma, optou-se por desligar o UMTS na banda dos 2100 MHz, pois é uma tecnologia mais complexa, podendo o tráfego de dados ser migrado para o LTE que é mais robusto que o HSDPA e a voz para o GSM. Desta forma é possível libertar (potencialmente) o espetro dos 2100 MHz para outra tecnologia. Posto isto, foram realizados os cálculos necessários à transferência de tráfego entre tecnologias, para que o *switch-off* do UMTS, na banda dos 2100 MHz, fosse possível.

A Figura 5.20 pretende ilustrar a distribuição do tráfego U2100, voz e dados (R99 e HSDPA), por outras tecnologias existentes na estação base.

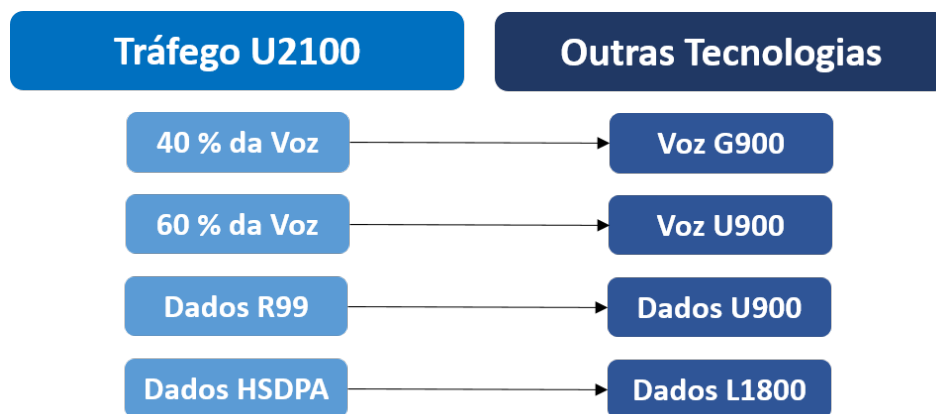


Figura 5.20: Transferência do tráfego U2100 para as outras tecnologias.

Assumindo uma probabilidade de bloqueio de 2%, valor típico usado pelos operadores de rede móvel, e tendo em conta que estão configurados um total de 12 canais de tráfego (TCH) nos dois TRX associados ao GSM, segundo a teoria de Erlang-B, mencionada no Capítulo 2, a capacidade máxima da célula GSM é de, aproximadamente, 6,6 Erl. Os restantes 4 canais são utilizados para sinalização e GPRS, como ilustrado na Figura 5.21.

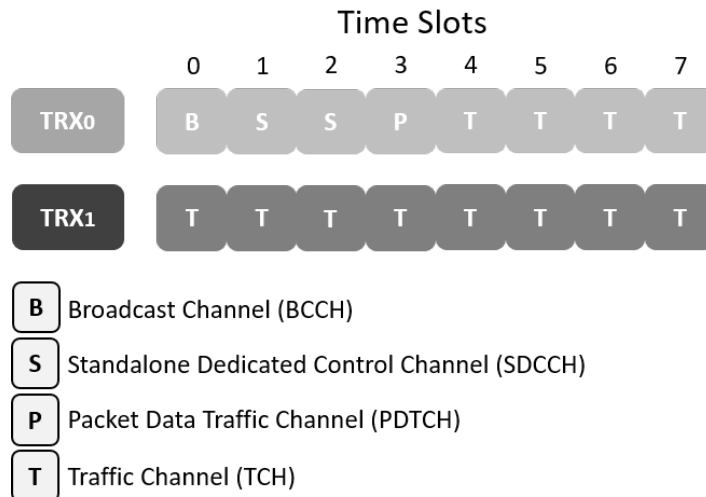


Figura 5.21: Configuração dos *transceivers* da estação base B.

Numa primeira fase, tentou-se distribuir o tráfego de voz equitativamente pelo GSM e UMTS 900 MHz, mas verificou-se que a capacidade máxima (6,6 Erl) era excedida, principalmente nas *busy-hours*. Optou-se então, por transferir 40% para o GSM e 60% para o UMTS.

