



---

ISEL – INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

MEET – MESTRADO EM ENGENHARIA ELETRÓNICA E TELECOMUNICAÇÕES

DISSERTAÇÃO

---

# **Análise de Medidas de Poupança Energética em Redes Móveis Multi-Tecnologia**

Viviana Alexandra Carrola Rodrigues

(Licenciada em Engenharia Informática, Redes e Telecomunicações)

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

Orientador: Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Presidente: Doutora Paula Maria Garcia Louro

Vogais: Doutor Paulo Alexandre Carapinha Marques

Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

**Julho de 2023**



# Agradecimentos

---

Primeiramente, pretendo exprimir o meu agradecimento a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação. Ao Professor Doutor Pedro Vieira, pela disponibilidade e confiança transmitida que impulsionou esta tese, à CELFINET, em especial aos Engenheiros David Duarte e Thaína Saraiva pelas sugestões dadas. Aos Engenheiros Diogo Almeida e Rui Caeiro pela partilha de conhecimento de *hardware* e transmissão.

Com respeito à partilha de conhecimento e sugestões relativas a infraestruturas de telecomunicações móveis, tenho a agradecer aos Engenheiros Ana Murteira, Inês Fernandes, José Brás, Paolo Favaro, Ricardo Raimundo, Sandra Morais, Sara Soares e Tiago Cunha.

Exprimo ainda agradecimento aos meus amigos e família, e um especial agradecimento à pessoa que mais me apoiou durante o percurso, Francisco Jesus.

Por último, pretendo exprimir agradecimento a um projeto internacional no âmbito do qual este trabalho foi realizado, o *Artificial Intelligence for Green Networks* (AI4GREEN) C2018/1-5, ao abrigo do CELTIC-NEXT Core Group e do programa EUREKA Clusters, e ao programa COMPETENCE/-FEDER pelo financiamento nacional do projeto (POCI-01-0247-FEDER-046555), bem como, mais uma vez, à CELFINET e ao Instituto de Telecomunicações (IT) pelo apoio a este trabalho.



# Resumo

---

A crescente preocupação com a eficiência energética, sustentabilidade e aumento dos custos energéticos tem levado empresas a focarem-se na redução dos seus consumos. Por esse motivo, os operadores de redes móveis têm trabalhado para otimizar energeticamente a sua rede, tornando-se assim mais sustentáveis. Com o objetivo de reduzir os custos operacionais através da poupança energética, nesta dissertação foram propostas um conjunto de soluções, nomeadamente a modernização de equipamentos, a desativação da tecnologia de Terceira Geração (3G), a partilha de equipamentos rádio com outros operadores e a ativação de funcionalidades de poupança energética.

Através da calibração de um modelo de previsão de consumo energético utilizando dados reais e informações documentadas sobre consumo típico dos equipamentos, foram analisadas as poupanças que podem ser alcançadas com as mudanças propostas. Os resultados mostram que é possível obter uma redução de até 59% nos custos energéticos por site.

Nesta dissertação, foi analisado o Custo Total de Propriedade de um operador e de uma empresa detentora de infraestrutura de telecomunicações no mercado português. Por conseguinte, foi desenvolvido um algoritmo em R para determinar o custo de uma torre com base na altura pretendida.

A implementação de algoritmos de otimização que se baseiam em técnicas de Inteligência Artificial (IA) é essencial para melhorar a eficiência dos modelos operacionais das redes móveis atuais. Deste modo, analisou-se ainda o impacto médio do recurso a IA no consumo de energia de uma estação base, em que se verificou que através de 2 funcionalidades de poupança energética podem existir poupanças de 156€ por site por ano em torres e 168€ em *rooftops*.

Por fim, foi analisado um caso de investimento em *Self-Optimizing Network* (SON) e concluiu-se que com apenas 6% de poupança energética, o investimento em técnicas de IA teria retorno em cerca de 2 anos e meio.

**Palavras-chave:** Redes móveis, Redes de Acesso Rádio, Eficiência Energética, Sustentabilidade.



# Abstract

---

The growing concern for energy efficiency, sustainability, and energy costs increase has led companies to focus on reducing their consumption. Therefore, mobile network operators have been working towards optimizing the energy efficiency of their networks, thereby becoming more sustainable. This thesis aims to reduce operational costs through energy savings by proposing a range of solutions, including equipment modernization, deactivation of Third Generation (3G) technology, sharing of radio equipment with other operators, and the activation of energy-saving features.

Through the calibration of a predictive model of energy consumption using real data and documented information on typical equipment consumption, the potential savings resulting from the proposed changes were analyzed. The results reveal that it is possible to achieve a reduction of up to 59% in energy costs per site.

This thesis also examines the Total Cost of Ownership for a mobile network operator and a telecommunications infrastructure company in the Portuguese market. Additionally, an algorithm was developed in R to determine the cost of towers based on the desired height.

The implementation of optimization algorithms based on Artificial Intelligence (AI) techniques is crucial for improving the operational efficiency of current mobile networks. Furthermore, the average impact of employing AI on energy consumption at a base station was analyzed, demonstrating potential savings of €156 per site per year for towers and €168 for rooftops through the use of two energy-saving features.

Finally, a case study on investment in Self-Optimizing Networks (SON) was conducted, concluding that with just a 6% energy savings, the investment in AI techniques would yield a return in approximately 2 and a half years.

**Keywords:** Mobile Networks, Radio Access Network, Energy Efficiency, Sustainability.



# Índice

---

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>i</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>xi</b>
<b>Acrónimos</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Lista de Símbolos</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Introdução</b> .....	<b>3</b>
1.1 Motivação .....	4
1.2 Objetivos .....	5
1.3 Estrutura do documento .....	5
<b>2 Conceitos Fundamentais</b> .....	<b>7</b>
2.1 Redes de Acesso Rádio .....	8
2.1.1 2G - <i>Global System for Mobile Communications</i> (GSM) .....	8
2.1.2 3G - <i>Universal Mobile Telecommunications System</i> (UMTS) .....	10
2.1.3 4G - <i>Long Term Evolution</i> (LTE) .....	11
2.1.4 5G - <i>New Radio</i> (NR) .....	14
2.1.5 Configuração da Estação Base .....	18
2.2 Indicadores de Performance .....	19
2.3 Monitorização de Consumo Energético .....	20
2.4 Funcionalidades de Poupança Energética .....	21
2.5 <i>Machine Learning</i> Aplicado ao Consumo de Energia .....	24
2.6 Modernização de Estação Base .....	24
2.6.1 Modernização de <i>Baseband Units</i> (BBUs) .....	25
2.6.2 Modernização de <i>Remote Radio Units</i> (RRUs) .....	26

2.7	Partilha de Infraestrutura de Rede - RAN <i>Sharing</i> . . . . .	27
2.8	Custo Total de Propriedade - <i>Total Cost of Ownership</i> (TCO) . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Modelo de Consumo Energético</b>	<b>30</b>
3.1	Modelo de Previsão de Consumo Energético . . . . .	31
3.1.1	Modelo de Previsão para RRU <i>Ericsson</i> . . . . .	31
3.1.2	Modelo de Previsão para BBU <i>Ericsson</i> . . . . .	32
3.2	Calibração do Modelo . . . . .	34
3.3	Modernização da Estação Base . . . . .	35
3.3.1	Modernização de BBUs . . . . .	36
3.3.2	Modernização de RRUs . . . . .	36
3.4	3G <i>shutdown</i> . . . . .	37
3.5	Partilha de Infraestrutura de Rede - <i>Radio Access Network (RAN) Sharing</i> . . . . .	38
3.6	Funcionalidades de Poupança Energética . . . . .	41
3.6.1	Funcionalidades Segunda Geração (2G) . . . . .	41
3.6.2	Funcionalidades Quarta Geração (4G) . . . . .	42
3.7	Síntese das Técnicas de Poupança Energética Utilizadas . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Modelo de Negócio para Poupança Energética e Automação</b>	<b>45</b>
4.1	Sustentabilidade . . . . .	46
4.1.1	Ambiente . . . . .	47
4.1.2	Sociedade . . . . .	49
4.1.3	Economia . . . . .	49
4.2	Custo Total de Propriedade . . . . .	50
4.2.1	<i>Capital Expenditure</i> (CAPEX) . . . . .	51
4.2.2	<i>Operational Expenditure</i> (OPEX) . . . . .	57
4.2.3	Caso de Uso - Inteligência Artificial (IA) . . . . .	60
4.3	Consumo Energético . . . . .	62
4.3.1	Consumo Energético Anual . . . . .	63
4.3.2	Consumo Energético DC . . . . .	64
4.3.3	Rede Elétrica . . . . .	67
4.4	Implementação de 5G . . . . .	68
4.5	Investimento SON . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>71</b>
5.1	Conclusões . . . . .	72
5.2	Trabalho Futuro . . . . .	73

# Lista de Figuras

---

1.1	Evolução do consumo energético com o surgimento de novas tecnologias [3]. . . . .	4
2.1	Arquitetura da rede 2G [5]. . . . .	8
2.2	Estrutura de <i>Transceiver</i> (TRX). . . . .	9
2.3	Arquitetura da rede 3G [6]. . . . .	10
2.4	Arquitetura da rede LTE [4]. . . . .	12
2.5	Alocação de recursos em LTE [7]. . . . .	13
2.6	Principais destaques da tecnologia Quinta Geração (5G) [11]. . . . .	14
2.7	Diferentes bandas globais do espectro 5G [11]. . . . .	15
2.8	Arquitetura RAN da rede 5G [13]. . . . .	16
2.9	Principais opções de arquitetura [11]. . . . .	17
2.10	Requisitos da rede 5G [14]. . . . .	17
2.11	Evolução da estação base para o tipo distribuído [15]. . . . .	18
2.12	BBUs - <i>Digital Unit for GSM</i> (DUG) 20 01, <i>Digital Unit for Wideband Code Division Multiple Access</i> (WCDMA) (DUW) 30 01 e <i>Multi-standard Digital Unit</i> (DUS) 41 01 [25, 26, 27]. . . . .	25
2.13	BBUs - <i>Baseband 5216</i> e <i>Baseband 6630</i> [28, 29]. . . . .	25
2.14	RRUs - <i>Remote Radio Unit all Standards</i> (RRUS) 12 B8 à esquerda e <i>Radio 2238</i> à direita [30, 31]. . . . .	26
2.15	MORAN - Cenário 1. . . . .	27
2.16	MORAN - Cenário 2. . . . .	28
2.17	Exemplo hipotético de alocação de espectro. . . . .	28
2.18	<i>Instantaneous Bandwidth</i> (IBW) e <i>Occupied Bandwidth</i> (OBW). . . . .	29
3.1	Previsão de potência consumida antes e após modernização de BBUs. . . . .	36
3.2	Previsão de potência consumida antes e depois da modernização de RRUs. . . . .	37
3.3	3G <i>shutdown</i> - Potência consumida por equipamento (à esquerda) e por banda (à direita). . . . .	38
3.4	Tráfego com e sem RAN <i>Sharing</i> - 2G. . . . .	39
3.5	Consumo Rádio com e sem RAN <i>Sharing</i> - 2G. . . . .	39
3.6	Tráfego com e sem RAN <i>Sharing</i> - 4G. . . . .	40
3.7	Consumo Rádio com e sem RAN <i>Sharing</i> - 4G. . . . .	40
3.8	Esquema da funcionalidade <i>Broadcast Control Channel</i> (BCCH) <i>Power Saving</i> . . . . .	41
3.9	Poupança energética através da <i>feature</i> 2G - BCCH <i>Power Saving</i> . . . . .	42

3.10	Esquema da funcionalidade <i>Micro Sleep</i> . . . . .	42
3.11	Esquema da funcionalidade <i>Cell Sleep Mode</i> . . . . .	43
3.12	Poupança energética através das <i>features</i> 4G - <i>Micro Sleep</i> e <i>Sleep Mode</i> . . . . .	43
4.1	Equilíbrio pretendido com a sustentabilidade. . . . .	46
4.2	Soluções de torres de madeira - Ecotelligent [45]. . . . .	48
4.3	Estrutura de Custo Total de Propriedade TCO (baseado em [34]). . . . .	50
4.4	Previsão CAPEX para novas implementações. . . . .	52
4.5	Tipos de Estrutura Tubulares (baseado em [48]). . . . .	53
4.6	Custo por tipo de estrutura tubular com uma dimensão de 30 metros. . . . .	55
4.7	Percentagem de custos de uma torre de telecomunicações não dependentes de altura nem distância à costa. . . . .	55
4.8	Componentes chave de uma escada de uma torre de telecomunicações. . . . .	56
4.9	Custos de uma torre - zona de vento A. . . . .	56
4.10	Custos de uma torre - zona de vento B. . . . .	57
4.11	Custo do OPEX. . . . .	58
4.12	Previsão OPEX médio por site. . . . .	59
4.13	Impacto médio da IA no consumo energético por ambiente. . . . .	61
4.14	Impacto médio da IA no consumo energético por tipo de estação. . . . .	61
4.15	Consumo energético anual médio por categorização por sistema de transmissão. . . . .	63
4.16	Consumo energético anual médio por sistema de transmissão - Contentor técnico. . . . .	63
4.17	Consumo energético anual médio por tipo de site - Contentor técnico. . . . .	64
4.18	Consumo energético <i>Direct Current</i> (DC) médio por sistema de transmissão - Agosto 2022. . . . .	65
4.19	Consumo energético DC médio - Agosto 2022 - Contentor técnico. . . . .	65
4.20	Diferença de consumo energético DC médio por tipo de site - Setembro 2021 vs Outubro 2022. . . . .	66
4.21	Diferença de consumo energético DC médio por categorização por sistema de transmissão - Setembro 2021 vs Outubro 2022. . . . .	66
4.22	Diferença média da rede elétrica por tipo de site - Outubro 2021 versus Setembro 2022. . . . .	67
4.23	Diferença média da rede elétrica por categorização por sistema de transmissão - Outubro 2021 versus Setembro 2022. . . . .	67
4.24	Percentagem de estações base com 5G por banda e tipo de ambiente. . . . .	68
4.25	Percentagem de municípios por tipo de ambiente. . . . .	68
4.26	Custo do Investimento - 1º cenário. . . . .	69
4.27	Custo do Investimento - 2º cenário. . . . .	70

# Lista de Tabelas

---

3.1	Coeficiente do modelo BBU 2G [36]. . . . .	33
3.2	Coeficientes do modelo BBU 3G [36]. . . . .	33
3.3	Coeficientes do modelo BBU 4G [36]. . . . .	33
3.4	Fator corretivo do consumo RRU por célula em cada tecnologia. . . . .	35
3.5	<i>Overhead</i> - Transferência de tráfego 3G → 4G por setor. . . . .	38
3.6	<i>Overhead</i> - Transferência de tráfego 3G → 4G por banda e setor. . . . .	38
4.1	Emissões de $CO_2e$ por material. . . . .	48
4.2	Peso volúmico de cada material [49]. . . . .	54
4.3	Duração típica dos equipamentos. . . . .	58
4.4	Taxas de inflação [51, 52]. . . . .	60
4.5	Poupanças adquiridas através de funcionalidades. . . . .	62
4.6	Redução de custos através de funcionalidades. . . . .	62
4.7	Custo da implementação SON e IA. . . . .	69



# Acrónimos

---

<b>2G</b>	Segunda Geração	<b>BSS</b>	<i>Base Station Subsystem</i>
<b>3G</b>	Terceira Geração	<b>BTS</b>	<i>Base Transceiver Station</i>
<b>3GPP</b>	<i>Third Generation Partnership Project</i>	<b>CAPEX</b>	<i>Capital Expenditure</i>
<b>4G</b>	Quarta Geração	<b>CCCH</b>	<i>Common Control Channel</i>
<b>5G</b>	Quinta Geração	<b>CCO</b>	<i>Coverage and Capacity Optimization</i>
<b>5GC</b>	<i>5G Core</i>	<b>CCH</b>	<i>Control Channel</i>
<b>AAS</b>	<i>Active Antenna System</i>	<b>CE</b>	<i>Channel Element</i>
<b>AAU</b>	<i>Active Antenna Unit</i>	<b>CPRI</b>	<i>Common Public Radio Interfaces</i>
<b>AC</b>	<i>Alternating Current</i>	<b>CS</b>	<i>Circuit Switched</i>
<b>ADN</b>	<i>Ácido desoxirribonucleico</i>	<b>CSFB</b>	<i>Circuit Switched Fallback</i>
<b>AGCH</b>	<i>Access Grant Channel</i>	<b>CU</b>	<i>Central Unit</i>
<b>AIC</b>	<i>Akaike Information Criterion</i>	<b>DAS</b>	<i>Distributed Antenna System</i>
<b>AI4GREEN</b>	<i>Artificial Intelligence for Green Networks</i>	<b>DA2GC</b>	<i>Direct Air-to-Ground Communications</i>
<b>ANACOM</b>	Autoridade Nacional de Comunicações	<b>DC</b>	<i>Direct Current</i>
<b>ANR</b>	<i>Automatic Neighbour Relation</i>	<b>DCCH</b>	<i>Dedicated Control Channel</i>
<b>ASR</b>	<i>Aggregation Services Routers</i>	<b>DL</b>	<i>Downlink</i>
<b>AVAC</b>	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado	<b>DTX</b>	<i>Discontinuous Transmission</i>
<b>AUC</b>	<i>Authentication Center</i>	<b>DU</b>	<i>Distributed Unit</i>
<b>BBU</b>	<i>Baseband Unit</i>	<b>DUG</b>	<i>Digital Unit for GSM</i>
<b>BCCH</b>	<i>Broadcast Control Channel</i>	<b>DUS</b>	<i>Multi-standard Digital Unit</i>
<b>BCH</b>	<i>Broadcast Channels</i>	<b>DUW</b>	<i>Digital Unit for WCDMA</i>
<b>BSC</b>	<i>Base Station Controller</i>	<b>D2D</b>	<i>Device-to-Device</i>
<b>BSIC</b>	<i>Base Station Identity Code</i>	<b>EB</b>	<i>Estação Base</i>
		<b>ECGI</b>	<i>E-UTRAN Cell Global Identifier</i>
		<b>EDGE</b>	<i>Enhanced Data Rates For GSM</i>

	<i>Evolution</i>	<b>ISDN</b>	<i>Integrated Services Digital Network</i>
<b>EIR</b>	<i>Equipment Identity Register</i>	<b>ISO</b>	<i>International Organization for Standardization</i>
<b>eNB</b>	<i>Evolved NodeB</i>	<b>IT</b>	<i>Instituto de Telecomunicações</i>
<b>eMBB</b>	<i>enhanced Mobile Broadband</i>	<b>IV</b>	<i>Infravermelha</i>
<b>EPC</b>	<i>Evolved Packet Core</i>	<b>LRT</b>	<i>Likelihood Ratio Test</i>
<b>EPS</b>	<i>Evolved Packet Switched System</i>	<b>LTE</b>	<i>Long Term Evolution</i>
<b>E-UTRAN</b>	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>	<b>MGW</b>	<i>Media Gateway</i>
<b>FACCH</b>	<i>Fast Association Control Channel</i>	<b>MIMO</b>	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
<b>FCCH</b>	<i>Frequency Correction Channel</i>	<b>ML</b>	<i>Machine Learning</i>
<b>FDD</b>	<i>Frequency Division Duplex</i>	<b>MLB</b>	<i>Mobility Load Balancing</i>
<b>FSO</b>	<i>Free Space Optics</i>	<b>MME</b>	<i>Mobility Management Entity</i>
<b>GBT</b>	<i>Ground Based Tower</i>	<b>mMIMO</b>	<i>massive Multiple-Input Multiple-Output</i>
<b>gNB</b>	<i>Next Generation NodeB</i>	<b>mMTC</b>	<i>massive Machine Type Communications</i>
<b>gNB-CU</b>	<i>gNB Central Unit</i>	<b>MNO</b>	<i>Mobile Network Operator</i>
<b>gNB-DU</b>	<i>gNB Distributed Unit</i>	<b>MOCN</b>	<i>Multi-Operator Core Network</i>
<b>GGSN</b>	<i>Gateway GPRS Support Node</i>	<b>MORAN</b>	<i>Multi-Operator Radio Access Network</i>
<b>GMSC</b>	<i>Gateway Mobile Switching Center</i>	<b>MR-DC</b>	<i>Multi-Radio Dual Connectivity</i>
<b>GPRS</b>	<i>General Packet Radio Services</i>	<b>MSC</b>	<i>Mobile Switching Center</i>
<b>GSM</b>	<i>Global System for Mobile Communications</i>	<b>NCRT</b>	<i>Neighbour Cell Relation Table</i>
<b>GSMA</b>	<i>Groupe Speciale Mobile Association</i>	<b>NMS</b>	<i>Network and Management System</i>
<b>HLR</b>	<i>Home Location Register</i>	<b>NR</b>	<i>New Radio</i>
<b>HSDPA</b>	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>	<b>NSA</b>	<i>Non-Stand Alone</i>
<b>HSS</b>	<i>Home Subscriber Server</i>	<b>NSS</b>	<i>Network Switching Subsystem</i>
<b>HSUPA</b>	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>	<b>OBW</b>	<i>Occupied Bandwidth</i>
<b>KPI</b>	<i>Key Performance Indicator</i>	<b>ODF</b>	<i>Optical Distribution Frame</i>
<b>IA</b>	<i>Inteligência Artificial</i>	<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
<b>IBW</b>	<i>Instantaneous Bandwidth</i>	<b>OMC</b>	<i>Operations and Maintenance Center</i>
<b>IMS</b>	<i>IP Multimedia Subsystem</i>	<b>OPEX</b>	<i>Operational Expenditure</i>
<b>IMT</b>	<i>International Mobile Telecommunications</i>	<b>OSS</b>	<i>Operations and Support System</i>
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol</i>		

<b>O&amp;M</b>	<i>Operations and Maintenance</i>	<b>SACCH</b>	<i>Slow Associated Control Channel</i>
<b>PCI</b>	<i>Physical Cell ID</i>	<b>SCH</b>	<i>Synchronization Channel</i>
<b>PCH</b>	<i>Paging Channel</i>	<b>SDCCH</b>	<i>Standalone Dedicated Control Channel</i>
<b>PCRF</b>	<i>Policy Control and Charging Rules Function</i>	<b>SGSN</b>	<i>Serving GPRS Support Node</i>
<b>PDSCH</b>	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>	<b>S-GW</b>	<i>Serving Gateway</i>
<b>P-GW</b>	<i>Packet Data Network Gateway</i>	<b>SIMO</b>	<i>Single-Input Multiple-Output</i>
<b>PS</b>	<i>Packet Switched</i>	<b>SON</b>	<i>Self-Optimizing Network</i>
<b>PRB</b>	<i>Physical Resource Block</i>	<b>SRAN</b>	<i>Single Radio Access Network</i>
<b>PSTN</b>	<i>Public Switched Telephone Network</i>	<b>TCH</b>	<i>Traffic Channel</i>
<b>QAM</b>	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>	<b>TCI</b>	<i>Target Cell Identifier</i>
<b>QoE</b>	<i>Qualidade de Experiência</i>	<b>TCO</b>	<i>Total Cost of Ownership</i>
<b>QoS</b>	<i>Qualidade de Serviço</i>	<b>TDD</b>	<i>Time Division Duplex</i>
<b>QPSK</b>	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>	<b>TDMA</b>	<i>Time Division Multiple Access</i>
<b>RAN</b>	<i>Radio Access Network</i>	<b>TMA</b>	<i>Tower Mounted Amplifier</i>
<b>RACH</b>	<i>Random Access Channel</i>	<b>TPAs</b>	<i>Terminais de Pagamento Automático</i>
<b>RAT</b>	<i>Radio Access Technology</i>	<b>TRX</b>	<i>Transceiver</i>
<b>RF</b>	<i>Radiofrequência</i>	<b>UE</b>	<i>User Equipment</i>
<b>RNC</b>	<i>Radio Network Controller</i>	<b>UL</b>	<i>Uplink</i>
<b>RRH</b>	<i>Remote Radio Head</i>	<b>UMTS</b>	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
<b>RRU</b>	<i>Remote Radio Unit</i>	<b>URLLC</b>	<i>Ultra Reliable Low Latency Communication</i>
<b>RRUS</b>	<i>Remote Radio Unit all Standards</i>	<b>UV</b>	<i>Ultravioleta</i>
<b>RRUW</b>	<i>Remote Radio Unit for WCDMA</i>	<b>VLR</b>	<i>Visitor Location Register</i>
<b>RTT</b>	<i>Rooftop Tower</i>	<b>VoLTE</b>	<i>Voice over LTE</i>
<b>RTT</b>	<i>Round Trip Time</i>	<b>WCDMA</b>	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
<b>RUS</b>	<i>Radio Unit all Standards</i>	<b>WDM</b>	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
<b>SA</b>	<i>Stand Alone</i>		