Foi verificado na *busy-hour* da banda dos 900 MHz do UMTS um pico de tráfego máximo de voz gerado de 3,9 Erl. Após o tráfego proveniente do UMTS 2100 MHz (60%), estima-se que este pico suba para 11,5 Erl, o equivalente a 19 canais dedicados, segundo a teoria de Erlang-B. Relembrando a Tabela 2.1 do Subcapítulo 2.3.2, o número de CEs depende do serviço utilizado, voz ou dados a diferentes ritmos de transmissão. Neste caso, para o tráfego de voz, utilizando AMR 12,2 k, é necessário apenas 1 CE por utilizador, para estabelecer um circuito dedicado. É então essencial uma capacidade mínima de 19 CEs instalada, de modo a ser possível absorver o tráfego proveniente do *switch-off* nas horas de pico.

Estes 60% são absorvidos, uma vez que analisando o pico máximo de tráfego existente no UMTS, em ambas as bandas, perfaz um total de 11,5 Erl, o equivalente a 19 canais dedicados. Relembrando a Tabela 2.1 do Subcapítulo 2.3.2, o número de CE's depende do serviço utilizado, como tal, a voz utiliza AMR 12,2 k que apenas utiliza um CE por serviço, logo são necessários 19 CE's.

Ao nível da capacidade do UMTS, de modo a absorver os dados associados à R99, sabe-se que estão instaladas quatro *boards* de processamento banda base, perfazendo um total de 1664 CEs disponíveis em *downlink*. Previamente foram analisados os tipos de serviços e verificou-se que, nesta BS, apenas foi gerado tráfego a PS 64 k e PS 128 k. Assim, somando os tráfegos de cada banda observou-se um pico máximo de 6141 kbit na *busy-hour*, traduzindo-se na necessidade de 192 CEs de capacidade. A este valor é necessário ainda somar os 19 CEs provenientes da voz. Extrapolando este valor para os três setores, contabiliza-se um total

de 633 CEs de capacidade necessária, não ultrapassando o limite instalado de 1664 CEs. Verifica-se ainda, que ao desligar a referida banda é possível reduzir o número de *boards* de capacidade.

Os dados associados ao HSDPA foram transferidos para a banda dos 1800 MHz do LTE, uma vez que a área de cobertura é a que mais se assemelha à banda dos 2100 MHz, isto assumindo que a distribuição dos utilizadores permanece inalterada. Relembrando o esquema MIMO 2x2 da Tabela 2.3, para a banda dos 1800 MHz é utilizada uma largura de banda de 20 MHz, com um *throughput* máximo teórico entre 67,2 a 201,6 Mbps, dependendo da localização do utilizador na célula que varia, entre outros fatores, com a modulação. Assim, analisando o tráfego na *busy-hour*, considerando já a totalidade do tráfego de dados, HSDPA e LTE, constata-se que o mesmo atinge um *throughput* de 20 Mbps, não excedendo os valores máximos teóricos referidos, levando a concluir que a célula LTE tem capacidade para debitar mais informação.

Utilizando os modelos construídos, é sugerido realizar o *switch-off* do UMTS 2100 MHz, simulando a transferência do tráfego para as outras tecnologias, ilustrada na Figura 5.22.