# Lista de Símbolos

---

$\epsilon$	Resíduos do modelo
$\gamma$	Peso volúmico
$\rho$	Densidade
$b_i$	Coefficientes de efeito aleatório
$\beta_i$	Coefficientes de efeito fixo
$\sigma_e$	Desvio padrão residual
$\phi_{base}$	Diâmetro do poste da base da torre
$\Delta\phi$	Espessura do material do poste da torre
$C_{Bandwidth}$	Custo do espetro
$C_{Cabos}$	Custo dos cabos de fibra ótica, <i>feeders</i> e <i>jumpers</i>
$C_{CAPEX_i}$	Custo do CAPEX
$C_{Decomm}$	Custo de desmantelamento
$C_{Maintenance}$	Custo da manutenção
$C_{MI}$	Custo de investimento em manutenção
$C_{Network}$	Custos do <i>Operations and Support System</i> (OSS)
$C_{OPEX_i}$	Custo do OPEX
$C_{Installation_{equip}}$	Custo da instalação dos equipamentos do operador
$C_{Installation_{TowerCo}}$	Custo da instalação da torre
$C_{Power\ Consumption}$	Custo de energia
$C_{Radio\ equip}$	Custo do equipamento rádio e de banda base
$C_{Site\ Lease}$	Custos de aluguer
$C_{Tower\ add-ons}$	Custo de diversos constituintes de uma torre de telecomunicações móveis (ex: para-raios, fundação, plataforma de trabalho, etc.)
$C_{fuste}$	Custo do fuste da torre de telecomunicações móveis
$C_{Tx\ equip}$	Custo do equipamento de transmissão
$C_{wages}$	Despesas com colaboradores
$d$	Depreciação anual do ativo

$FC$	Fator Corretivo para calibração do modelo de previsão de consumo energético
$F_{Micro\_Sleep}$	<i>Feature Micro-Sleep</i> de poupança energética 4G
$F_{RF\_OFF}$	<i>Feature RF Shutdown</i> de poupança energética 4G
$F_{Sleep}$	<i>Feature Sleep Mode</i> de poupança energética
$g$	Aceleração gravítica
$h$	Altura
$m$	Massa
$N_{Cells}$	Número de células ativas 4G
$N_{CE}$	Número de <i>Channel Elements</i> 3G
$N_{BS}$	Número de Estações Base
$N_{BS_{exit}}$	Número de estações base desmanteladas
$New_{BS}_i$	Número de novas Estações Base
$N_{Preventive\ Maintenance}$	Número de estações base onde foi efetuada manutenção preventiva
$OPEX_{Decomm}$	Despesas de desmantelamento
$OPEX_{Main\ expenses}$	Principais despesas referentes a custos operacionais
$P_{2G}$	Potência consumida pelos equipamentos 2G
$P_{3G}$	Potência consumida pelos equipamentos 3G
$P_{2G/3G}$	Potência consumida pelos equipamentos 2G/3G
$P_{4G}$	Potência consumida pelos equipamentos 4G
$P_{BBU}$	Potência consumida pela unidade de processamento de banda base
$P_{DC}$	Potência consumida em DC
$P_{RRU}$	Potência consumida pela unidade rádio
$P_{Tx}$	Potência consumida pelos equipamentos de transmissão
$s$	Declive
$s_n$	Custo indicativo do material (ex: aço)
$T_{CS\_2G}$	Tráfego de voz 2G
$T_{PS\_2G}$	Tráfego de dados 2G
$T_{CS\_3G}$	Tráfego de voz 3G
$T_{PS\_R99}$	Tráfego de dados 3G
$T_{HSDPA}$	Tráfego de dados <i>High Speed Downlink Packet Access</i> (HSDPA)
$T_{4G}$	Tráfego de dados 4G
$V$	Volume
$V_{fuste}$	Volume do fuste de uma torre

# 1

## Introdução

---

1.1	Motivação . . . . .	4
1.2	Objetivos . . . . .	5
1.3	Estrutura do documento . . . . .	5

## 1.1 Motivação

Com a evolução das redes móveis e consequente aumento da quantidade de dispositivos em rede, o consumo energético tem vindo a incrementar, o que acresce a preocupação quanto à eficiência energética. A maior parte do consumo energético de uma Estação Base (EB), incluindo fontes de alimentação e sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC), ocorre em equipamentos rádio. Os equipamentos de *Radiofrequência* (RF), entre os quais estão amplificadores de potência e *transceivers*, perfazem tipicamente 65% do consumo energético de uma EB. Por sua vez, o ar condicionado tem um peso de cerca de 17.5% dos gastos, as *Baseband Unit* (BBU) responsáveis pelo processamento de sinal consomem 10% e, por fim, as fontes de alimentação (conversores *Alternating Current* (AC)/*Direct Current* (DC)) 7.5%, [1, 2].

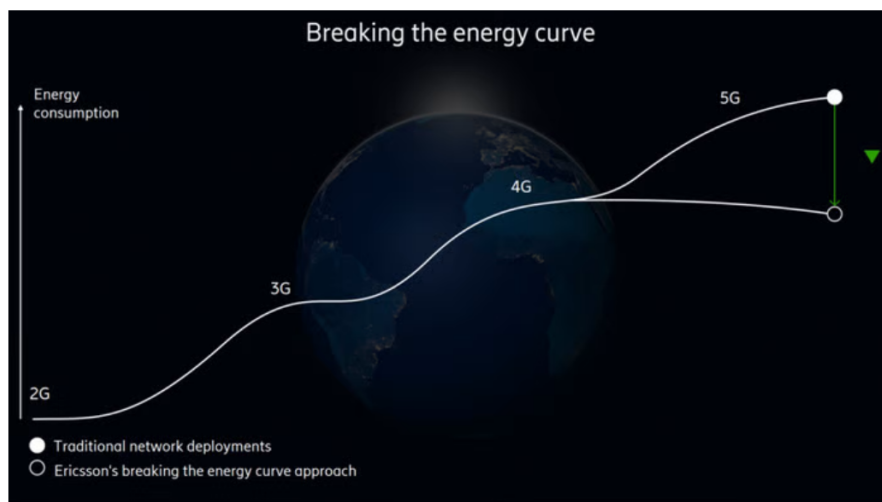


Figura 1.1: Evolução do consumo energético com o surgimento de novas tecnologias [3].

A indústria de telecomunicações, ciente da importância da melhoria da eficiência energética, levou evidentemente isso em consideração no desenvolvimento da mais recente tecnologia de comunicações móveis, para quebrar a curva ascendente de consumo energético que ocorre sempre que uma nova tecnologia de redes móveis surge. A Figura 1.1 apresenta o crescimento do consumo da energia nas diferentes tecnologias, representando a visão do fabricante de equipamentos Ericsson, que pretende quebrar o crescimento tendencial ao utilizar *softwares* de poupança de energia nos equipamentos de rádio, contribuindo, deste modo, para que os *Mobile Network Operators* (MNOs) reduzam significativamente o consumo de energia.

Esta redução diminui, por consequência, os custos operacionais das empresas contribuindo também para a sustentabilidade, tanto a nível económico como ambiental, impactando, por consequência, a sociedade.

## 1.2 Objetivos

O consumo energético é cada vez mais uma preocupação global, tornando-se numa temática que tem impulsionado a investigação, com o intuito de serem encontradas soluções mais eficientes.

Nesse sentido, esta dissertação tem como objetivo a realização de um estudo para uma redução dos custos operacionais, através da poupança energética. A implementação de algoritmos de otimização é uma das soluções chave para a redução de consumo energético que, não só é importante para reduzir os custos empresariais, como para reduzir as emissões de gases de efeito de estufa.

Este documento apresenta uma análise de custos de construção e operação de uma EB, bem como o investimento em funcionalidades de poupança de energia. Engloba ainda etapas que permitem alcançar reduções energéticas: modernização de unidades rádio e de banda base, desativação do 3G, a partilha de equipamento entre operadores (antenas, RRUs e BBUs), assim como ativação de funcionalidades de poupança energética ao nível da tecnologia.

Importa mencionar que, existem diversos tipos de infraestrutura de telecomunicações, podendo ser uma torre (*Ground Based Tower* (GBT)), *rooftop* (*Rooftop Tower* (RTT)), *Distributed Antenna System* (DAS), ou repetidor de radiofrequências (repetidor RF). Este trabalho foca-se em GBT e RTT, por representarem a grande fatia do mercado (cerca de 53% e 45%, respetivamente. Dados provenientes de uma empresa detentora de infraestrutura de telecomunicações).

Uma análise de custos deve incluir um Custo Total de Propriedade (TCO), que é constituído por despesas de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX). Deste modo, é interessante analisar o custo da implementação de uma EB e custos operacionais de detenção da mesma. Outra finalidade tem a ver com o impacto na sustentabilidade, podendo ser complementado com um modelo de negócio de poupanças energéticas e automação.

Como já mencionado, o tema da redução de consumo energético é de extrema importância, seja pela poupança a nível financeiro, como ambiental, através da redução de gases de efeito de estufa provenientes da consequência das operações de uma EB.

O estudo tem ainda como objetivo explorar o consumo de equipamentos da estação base, nomeadamente, *Baseband Unit* (BBU) e *Remote Radio Unit* (RRU), tendo sido analisado para três gerações de tecnologias de redes móveis: 2G, 3G e 4G.

De referir que esta tese foi realizada em parceria com a CELFINET a CYIENT Company, empresa portuguesa de consultoria em telecomunicações adquirida pela multinacional tecnológica CYIENT, e contou com a parceria de uma empresa de infraestruturas de telecomunicações.

## 1.3 Estrutura do documento

O documento encontra-se dividido em cinco capítulos, sendo o primeiro uma introdução ao tema, explicando a motivação e objetivos do trabalho.

O segundo capítulo apresenta o estado da arte do tema em estudo, introduzindo as tecnologias 2G, 3G, 4G, 5G, configuração da estação base, indicadores de performance, técnicas de monitorização e funcionalidades de consumo energético, assim como *Machine Learning* (ML) aplicado ao mesmo.

Passa ainda possíveis modernizações em equipamentos BBUs e RRUs, partilha de infraestrutura de rede e custo total de propriedade.

Na terceira secção debate-se o modelo de previsão de consumo energético utilizado e respetivo fator corretivo desenvolvido. Posteriormente, e recorrendo-se ao modelo mencionado considera-se a modernização de BBUs e RRUs e desativação do 3G. Avalia-se também o benefício proveniente do RAN *sharing* em termos de poupança energética e, por fim, consideram-se ainda as poupanças energéticas adquiridas via funcionalidades para esse fim. Por conseguinte, o capítulo é fechado com uma análise preliminar das alterações propostas que visam reduzir o consumo energético de uma estação base.

O quarto capítulo aborda os três pilares da sustentabilidade: ambiente, sociedade e economia. Seguindo-se o custo total de propriedade estando dividido em CAPEX, OPEX e um caso de uso de inteligência artificial. Por conseguinte, são apresentadas análises do consumo energético necessários para manter o negócio em estudo a funcionar. A secção fecha com uma visão da implementação do 5G nesse negócio e com casos de uso dos custos subsequentes do investimento em SON.

# 2

## Conceitos Fundamentais

---

<b>2.1</b>	<b>Redes de Acesso Rádio</b> . . . . .	<b>8</b>
2.1.1	2G - <i>Global System for Mobile Communications</i> (GSM) . . . . .	8
2.1.2	3G - <i>Universal Mobile Telecommunications System</i> (UMTS) . . . . .	10
2.1.3	4G - <i>Long Term Evolution</i> (LTE) . . . . .	11
2.1.4	5G - <i>New Radio</i> (NR) . . . . .	14
2.1.5	Configuração da Estação Base . . . . .	18
<b>2.2</b>	<b>Indicadores de Performance</b> . . . . .	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Monitorização de Consumo Energético</b> . . . . .	<b>20</b>
<b>2.4</b>	<b>Funcionalidades de Poupança Energética</b> . . . . .	<b>21</b>
<b>2.5</b>	<b><i>Machine Learning</i> Aplicado ao Consumo de Energia</b> . . . . .	<b>24</b>
<b>2.6</b>	<b>Modernização de Estação Base</b> . . . . .	<b>24</b>
2.6.1	Modernização de BBUs . . . . .	25
2.6.2	Modernização de RRUs . . . . .	26
<b>2.7</b>	<b>Partilha de Infraestrutura de Rede - <i>RAN Sharing</i></b> . . . . .	<b>27</b>
<b>2.8</b>	<b>Custo Total de Propriedade - TCO</b> . . . . .	<b>29</b>

## 2.1 Redes de Acesso Rádio

Este trabalho foca-se nas tecnologias implementadas, a nível global, à data deste documento, o *Global System for Mobile Communications* (GSM), *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS), *Long Term Evolution* (LTE) e o *New Radio* (NR). A subsecção em questão apresenta um breve e sucinto resumo das tecnologias mencionadas, assim como os principais elementos de uma EB e respetiva função.

### 2.1.1 2G - *Global System for Mobile Communications* (GSM)

A tecnologia 2G é ainda hoje, 30 anos depois, uma tecnologia amplamente utilizada, existindo equipamentos de grande importância que só funcionam com esta tecnologia, nomeadamente Terminais de Pagamento Automático (TPAs).

O GSM funciona apenas *Circuit Switched* (CS), sendo posteriormente lançados o *General Packet Radio Services* (GPRS) e o *Enhanced Data Rates For GSM Evolution* (EDGE) que funcionam em *Packet Switched* (PS), suportando cerca de 150kbps e 384kbps, respetivamente, em condições ótimas [4].

#### Arquitetura

A rede GSM é constituída por três subsistemas: *Base Station Subsystem* (BSS), *Network Switching Subsystem* (NSS) e *Operations and Support System* (OSS). A BSS é composta pelos *User Equipment* (UE), Estação Base (EB), que em 2G é denominada *Base Transceiver Station* (BTS), e pelo *Base Station Controller* (BSC). Já a rede core possui o *Gateway Mobile Switching Center* (GMSC) como ligação com as redes convencionais através do *Mobile Switching Center* (MSC), como se pode constatar através da Figura 2.1, e as bases de dados *Equipment Identity Register* (EIR), *Authentication Center* (AUC), *Home Location Register* (HLR) e *Visitor Location Register* (VLR).

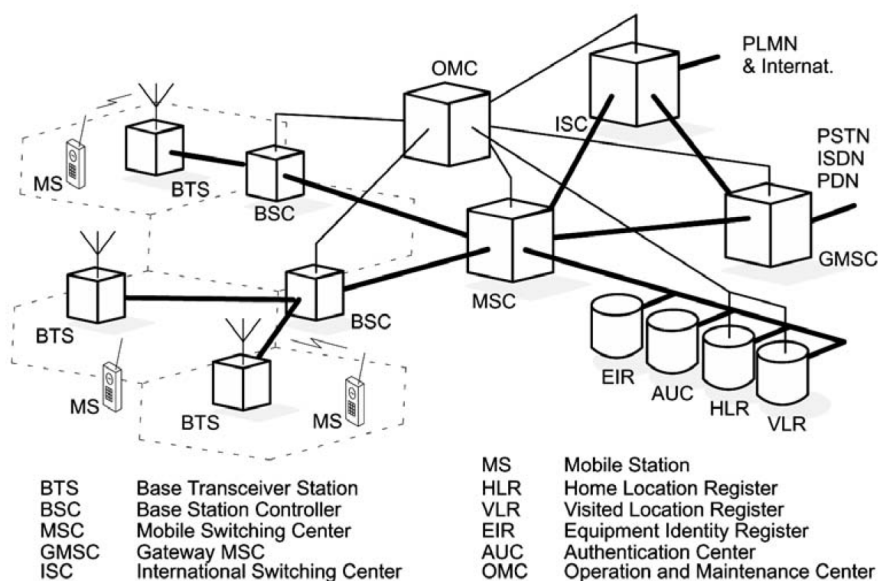


Figura 2.1: Arquitetura da rede 2G [5].

O OSS é a ligação entre o BSS e o NSS, sendo composto pelo *Operations and Maintenance Center* (OMC) fazendo então toda a gestão, recolha de contadores para se efetuarem estatísticas para a análise de performance e funcionamento da EB, alarmística e controlo de tráfego da rede. De referir que o NSS age como uma interface entre a rede GSM e as redes públicas *Public Switched Telephone Network* (PSTN)/*Integrated Services Digital Network* (ISDN).

Indo mais ao detalhe, a rede *core* é constituída pelo GMSC que é o ponto de entrada, a interface de ligação com as redes convencionais (fixas) e pelo MSC. Os restantes elementos são bases de dados. O VLR é uma base de dados local que está associada a cada MSC, o HLR integra a informação dos assinantes, o EIR agrega os equipamentos que circulam na rede e o AUC gera as chaves de autenticação e de encriptação da rede que ao serem geradas são armazenadas ao nível do MSC. Importa ainda referir que a estrutura da rede GSM é em árvore (milhares de terminais móveis para uma EB, muitas EB para um BSC e vários BSC para um MSC).

A transmissão e receção que ocorre entre uma estação base e o utilizador é proveniente de TRXs.

### Funcionamento dos TRXs

Este tópico serve como introdução ao funcionamento de um TRX, por forma a auxiliar na compreensão de uma funcionalidade de poupança energética explicada na subsecção 2.4.

TRXs são unidades responsáveis pela transmissão e receção da portadora de RF, sendo cada TRX um par de portadoras, uma para *Downlink* (DL) e outra para *Uplink* (UL). Cada TRX é constituído por 8 *timeslots* de 577  $\mu$ s cada, perfazendo 4.615 ms. Quando se adiciona um par de portadoras, adiciona-se mais 8 *timeslots*, como se pode observar na Figura 2.2.

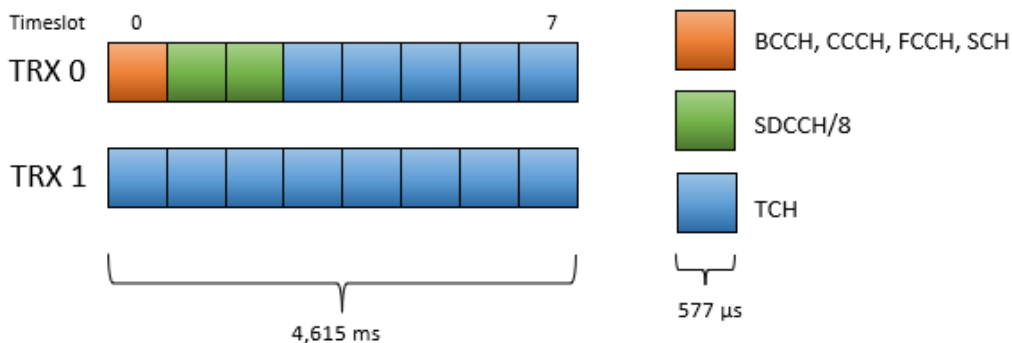


Figura 2.2: Estrutura de TRX.

Existem 2 tipos de canais lógicos em GSM: *Traffic Channel* (TCH) e *Control Channel* (CCH), sendo o segundo composto por *Broadcast Channels* (BCH), *Common Control Channel* (CCCH) e *Dedicated Control Channel* (DCCH). Os BCH são canais que apenas funcionam em *downlink*, sendo constituídos por: *Frequency Correction Channel* (FCCH), onde ocorre correção de frequência do terminal móvel, *Synchronization Channel* (SCH) que contém informação acerca do número da *frame* *Time Division Multiple Access* (TDMA) e código de identificação da EB denominado *Base Station Identity Code* (BSIC) e, por fim, *Broadcast Control Channel* (BCCH) que faz *broadcast* de informação específica da célula que é lida pelo terminal móvel.

Já os CCCH são compostos por *Paging Channel* (PCH), *Random Access Channel* (RACH) e *Access Grant Channel* (AGCH). O PCH é utilizado para localizar o terminal móvel, funcionando apenas em *downlink*, o RACH é utilizado pelo terminal móvel para requerer alocação para *Standalone Dedicated Control Channel* (SDCCH), tanto como resposta a *paging* ou acesso à originação/registo de chamadas, *location update*, etc., e o AGCH para alocar SDCCH para um terminal móvel, funcionando então em *downlink*. Por fim, os DCCH são formados por SDCCH que é usado para sinalizar durante o *call setup* ou registo, funcionando em *downlink* e *uplink*, *Slow Associated Control Channel* (SACCH) que é um canal de controlo associado a TCH ou a SDCCH, onde em *uplink* são enviados relatórios de medidas e em *downlink* *Timing Advance* e ordens de potência. O *Fast Association Control Channel* (FACCH) compõe os DCCH, sendo um canal associado com um TCH, funcionando, deste modo, em *downlink* e *uplink*.

### 2.1.2 3G - Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)

Com o aparecimento da rede 3G surgiu um novo mundo no que toca a velocidade de Internet móvel, pois a rede UMTS é em CS e PS, ao contrário do 2G que em GSM funciona apenas CS. No entanto, em EDGE, apesar de ser possível um volume muito elevado de dados, a transferência de pacotes na interface *Um* comporta-se como uma chamada *Circuit Switched* (CS). Além disso, os padrões de desenvolvimento das redes até à Segunda Geração (2G) eram distintos para diferentes partes do mundo, então foi decidido criar-se uma rede que fornece serviços independentes da plataforma tecnológica e cujos padrões de concepção de rede são os mesmos a nível mundial. Deste modo, nasceu o 3G [4].

#### Arquitetura

Na arquitetura 3G o BSS passou a ser denominado de RAN, sendo o controlador da EB o *Radio Network Controller* (RNC), ao invés do BSC do 2G. A estação base é designada *NodeB*. O NSS passou a ter a designação de rede *core* e o OSS de *Network and Management System* (NMS).

A grande diferença a nível da rede acesso rádio é a ligação dos RNCs, pois em GSM não havia ligação entre BSCs. O intuito é facilitar o processo de *soft handover*, que ocorre pela interface *Iur*, como se pode observar na Figura 2.3.

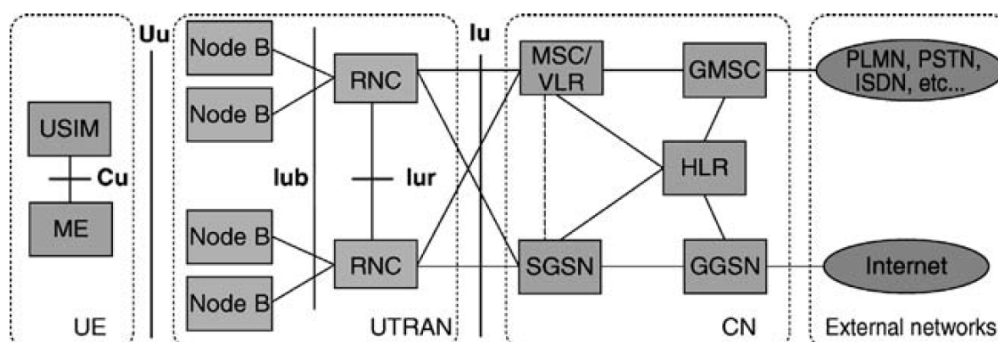


Figura 2.3: Arquitetura da rede 3G [6].

No que diz respeito aos RNCs, existe um controlador que é o *Master*, isto aparece porque os controladores passam a estar ligados, e havendo uma ligação de sinalização é sempre necessário que um controlador seja dominante, isto tem a ver com a forma como a sinalização flui ao nível do processo de *soft handover*.

Outra diferença para GSM é precisamente em UMTS existir *soft handover*, o *handover* em GSM era o chamado *hard handover*, ou seja, há uma transferência abrupta dos recursos rádio de uma EB para a outra, no caso do *soft handover* o terminal tem a possibilidade de estabelecer múltiplas ligações com várias EBs, atualizando o *active set* que é, no fundo, um conjunto de posições de memória onde armazena as localizações ou as identificações das EBs. A estrutura RAN mantém-se como uma estrutura em árvore.

Relativamente aos restantes elementos constituintes da arquitetura 3G, o VLR passou a estar incorporado no MSC e, como se trata de uma tecnologia que funciona tanto em comutação de circuitos (CS) como em comutação de pacotes (PS), acresceu a necessidade de se ter nós de suporte com a necessidade de fazer esta separação. O *Serving GPRS Support Node* (SGSN) é o dispositivo cujas funções equivalem ao MSC/VLR, porém para conexões PS. Já o *Gateway GPRS Support Node* (GGSN) é o equivalente ao GMSC para o domínio PS.

Apesar de não estar presente na Figura 2.3, entre o MSC/VLR e o SGSN encontra-se a base de dados EIR e conectado ao HLR a base de dados de autenticação AUC. O EIR é a base de dados em que o operador armazena a lista dos equipamentos que são permitidos.

A *release 4* veio flexibilizar a rede *core*, anteriormente existia a manutenção da rede *core* de comutadores GSM, uns *routers*, e cada um desses nós fazia a sinalização no plano do utilizador e no plano de controlo separadamente. Tendo em conta o funcionamento destes sistemas em que a comutação de pacotes se intensificou, rapidamente percebeu-se que era útil separar o plano de controlo do plano de utilizador, propondo-se na *release 4* uma nova configuração da rede *core*. Assim, o MSC/VLR foi dividido em MSC e *Media Gateway* (MGW), e o GMSC dividido em GMSC e MGW. Posteriormente, na *release 5* foi incluindo o *IP Multimedia Subsystem* (IMS), que veio flexibilizar o funcionamento da rede *core* ao nível de tarifário, do estabelecimento das conexões, do tratamento individualizado do perfil do utilizador, etc. O IMS permite uma abordagem padronizada para a oferta de serviços baseados em *Internet Protocol* (IP) através do domínio PS.

Importa referir que em *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) atinge 1.8 a 10 Mbps e *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA) até 4 Mbps [4].

### 2.1.3 4G - Long Term Evolution (LTE)

LTE é uma tecnologia desenhada para funcionar apenas em PS, conseqüentemente pelo protocolo IP, sendo assim uma rede mais fácil de implementar, manter e introduzir serviços, por exemplo de *streaming*. É ainda focado na utilização eficiente do espectro e redução da latência.

O LTE oferece benefícios importantes tanto para os operadores como para os consumidores. Um dos seus requisitos, em termos de performance e capacidade, é providenciar débitos de 100 Mbit/s em *downlink*, sendo possível alcançar velocidades acima de 200 Mbit/s. Além disso, os *Round Trip Times* (RTTs) devem ser inferiores a 10 ms. Quanto à simplicidade, a tecnologia 4G suporta tanto

*Frequency Division Duplex* (FDD) como *Time Division Duplex* (TDD), sendo que o FDD requer dois segmentos simétricos, um para *downlink* e outro para *uplink*, enquanto o TDD utiliza a mesma banda para os sentidos ascendente e descendente. A largura de banda pode variar entre dos 5 MHz aos 20 MHz [7].

## Arquitetura

A Figura 2.4 apresenta a arquitetura da tecnologia 4G, onde a RAN é designada por *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) e a rede *core* por *Evolved Packet Core* (EPC), formando assim o *Evolved Packet Switched System* (EPS). Os principais elementos de rede são o *Mobility Management Entity* (MME), *Serving Gateway* (S-GW), *Packet Data Network Gateway* (P-GW) e as bases de dados *Home Subscriber Server* (HSS) e *Policy Control and Charging Rules Function* (PCRF).

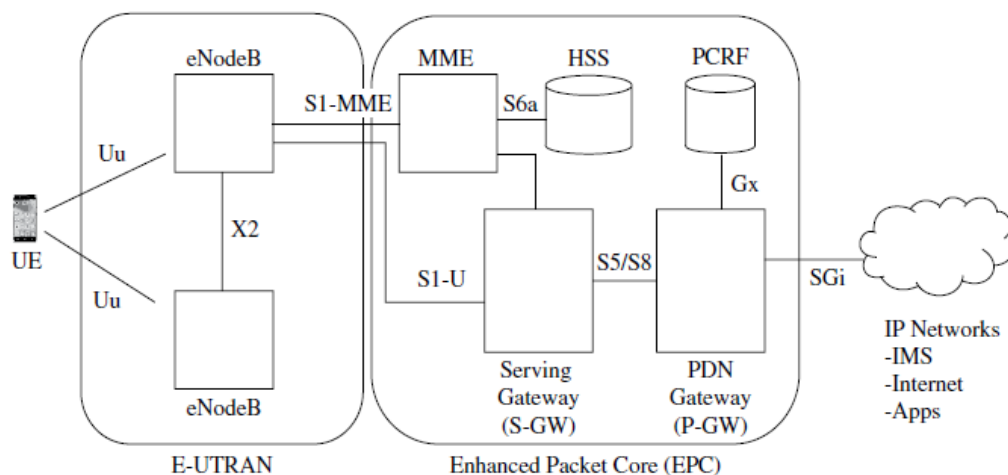


Figura 2.4: Arquitetura da rede LTE [4].

A E-UTRAN efetua a ligação entre os UE e os *Evolved NodeB* (eNB), havendo uma interface entre eNBs denominada *X2*, para facilitar o processo de *handover*. A interface *Uu* tem como objetivo conectar o UE à eNB. A interação com o EPC, ocorre na interface *S1* que tem como propósito transformar os serviços de voz e dados num serviço unicamente IP e, portanto, num serviço de comutação de pacotes. Por sua vez, os elementos constituintes do EPC possuem as seguintes funções ([8] [9] [10]):

- **Home Subscriber Server (HSS):** base de dados que contém as informações dos subscritores IMS (arquitetura especificada pelo 3GPP para suportar um conjunto de serviços multimédia sobre uma rede de comutação de pacotes), fornecendo-lhes autenticação em caso de registo e/ou de receção de chamada;
- **Mobility Management Entity (MME):** nó da rede responsável por todas as trocas de sinalização entre as EBs e a rede *core*, e entre os utilizadores e a rede *core*. É responsável por gerir as atribuições e conexões das *bearers*, encontra-se conectado ao HSS através da interface *S6a*, por onde solicita dados de subscrição e de autenticação. Está ainda ligado ao S-GW através da interface *S11*. Este elemento fornece também suporte ao *handover*, pois no caso da interface *X2* estar indisponível, o MME ajuda a efetuar o reencaminhamento das mensagens de *handover*. De notar que a interface *S1* é fundamental para estabelecer comunicação entre a rede *core* e o RAN;

- **Policy Control and Charging Rules Function (PCRF):** realiza a gestão das políticas de controlo e controla a tarifa de serviços de dados. Interage com o P-GW através da interface  $Gx$ , fornecendo a política de transferência denominada *Qualidade de Serviço* (QoS) e as regras de cobrança, sendo assim responsável pela tomada de decisão de pedidos multimédia. De notar que o PCRF foi originalmente concebido para ser utilizado pelos serviços IMS;
- **Packet Data Network Gateway (P-GW):** também conhecido por PDN-GW, é a ponte de ligação com a internet. Há operadores que o utilizam para interligarem *intranets* de grandes empresas através de túneis encriptados para oferecer diretamente aos seus colaboradores acesso às suas redes internas privadas;
- **Serving Gateway (S-GW):** responsável pela gestão dos túneis de dados dos utilizadores entre os eNBs na RAN e o P-GW. Tem ainda a função de conectar o E-UTRAN ao EPC através da interface  $S1-U$  e está conectado ao P-GW através das interfaces  $S5/S8$  por forma a efetuar a gestão dos serviços dos utilizadores.

## Transmissão de Dados

A tecnologia de 4G recorre à técnica *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), que transmite os dados sobre múltiplas portadoras de banda estreita de 180 kHz. Estas múltiplas portadoras correspondem a 12 sub-portadoras de 15 kHz, o que equivale a um *resource block*, ilustrado na Figura 2.5.

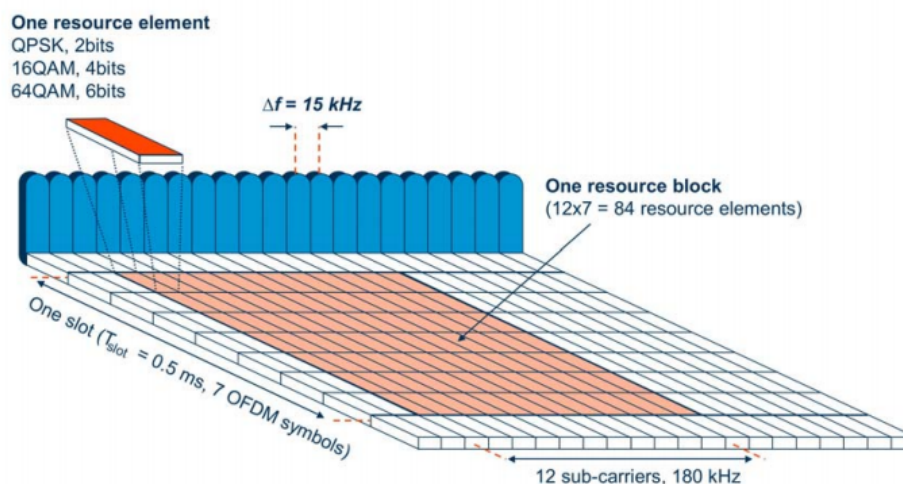


Figura 2.5: Alocação de recursos em LTE [7].

Uma vez que na Europa a tecnologia 4G está regulamentada para operar nas bandas dos 700, 800, 900, 1800, 2100 e 2600 MHz, um *resource block* foi desenhado com a duração de 1 ms, um valor próximo do tempo de coerência para a banda menos favorável (2.6 GHz). De notar que 1 ms é a duração de 2 *slots*, portanto 14 símbolos OFDM, já que 1 *slot* contém 7 símbolos [10].

## 2.1.4 5G - *New Radio* (NR)

Quando o LTE foi desenhado, o seu principal objetivo era o acesso à internet de alta velocidade [10], no entanto, as redes móveis atuais estão muito aquém dos objetivos e metas do 5G, por não possuírem as capacidades para corresponder aos novos desafios que estão a surgir, como por exemplo para suportar um sistema com requisitos tão rigorosos como os que serão necessários para os veículos autónomos.

Os principais pilares da tecnologia *New Radio* são: *enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *massive Machine Type Communications* (mMTC) e *Ultra Reliable Low Latency Communication* (URLLC). A eMBB tem como objetivo taxas de dados acima dos 10 Gbps, sendo mais consistentes e com capacidade mínima de 100 Mbps em qualquer lugar e 10.000 vezes mais capacidade de tráfego de que o LTE. O mMTC visa otimizar redes e dispositivos para conectividade com biliões de dispositivos de baixo custo e com bateria de longa duração. O último pilar (URLLC) pretende o desempenho com latência inferior a 1 ms com uma taxa de fiabilidade de 99,9999%. Os principais destaques da rede 5G, presentes na Figura 2.6, são [11], [12]:

- **Novo espectro electromagnético** - a tecnologia foi desenhada para operar entre os 400 MHz e os 90 GHz, sendo que as faixas mais baixas serão utilizadas para cobertura, e as mais elevadas para capacidade. O desenvolvimento inicial utiliza *Time Division Duplex* (TDD) entre os 2.5 e 5 GHz nas ondas centimétricas e de 24 a 39 GHz nas ondas milimétricas, e *Frequency Division Duplex* (FDD) abaixo dos 2.7 GHz;
- **massive Multiple-Input Multiple-Output (mMIMO)** - é uma das tecnologias mais promissoras da próxima geração de comunicações sem fios, já que tem o potencial de fornecer melhorias na eficiência espectral e energética. O *beamforming*, que pode aumentar consideravelmente a cobertura e eficiência espectral, é mais prático em altas frequências, já que a dimensão da antena é proporcional ao comprimento de onda, e o tamanho da antena torna-se mais pequeno a altas frequências, o que permite agregar mais elementos de antena, aumentando o grau de liberdade para dirigir os feixes;

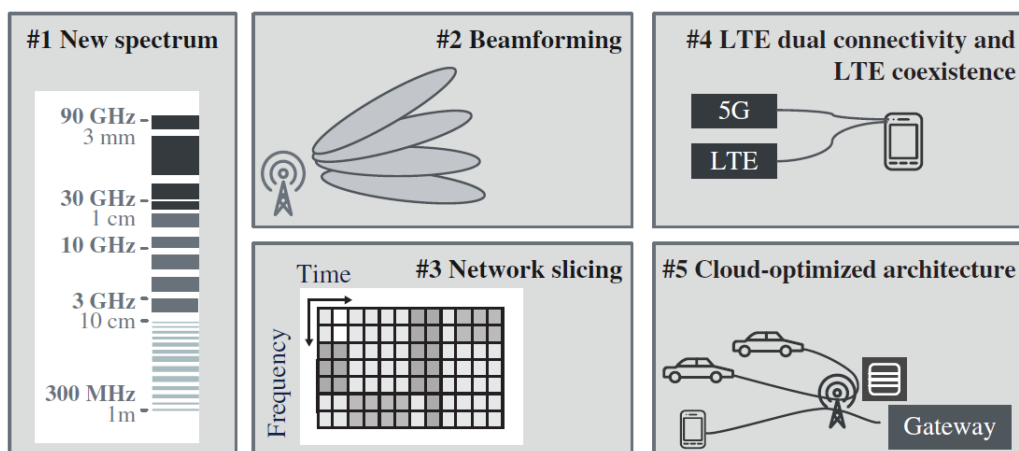


Figura 2.6: Principais destaques da tecnologia 5G [11].

- **Network slicing** - as camadas de protocolo no 5G necessitam de um desenho flexível, de modo a suportar diferentes casos de uso, diferentes faixas de frequência, e para maximizar a energia e eficiência espectral. Assim, a divisão (*slicing*) da rede criará segmentos de rede para diferentes serviços, dentro da mesma tecnologia 5G. Essa capacidade de divisão permite aos operadores suportarem diferentes casos de uso e clientes corporativos, sem que haja necessidade de terem redes dedicadas;
- **Coexistência de conectividade dupla e LTE** - numa primeira versão o 5G está ancorado ao LTE, logo é essencial a existência de cobertura 4G. Assim, o 5G foi também projetado para a coexistência com LTE, que viabiliza a partilha de espectro e simplifica a abolição das alocações de banda existentes no espectro de rádio, assim como a realocação mais eficiente do espectro em bandas menores, ou seja, alguns operadores desligam as suas redes legadas (2G/3G), enquanto outros as mantêm. O que permite esta coexistência denomina-se *spectrum refarming*. Um dispositivo 5G pode ter simultaneamente conexão 5G e 4G. Conetividade dupla pode fazer a introdução do 5G mais simples, aumentar os ritmos de transmissão do utilizador, e melhorar a fiabilidade;
- **Suporte para implementação na nuvem e edge computing** - A baixa latência requer que o conteúdo esteja mais perto do rádio, o que leva a fragmentação local e *edge computing*. As especificações 5G foram projetadas para suportar rádio na nuvem, definindo uma nova interface na rede rádio para dividir a funcionalidade entre um site de rádio frequência distribuído e o site de *edge cloud* centralizado. A escalabilidade trazida pela implementação de *radio cloud* requer que os benefícios da nuvem sejam trazidos para as redes rádio com arquitetura *edge cloud* de modo a minimizar a latência e, portanto, providenciar o caminho mais curto entre aplicações e servidores.

Importa ainda referir que o *New Radio* (NR) foi desenhado para uma utilização flexível de todo o espectro disponível, desde os 400 MHz aos 90 GHz incluindo as bandas licenciadas, partilhadas e sem licença [11].

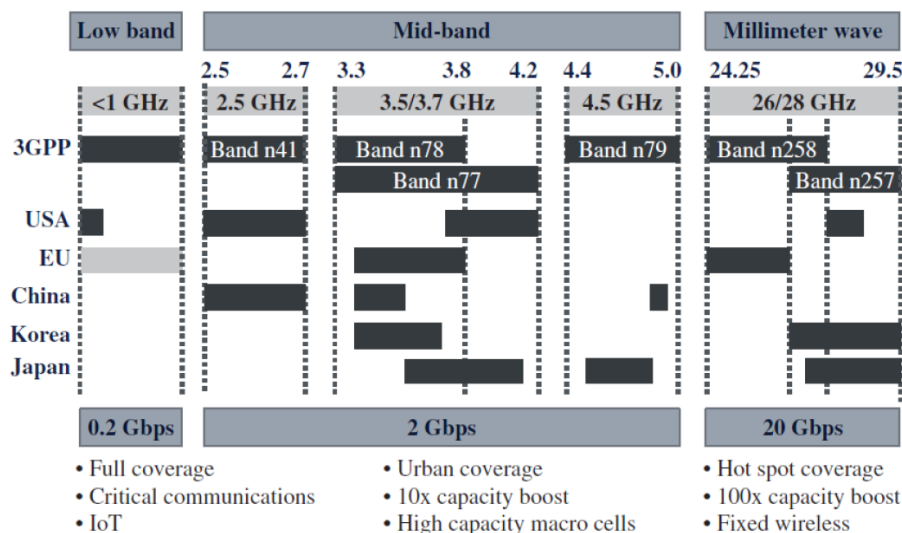


Figura 2.7: Diferentes bandas globais do espectro 5G [11].

Como se pode observar na Figura 2.7, as três principais opções do espectro são: 20 a 90 GHz, abaixo dos 6 GHz e abaixo de 1 GHz. A faixa das ondas milimétricas acima dos 20 GHz pode fornecer largura de banda acima dos 1-2 GHz, que pode aumentar o ritmo de transmissão até 5-20 Gbps para o eMBB. As ondas milimétricas são mais adequadas para uso local, como eventos e *hotspots*.

O espectro dos 2.5-5.0 GHz será utilizado para cobertura e capacidade em zonas urbanas, aproveitando as estações base existentes. Bandas abaixo dos 3 GHz serão necessárias para cobertura em zona rural, baixa latência, alta fiabilidade e alta taxa de penetração em zonas *indoor*. As bandas mais baixas poderão ser 700 MHz ou 900 MHz sendo que a faixa dos 900 MHz está ocupada com 2G e 3G.

## Arquitetura

A arquitetura do *New Radio* (NR) está descrita na Figura 2.8, a qual apresenta a ligação entre *Next Generation NodeB* (gNB), interligadas através da interface lógica *Xn-C*. Esta interface conecta as *gNB Central Unit* (gNB-CU) de cada gNB, permitindo assim a comunicação entre elas, estando as gNB ligadas ao *5G Core* (5GC) através da interface lógica *NG*. As EB possuem uma gNB-CU conectada a uma ou várias *gNB Distributed Unit* (gNB-DU) interligadas ao gNB-CU através da interface lógica *F1*. De notar que a gNB-DU está conectada apenas com a gNB-CU, no entanto, por questões de redundância, pode estar conectada a múltiplos gNB-CUs [13]. Assim, a comunicação entre *User Equipment* (UE) e gNB dá-se através da gNB-DU.

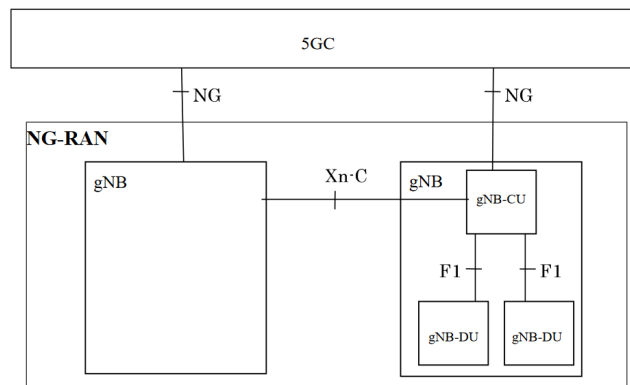


Figura 2.8: Arquitetura RAN da rede 5G [13].

A *Central Unit* (CU) pode ser um *hardware* dedicado ou um tipo de implementação de *radio-cloud*, e tem como objetivo lidar com camadas acima da camada física. Já a *Distributed Unit* (DU) está localizada na célula, juntamente com as antenas e unidades de *Radiofrequência* (RF). É expectável que venha lidar com o processamento mais crítico, que não tolera latências consideráveis para permitir o processamento fora da célula [11]. Posto isto, a CU e a DU podem ou não estar co-localizadas.

## Opções de Implementação

A Figura 2.9 apresenta quatro cenários de implementação da tecnologia NR, sendo estas as mais usadas à data, pois numa implementação de *Non-Stand Alone* (NSA), o *Multi-Radio Dual Connectivity* (MR-DC) fornece a um UE conectividade simultânea para dois nós RAN de gerações diferentes (gNB e eNB), e, no caso da opção 2 que é *Stand Alone* (SA), é a opção de implementação padrão de qualquer

arquitetura, sendo o implementado nas gerações legadas. Primeiramente as implementações estão ancoradas ao LTE já que é uma tecnologia amplamente implementada nos países mais desenvolvidos.

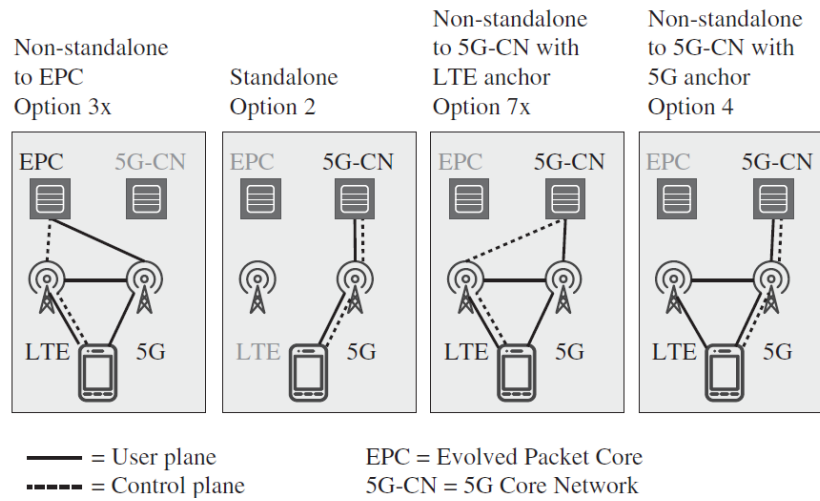


Figura 2.9: Principais opções de arquitetura [11].