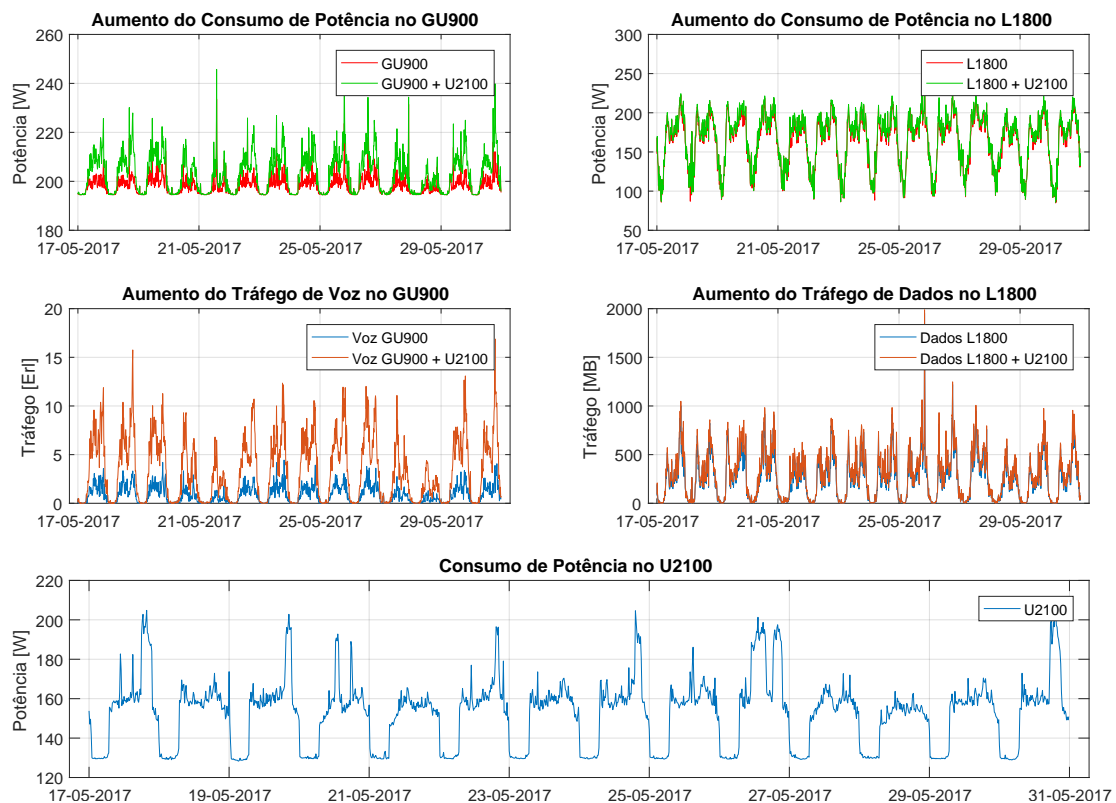


Figura 5.22: Transferência de tráfego do UMTS 2100 MHz.

Analisando os resultados obtidos ao nível da transferência de tráfego do UMTS 2100 MHz para a banda dos 900 e 1800 MHz (Figura 5.22), verifica-se que ocorreu um aumento médio de cerca de 2,4%, correspondente a 4,9 W no consumo energético ao nível do GU900. Já

na banda dos 1800 MHz do LTE, é também visível um aumento de consumo, embora mais reduzido, pois o volume de tráfego de dados HSDPA é facilmente absorvido pela tecnologia.

Visualizando o gráfico inferior da Figura 5.22, constata-se que a tecnologia UMTS 2100 MHz apresenta um consumo médio por setor de 153 W, sendo aproximadamente 459 W por estação base.

Relembrando os valores anuais médios da Tabela 4.5, as tecnologias GU900, U2100 e L1800 apresentam um custo por estação base de 769, 609 e 640 euros, respetivamente. Tendo em conta a transferência de tráfego, as tecnologias GU900 e L1800 passam a um custo de 788 e 652 euros, respetivamente. Então, o *switch-off* da tecnologia U2100 traduz-se numa poupança de 578 euros.

Conclui-se que é possível poupar no consumo energético da BS, ao desligar uma tecnologia, sem aparente degradação de capacidade e qualidade de serviço. O tráfego gerado pode ser facilmente absorvido pelas restantes bandas, uma vez que existe capacidade suficiente disponível.

6

Conclusões

6.1 Síntese	68
6.2 Trabalho Futuro	69

6.1 Síntese

Esta dissertação fornece, inicialmente, uma visão geral dos últimos estudos em torno do tema da eficiência do consumo energético em estações base multi tecnologia.