É expectável que a segunda opção seja a última arquitetura a ser implementada, devido ao facto de ser completamente independente do 4G. A opção 3x utiliza o LTE para *user plane* e a tecnologia NR para *control plane* (gestão da interface, gestão de mobilidade, etc.). Já a opção 7x comporta-se exatamente como a opção 3x, porém está conetada à rede 5G Core (5GC) ao invés do EPC.

### Requisitos da Rede 5G

De modo a chegar aos seus casos de uso e aplicações, o 5G aumentou a exigência de uma variedade de capacidades, estando estas presentes na Figura 2.10. Pretende-se uma experiência do utilizador, *Qualidade de Experiência* (QoE), a nível do débito que atinja os 100 Mbit/s em toda a área de cobertura por dispositivo móvel. A nível de mobilidade, pretende-se uma velocidade máxima que alcance os 500 km/h. A mobilidade é definida como a velocidade máxima para um determinado QoS e taxa de transferência sem quebras entre nós de rádio, sendo que os nós podem pertencer a diferentes camadas e/ou tecnologias *Radio Access Technology* (RAT) [14].

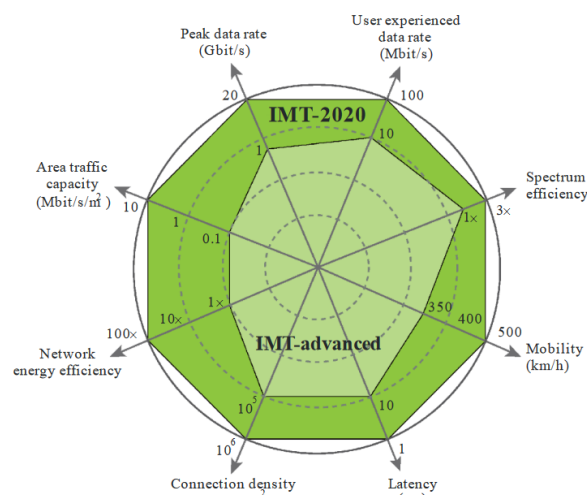


Figura 2.10: Requisitos da rede 5G [14].

O alvo das redes 5G para a latência é a redução para um décimo do valor projetado para o International Mobile Telecommunications (IMT)-*advanced* e a densidade de ligação, que é referente à quantidade total de dispositivos ligados por unidade de área, tem como alvo  $10^6$  dispositivos/km<sup>2</sup>. A eficiência energética da rede refere-se à quantidade de bits de informação transmitidos ou recebidos por um UE, por unidade de consumo de energia da RAN em *bit/Joule*. Por conseguinte, no dispositivo móvel, a eficiência energética diz respeito à quantidade de bits de informação por unidade de energia do consumo do módulo de comunicação (em *bit/Joule*). Por fim, os requisitos da tecnologia referem-se ainda ao débito binário por área num valor de 10 Mbit/s/m<sup>2</sup>, e a picos de taxa de dados de 20 Gbit/s por UE, em condições ideais.

### 2.1.5 Configuração da Estação Base

Existem diferentes configurações de estações base. De um modo geral, as estações bases tradicionais são compostas pelos seguintes equipamentos:

- **Contentor técnico** tipicamente designado *cabinet* onde constam baterias, controlo climático e BBU, tendo esta última como função efetuar o processamento de banda base;
- **Antenas** que recebem e radiam ondas rádio transformando energia elétrica em energia eletromagnética irradiada e vice-versa;
- **Tower Mounted Amplifier (TMA)** para amplificar o sinal *uplink*, aumentando-se assim a sensibilidade da EB;

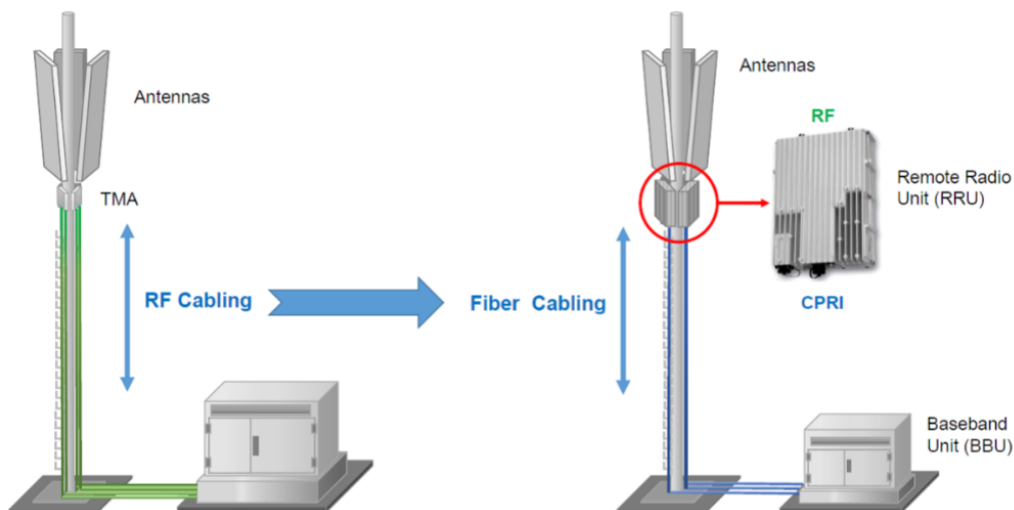


Figura 2.11: Evolução da estação base para o tipo distribuído [15].

A Figura 2.11 ilustra a evolução de uma estação base. Com respeito às estações mais recentes, estas apresentam RRUs que comunicam com a BBU através de *Common Public Radio Interfaces* (CPRI) [15]. De notar que se podem encontrar as ligações entre *Baseband Unit* (BBU) e topo da torre interligado por *feeders*, tipicamente designados por cabos de 7/8", como por *jumpers*, cabos de 1/2", ou por fibra ótica. Os *jumpers* são cabos mais flexíveis, sendo usados em situações onde a sua flexibilidade seja requerida para ligação entre o *feeder* e *cabinet* ou com as antenas, já que costumam estar a uma

distância de cerca de 30 cm, não constituindo grande perda de sinal. Por outro lado, os cabos de 7/8" são bastante inflexíveis e, quando usados, efetuam a ligação entre o contentor técnico e o TMA, sendo o local de toda a estação base onde há uma atenuação do sinal significativa, o que levou ao uso de fibras óticas ao invés de *feeders* pois apresentam muito menos perdas. De notar que seria impensável optar-se por uma implementação cuja ligação entre *cabinet* e topo da torre fosse efetuada com *jumpers*, uma vez que estes apresentam uma maior atenuação do sinal em relação aos cabos de 7/8" visto que a sua secção é menor. As estações base do tipo distribuído, apesar de não ser perceptível na Figura 2.11, tipicamente têm TMA pois este serve, como referido anteriormente, para amplificar o sinal *uplink* aumentando assim a sensibilidade da EB.

Importa mencionar que a implementação de *Remote Radio Head* (RRH), também denominado *Remote Radio Unit* (RRU), veio permitir o "abandono" da utilização de *feeders* e, por conseguinte, a utilização da fibra ótica, que reduz a perda por atenuação a níveis insignificantes. O RRU trouxe ainda uma menor confusão em termos de cabos e redução da dimensão do *cabinet*. Nesta implementação tem-se, ao invés de um *feeder* que parte da antena sendo conectado à parte rádio e consequentemente ao *backhaul*, um *jumper* ligado à antena que se conecta ao RRU e de seguida a um *link* ótico imediatamente seguido do *backhaul*. Este *link* ótico consiste num circuito ótico, sendo tipicamente uma junção de fibra ótica com a designada *dark fibre* que compreende-se como uma fibra ótica onde os impulsos de luz não estão a ser transmitidos, ou seja, que não está a ser utilizada para comunicar. Outras formas de *links* óticos podem ser através de *Free Space Optics* (FSO), ligações *single colour* sobre *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) e/ou conexões que recorrem a amplificadores óticos para compensar a atenuação em longas distâncias [16].

Existem ainda *Active Antenna Unit* (AAU) que consiste numa RRU com antena integrada. Esta solução tem como vantagem ocupar menos espaço que as restantes, além de ser mais discreta.

## 2.2 Indicadores de Performance

*Key Performance Indicators* (KPIs) são a chave para a monitorização e optimização de uma rede móvel, uma vez que permitem avaliar alterações temporais de tudo o que acontece na estação base, não só a nível rádio, mas também especificamente a nível de sensores e baterias que façam parte da constituição da EB, contendo informação detalhada do desempenho da rede. A nível de rádio, os KPI estão registados no OSS e são medidos, através de contadores, em intervalos de tempo, percentagem, kbps e Erlang relativamente a medições de QoS, utilização de recursos, distribuição de tráfego, etc. Importa referir que existem KPI específicos de cada fabricante e que os obrigatórios, estão especificados no *Third Generation Partnership Project* (3GPP).

De forma geral, os KPI estão definidos em seis categorias:

- **Acessibilidade:** capacidade de um serviço ser obtido dentro das tolerâncias especificadas. KPIs de *setup success rate* de serviço e sinalização;
- **Disponibilidade:** quantifica a performance da EB avaliando e monitorizando a disponibilidade para medir a fiabilidade e eficiência, assim como identificar o que necessita de ser melhorado. As estatísticas medem a respetiva taxa de disponibilidade;

- **Integridade:** qualidade de serviço experimentada pelo utilizador. Os indicadores de performance avaliam o débito e latência;
- **Mobilidade:** quantifica o desempenho do serviço em CS e PS através da avaliação e monitorização da capacidade de *handover* e conectividade dos dispositivos, sendo que o KPIs medem *handover success rate*;
- **Retenção:** probabilidade de um serviço permanecer sob determinadas condições durante determinado período de tempo. KPIs refletem maioritariamente os *drop rates*;
- **Utilização:** demonstra a utilização da rede ao nível de tráfego e gestão de capacidade. Deste modo as estatísticas medem a taxa de utilização e ocupação.

## 2.3 Monitorização de Consumo Energético

A tecnologia NR tendo sido projetada de modo a ser mais eficiente do que as gerações anteriores relativamente à quantidade de bits de informação transportados para uma determinada unidade de consumo energético, ou seja, o tráfego em 5G será significativamente maior para o mesmo consumo energético.

A poupança energética pode ser dividida em três níveis: a nível do equipamento, a nível da rede e a nível do site. No primeiro nível, a redução do consumo energético inclui a utilização de amplificadores de potência eficientes (que percam o menor calor possível) e *wake-up/sleep* automático da EB, inclusive desativação de símbolos, canais ou portadoras, para evitar desperdício de energia quando não há dados a serem transmitidos. A nível da rede, a técnica de poupança energética consiste em minimizar o número de tecnologias em uso, utilizar as combinações mais eficientes de bandas dispersas no espectro levando a uma cooperação flexível entre tecnologias por forma a que se forneça a quantidade certa de capacidade para determinada tarefa com a menor potência possível. A evolução da *cloud* permite que os dados e conteúdos mais acedidos estejam armazenados em *cache* perto do utilizador, o que se denomina de *edge computing* e é outra forma de reduzir o consumo energético. Por fim, pode-se ainda tirar partido, a nível da rede, da comunicação *Device-to-Device* (D2D), que permite a conectividade sem envolver *hardware* da EB. O que nos leva ao terceiro e último ponto, redução do consumo energético a nível do site que pode ser alcançada através do uso energias renováveis, baterias de lítio inteligentes, e arrefecimento líquido, em vez de sistemas AVAC tradicionais, que como referido na subsecção 1.1 que correspondem a cerca de 17.5% no consumo energético da EB [2]. Existem diversas soluções para que os MNOs sejam capazes de monitorizar o consumo energético das suas estações base, sendo uma das mais comuns os *smart meters*, que são equipamentos de gestão que permitem registar consumos, obter leituras precisas em tempo real e transmitir essa informação, executando operações remotamente [17].

Os fornecedores de equipamento têm vindo a desenvolver ferramentas que permitam a gestão de energia da EB, como é o caso da NetEco da Huawei que permite monitorização em tempo real, histórico de alarmes, gestão remota, análise estatística e de performance para os equipamentos energéticos da EB.

O fornecedor de equipamentos de redes móveis Ericsson, tem desenvolvido ferramentas de automatização de gestão de energia, recorrendo a técnicas de ML e IA. É possível destacar o algoritmo de gestão de energia MIMO desenvolvido em [18] no qual, a partir do padrão de tráfego dos utilizadores obtido de seis sites em Portugal, por meio da ativação de uma funcionalidade que permite a suspensão automática do *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) que realiza o controlo automático de potência e, quando a atividade em determinado site passava abaixo do limiar definido, os dados dos cliente foram direcionados para um site nas proximidades, sendo o amplificador de potência desativado até a procura aumentar. O artigo refere que este algoritmo permite poupanças energéticas de 14%, o que a nível internacional representa poupanças bastante significativas.

A CELFINET possui uma ferramenta de otimização energética de equipamento rádio denominada VISION Energy. Esta ferramenta mede, pré-processa, guarda e transmite o consumo através de *dataloggers* (produto desenvolvido pela CELFINET) para uma base de dados. Após a recolha, processamento e visualização do consumo de energia do equipamento, é possível efetuar a análise por forma a reduzir o consumo de energia e assim aumentar a eficiência energética. Esta análise passa por *Hardware Benchmarking* que visa descobrir que configuração leva a uma redução do consumo de energia e que equipamento é mais eficiente, configuração de *software* para se estudar e melhorar a configuração em termos eficiência energética quer, por exemplo, em reconfigurações rádio como em balanceamento de carga, e, por fim, avaliação das características energéticas onde é possível estimar a redução dos custos, validando as características de poupança energética [19].

## 2.4 Funcionalidades de Poupança Energética

As funcionalidades de poupança energética contribuem diretamente na redução de *Operational Expenditure* (OPEX) e contribui positivamente para a sustentabilidade. Esta subsecção visa apresentar algumas das funcionalidades existentes.

### ***Micro Sleep Transmission***

O *Micro Sleep Transmission* é uma funcionalidade que permite poupanças energéticas desligando os amplificadores de potência quando não existem dados a serem transmitidos no sentido descendente. Ou seja, esta funcionalidade permite *Discontinuous Transmission* (DTX) em *downlink* durante períodos de baixo tráfego. É aplicado a nível do nó e em rádios *non-Active Antenna System* (AAS), atuando automaticamente sobre os amplificadores de potência do rádio ativando e desativando-os. De notar que o amplificador de potência é desligado quando não há tráfego *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH), canal que transporta dados do utilizador, numa *subframe*, e durante símbolos que não transportem informação mandatória.

### ***Cell Sleep Mode***

A funcionalidade *Cell Sleep Mode* permite poupanças energéticas a nível da célula através da deteção de períodos de baixo tráfego. Caso a célula detete essa condição, é desligada automaticamente por forma a reduzir o consumo energético, transferindo o tráfego para outra.

### ***MIMO Sleep Mode***

*MIMO Sleep Mode* reduz o consumo energético em rádios da estação base, alterando a configuração MIMO alterando-a para *Single-Input Multiple-Output* (SIMO) quando a célula deteta baixo tráfego. Com a alteração de configuração, tanto para um MIMO mais reduzido ou SIMO, a energia consumida é reduzida a partir de uma menor radiação da unidade rádio, ou desligando o amplificador de potência do rádio da transmissão da antena desativada.

### ***Low Energy Scheduler Solution***

O *Low Energy Scheduler Solution* alcança poupanças energéticas maximizando a quantidade de *sub-frames* em que não existem dados a serem transmitidos. Esta funcionalidade consiste em adiar a transmissão de tráfego de dados até determinado limiar ser atingido, afetando apenas as transmissões no sentido descendente.

### ***Radio Deep Sleep Mode***

O *massive Multiple-Input Multiple-Output* (mMIMO) aumenta consideravelmente o consumo energético. Deste modo, o *Radio Deep Sleep Mode* visa reduzir o consumo energético do rádio em bandas médias em unidades rádio através de capacidades de *deep sleep*. A poupança ocorre quando não há portadoras.

### ***BCCH Power Saving***

No *BCCH Power Saving* quando o TRX de BCCH do GSM deteta baixo tráfego, os *timeslots* da TRX de BCCH são colocados em *power saving*, excepto o *timeslot* 0 que é o de BCCH.

### ***Self Optimizing Networks***

As *Self-Optimizing Networks* (SONs) vieram apresentar vários casos de aplicação que possuem o potencial de melhorar a poupança energética. Entre estes estão *Automatic Neighbour Relation* (ANR), *Mobility Load Balancing* (MLB) e *Coverage and Capacity Optimization* (CCO), que permitem uma poupança energética por as suas funções resultarem numa correspondência entre a capacidade oferecida pela rede e a procura de tráfego necessária em qualquer instante [20].

### ***Automatic Neighbour Relation (ANR)***

A *Automatic Neighbour Relation* (ANR) permite a um eNB construir e manter uma lista de relações de vizinhança com outras células da mesma e outras eNB. Assim, o operador não necessita de efetuar essa relação manualmente, como acontecia nas tecnologias legadas. Existem funções de deteção e de remoção de vizinhas especificadas no 3GPP, que encontram e adicionam novas vizinhas à *Neighbour Cell Relation Table* (NCRT) e removem as desatualizadas.

Uma relação de vizinhança implica que a célula de origem conheça três aspetos da célula de destino:

- *E-UTRAN Cell Global Identifier* (ECGI) e o *Physical Cell ID* (PCI) da célula alvo, ou seja, o *Target Cell Identifier* (TCI);
- Apresenta uma entrada na NCRT de origem identificando a célula alvo;
- A *Neighbour Cell Relation Table* (NCRT) tem os atributos definidos quer pelo *Operations and Maintenance* (O&M), quer pelos valores por omissão.

A especificação *3GPP TS 36.300* [21] denota ainda que a troca de informação de vizinhança pode ser posteriormente utilizada para efeitos do ANR, podendo ocorrer durante a configuração da interface *X2*, ou durante o procedimento de atualização da configuração da eNB.

### ***Mobility Load Balancing (MLB)***

Segundo a especificação *3GPP TR 36.902* [22], o *Mobility Load Balancing* (MLB) tem como objetivo otimizar os parâmetros de *handover* e re-seleção de células por forma a lidar com a carga de tráfego desigual ao minimizar a quantidade de *handovers* e redirecionamentos necessários para alcançar o equilíbrio da carga (*load balancing*). Este equilíbrio, pode ocorrer em intra-LTE e inter-RAT, e é conseguido através de um algoritmo que decide como distribuir os UEs pelas células. O equilíbrio da carga do tráfego é, então, conseguido através de avanços ou atrasos na "entrega" dos terminais móveis pelas células. Indo mais ao detalhe, primeiramente o eNB monitoriza a carga de determinada célula, trocando informações sobre as interfaces *X2* e *S1* dos nós vizinhos. De seguida, o algoritmo deteta a necessidade de distribuir a carga da célula em análise para células adjacentes ou co-localizadas ou outras tecnologias. Esta análise compara, por exemplo, os tipos de serviços a decorrer, a diferença de carga entre as células, configuração celular, etc. Por conseguinte, no caso de equilíbrio de carga no cenário intra-LTE, o algoritmo estima se as definições do *handover* necessitam de ser alteradas. Se aplicável, a comunicação entre os eNB envolvidos ocorre por forma a propor alterações nos parâmetros de *trigger* do *handover* da eNB vizinha.

### ***Coverage and Capacity Optimization (CCO)***

No que diz respeito ao CCO, como o nome indica, foca-se em fornecer otimização da cobertura e otimização da capacidade. A primeira exige que a área onde o sistema LTE é disponibilizado, permita aos UE estabelecerem e manterem as ligações com uma QoS razoável, de acordo com os requisitos do MNO. No entanto, os algoritmos devem ter em atenção a consequência na capacidade, já que a cobertura e a capacidade estão de certa forma conectadas devido ao *trade-off* que existe entre ambos, podendo também ser alvo de otimização [22].

## 2.5 *Machine Learning* Aplicado ao Consumo de Energia

Com o constante crescimento tecnológico seria de esperar que as novas gerações de redes móveis apostassem em redes inteligentes, havendo assim uma aposta na Inteligência Artificial (IA) e/ou no *Machine Learning* (ML), sendo o seu uso praticado no planeamento, implementação e optimização da rede. O ML abre a possibilidade de um equilíbrio entre o consumo energético ao mesmo tempo que permite KPIs estáveis, mantendo-se assim a QoS/QoE mesmo que com menor consumo de energia ao empregar funcionalidades de poupança energética, que podem ser acionadas de forma pró-ativa.

Em [2], é referido o uso de histórico de dados de um grande número de células da rede, com informação ao nível do tempo, relações de vizinhança e dados meteorológicos, como valores de entrada no sistema de ML. Durante a previsão o sistema monitoriza os KPI e dá um *feedback* ao modelo de previsão de acordo com as mudanças, sendo que seguidamente efectua o ML ao nível da célula, *cluster* ou área permitindo assim a previsão da respectiva carga e o tempo óptimo de poupança energética para diferentes funções de poupança, tais como desligar portadoras, canais e símbolos, o que permite alcançar uma previsão iterativa, óptima poupança energética e desempenho do sistema.

A predição do consumo energético dos equipamentos de rádio 4G e redes legadas, é apresentado em [18], em que são utilizados dados reais de seis estações bases em Portugal para estimar os coeficientes da regressão linear, relacionando as variações de tráfego e o consumo energético, obtendo correlações entre 80% e 90% para todas as tecnologias. Destaca-se ainda que, no modelo 4G, a utilização de *Physical Resource Block* (PRB) é o fator que mais contribuiu no consumo energético.

No estudo de investigação [23], é apresentado o desenvolvimento de um modelo de consumo energético para estações bases localizadas no Gana que operam nas tecnologias 2G e 3G. Este artigo comprova um relacionamento linear entre a carga de tráfego celular e o consumo de energia e, além disso, constata que a arquitetura da EB ao usar RRUs é 32% mais eficiente, quando comparado à EB que tem a unidade rádio instalada no solo.

Utilizando regressão linear de efeitos mistos, é demonstrado o modelo de consumo de energia nos equipamentos de RRUs e BBUs em [24]. Neste trabalho considera que além da correlação do consumo energético e o tráfego, também existe variações que dependem do tipo de *hardware*.

## 2.6 Modernização de Estação Base

O mercado das redes móveis está em constante desenvolvimento, por consequência os fornecedores ano após ano lançam novos produtos, focados em novas e melhoradas funcionalidades e equipamentos, mas também dando ênfase à componente energética. Nas redes atuais existem equipamentos que foram desenvolvidos há décadas, estando a entrar em fim do ciclo de vida e, além disso, existe a necessidade de substituir este equipamento obsoleto por novas e mais eficientes inovações.

Qualquer equipamento tem um determinado tempo útil, necessitando-se periodicamente da sua substituição. Relativamente aos rádios (RRUs) e unidades de banda base (BBUs) mais antigos, são equipamentos que possuem um consumo energético superior. Assim, é relevante substituir-se os equipamentos por modelos mais recentes e, portanto, que consumam menos energia, o que pode ser visto

de duas formas: como aumento das despesas operacionais por aquisição de equipamento para manutenção da rede, ou como redução no OPEX através de redução dos custos energéticos, permitindo a instalação de mais bandas como o consumo semelhante mantendo-se assim os valores das despesas operacionais relativas a energia.

As subsecções seguintes explicam o que pode ser feito a nível de modernização de BBUs e RRUs.

### 2.6.1 Modernização de BBUs

Boa parte das *Baseband Units* (BBUs) à data deste documento, são do tipo DUG, DUW e DUS, sendo BBUs mais antigas e com menor eficiência energética. As BBUs *Digital Unit for GSM* (DUG) funcionam para a tecnologia 2G, *Digital Unit for WCDMA* (DUW) para 3G e *Multi-standard Digital Unit* (DUS) tipicamente para LTE. De notar que são designações *Ericsson*, já que os dados utilizados são provenientes de equipamentos deste fornecedor. As Estação Base (EB) mais recentes e as que foram modernizadas contém umas BBUs mais recentes, designadas pelo nome *Baseband*.

A Figura 2.12 apresenta exemplos de *Baseband Units* (BBUs) mais antigas, nomeadamente os modelos DUG 20 01, DUW 30 01 e DUS 41 01. É possível constatar que a DUW é consideravelmente menos estreita que as DUG e DUS.

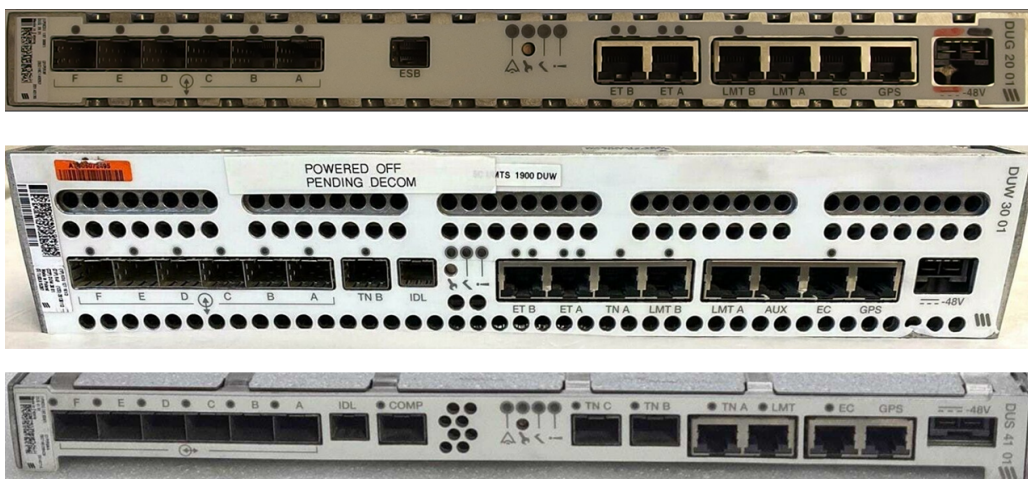


Figura 2.12: BBUs - DUG 20 01, DUW 30 01 e DUS 41 01 [25, 26, 27].

Já a Figura 2.13 apresenta BBUs de gerações um pouco mais recentes. A *Baseband 5216* pode ser utilizada para 2G e 3G enquanto a *Baseband 6630* pode operar as tecnologias 2G, 3G, 4G e 5G, não sendo possível à data desta dissertação ter as 4 tecnologias configuradas em simultâneo na mesma BBU. Importa ainda referir que há *Basebands* mais recentes que não suportam GSM.



Figura 2.13: BBUs - *Baseband 5216* e *Baseband 6630* [28, 29].

## 2.6.2 Modernização de RRUs

Quanto às *Remote Radio Units* (RRUs), a ideia é evoluir de modelos *Remote Radio Unit all Standards* (RRUS), *Remote Radio Unit for WCDMA* (RRUW) e *Radio Unit all Standards* (RUS), entre outros possíveis para modelos designados *Radio*, que são mais recentes e, por consequência, mais eficientes energeticamente. Importa notar que, relativamente aos *Radio*, existem modelos para bandas baixas, modelos para as bandas médias e modelos para bandas altas, diferindo entre si em diversos aspetos, ou seja, dois rádios de bandas baixas não funcionam da mesma forma, tendo cada rádio as suas particularidades.

A Figura 2.14 apresenta dois modelos de RRU. O equipamento da esquerda corresponde a um modelo mais antigo, *RRUS 12 B8* e o da direita a um *Radio 2238*.

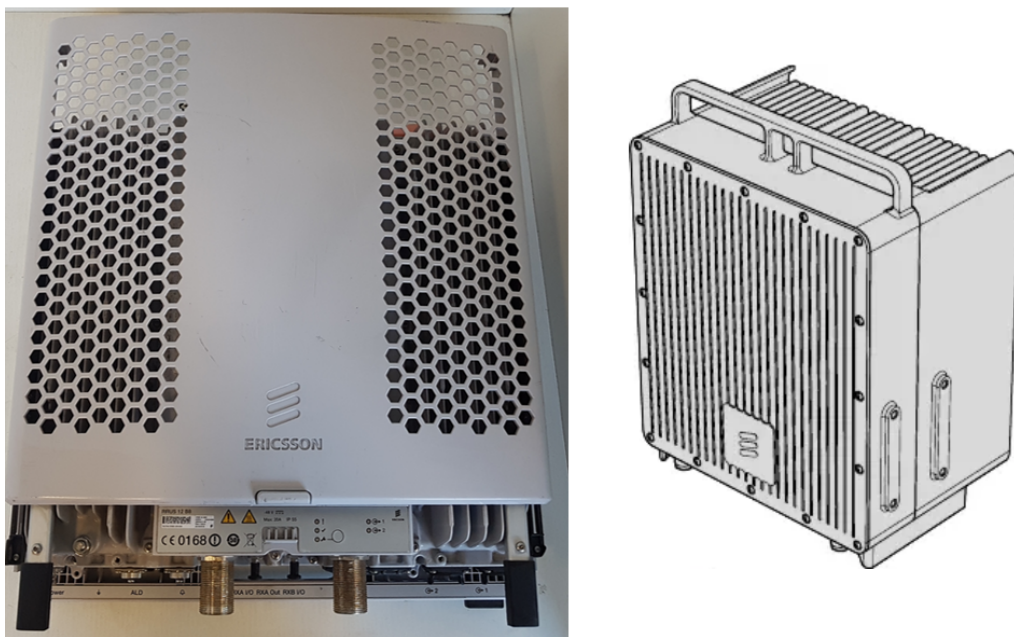


Figura 2.14: RRUs - RRUS 12 B8 à esquerda e *Radio 2238* à direita [30, 31].

Outro aspeto evoluído de um modelo em relação a outro legado é o índice de proteção. O rádio RRUS 12 B8 tem um IP55 enquanto o *Radio 2238* possui um IP65. O primeiro algarismo indica o grau de proteção dos equipamentos contra corpos estranhos, como pó e resíduos, enquanto o segundo número espelha a proteção face várias formas de humidade. Deste modo, é possível concluir que o rádio RRUS 12 B8 tem uma proteção limitada contra a entrada de pó e resíduos e proteção de jatos de água de baixa pressão de qualquer direção. Por sua vez, o *Radio 2238* tem também uma proteção de jatos de água de baixa pressão de qualquer direção porém possui proteção total contra a entrada de pó e resíduos.

Além de diferirem nas bandas de utilização, como por exemplo funcionar apenas numa banda, ou só em bandas baixas, médias ou altas, os rádios também diferem no número de *branches* de transmissão e receção. Também podem diferir em separação de *branches* de várias bandas, o que evita problemas de produtos de intermodulação. Rádios com 4 Rx são expectáveis de possuir o dobro do patamar de interferência havendo um aumento de 3 dB quando comparado com um rádio com 2 Rx como o 2238 apresentado na Figura 2.14, à direita.

Conforme referido no subcapítulo 2.7, outro ponto importante principalmente para o RAN *sharing* é o valor de IBW que, no caso de *Radio 2238* é de 95 MHz [31], enquanto que para o RRU RRUS 12 B8 é de 35 MHz [32].

## 2.7 Partilha de Infraestrutura de Rede - RAN *Sharing*

Os custos envolventes na implementação de uma estação base, como será exposto no capítulo 4, são bastante elevados, não só a nível de aquisição de material e mão de obra, como de licenciamentos. No entanto, havendo partilha de *hardware* os MNOs alcançam poupanças a vários níveis. No RAN *sharing*, os operadores partilham a componente rádio de um site e, portanto, o consumo energético e aquisição. Tipicamente o equipamento pertence a um único MNO. Os principais tipos de RAN *sharing* são *Multi-Operator Radio Access Network* (MORAN) e o *Multi-Operator Core Network* (MOCN). A diferença reside no tipo de rede que é partilhada: acesso ou núcleo. Em MOCN os operadores podem também partilhar o espectro. A título de exemplo, a Nowo apenas possui espectro eletromagnético nas bandas dos 1800, 2600 e 3600 MHz [33]. Por forma a ter uma maior cobertura e rede 2G e 3G, a Nowo necessita de partilhar espectro com um operador que possua espectro nas restantes bandas que a empresa queira usar.

Nesta dissertação, todo o RAN *sharing* vai ser considerado MORAN.

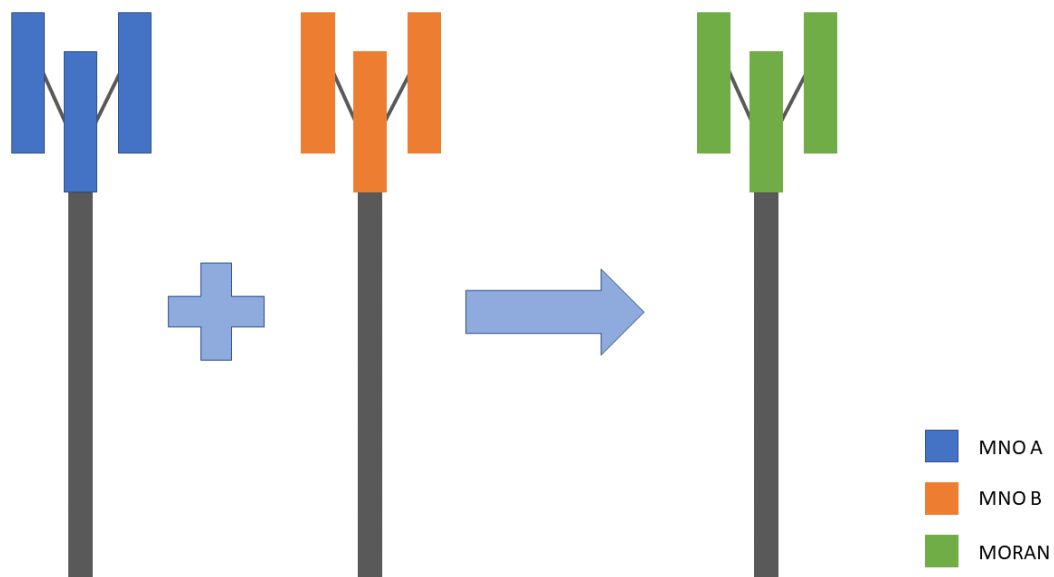


Figura 2.15: MORAN - Cenário 1.

Existem duas formas de olhar para cenário. A Figura 2.15 apresenta um cenário em que existem dois operadores, MNO A e MNO B, sendo que cada operador possui, ou iria possuir, uma estação base. Ao haver RAN *sharing* os operadores poupam recursos financeiros pois, tipicamente, são feitos acordos onde se divide quem é detentor dos equipamentos, poupando CAPEX, podendo até cumprir obrigações impostas pela Autoridade Nacional de Comunicações (ANACOM). Estas obrigações provêm da aquisição de espectro eletromagnético.

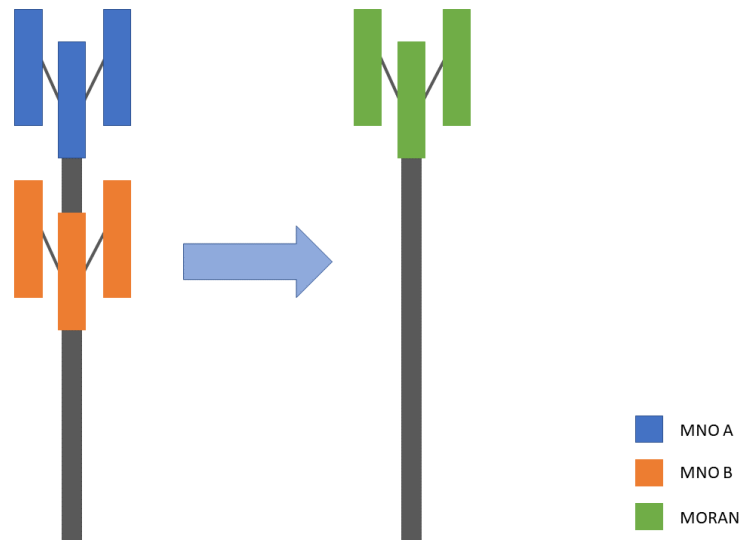


Figura 2.16: MORAN - Cenário 2.

Outro cenário possível é a existência de partilha de torre. Os operadores encontram-se na mesma infraestrutura, no entanto cada um possui as suas antenas, rádios e unidades de banda base. Com MORAN, tal como no cenário apresentado em 2.15, os operadores alcançam poupanças monetárias com bastante relevância, que serão estudadas em 3.5.

Uma das desvantagens do RAN *sharing* é que os MNOs que estão a beneficiar da partilha necessitam de recorrer a rádios que consigam processar a largura de banda de ambos. Ou seja, as RRUs possuem um parâmetro denominado *Instantaneous Bandwidth* (IBW), que é a faixa de frequência ocupada por um sinal em um determinado instante, podendo, deste modo, variar ao longo do tempo. Num cenário em que o início do espectro do MNO A e o fim do espectro do MNO B seja de 190 MHz, uma RRU com um IBW de 100 MHz não é suficiente, não permitindo a partilha. Isto é uma desvantagem pois rádios com um IBW mais elevado são mais caros. Se os operadores A e B não tiverem o espectro contíguo, havendo outro ou outros operadores com espectro adquirido entre as frequências de ambos, facilmente se alcança um IBW elevado, apesar do *Occupied Bandwidth* (OBW) ser mais reduzido.

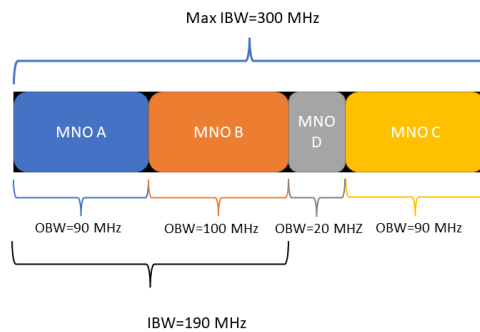


Figura 2.17: Exemplo hipotético de alocação de espectro.

A Figura 2.17 apresenta um cenário hipotético de distribuição de determinada banda do espectro eletromagnético. Neste exemplo o IBW limite é de 300 MHz e o IBW dos MNO A e B, tal como no exemplo dado anteriormente, é de 190 MHz, seguindo-se do MNO D com 20 MHz e o MNO C com 90 MHz.

Caso o MNO A quisesse fazer RAN *sharing* com o MNO D, a largura de banda ocupada (OBW) seria de 110 MHz e o IBW de 210 MHz, como se pode observar na Figura 2.18, uma vez que o IBW reflete a largura de banda necessária para incluir ambos MNOs.

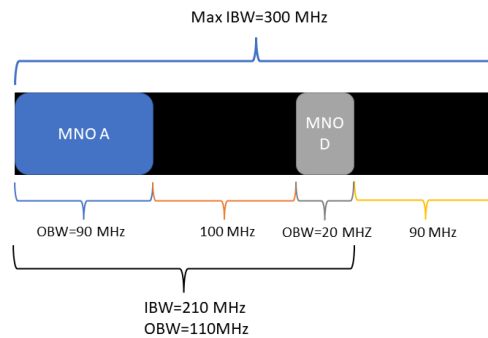


Figura 2.18: IBW e OBW.

## 2.8 Custo Total de Propriedade - TCO

TCO é uma metodologia utilizada para avaliar todos os custos associados à aquisição, aluguer, manutenção e operação de ativos durante todo o ciclo de vida. Isto permite que as empresas e organizações avaliem as despesas reais dos seus serviços e ativos, tendo em consideração os desembolsos de aquisição, manutenção, aluguer, operação, etc.

Em [34] foi elaborado um estudo de otimização de custo total de propriedade para sistemas *Direct Air-to-Ground Communications* (DA2GC). Os autores entenderam que a otimização do TCO é a chave para resolver o problema da implementação de estações terrestres, ou seja, a quantidade de estações terrestres, elementos de antenas, largura de banda e potência transmitida necessários. O TCO pode ser decomposto em CAPEX, OPEX e despesas do espetro. Os custos de capital foram divididos em gastos das estações terrestres e aéreas, e os custos operacionais em gastos de manutenção, arrendamento dos locais onde serão implementadas as estações terrestres e as despesas relativas ao consumo energético.

Os autores contabilizaram o CAPEX considerando o custo de uma EB LTE (10k €) como despesa de BBUs somando-o ao custo dos elementos da antena, tendo em conta o número de estações terrestres e aéreas. Quanto aos desembolsos operacionais, os autores consideram um arrendamento médio de 1300 € por mês.

As soluções de poupança energética têm de ser exequíveis, por forma a que a empresa aceite investir o seu capital. Assim, em [35] os autores estudaram soluções do ponto de vista económico. O foco foi o *upgrade* de *hardware*, permitindo opções de *sleep mode* dinâmicas nomeadamente *cell DTX*, e implementação de redes energeticamente eficientes.

As simulações efetuadas apresentam poupanças de até 60% com *upgrade* de *hardware*, sendo que a solução demonstrou ser cada vez mais rentável à medida que o custo unitário da energia aumenta. Quanto à implementação de redes com uma maior poupança energética, exige uma implementação mais densa de EBs, não sendo, deste modo, considerado economicamente viável tendo em conta os valores de despesas atuais.

# 3

## Modelo de Consumo Energético

---

<b>3.1</b>	<b>Modelo de Previsão de Consumo Energético . . . . .</b>	<b>31</b>
3.1.1	Modelo de Previsão para RRU <i>Ericsson</i> . . . . .	31
3.1.2	Modelo de Previsão para BBU <i>Ericsson</i> . . . . .	32
<b>3.2</b>	<b>Calibração do Modelo . . . . .</b>	<b>34</b>
<b>3.3</b>	<b>Modernização da Estação Base . . . . .</b>	<b>35</b>
3.3.1	Modernização de BBUs . . . . .	36
3.3.2	Modernização de RRUs . . . . .	36
<b>3.4</b>	<b>3G <i>shutdown</i> . . . . .</b>	<b>37</b>
<b>3.5</b>	<b>Partilha de Infraestrutura de Rede - <i>RAN Sharing</i> . . . . .</b>	<b>38</b>
<b>3.6</b>	<b>Funcionalidades de Poupança Energética . . . . .</b>	<b>41</b>
3.6.1	Funcionalidades 2G . . . . .	41
3.6.2	Funcionalidades 4G . . . . .	42
<b>3.7</b>	<b>Síntese das Técnicas de Poupança Energética Utilizadas . . . . .</b>	<b>44</b>

### 3.1 Modelo de Previsão de Consumo Energético

Nesta dissertação optou-se por tirar proveito de um modelo desenvolvido em [36], trabalho anterior desenvolvido em parceria com a CELFINET. O modelo desenvolvido consiste em determinar o consumo energético multi-tecnologia e multi-fabricante para nós de acesso rádio, focando-se assim no consumo de RRUs e BBU's para as tecnologias 2G, 3G e 4G em fornecedores *Ericsson* e *Huawei*. De salientar que, para modelar os dados, o modelo recorre a uma regressão linear de efeitos mistos, tendo apresentado um erro percentual máximo de 3.7% nos equipamentos rádio e de 8.49% nos equipamentos de banda base [36]. Assim, o primeiro passo passa por diminuir o erro do modelo, isto é, para minimizar o erro na previsão do consumo será necessário determinar um fator corretivo, sendo que este será calculado tendo como base valores de consumo DC reais e o consumo o que é possível chegando-se a um fator corretivo com base em valores de consumo DC reais.

Um dos objetivos desta dissertação prende-se com a otimização energética em nós da rede de acesso rádio, pelo que será necessário recorrer a um modelo que permita avaliar toda a informação dos consumos energéticos. Tirando-se proveito do modelo de consumo energético, o objetivo passa por investigar o impacto que determinadas funcionalidades do sistema possam ter no consumo para, desta forma, otimizá-lo. De notar que o aumento da eficiência energética das estações base contribui, por consequência, não só para uma redução dos custos OPEX da empresa, como para uma redução dos consumos a nível global. A redução das despesas monetárias pode ser benéfica tanto para o operador móvel como para a empresa detentora da infraestrutura, dependendo do contrato elaborado entre ambos.

O modelo referido permite cumprir o objetivo pretendido. Na verdade, o trabalho citado, [36], apresenta dois modelos, um para o fornecedor *Ericsson* e outro para a *Huawei*. Esta tese terá foco em equipamentos *Ericsson*, já que os dados analisados são referentes a este fornecedor. O modelo será calibrado, reduzindo conseqüentemente o erro percentual, recorrendo-se a dados reais de consumo DC.

#### 3.1.1 Modelo de Previsão para RRU *Ericsson*

O modelo de previsão de consumo energético utilizado é um modelo de regressão linear de efeitos mistos. As equações estão divididas em três partes: efeito fixo, efeito aleatório e erro. O efeito fixo é dado pelo tráfego, já o efeito aleatório depende da tecnologia. Os efeitos fixos estão associados ao efeito médio dos preditores sobre a variável de resposta, já os efeitos aleatórios permitem modelar a variabilidade dos diferentes equipamentos. O processo de seleção do modelo, baseia-se no *Likelihood Ratio Test* (LRT) e o no valor de *Akaike Information Criterion* (AIC). A principal vantagem deste modelo é permitir uma estimativa do consumo de energia dos equipamentos utilizando apenas estatísticas de tráfego (globalmente disponíveis) e, assim, prevendo o consumo de energia, pode funcionar como um instrumento de tomada de decisão para o operador tornar a rede mais eficiente em termos energéticos.

A potência consumida pelas RRUs é determinada de diferentes formas dependendo da tecnologia, sendo o fator comum o tráfego. No caso do 2G, é determinado pelo tráfego em CS e PS. Já no 3G, é calculado através do tráfego *Circuit Switched* (CS), *Packet Switched* (PS) *release 99* e HSDPA.

Quanto ao 4G, além do tráfego, é ainda dependente das *features*  $F_{MicroSleep}$  e  $F_{SleepMode}$  que são funcionalidades de poupança de energia. As equações 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam o cálculo da potência consumida nas tecnologias 2G, 3G e 4G [36], respetivamente.

$$P_{2G} = T_{CS\_2G} + T_{PS\_2G} \quad (3.1)$$

- $T_{CS}$ : representa o tráfego de uma alocação de recursos utilizada permanentemente durante a transmissão;
- $T_{PS}$ : representa o tráfego de pacotes individualmente encaminhados através de ligações tipicamente partilhadas por outros nós.

$$P_{3G} = T_{CS\_3G} + T_{PS\_R99} + T_{HSDPA} \quad (3.2)$$

- $T_{PS\_R99}$ : é o tráfego PS na *release* 99;
- $T_{HSDPA}$ : tráfego *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA). Ao invés da modulação *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK) da R99 utiliza *16-Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), o que permite transportar mais informação. Saiu na *release* 5 do UMTS.

$$P_{4G} = T_{4G} + F_{MicroSleep} + F_{SleepMode} \quad (3.3)$$

- $F_{MicroSleep}$ : *feature* de *micro sleep*. Consiste em desligar a portadora no tempo de símbolo ( $71.3 \mu s$ ) quando é detetado baixo tráfego. Deste modo, o respetivo amplificador de potência é desligado;
- $F_{SleepMode}$ : *feature* de *sleep mode*. Consiste na informação se há ou não *sleep mode* ativo. Conforme explicado em 3.6, quando uma célula deteta baixo tráfego desligasse automaticamente, transferindo o tráfego para outra célula.