Na elaboração do trabalho foi feita uma caracterização das estações base, ao nível do equipamento instalado, bem como da própria configuração, como células ativas e parâmetros de potência. Como ponto de partida, analisaram-se os padrões de tráfego (voz e dados) dos utilizadores, tanto diário como semanal, para as diferentes tecnologias configuradas nas estações base em estudo. Verificou-se a existência de períodos de baixo tráfego em horas de baixa carga nas células, tipicamente de madrugada, bem como períodos de picos nas *busy-hours*, hora de almoço e final do dia de trabalho. Constatou-se também uma quebra de tráfego durante o fim de semana, como esperado.

Verificou-se uma grande dependência entre o tráfego gerado nas estações base nas diversas tecnologias, e o respetivo consumo energético, pelo que o tráfego é o principal fator considerado nos modelos desenvolvidos.

Foi realizado um estudo sobre o impacto ambiental de uma estação base, com o grave problema do aquecimento global devido às emissões de dióxido de carbono, bem como uma análise simplista do número de árvores necessárias para compensar as emissões para o meio ambiente. Verificou-se que ao fim de um ano, uma BS, em média, está associada, aproximadamente, a 10,7 toneladas de emissões de CO₂ para a atmosfera, sendo necessárias cerca de 530 árvores para combater esse valor.

Foram desenvolvidos três modelos de consumo energético, GU900, U2100 e LTE, baseados em regressões lineares multivariadas. Além do tráfego, foram adicionados fatores que têm uma associação com o consumo, são estes a potência de transmissão, a identificação do tipo de ambiente e a *feature* do BCCH, no que diz respeito ao modelo GU900. No caso do U2100, a disponibilidade das células foi crucial no andamento da potência consumida, especialmente de madrugada, onde existe o *switch-off* de portadoras. Na tecnologia LTE, observou-se que os recursos alocados aos utilizadores (PRB) e a largura de banda são bastante importantes na caracterização do modelo.

Os modelos resultaram numa boa previsão da potência consumida, com resultados muito satisfatórios. Foi possível verificar que o GU900 foi o modelo com piores resultados, atingindo erros médios de 4%. Já o modelo U2100 apresentou um erro médio de 2,2%. Por fim, o LTE atingiu um erro de predição médio de 2,7%, após considerar os PRB. Após aplicar os modelos obtiveram-se valores do coeficiente de correlação entre o consumo medido e o consumo estimado, a variar entre os 82 e 97%.

De modo a otimizar o consumo, no rádio de banda partilhada, foi possível fazer testes ativando a *feature* de poupança no TRX do BCCH. Verificou-se uma diminuição de 10% de potência consumida, não degradando um dos principais KPI em GSM, a taxa de queda de

chamadas. No final de um ano, esse valor traduz-se numa poupança de 3075 euros, ao reduzir 3 dB na potência de transmissão em todo *cluster*.

Por fim, dada a situação de transição entre gerações e, conseqüentemente, o possível *switch-off* de tecnologias, foi realizado um estudo ao nível da capacidade nas três tecnologias. Na estação base analisada, verificou-se que é possível canalizar o tráfego, voz e dados, da tecnologia U2100 para o GU900 e LTE, uma vez que a capacidade disponível é suficiente. Com este procedimento verificou-se ser possível desligar (em simulação) o UMTS 2100 MHz, poupando cerca de 578 euros ao final do ano em cada estação base, aumentando de forma quase residual o consumo nos outros rádios.

6.2 Trabalho Futuro

Esta dissertação não representa um fim de projeto, mas sim um início de trabalho na área da poupança energética. Neste ponto são realizadas algumas sugestões de trabalho futuro a desenvolver que visam complementar o trabalho realizado e abrir novos tópicos de investigação.

Como tal, até agora é possível estimar o consumo da componente de rádio da estação base. No entanto, os modelos desenvolvidos podem sofrer melhorias, nas suas estimativas, minimizando o erro de predição, com a introdução de mais variáveis explicativas do consumo energético. Será muito interessante recolher uma amostra de medidas de estações base onde o *hardware* possa ser diferente dos cenários de teste até então realizados, tanto em termos de modelos como do próprio fornecedor de equipamentos. Apenas assim, os modelos podem ser totalmente genéricos.

De modo a estimar o consumo de toda a estação base, é necessário ainda continuar a investigação no âmbito dos equipamentos de processamento de banda base (BBU) e de transmissão (Tx), ilustrados na Figura 6.1, sendo necessário identificar os fatores que explicam o consumo real dos equipamentos.

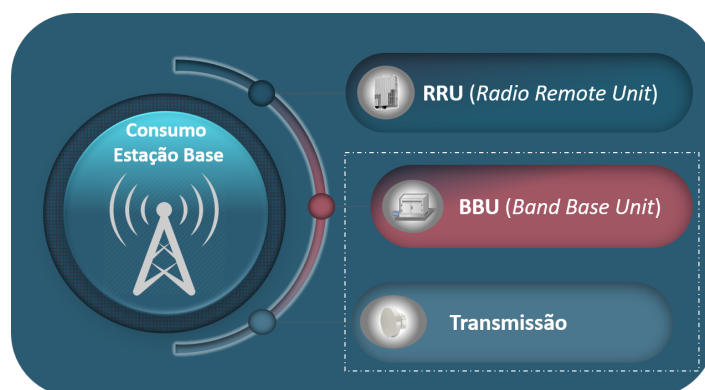


Figura 6.1: Equipamentos da estação base.

Atualmente, a rede móvel é uma estrutura dinâmica, com várias camadas (macro / micro / pico células) que, a fim de lidar com o aumento em número e utilização dos utilizadores e implementação de novos serviços, necessita ser dimensionada de modo a que os requisitos de QoS e de QoE fornecidos sejam cumpridos. A evolução tecnológica intensa pelo lado do consumidor, o equipamento móvel com cada vez mais recursos avançados e uma tendência social que está a ligar as pessoas como nunca antes visto, precisa de uma estrutura de rede altamente disponível e com recursos abundantes. Hoje em dia, a maioria das redes em todo o mundo opera, simultaneamente, em três tipos de tecnologias diferentes: 2G, 3G e 4G. Além disso, a necessidade de maior capacidade, ou seja, mais chamadas de voz/vídeo e maiores ritmos de transmissão para oferecer aos utilizadores, leva os operadores a planear a rede com cada vez mais células, aumentando o investimento e, conseqüentemente, a fatura energética. Neste contexto, os mecanismos de poupança energética têm atraído muita atenção por parte dos operadores, sendo fundamental o aprofundamento ao nível dos modelos de capacidade para todas as tecnologias, de modo a contribuir para uma previsão ainda mais fidedigna dos cenários de reconfiguração e *refarming*¹ da rede. Seria interessante a implementação de um algoritmo de adaptação da carga consciente do ambiente de rádio, pela comutação on/off de portadoras, através da realocação de utilizadores para outras bandas em momentos de baixa carga nas células, promovendo assim a poupança energética, investindo eficazmente no QoS e mantendo praticamente inalterados os vários KPI.

¹*Refarming*: Supressão da alocação de bandas existentes no espectro radioelétrico ou realocação mais eficiente do espectro em bandas menores