### 3.1.2 Modelo de Previsão para BBU *Ericsson*

Por sua vez, a energia consumida por BBU é aproximadamente constante, tendo sido utilizado em [36] apenas o valor médio no caso do 2G, sendo dependente do número de *channel elements* no 3G e do número de células no 4G.

O modelo 2G, dado pela equação 3.4 [36], considera apenas o valor médio para estimar a potência consumida sendo portanto uma regressão linear de efeitos fixos.

$$P_{BBU2G} = \beta_0 + \epsilon \quad (3.4)$$

O coeficiente de efeito fixo  $\beta_0$  representa um valor constante determinado com um estudo intensivo em [36], tendo a autora chegado ao valor de 40.54 W para GSM, conforme apresentado na Tabela 3.1, onde se pode também verificar o intervalo de confiança a 95% que leva a esse valor.

Tabela 3.1: Coeficiente do modelo BBU 2G [36].

		Estimativa	IC (95%)
		Pontual	
(Intercept) [W]	$\beta_0$	40.54	[38.782, 42.313]

Já a equação 3.5 [36] apresenta o modelo para BBUs 3G que é uma de regressão linear de efeitos mistos. Este modelo depende da capacidade máxima do equipamento em número de *Channel Element* (CE) ( $N_{CE}$ ). A interceção reflete o consumo energético quando o *hardware* tem 384 CE de capacidade instalada.

$$P_{BBU3G} = \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{N_{CE}}{384} - 1 \right) + \epsilon \quad (3.5)$$

A Tabela 3.2 apresenta os valores dos coeficientes fixos  $\beta_0$  e  $\beta_1$  para a tecnologia UMTS, sendo de 106.22 W para o  $\beta_0$  e 77.04 W para o  $\beta_1$  [36].

Tabela 3.2: Coeficientes do modelo BBU 3G [36].

		Estimativa	IC (95%)
		Pontual	
(Intercept) [W]	$\beta_0$	106.220	[82.737, 129.701]
$\left( \frac{N_{CE}}{384} - 1 \right)$	$\beta_1$	77.040	[63.357, 90.727]

O modelo BBU para a tecnologia 4G presente na equação 3.6 [36] considera como variável preditora o número de células ativas. A interceção  $\beta_0$  reflete o consumo energético de uma BBU com 3 células ativas.

$$P_{BBU4G} = \beta_0 + \beta_1 (N_{Cells} - 3) + \epsilon \quad (3.6)$$

Os coeficientes fixos para o modelo BBU para LTE são de 121.43 W para a interceção  $\beta_0$  e de 5.23 W para o coeficiente  $\beta_1$ , conforme apresentado na Tabela 3.3 [36].

Tabela 3.3: Coeficientes do modelo BBU 4G [36].

		Estimativa	IC (95%)
		Pontual	
(Intercept) [W]	$\beta_0$	121.433	[113.289, 129.577]
$(N_{Cells} - 3)$	$\beta_1$	5.233	[2.429, 8.036]

Estes modelos RRU e BBU para 2G, 3G e 4G permitem determinar o consumo energético em RRU e BBU, o que, sabendo o consumo DC da estação, permite extrapolar o consumo energético da transmissão. Assim, optou-se por utilizar este modelo criando, no entanto, um fator corretivo para o calibrar, por forma a haver a menor discrepância possível nos valores. Isto é importante devido ao facto da potência de transmissão ser calculada a partir do restante valor que perfaz o consumo total DC da estação base, ou seja, através do valor de consumo DC global da estação base.

## 3.2 Calibração do Modelo

É sabido que o consumo da RRU é dependente do tráfego [36], enquanto o da BBU depende do número de células, no caso do 4G e 2G e obedece ao número de CE no caso do 3G, sendo portanto um consumo quase constante. Deste modo fora necessário determinar um fator corretivo para o modelo RRU por forma a tornar o modelo mais sensível.

Assim, procedeu-se à sua determinação comparando o consumo proveniente do modelo presente em 3.1 e o consumo DC real medido.

### Transmissão

Por forma a determinar o consumo dos equipamentos de transmissão de uma estação base e, uma vez que é necessário existirem duas variáveis fixas e uma aleatória, foi feita uma extrapolação através da diferença do consumo DC das EB e, consumos de RRU e BBU determinados através do modelo 3.1. Posteriormente, o valor extrapolado é utilizado para determinar o fator corretivo da estação, juntamente com o consumo das *Baseband Units* (BBUs) como variável fixa. A escolha da variável fixa deve-se ao facto de as BBUs possuírem uma variação pouco variável. Outro aspeto é a calibração do modelo de consumo de *Remote Radio Units* (RRUs) ser mais interessante do ponto de vista de análise dos gastos de uma estação pois, diferentemente das BBUs, o consumo das RRU varia com o tráfego.

Os equipamentos de transmissão constituintes de uma estação base dependem de dois fatores: se é um site de acesso ou agregador, e do tipo de transmissão, fibra ótica ou microondas. Quando se trata de um site agregador este é ainda constituído por antenas de transmissão quando o site de acesso que está agregado a este tem uma ligação por microondas. Importa ainda referir que a estação base pode ainda possuir clientes empresariais.

As estações base de acesso por fibra ótica sempre tiveram uma unidade de transmissão porém, com as modernizações atuais, as novas *Baseband Units* (BBUs) conectam diretamente à *Optical Distribution Frame* (ODF), não sendo necessário possuir a unidade de transmissão. Por outro lado, se a transmissão for por microondas, há sempre a necessidade de haver uma unidade de transmissão. Importa referir que os sites de agregação apresentam sempre uma unidade Cisco de *Aggregation Services Routers* (ASR) para agregar os sites, que poderão ser, tipicamente, entre 5 a centenas de sites.

### *Baseband Unit* (BBU)

As *Baseband Units* (BBUs) possuem um consumo bastante constante [36]. Desta forma, e uma vez que o modelo desenvolvido em [36] já considera valores reais de consumo de BBUs, não será efetuado um fator corretivo.

### *Remote Radio Unit* (RRU)

É nas RRUs, juntamente com o consumo dos equipamentos de transmissão, que reside a variação do consumo energético DC de uma estação base. Neste estudo, na calibração do modelo de consumo energético, a sinalização foi considerada como tendo um consumo desprezável.

Após análise do modelo apresentado em 3.1, juntamente com a extrapolação da transmissão, e valores de consumo energético DC das respectivas estações base, determinou-se o fator corretivo. A Tabela 3.4 apresenta o fator corretivo do consumo de *Remote Radio Units* (RRUs) por unidade de radiação em cada geração de comunicações móvel, pois o consumo é calculado através do modelo de previsão ao nível da célula.

Tabela 3.4: Fator corretivo do consumo RRU por célula em cada tecnologia.

Consumo RRU por célula [W] - Fator Corretivo	
2G	0.605
3G	0.721
4G	0.776

Ao serem adicionados os fatores presentes na Tabela 3.4, tendo o consumo dos equipamentos de transmissão sido extrapolado, é possível calibrar o modelo, conforme será explicado de seguida.

De notar que a partilha de rádios 2G/3G não foi calibrada por não haver dados para a efetuar, no entanto também não foi considerado neste estudo.

### Calibração

Por forma a calibrar o modelo apresentado no sub-capítulo 3.1, os valores presentes na Tabela 3.4 são aplicados à previsão de consumo para cada tecnologia. Assim, o consumo DC de uma EB é dado pela equação 3.7:

$$\begin{aligned}
 P_{DC} = & \sum_{i=1}^{N_{\text{cells}_{2G}}} [P_{\text{RRU}_{2G_i}} \pm FC_{2G}] + P_{\text{BBU}_{2G}} + P_{\text{Tx}_{2G}} \\
 & + \sum_{i=1}^{N_{\text{cells}_{3G}}} [P_{\text{RRU}_{3G_i}} \pm FC_{3G}] + P_{\text{BBU}_{3G}} + P_{\text{Tx}_{3G}} \\
 & + \sum_{i=1}^{N_{\text{cells}_{4G}}} [P_{\text{RRU}_{4G_i}} \pm FC_{4G}] + P_{\text{BBU}_{4G}} + P_{\text{Tx}_{4G}}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

$P_{DC}$  caracteriza o consumo em *Direct Current* (DC),  $P_{\text{RRU}_{2G}}$  a potência da tecnologia 2G consumida nas RRUs, por conseguinte,  $P_{\text{RRU}_{3G}}$  o consumo da tecnologia 3G e  $P_{\text{RRU}_{4G}}$  da tecnologia 4G.  $P_{\text{BBU}}$  é referente ao consumo de potência das BBUs e  $P_{\text{Tx}}$  dos equipamentos de transmissão. Por fim,  $FC$  representa o fator corretivo presente na Tabela 3.4.

### 3.3 Modernização da Estação Base

Em sequência da explicação do funcionamento de modernização de equipamentos BBUs e RRUs do sub-capítulo 2.6, as subsecções seguintes apresentam previsões de consumos energéticos recorrendo-se a modernizações. Os valores de consumo dos equipamentos legados provem de medidas reais, enquanto nos novos equipamentos foram considerados os valores típicos referidos pelo fornecedor.

### 3.3.1 Modernização de BBUs

Por forma a quantificar a possível poupança energética que provém da modernização dos equipamentos de banda base, consideraram-se valores típicos estimados para uma temperatura de 25°C, tendo-se obtido 123W por BBU, conforme apresentado em [37]. Considerou-se uma BBU por estação base, já que o cenário em análise é de baixa capacidade, pois contém G900, U900, U2100, L800. Uma *Baseband 6630*, em *triple mode*, à data do ano de 2018, permitia 12 TRX, 288 CE/480 CE e 1050/525 Mbps [38].

Importa referir que nas BBU *Baseband* tipicamente existem 2 BBUs por Estação Base (EB). A BBU B1, por norma, considera as tecnologias 2G e 3G, e a B2 LTE e 5G. No entanto, isto deve-se ao facto de à data da elaboração deste trabalho uma BBU não suportar a configuração de 4 tecnologias em simultâneo.

A Figura 3.1 apresenta a previsão de consumo energético para uma estações base em dois cenários, com unidades de processamento de banda base legadas e com modernização de BBUs. Nos equipamentos mais antigos (à esquerda) observa-se que as BBUs da tecnologia 3G, as DUW, representam 73.25% do consumos das unidades de banda base. Verifica-se uma redução de 482,53 W num cenário com uma BBU, o que representa uma diminuição de aproximadamente 80% do consumo de energia das BBUs. Se for considerado um cenário de maior capacidade em que seja necessário mais uma BBU, reflete-se com esta modernização, uma poupança de 359,53 W, que são cerca de menos 60% do consumo.

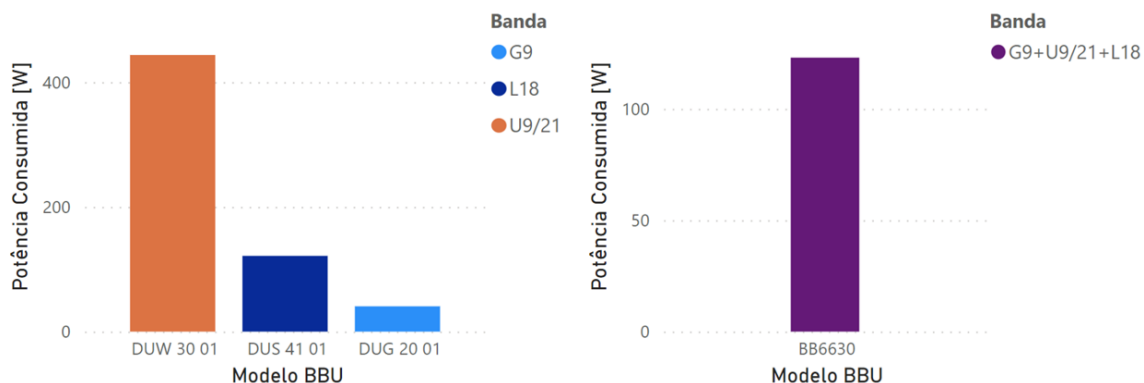


Figura 3.1: Previsão de potência consumida antes e após modernização de BBUs.

Ao poupar-se 482.53 W, num ano atingem-se poupanças de 16.91 MWh por estação base, o que a uma taxa de 0.125€/kWh [39], caracteriza uma redução de 2113€/ano para uma EB. Assumindo-se que uma *Baseband 6630* custa cerca de 900€ (valor em [29] de 742.31€), a BBU ficaria paga através das poupanças energéticas em menos de 1 ano.

### 3.3.2 Modernização de RRUs

Relativamente à modernização dos rádios, considerou-se uma troca dos rádios RRUS 12, RUS 01 e RRUS 11, pelos rádios *Radio 2238* e *Radio 4480*. O *Radio 2238* é uma RRU de bandas baixas, 700, 800, 900 MHz, e a RRU *Radio 4480* de bandas médias, 1800, 2100, 2600 MHz.

Deste modo, efetuou-se uma previsão do consumo energético com modernização de todas as RRUs da estação base em estudo. A poupança alcançada através da modernização de RRUs foi considerada de 25% [40]. Na Figura 3.2 verifica-se a comparação entre modelos mais antigos, à esquerda, e modelos mais recentes, à direita.

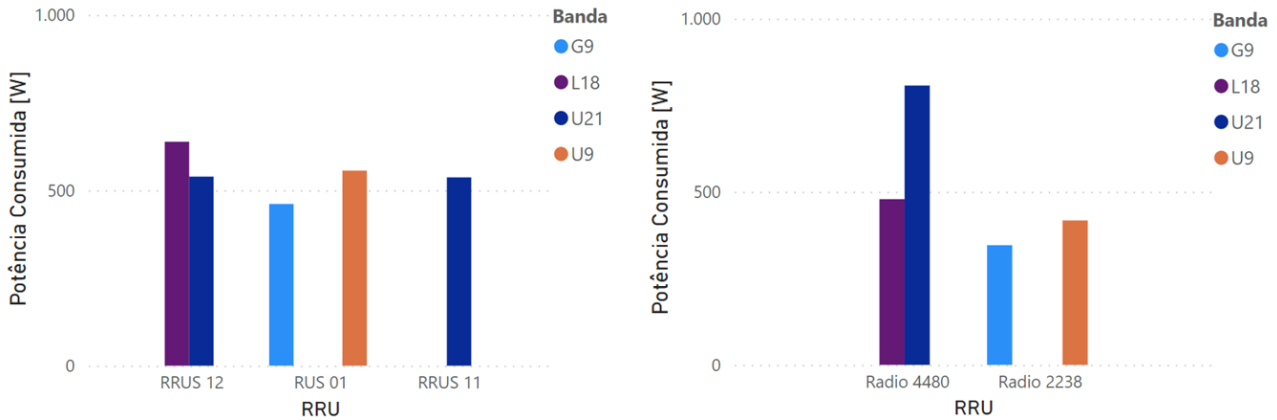


Figura 3.2: Previsão de potência consumida antes e depois da modernização de RRUs.

No cenário com equipamentos legados verifica-se que o UMTS na banda dos 2100 MHz necessita de 2 rádios. Isto deve-se ao facto de se pretender ter MIMO 4x4, pois as RRUs legadas têm apenas dois amplificadores de potência. Estima-se que o consumo energético dos rádios reduza em 682.83 W com a modernização, o que proporciona uma poupança de 23.93 MWh por ano no site em análise, o que a uma taxa de 0.125€/kWh representa uma diminuição no custo energético da estação base de cerca de 2991€/ano.

Assumindo que cada RRU custa cerca de 2400€ e que são necessárias duas, uma para bandas baixas e outra para bandas médias, a modernização das unidades rádio ficaria paga através de poupanças energéticas ao fim de cerca de 2 anos.

### 3.4 3G shutdown

Como verificado nos cenários anteriores, é com a tecnologia 3G que os equipamentos consomem mais energia. Deste modo, a banda dos 900 MHz do 3G foi substituída pelo LTE na banda dos 800 MHz e o U2100 pelo LTE 2100 MHz. De referir que os rádios e unidades de banda base escolhidos permitem esta mudança sem necessidade de qualquer troca de equipamentos, pois o *Radio 4480* funciona nas bandas B1 (2100 MHz) e B3 (1800 MHz), e o *Radio 2238* nas bandas B8 (900 MHz) e B20 (800 MHz).

Por conseguinte, é necessário transferir o tráfego 3G para 4G, o que é feito com a aplicação de um *overhead* que corresponde ao rácio entre o número de utilizadores 3G pela quantidade de utilizadores em 3G e 4G antes do *shutdown*. A Tabela 3.5 apresenta a percentagem de acréscimo de utilizadores por setor.

A Tabela 3.6 apresenta o *overhead* aplicado ao tráfego 3G na transferência para 4G. De notar que U9 denota a UMTS na banda dos 900 MHz e U21 UMTS na faixa dos 2100 MHz.

Tabela 3.5: *Overhead* - Transferência de tráfego 3G → 4G por setor.

Porcentagem de acréscimo de utilizadores	
Setor 1	24.54%
Setor 2	22.72%
Setor 3	16.76%

Tabela 3.6: *Overhead* - Transferência de tráfego 3G → 4G por banda e setor.

Porcentagem de acréscimo de utilizadores	
U9 - Setor 1	48.21%
U9 - Setor 2	35.77%
U9 - Setor 3	31.00%
U21 - Setor 1	58.14%
U21 - Setor 2	48.41%
U21 - Setor 3	41.33%

A Figura 3.3 e apresenta os consumos por equipamento e por banda, respetivamente.

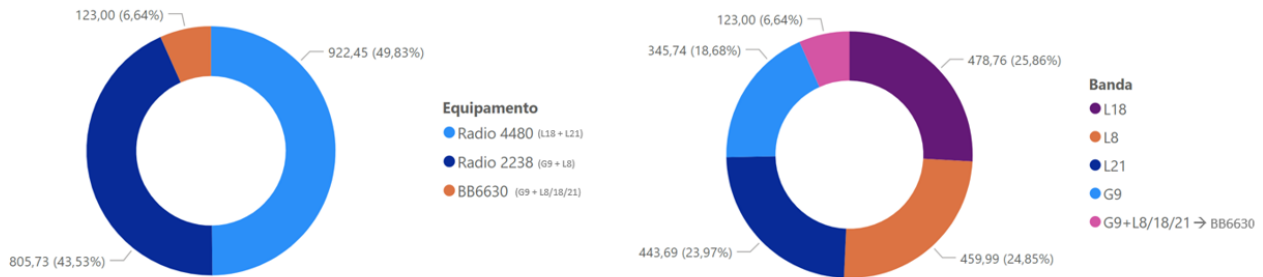


Figura 3.3: 3G *shutdown* - Potência consumida por equipamento (à esquerda) e por banda (à direita).

Verifica-se que o 3G *shutdown* representa uma redução de 363.15 W (28.2%) nas bandas médias (1800 e 2100 MHz) e um aumento da potência consumida de 42.87 W (5.6%) nas bandas baixas (800 e 900 MHz). Isto leva a uma poupança de 320.28 W (14.7%) no local e cenário analisados, a nível de RRUs, o que equivale a uma poupança de energia de 11.22 MWh por estação base ao longo de um ano. A uma taxa de 0.125€/kWh resulta numa poupança de cerca de 1400€/site/ano.

Isto faz com que o *breakeven point* da modernização das RRUs e BBU passe a menos de 1 ano.

### 3.5 Partilha de Infraestrutura de Rede - *RAN Sharing*

Como mencionado em 2.7, existem várias opções de *RAN Sharing*. O alvo de estudo nesta subsecção é o *Multi-Operator Radio Access Network* (MORAN), em que o equipamento rádio é partilhado entre operadores. Lembra-se que todos os gráficos apresentados nesta subsecção provêm de uma janela temporal de 15 minutos.

A Figura 3.4 apresenta o tráfego 2G CS (em Erlang) e PS (em Mb), assim como o consumo rádio em cenários com e sem MORAN para cada setor de uma determinada EB. Considerou-se que o tráfego em cenário de *RAN sharing* é o dobro dos dados em análise.

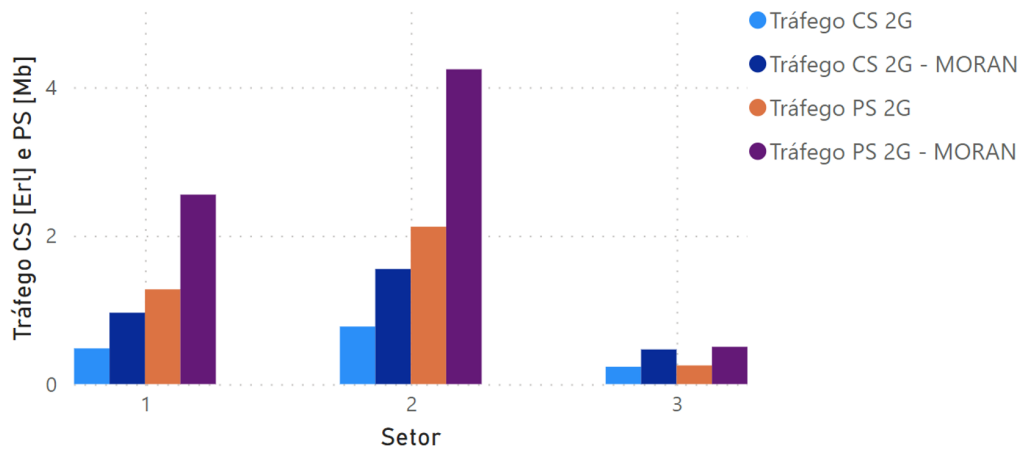


Figura 3.4: Tráfego com e sem RAN *Sharing* - 2G.

Na Figura 3.5 observa-se o consumo energético das RRUs com e sem RAN *sharing*, por setor. Verifica-se que o segundo setor deste site apresenta maior volume de tráfego, logo possui um consumo de energia mais elevado. Quanto ao estudo resultante do consumo energético dos equipamentos rádio com recurso a MORAN, é possível concluir-se que o tráfego duplica, porém o consumo não tem um comportamento linear.

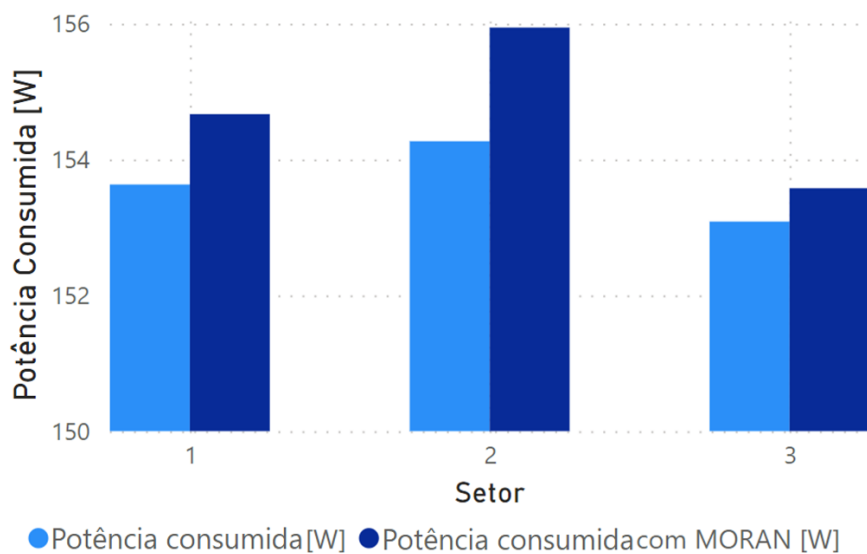


Figura 3.5: Consumo Rádio com e sem RAN *Sharing* - 2G.