Referências

- [1] I. Humar, X. Ge, L. Xiang, M. Jo, M. Chen, e J. Zhang. “Rethinking energy efficiency models of cellular networks with embodied energy”. *IEEE Network*, 25(2):40–49, Março 2011.
- [2] G. Fettweis e E. Zimmerman. “Energy Consumption - Trends and Challenges”. *11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, 2008.
- [3] Huawei. Whitepaper for Saving Energy and Reducing Emissions, Save Energy and Reduce Emissions to Achieve Sustainable Development and Improve Corporate Competitiveness, 2012.
- [4] Celfinet. RAN Energy Optimizer, Product Description. 2016.
- [5] J. Thompson e C. Khirallah. “Overview of Green Radio Research Outcomes”. *Workshop on Smart and Green Communications and Networks (SGCNet)*, 2012.
- [6] Anders Andrae e Tomas Edler. “On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030”. *Challenges*, 6(1):117–157, 2015.
- [7] Dr. Andreas Eisenblätter, Rafał Pisz e Szymon Stefański. GreenNets White Paper, 2013.
- [8] National Instruments. Efficient Testing of Wireless Radio Equipment Including RF and CPRI, 2017.
- [9] Jörg Eberspächer, Hans-Jörg Vögel, Christian Bettstetter, and Christian Hartmann. *GSM - Architecture, Protocols and Services (3. ed.)*. Wiley, 2009.
- [10] Harri Holma and Antti Toskala. *WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 2007.
- [11] [Online; acedido 3-Julho-2017]. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_sa/TSG_SA/TSGS_08/Docs/PDF/SP-000257.pdf.
- [12] Stefania Sesia, Issam Toufik, e Matthew Baker. *LTE, The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Wiley Publishing, 2009.

- [13] Christopher Cox. *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications*. 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd., 2014.
- [14] Ericsson. *Control Channel Dimensioning*. Wiley Publishing, 2009.
- [15] Motorola. Realistic LTE Performance From Peak Rate to Subscriber Experience, 2009.
- [16] Ayman Elnashar, Mohamed A. El-saidny, e Mahmoud R. Sherif. *Coverage and Capacity Planning of 4G Networks*. John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [17] *3GPP Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+) - Key Performance Indicators (KPI) for UMTS and GSM*, 2010.
- [18] Nikoleta Andreadou, Miguel Olariaga Guardiola, e Gianluca Fulli. “Telecommunication Technologies for Smart Grid Projects with Focus on Smart Metering Applications”. *Energies*, 2016.
- [19] J. Lloret, J. Tomas, A. Canovas e L. Parra. “An Integrated IoT Architecture for Smart Metering”. *IEEE Communications Magazine*, 54(12):50–57, 2016.
- [20] Min-Gyu Kang, Woo-Suk Jung, Chong-Yun Kang, e Seok-Jin Yoon. “Recent Progress on PZT Based Piezoelectric Energy Harvesting Technologies”. *Actuators*, Fevereiro 2016.
- [21] Shancymol Sojan and R.K. Kulkarni. “A Comprehensive Review of Energy Harvesting Techniques and its Potential Applications”. *International Journal of Computer Applications*, 139(3), 2016.
- [22] James M. Gilbert e Farooq Balouchi. “Comparison of Energy Harvesting Systems for Wireless Sensor Networks”. *International Journal of Automation and Computing*, 5(4):334–347, 2008.
- [23] Zhang Mingyu. “World’s Largest Solar Energy Base Station Cluster Set Up in Tibet”, 2009. [Online; acedido 20-Março-2017] http://news.xinhuanet.com/english/2009-08/17/content_11896676.htm.
- [24] C. Lubritto, A. Petraglia, C. Vetromile, F. Caterina, A. D’Onofrio, M. Logorelli, G. Marsico, e S. Curcuruto. Telecommunication power systems: Energy saving, renewable sources and environmental monitoring. *Telecommunications Energy Conference INTELEC. IEEE 30th International*, 2008.
- [25] Antonio Spagnuolo, Antonio Petraglia, Carmela Vetromile, Roberto Formosi, e Carmine Lubritto. “Monitoring and Optimization of Energy Consumption of Base Transceiver Stations”. *Energy*, 81(C):286–293, 2015.