O consumo foi determinado através do modelo de previsão, considerando que no cenário com RAN *sharing* o tráfego seria o dobro do cenário de um só operador.

Com o RAN *sharing* o aumento de potência consumida face ao cenário com apenas um MNO, aumenta em 1.04 W (0.67%) no setor 1, 1.67 W (1.07%) no setor 2, e 0.49 W (0.32%) no terceiro setor.

Na tecnologia de Quarta Geração (4G), os consumos são mais elevados devido à existência de mais tráfego. Importa notar que nem todos os terminais móveis possuem *Voice over LTE* (VoLTE) e, portanto, nesses casos é despoletada *Circuit Switched Fallback* (CSFB), ocorrendo as chamadas por *Circuit Switched* (CS) numa tecnologia legada (2G ou 3G).

A Figura 3.6 apresenta o tráfego em 4G, em Gb, com e sem RAN *sharing* para os 3 setores da estação base, e respetivas bandas: 800, 1800 e 2100 MHz. Observa-se que, no site em análise, a banda dos 1800 MHz tem muito mais tráfego que a banda dos 800 ou dos 2100 MHz. Isto justifica-se com a necessidade de um bom débito e bom nível de sinal, pois o L800 possui menor débito que o L1800 e um maior raio de célula. Já o L2100 tem um raio de célula mais reduzido e um melhor débito, sendo utilizado por quem está mais perto da estação base pois é onde há melhor nível de sinal. Importa referir que a prioridade de uma célula pode ser definida através de comandos no OSS, pelo que a distribuição do tráfego também está condicionada à política definida pelo operador móvel.

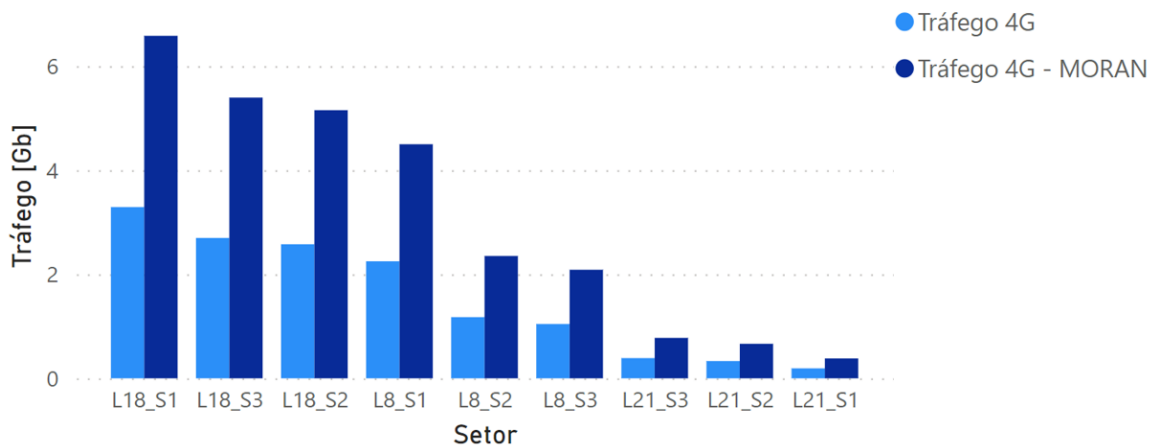


Figura 3.6: Tráfego com e sem RAN *Sharing* - 4G.

Na Figura 3.7 observa-se o consumo da componente rádio com e sem RAN *sharing* para os diversos setores e respetivas bandas. Como seria de esperar, apresenta o mesmo comportamento que o tráfego, tendo, no entanto, diferenças menos evidentes.

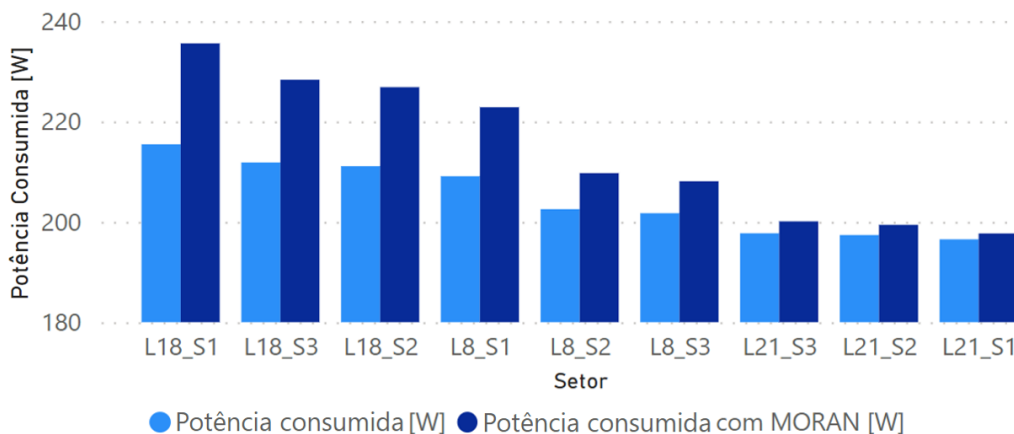


Figura 3.7: Consumo Rádio com e sem RAN *Sharing* - 4G.

Através do RAN *sharing*, o aumento do consumo face ao cenário com apenas um MNO, aumenta em 35.02 W (5.34%) no setor 1, 24.95 W (3.92%) no setor 2, e 25.23 W (3.93%) no terceiro setor.

De salientar que, estes aumentos não representam um cenário negativo do ponto de vista da poupança, uma vez que são dois MNOs ao invés de um, ou seja, existe na verdade uma redução do consumo energético pois dois operadores não estando em RAN *sharing* iriam consumir 47.7% mais, sendo este modelo de negócio bastante vantajoso para os operadores.

### 3.6 Funcionalidades de Poupança Energética

O último passo no processo de redução do consumo energético, passa pela ativação de funcionalidades de poupança energética. Neste cenário optou-se pela ativação das seguintes funcionalidades: BCCH *Power Saving*, *Micro Sleep* e *Sleep Mode*.

O BCCH *Power Saving* é uma funcionalidade da tecnologia 2G, enquanto as técnicas de *Micro Sleep* e *Sleep Mode* serão aplicadas ao 4G.

#### 3.6.1 Funcionalidades 2G

O BCCH *Power Saving* é uma funcionalidade da rede GSM (2G), que possibilita poupança energética através da redução da potência de transmissão em *timeslots* na TRX de BCCH, excepto na *timeslot* 0. A Figura 3.8 representa o funcionamento da funcionalidade, à esquerda o comportamento normal com e sem ocupação das *timeslots*, e à direita o comportamento relativamente à potência usada em cada *timeslot* com a utilização desta funcionalidade de poupança 2G.

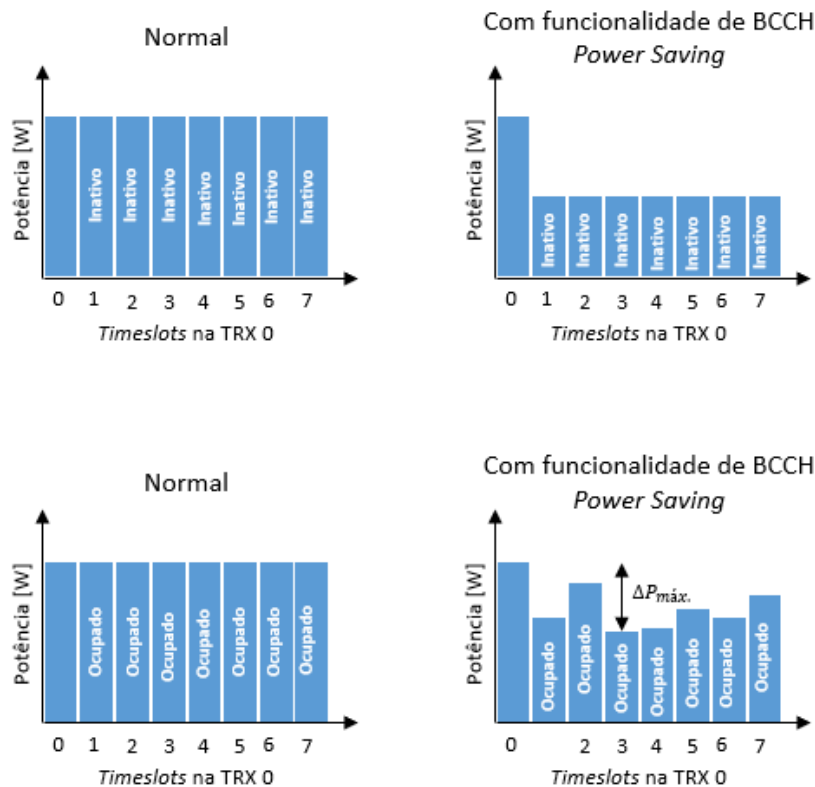


Figura 3.8: Esquema da funcionalidade BCCH *Power Saving*.

Um estudo da CELFINET, permitiu concluir que a ativação desta funcionalidade permite reduções de 11.8% [39].

A Figura 3.9 apresenta a poupança energética alcançada com esta funcionalidade. Verifica-se que houve uma redução média de 18.26 W por setor, o que representa cerca de 1.92 MWh por ano, para a estação base em estudo.

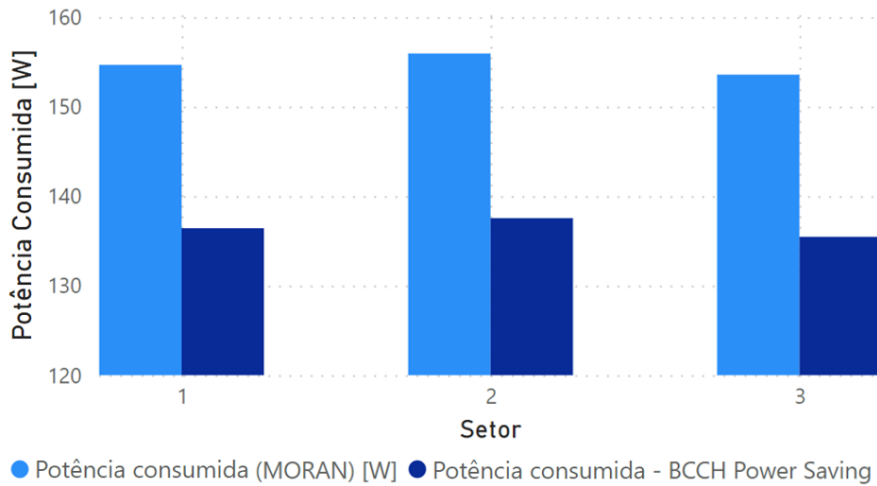


Figura 3.9: Poupança energética através da *feature* 2G - BCCH Power Saving.

### 3.6.2 Funcionalidades 4G

O *Micro Sleep* é uma técnica em que a estação base alterna rapidamente entre os modos de transmissão e recepção de dados, mesmo quando não há tráfego a ser transmitido ou recebido. Essa mudança, permite que a estação base economize energia, reduzindo a potência de transmissão, sem comprometer a qualidade da ligação.

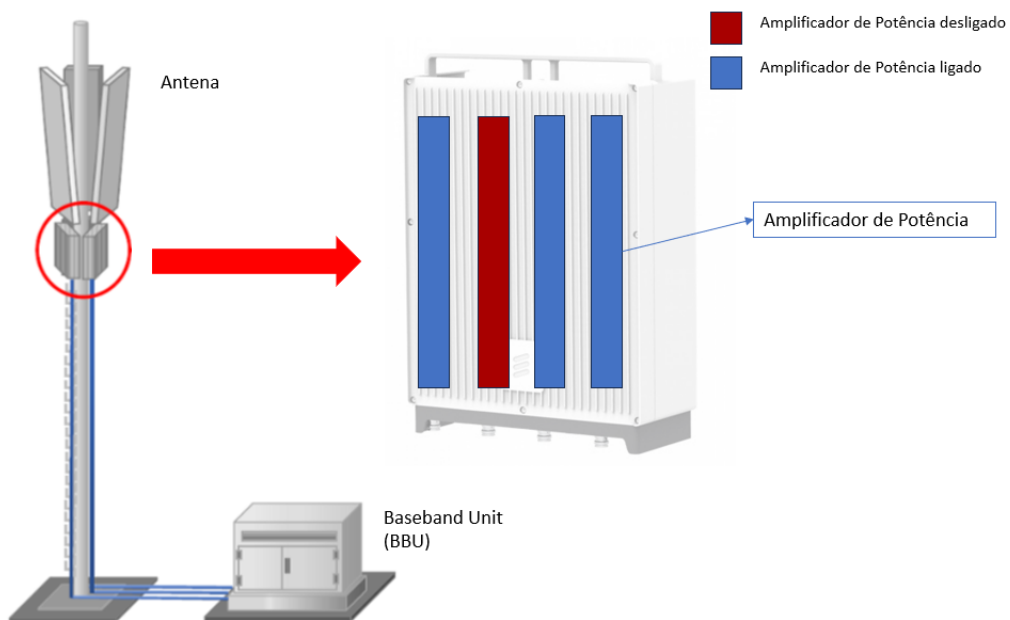


Figura 3.10: Esquema da funcionalidade *Micro Sleep*

Já o *Sleep Mode*, é uma técnica em que a estação base é colocada num estado de baixo consumo de energia quando não é necessária. No período em que se encontra em *sleep mode*, a estação base desliga ou reduz a potência, permitindo assim que a estação base poupe energia.

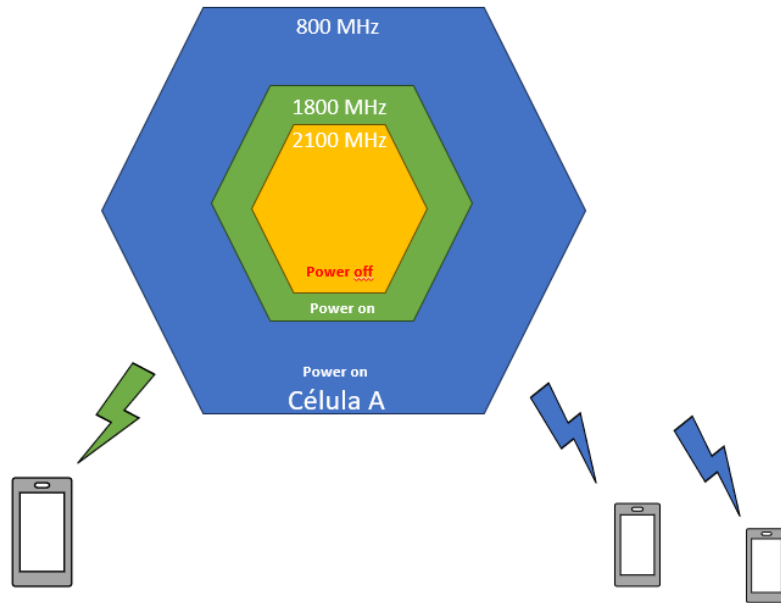


Figura 3.11: Esquema da funcionalidade *Cell Sleep Mode*

Um estudo da CELFINET, permitiu concluir que a ativação conjunta destas funcionalidades permite reduções de 14.2% [39].

A Figura 3.12 indica a redução de energia devido à ativação destas duas funcionalidades LTE. Observa-se uma possível redução de 9.445 MWh por ano para o site em análise, o que a uma taxa de 0.125€/kWh são 1180.6€ de redução no custo de apenas uma estação base.

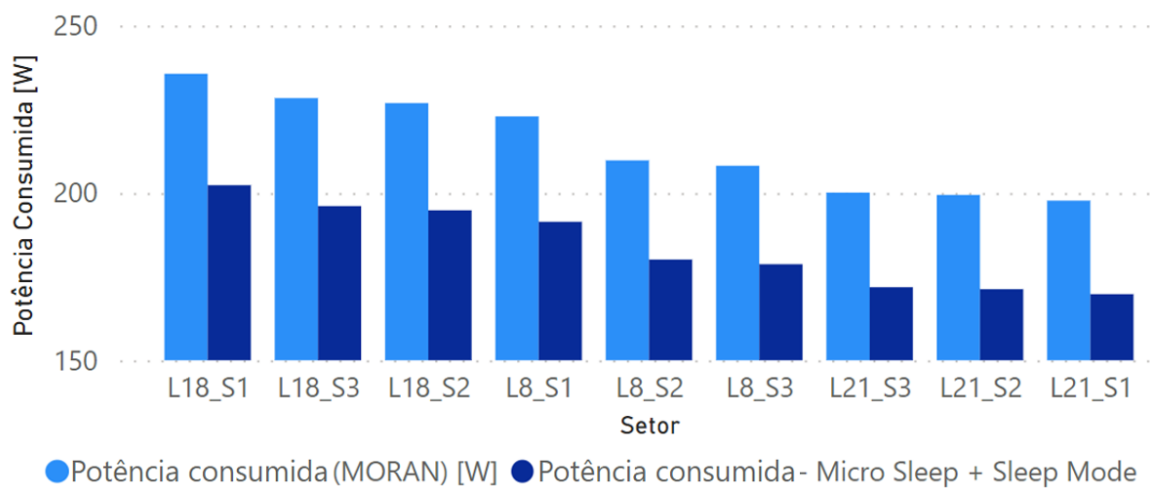


Figura 3.12: Poupança energética através das *features* 4G - *Micro Sleep* e *Sleep Mode*.

O ponto de equilíbrio entre a despesa do investimento para a ativação das funcionalidades de poupança de energia, e o momento em que fica pago através de poupanças de energia, é determinado em 4.5.

### 3.7 Síntese das Técnicas de Poupança Energética Utilizadas

Esta subsecção tem como objetivo resumir as principais técnicas discutidas para otimizar o consumo de energia em operadoras de redes móveis, contribuindo para a redução do impacto ambiental. Essas técnicas incluem a modernização de RRUs e BBUs, desativação do 3G, partilha de infraestrutura de rede (RAN sharing) e ativação de funcionalidades de economia de energia.

O primeiro passo natural é modernizar os equipamentos, seguido pelo desligar do 3G. Em seguida, considera-se a partilha de RAN e, por fim, a adição de três funcionalidades de economia de energia: *BCCH Power Saving* para 2G e *Micro Sleep* e *Sleep Mode* para LTE.

Prevê-se que a modernização de BBUs e RRUs resulte em economias de cerca de 35% por estação base, considerando as características analisadas. O investimento nessas melhorias é recuperado em aproximadamente 1 ano e 2 meses. A desativação do 3G permite uma redução adicional de 14,7% em comparação com o cenário de modernização com U900 e U2100. A partir desse ponto, o investimento na modernização dos equipamentos de rádio e banda base é compensado pelas poupanças de energia em menos de 1 ano.

Ao adicionar um cenário de *Multi-Operator Radio Access Network* (MORAN), no qual dois operadores partilham o equipamento de rádio, o consumo de energia aumenta apenas 4,4% em comparação com o cenário com apenas um *Mobile Network Operator* (MNO) no local, resultando em uma redução de 47,7% em comparação com dois operadores em *RAN sharing*.

Ao combinar a modernização, desativação do UMTS e partilha de RAN, é possível alcançar uma redução de consumo de energia de 45,3% por estação base. Com a adição das três funcionalidades de economia de energia, que permitem reduções energéticas de 14,12%, consegue-se alcançar uma poupança surpreendente de 59% por estação base.

Essas estratégias combinadas proporcionam uma redução significativa no consumo de energia das operadoras de redes móveis, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e económica do setor.

# 4

## Modelo de Negócio para Poupança Energética e Automação

---

<b>4.1</b>	<b>Sustentabilidade</b>	<b>46</b>
4.1.1	Ambiente	47
4.1.2	Sociedade	49
4.1.3	Economia	49
<b>4.2</b>	<b>Custo Total de Propriedade</b>	<b>50</b>
4.2.1	<i>Capital Expenditure</i> (CAPEX)	51
4.2.2	<i>Operational Expenditure</i> (OPEX)	57
4.2.3	Caso de Uso - Inteligência Artificial (IA)	60
<b>4.3</b>	<b>Consumo Energético</b>	<b>62</b>
4.3.1	Consumo Energético Anual	63
4.3.2	Consumo Energético DC	64
4.3.3	Rede Elétrica	67
<b>4.4</b>	<b>Implementação de 5G</b>	<b>68</b>
<b>4.5</b>	<b>Investimento SON</b>	<b>69</b>

## 4.1 Sustentabilidade

Por forma a existir um equilíbrio entre questões ambientais, bem-estar social e desenvolvimento económico, foi criado o conceito de sustentabilidade que visa a capacidade de satisfazer as necessidades atuais sem comprometer o futuro.

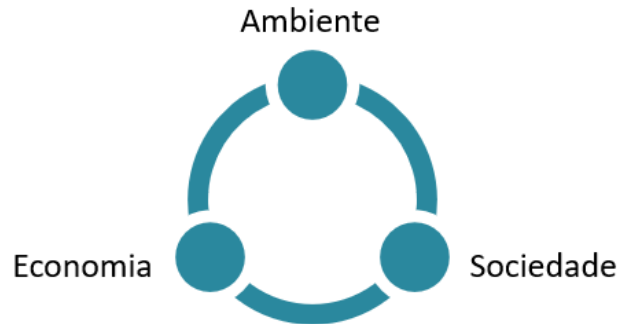


Figura 4.1: Equilíbrio pretendido com a sustentabilidade.

Deste modo, as empresas têm uma grande importância neste tópico, necessitando de agir de forma a cumprir a sua missão social sem descurar a contribuição para um planeta mais sustentável, nomeadamente com a redução de gases de efeito de estufa. As empresas que cumpram esta necessidade podem reduzir os seus custos, nomeadamente energéticos, reduzindo o OPEX e CAPEX com, por exemplo, implementação de torres de madeira e modernização dos equipamentos da EB. A redução de custos de energia podem também ser alcançados com recurso a energias renováveis que podem, além do impacto na sustentabilidade, melhorar o retorno do investimento no objetivo de tornar a rede mais eficiente energeticamente, não reduzindo a sua qualidade de serviço/experiência. No entanto, é um investimento elevado e nem sempre viável.

Outra forma de reduzir os custos de CAPEX nesta temática é através da modernização de equipamentos de uma estação base, conforme estudado em 3.3, subcapítulo de modernização de BBU's e RRUs. Relativamente ao OPEX, além do recurso a energias renováveis, é possível alcançar reduções nos custos através da ativação de funcionalidades de poupança energética, como analisado na subsecção 3.6, de aplicação de *features* que permitam a diminuição de consumos de energia elétrica, e redução das despesas de aluguer com o RAN *sharing*, estudado em 3.5, em que 2 MNOs partilham, não só toda a infraestrutura passiva, como a ativa.

Outro aspeto positivo de uma empresa sustentável, é a forma como é vista pelo mercado, pois é um tema cada vez mais importante, sendo tido em conta por clientes e *stakeholders*, podendo afetar também a reputação perante os fornecedores. As empresas podem beneficiar não só de uma posição de liderança no mercado devido à reputação positiva, como de maior lealdade dos clientes. Pode ainda mitigar ou antecipar riscos relacionados com alterações em regulamentos, tendências de mercado e políticas governamentais.