- [26] Feng Han, Zoltan Safar, W. Sabrina Lin, Yan Chen, e K. J. Ray Liu. “Energy-efficient Cellular Network Operation via Base Station Cooperation”. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, ICC*, pages 4374–4378, 2012.
- [27] T. En, W. Ye, D. Fei, P. Zhiwen, e Y. Xiaohu. “A Practical eNB off/on based Energy Saving Scheme for Real LTE Networks”. *17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2015.
- [28] T. Cunha, A. Rodrigues, e P.Vieira. “Energy Savings in 3G Using Dynamic Spectrum Access and Base Station Sleep Modes”. *Radio Science Conference (URSI AT-RASC), 1st URSI Atlantic*, 2015.
- [29] Jingjin Wu, Yujing Zhang, Moshe Zukerman, e Edward Kai-Ning Yung. “Energy-Efficient Base-Stations Sleep-Mode Techniques in Green Cellular Networks: A Survey”. *IEEE Communication Surveys and Tutorials, Vol. 17, No. 2*, 2015.
- [30] Gunther Auer, Vito Giannini, Claude Desset, István Gódor, Per Skillermark, Magnus Olsson, Muhammad Ali Imran, Dario Sabella, Manuel J. Gonzalez, Oliver Blume, e Albrecht J. Fehske. “How much energy is needed to run a wireless network?”. *IEEE Wireless Communications*, 18:40–49, 2011.
- [31] J. Lorincz, T. Garma, e G. Petrovic. “Measurements and Modelling of Base Station Power Consumption Under Real Traffic Loads”. *Sensors*, 12(4):4281–4310, 2012.
- [32] Madhu Dahal, Jagan Shrestha, e Shree Shakya. “Power Consumption Modeling of Base Station as per Traffic Generated”. *South American Journal of Academic Research*, 2016.
- [33] James D. Gadze, Sylvester B. Aboagye, e Kwame A. P. Agyekum. “Real Time Traffic Base Station Power Consumption Model for Telcos in Ghana”. *International Journal of Computer Science and Telecommunications*, 2016.
- [34] Josip Lorincz, Tonko Garma, e Goran Petrovic. “Measurements and Modelling of Base Station Power Consumption under Real Traffic Loads”. *Sensors*, 2012.
- [35] K. Davaslioglu e E. Ayanoglu. “New Algorithms for Maximizing Cellular Wireless Network Energy Efficiency”. *Proc. IEEE Information Theory and Applications Workshop, San Diego, CA*, 2016.
- [36] C. Chatfield. *Time-Series Forecasting*. Boca Raton, Florida: Chapman and Hall/CRC, 2000.
- [37] P.J. Brockwell e R.A. Davis. *Introduction to Time Series and Forecasting*. Number vol. 1 in Introduction to Time Series and Forecasting. Springer, 2002.

- [38] D. C. Montgomery e G. C. Runger. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. John Wiley and Sons, 2003.
- [39] S. Rodrigues. *Modelo de Regressão Linear e suas Aplicações*. Universidade da Beira Interior, 2012.
- [40] Christian Kleiber e Achim Zeileis. *Applied Econometrics with R*. Springer, 2008.
- [41] T. S. Breusch e A. R. Pagan. *A Simple Test for Heteroskedasticity and Random Coefficient Variation*. *Econometrica*, 1979.
- [42] Wlodzimierz Bryc. *The Normal Distribution: Characterizations with Applications*. Springer-Verlag, 1995.
- [43] R. J. Hyndman e G. Athanasopoulos. *Forecasting principles and practice*, 2017. [Online; acessado 27-Junho-2017] <https://www.otexts.org/fpp/>.
- [44] Edward Ramsden. *Hall-effect sensors*. Elsevier Inc., 2006.
- [45] S. Saunders e A. Aragon-Zavala. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [46] IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Stationary Combustion, Chapter 2, 2006.
- [47] Dexter B. Dombro. *How much carbon does a tropical tree sequester?* Tree-nation In partnership with the United Nations Environment Programme Plant for the planet, Billion tree campaign, 2013.
- [48] Huawei Technologies. *Performance counter reference*, 2016.

A

Aplicação dos Modelos

Os modelos de consumo energético foram testados em todas as estações base a que se teve acesso. Nas Tabelas A.1, A.2 e A.3 são identificadas as BS's e o setores avaliados com a correlação e erro existente, MAPE e RMSE, entre a potência medida e estimada. Deve-se notar que a primeira, segunda e terceira fase denominaram-se abordagens I, II e III, respectivamente.

Tabela A.1: Indicadores de desempenho do modelo GU900 para as três abordagens.

BS	Setor	Correlação [%]			MAPE [%]			RMSE [W]		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
A	1	42,6	93,5	95,9	5,1	4,2	0,9	13,4	9,9	3,4
A	2	28,1	98,1	98,9	5,4	5,1	1,7	15,5	11,6	4,2
B	1	77,7	44,8	69,6	10,5	14,2	5,7	19,9	26,9	11,3
B	2	87,8	48,7	84,9	13,0	11,2	8,2	26,4	23,5	17,8
B	3	91,8	62,4	86,5	9,6	9,4	5,4	19,7	20,7	13,1
C	1	78,7	24,7	77,4	3,8	4,9	2,7	9,3	12,3	7,5
C	2	84,4	77,8	85,1	5,2	6,0	4,9	16,2	17,2	14,7
C	3	81,9	8,4	78,8	4,7	7,3	1,5	9,8	15,4	3,5
D	1	82,1	63,5	82,7	9,2	6,1	2,1	21,0	14,3	5,3
D	2	73,6	48,2	65,4	11,6	8,5	4,7	27,3	20,3	11,4
D	3	47,9	51,0	69,3	9,9	6,5	3,0	22,6	14,9	7,0
E	1	81,5	59,7	81,1	23,9	3,1	3,4	43,7	8,1	9,4
E	2	86,4	33,6	85,7	9,7	8,2	7,0	19,9	17,3	14,4
E	3	89,3	80,9	90,2	9,0	8,9	7,5	20,3	19,3	16,2
F	1	85,2	83,5	80,6	9,9	5,8	3,9	25,0	16,7	20,3
F	2	79,8	79,9	81,8	8,0	4,0	1,2	18,5	9,9	4,0

Tabela A.2: Indicadores de desempenho do modelo U2100 para as três abordagens.

BS	Setor	Correlação [%]			MAPE [%]			RMSE [W]		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
A	1	71,6	98,8	97,2	9,2	1,8	2,3	17,2	3,5	5,1
B	1	80,9	98,5	98,8	5,6	2,7	2,2	10,4	4,8	4,3
B	2	79,4	97,5	98,0	8,0	2,1	1,9	17,1	4,7	4,9
B	3	83,8	98,0	97,5	5,8	2,2	2,5	12,4	5,3	6,2
C	1	72,1	94,5	94,4	3,8	1,7	1,6	7,4	3,6	3,5
C	2	71,5	91,0	93,4	4,0	3,0	2,7	10,3	6,8	6,3
C	3	79,8	96,9	97,1	4,4	1,4	1,2	8,4	2,8	2,7
E	1	67,3	89,6	90,1	4,1	1,3	1,6	8,6	3,1	3,0
E	2	72,6	93,6	92,5	3,5	3,6	3,3	7,2	5,5	5,4
E	3	66,8	98,3	98,2	7,3	2,4	2,7	13,4	4,4	5,1

Tabela A.3: Indicadores de desempenho do modelo LTE para as três abordagens.

BS	Banda	Setor	Correlação [%]			MAPE [%]			RMSE [W]		
			I	II	III	I	II	III	I	II	III
B	800	1	51,2	94,8	95,4	4,9	2,8	2,4	7,2	3,9	3,6
B	800	2	77,1	95,1	94,6	3,8	2,5	2,3	6,9	4,7	3,9
B	800	3	89,4	97,1	94,7	3,6	1,9	2,2	6,2	3,3	4,2
B	1800	1	90,6	97,3	97,2	9,4	3,5	3,1	22,0	7,0	7,8
B	1800	2	86,5	95,4	97,0	7,7	3,1	2,8	17,1	6,7	6,2
B	1800	3	96,1	95,5	97,2	9,4	3,5	3,3	19,0	10,0	10,1