Assim, esta temática acresce o cuidado dos MNOs e *TowerCos* relativamente à reutilização e reciclagem de materiais, e redução do consumo de recursos naturais nas construções e manutenções. Não obstante, optar-se por torres de madeira acaba por não ser, em comparação com as opções atuais, uma contradição à redução de consumo de recursos naturais, visto que tem o potencial de compensar

na redução de emissão de gases de efeito de estufa, como será apresentado de seguida. Pode-se, inclusive, compensar com a plantação de árvores para compensar as necessárias para a construção de uma torre de telecomunicações.

#### 4.1.1 Ambiente

Dados referentes a uma empresa de infraestrutura de telecomunicações a operar em Portugal, ditam que num universo de 3500 sites [41] existem 24 sistemas de painéis solares, 5 estações base com eólicas e cerca de 1500 sites com *smart metering*. O plano dessa empresa, está em conformidade com a *International Organization for Standardization (ISO) 50001 (Energy Management)* que consiste em seguir uma abordagem sistemática para a melhoria contínua do desempenho energético e da segurança [42].

Quanto à construção de estações base, uma torre requer em média 50 toneladas de betão e 6 toneladas de aço [43]. Estes valores são bastante elevados, e por consequência preocupantes, causando um impacto negativo no ambiente através da sua construção e transporte, pois libertam gases de efeito de estufa para a atmosfera. Os principais gases de efeito de estufa são o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ ), hidrofluorcarbono ( $HFC$ ) e perfluorcarbono ( $PFC$ ). Por forma a comparar as emissões de efeito de estufa dos diferentes gases, e sendo o  $CO_2$  o mais conhecido pela sociedade, foi criada uma unidade de medida designada dióxido de carbono equivalente ( $CO_2e$ ).

O gás de efeito de estufa  $HFC$ , foi criado em alternativa aos clorofluorcarbonetos ( $CFC$ ) sendo constituído por hidrogénio, flúor e carbono. Esta substituição face aos  $CFC$  deve-se ao facto do cloro reagir com o ozono na atmosfera, degradando-o em moléculas de oxigénio. Uma molécula de  $CFC$  ao ser exposta à radiação Ultravioleta (UV) divide-se. O cloro, reage com o ozono, quebrando-o em moléculas de oxigénio e monóxido de cloro ( $ClO$ ), diminuindo assim a quantidade de ozono presente na camada de ozono, o que contribui para a destruição da mesma. De notar que o monóxido de cloro também pode reagir com o ozono, formando mais oxigénio e produzindo cloro. O mesmo acontece com outros halons ou hidrocarboneto halogenado (grupo de compostos que contém halogénios, como o cloro, bromo ou flúor, e carbono) que são por vezes utilizados como extintores de incêndio. São semelhantes aos  $CFCs$  e bromofluorcarbonetos ( $BFCs$ ) em termos de potencial de destruição da camada de ozono, tendo sido proibidos pela Convenção de Viena e pelo Protocolo de Montreal, juntamente com os  $CFCs$  e  $BFCs$ .

O problema é que a alternativa criada, o  $HFC$ , embora não afete a camada de ozono, tem um impacto significativo no aquecimento global, pois absorve a radiação Infravermelha (IV) refletida pela superfície terrestre retendo o calor na atmosfera. Os  $HFCs$  são moléculas que contêm ligações polarizadas (que não compartilham eletrões igualmente) entre átomos de carbono e flúor, o que faz com que a molécula possua um momento dipolar, ou seja, um campo elétrico na sua estrutura. Quando os  $HFCs$  estão na atmosfera podem absorver radiação IV, visto que tem uma frequência que corresponde à vibração das ligações moleculares dos  $HFCs$ . Quando essas ligações absorvem a radiação, começam a vibrar mais intensamente, aumentando a energia da molécula, o que pode levar a interações químicas com outras moléculas na atmosfera, além de contribuir para o aquecimento global.

Um relatório sobre ambiente e alterações climáticas de uma empresa de infraestrutura de telecomunicações [44], refere que em Portugal no ano de 2022 existiu, relativamente a emissões operacionais, 31228  $tCO_2e$ , representando 231  $tCO_2e/M€$  e 5.17  $tCO_2e/site$  o que são cerca de 14.2k  $gCO_2e/site/dia$ . Para compensar estas emissões são necessárias cerca de 21 árvores por site por ano (assumindo 0.1244  $kgCO_2/kWh$  e  $5.04 \times 10^{-4}$   $árvores/kWh$ , [39]).

## Torres de Madeira

Apesar das emissões operacionais representarem a maioria dos consumos anuais, a construção de novas torres também é bastante preocupante. Deste modo, empresas como a finlandesa Ecotelligent inovaram com soluções 100% reutilizáveis ou recicláveis [45].

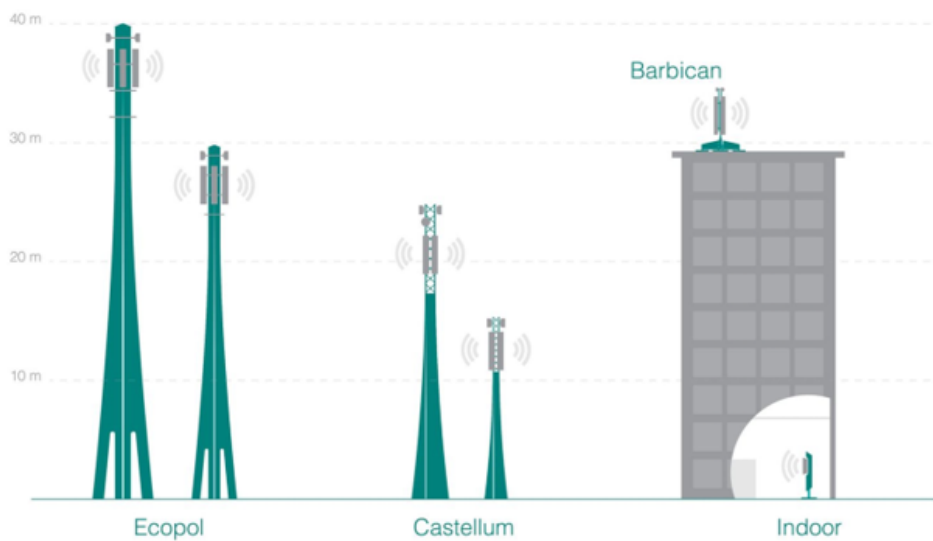


Figura 4.2: Soluções de torres de madeira - Ecotelligent [45].

A Figura 4.2 apresenta 4 tipos de soluções de torres com uma duração estimada de aproximadamente 30 anos [45]. A solução *Ecopol* alberga 3 a 4 MNOs, enquanto as *Castellum* hospedam 2 a 3 operadores. As soluções para *rooftops Barbican*, têm entre 4 a 8 metros e são instaladas em 15 minutos.

Uma torre de madeira de 30 metros requer cerca de 15 a 20 toneladas de madeira [46]. Tendo em conta que em 20 toneladas de madeira, 36  $tCO_2e$  [46] são libertados para a atmosfera, enquanto para 80 toneladas de betão e 6 toneladas de aço, [43], ocorrem emissões de 64  $tCO_2e$  e 12  $tCO_2e$ , respetivamente. A Tabela 4.1 contempla estes dados, permitindo concluir que uma torre de madeira emite cerca de 53% menos toneladas de dióxido de carbono equivalente ( $CO_2e$ ).

Tabela 4.1: Emissões de  $CO_2e$  por material.

	Betão	Aço	Madeira
Quantidade [t]	80	6	20
Emissões [ $tCO_2e$ ]	64	12	36

### 4.1.2 Sociedade

O bem estar social é outro pilar da sustentabilidade, havendo foco na saúde e segurança, acesso a comunicações em zonas rurais e responsabilidade social. O acesso a comunicações em zonas rurais tem como fim qualquer pessoa conseguir comunicar, independentemente da quantidade de povoamento da zona em que habita, sendo uma obrigação que a ANACOM impõem aos operadores de redes móveis. Já a responsabilidade social é um dever das empresas que deve ser promovida através de ações que visem igualdade, diversidade, inclusão e gestão de resíduos. Como gestão de resíduos está também compreendido o cuidado em, após obras e/ou modernizações em sites, deixar o local limpo.

Aspetos como a saúde e segurança levam a uma importante necessidade, no contexto das redes móveis, o acesso à informação sobre os possíveis impactos da exposição a ondas eletromagnéticas, uma vez que a sociedade associa a palavra "radiação" a uma conotação negativa. A radiação eletromagnética é uma forma de energia que se propaga através do espaço em ondas eletromagnéticas. Existem dois tipos: radiação eletromagnética ionizante e não ionizante. A diferença entre ambas está relacionada com a quantidade de energia transportada pela onda.

#### **Radiação Eletromagnética - Quais os perigos?**

A radiação eletromagnética ionizante possui energia suficiente para remover eletrões de átomos ou moléculas. Essa remoção leva à criação de iões e radicais livres. Exemplos deste tipo de radiação inclui raios-X, raios gama, radiação alfa e beta, entre outras. Devido a esta remoção de eletrões, pode ter efeitos nocivos para a saúde, como causar danos ao *Ácido desoxirribonucleico* (ADN) o que pode aumentar o risco de cancro e outras doenças.

Por outro lado, a radiação eletromagnética não ionizante não possui energia suficiente para remover eletrões, portanto não cria iões nem radicais livres potencialmente prejudiciais para a saúde. Exemplos deste tipo de radiação incluem ondas rádio, microondas, infravermelha e luz visível. Tipicamente, é uma radiação considerada segura, desde que os níveis de exposição não sejam muito elevados. Isto deve-se ao facto da elevada exposição poder levar ao aquecimento dos tecidos, alterações na permeabilidade das membranas celulares e mudanças no padrão de atividade cerebral.

Deste modo, a principal diferença entre os dois tipos de radiação eletromagnética mencionados está na quantidade de energia que transportam e nos efeitos que essa energia possa ter na matéria e, por consequência, na saúde humana.

### 4.1.3 Economia

O desenvolvimento económico é outro ponto fulcral da sustentabilidade que, neste contexto, pode ser a implementação de torres de madeira ao invés de aço, ativação de funcionalidades de poupança energética, modernização de equipamentos para opções mais eficientes energeticamente, optar por partilha de equipamento rádio reduzindo também os custos de aluguer do local, e ainda recurso a energias renováveis.

Em 4.1.1 verificou-se que as emissões  $CO_2e$  libertadas para a construção de uma torre de madeira é cerca de menos 40  $tCO_2e$  (53%) que a construção de torres de aço. Considerando uma torre de

madeira com um custo de 23 000€ [46] e uma torre de aço com um custo de 14 000€ [42], o acréscimo de cerca de 9000€ no custo da torre compensa com uma redução de 53% de  $CO_2e$ , já que melhora a reputação perante clientes, fornecedores e *stakeholders*, o que torna a empresa mais atrativa para investidores.

Deste modo, as empresas podem contribuir para a sustentabilidade através da redução de custos de capital (construção) e operacionais (manutenção e energia).

## 4.2 Custo Total de Propriedade

De modo a construir um modelo de negócio, é imperativo ter um *Total Cost of Ownership* (TCO). Este custo representa a soma de todas as despesas de uma empresa/negócio e, por conseguinte, é necessário ter uma visão mais profunda de todas as partes envolvidas.

Para o modelo desenvolvido no âmbito desta dissertação, são considerados dois pontos de vista distintos: o do *Mobile Network Operator* (MNO) e o da *TowerCo* (empresa de infraestrutura de telecomunicações). A Figura 4.3 apresenta uma visão simplificada do modelo TCO, onde se verifica que o CAPEX é constituído por despesas de implementação, que são custos tanto do MNO como da *TowerCo*, e o OPEX por custos de manutenção, que também são custos de ambas as empresas, aluguer, energia e espetro.

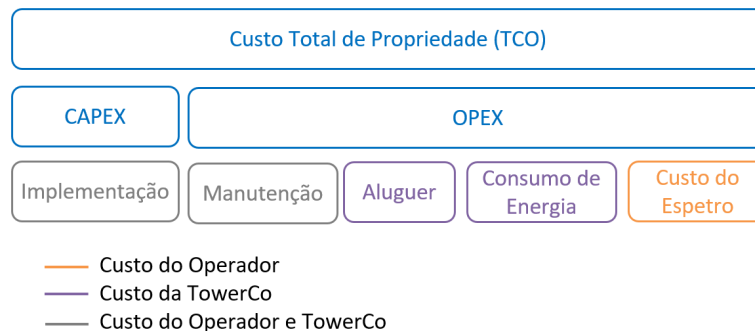


Figura 4.3: Estrutura de Custo Total de Propriedade TCO (baseado em [34]).

O custo pode ser sumarizado da seguinte forma:

$$TCO = C_{CAPEX_i} + C_{OPEX_i} \quad (4.1)$$

A Equação 4.1 reflete a visão geral presente na Figura 4.3, ou seja, o somatório das despesas de capital e operacionais, que irão ser apresentadas em detalhe nas próximas subsecções. O parâmetro  $i$  caracteriza a tipologia da torre, podendo ser efetivamente uma torre GBT, *Rooftop Tower* (RTT), *Distributed Antenna System* (DAS) ou repetidor de RF. Tipicamente, tratam-se de torres ou *rooftops*, assim este documento foca-se nestas duas tipologias, uma vez que os restantes possuem um impacto menos relevante no TCO, não existindo dados suficientes para o analisar rigorosamente no que diz respeito ao consumo de energia.

As equações 4.2 e 4.3 refletem o cálculo geral de CAPEX e OPEX, da visão de MNO e *TowerCo*, onde  $New_{BS_i}$  representa o número de novas estações base,  $n$  o ano e  $N$  o tempo de vida da rede.

$$C_{CAPEX_i} = NewBS_i \times \sum_{n=0}^N \left( C_{CAPEX_{TowerCo_n_i}} + C_{CAPEX_{MNO_n_i}} \right) \quad (4.2)$$

$$C_{OPEX_i} = C_{OPEX_{TowerCo_i}} + C_{OPEX_{MNO_i}} \quad (4.3)$$

Este subcapítulo encontra-se dividido em três partes. Numa primeira parte são abordados em 4.2.1 os aspetos do CAPEX, inclusive como determinar o custo do poste de uma torre com base na altura. Em 4.2.2 analisa-se o OPEX que, tal como no CAPEX possui perspectiva do MNO e da *TowerCo*. Por fim, em 4.2.3 é apresentado um caso de uso de Inteligência Artificial (IA).

#### 4.2.1 *Capital Expenditure (CAPEX)*

As despesas de capital (CAPEX) representam investimentos ou desembolsos em capital, pelo que são fundos utilizados para adquirir elementos que ajudarão a fazer crescer o negócio e a gerar lucro. É possível ver o CAPEX da seguinte forma:

##### Implementação

- **Mobile Network Operator (MNO):** antenas, *Remote Radio Unit* (RRU), *Baseband Unit* (BBU), *routers*, equipamento de transmissão, modernização, compra de espetro, *RAN sharing*, *Single Radio Access Network* (SRAN) *Integrations*, etc.
- **TowerCo:** infraestruturas, realocização, construção de ramal de energia, baterias, ar condicionado e unidades de refrigeração.

As equações seguintes mostram como pode ser calculado o CAPEX para cada empresa. Como mencionado anteriormente,  $i$  é o tipo de site: GBT ou RTT.

Para construir uma estação base, diversos aspetos estão envolvidos. As equações 4.4, 4.5 e seguintes apresentam os detalhes.

$$C_{CAPEX_{TowerCo_n_i}} = C_{Tower\ pole_{n_i}} + C_{Tower\ add-ons_{n_i}} + C_{Installation_{TowerCo_n_i}} \quad (4.4)$$

$$C_{CAPEX_{MNO_n_i}} = C_{Radio\ equip_{n_i}} + C_{Tx\ equip_{n_i}} + C_{cables_{n_i}} + C_{Installation_{equip_{n_i}}} \quad (4.5)$$

A equação 4.4 caracteriza as despesas de capital de uma *TowerCo*.  $C_{Tower\ pole_{n_i}}$ , representa o custo de um poste de uma torre de telecomunicações, durante o ano  $n$  num local do tipo  $i$ .  $C_{Tower\ add-ons_{n_i}}$  caracteriza o custo adicional relativo a escada, sistema de segurança da escada, fundação (no caso das GBTs), suporte de luz noturna, plataforma de trabalho, parafusos de ancoragem, etc., e  $C_{Installation_{TowerCo_n_i}}$  o custo da instalação de todos os elementos mencionados.

Por sua vez, a equação 4.5 revela os desembolsos de capital do ponto de vista do operador, equipamento de rádio e transmissão, cabos e instalação dos mesmos. As unidades de banda de base (BBUs) são consideradas nos custos do equipamento de rádio e  $C_{Installation_{equip_{n_i}}}$  reflete o custo da instalação de todos estes equipamentos.

Na Figura 4.4 é apresentado o CAPEX para uma nova implementação, GBT versus RTT, tanto para o operador como para o proprietário da infraestrutura, de uma perspectiva do mercado português. Verifica-se que os custos da empresa detentora de infraestrutura de telecomunicações é deveras superior à do operador, no que toca a construção de torres (GBTs). Relativamente às despesas do MNO, observa-se que são as mesmas independentemente de se tratar de uma GBT ou RTT, pois o material/equipamento adquirido pelo MNO é o mesmo independentemente de se tratar de uma torre ou *rooftop*. De salientar que, nesta análise foram consideradas alturas de 30 metros para GBT e 5 metros para RTT.

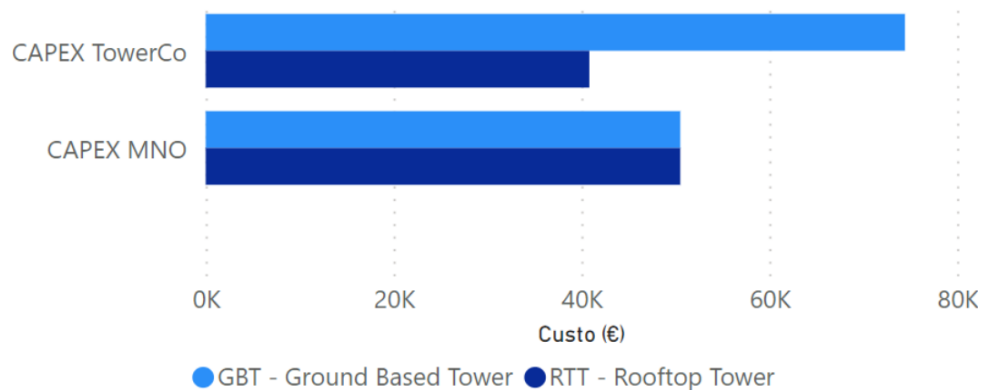


Figura 4.4: Previsão CAPEX para novas implementações.

Para se planejar a construção de uma estação base, é necessário previamente conhecer os detalhes pretendidos, como a cota, quantidade e peso das antenas. Desta forma, foi desenvolvida uma equação para se deduzir o custo da futura torre, cujo maior impacto é o material utilizado e a altura da estrutura. É importante notar que o custo do material varia quase diariamente, pelo que foi utilizado um valor indicativo para o cálculo deste estudo, no valor de 1.58€/kg [47] (conversão efetuada à data da utilização do artigo, ao invés da conversão contida no mesmo).

### Cálculo do Custo - Tipo de Estrutura

Uma *Ground Based Tower* (GBT) é principalmente composta por três partes: fundação, fuste, escada e plataformas de trabalho. A fundação é a estrutura que suporta e equilibra o fuste, que é constituída tipicamente por betão armado. A interligação do fuste com a fundação é garantida por meio de um chumbadouro em aço galvanizado e depende dos esforços causados pelas solicitações do vento sobre o fuste e equipamentos, dependendo maioritariamente do tipo de solo.

Já o fuste é a estrutura vertical de suporte de equipamentos que garante que estes ficam instalados à cota pretendida e que é dimensionada para suportar - mais uma vez - as solicitações do vento sobre o fuste e equipamentos. Quanto às plataformas de trabalho, são onde estão instalados os equipamentos (antenas, *links* de transmissão, outros) e respetivos suportes.

Assim, pode-se concluir, que existem três parâmetros que têm impacto no custo de uma torre: altura da torre, tipo de solo e zona de vento. A que possui uma maior influência é a altura da torre, já que implica que haja necessidade de mais ou menos material.

Existem diversos tipos de estrutura de torres de telecomunicações: tubulares, treliçadas, espiadas, combinadas, etc. As tubulares representam a maioria (47.23%). Deste modo, esta subsecção incide sobre a determinação do custo de uma torre tubular com base na altura pretendida.

As torres tubulares, também designadas *monopole*, podem ser divididas em 5 categorias [48]: reforçadas, médias, ligeiras, transportáveis (que podem ser montadas e desmontadas, pois as suas fundações não estão debaixo do solo) e camufladas, sendo apresentadas na Figura 4.5. É possível constatar que, excluindo as torres camufladas, existe um declive, por consequência da diminuição da espessura ao longo da altura, e que as plataformas de trabalho são tipicamente triangulares.

A informação estrutural contida no catálogo [48] permite chegar a uma equação para cada particularidade da torre, não só quanto à altura da mesma e consequentemente diâmetro da base, como o tipo de estrutura.

No entanto, é necessário primeiramente explicar como se pode determinar o custo de uma torre, sendo que se optou pelo recurso à massa da mesma, por ser dependente do tipo de material, adicionando-se posteriormente os montantes referentes à restante estrutura que podem ser fixos ou variar de forma mais linear.



Figura 4.5: Tipos de Estrutura Tubulares (baseado em [48]).

As torres são, como referido anteriormente, normalmente compostas por aço cujo peso volúmico é de  $77 \text{ kN/m}^3$  [49]. Ao determinar o volume de uma torre, é possível calcular a massa do material e, por conseguinte, chegar ao custo recorrendo a um valor indicativo do preço do material utilizado.

$$m = \frac{V \times \gamma}{g} \quad (4.6)$$

A equação 4.6 apresenta a massa de um material em quilograma ( $kg$ ). O parâmetro  $V$  representa o volume em  $m^3$ ,  $\gamma$  o peso volúmico em  $N/m^3$  e  $g$  a aceleração gravítica em  $m/s^2$ . Esta equação foi deduzida a partir do peso volúmico que representa a força exercida ao volume ocupado por um material. Essa força pode ser dada pela relação entre a densidade e a aceleração gravítica. Assim, o peso volúmico pode ser calculado através da equação 4.7 o que, juntamente com a equação 4.8 que determina a densidade  $\rho$ , resulta na equação 4.6.

$$\gamma = \rho \times g \quad (4.7)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.8)$$

Quanto ao volume, pode ser determinado através de uma equação da reta que caracterize a variação do diâmetro da torre,  $\emptyset$ , ao longo da altura,  $h$ .

$$V_{fuste} = \pi \int_0^{\text{altura da torre}} \left( s \times h + \frac{\emptyset_{base}}{2} \right)^2 dh - \pi \int_0^{\text{altura da torre}} \left( s \times h + \frac{\emptyset_{base}}{2} - \Delta\emptyset \right)^2 dh \quad (4.9)$$

Uma vez que a torre é oca, duas equações têm de ser consideradas, como se pode observar na equação 4.9. A diferença corresponde ao volume da torre. Importa referir que  $s$  denota o declive da reta,  $\emptyset_{base}$  o diâmetro da base da torre e  $\Delta\emptyset$  a espessura do material do poste, que neste documento é considerado  $8 \text{ mm}$ .

Por fim, é exequível deduzir o custo do poste da infraestrutura de telecomunicações através da equação seguinte:

$$C_{fuste} = m \times s_n \quad (4.10)$$

A variável  $m$  caracteriza a massa em  $kg$  do poste da torre, determinado através da equação 4.6,  $s_n$  o custo unitário do material em  $\text{€}/kg$  em que se considerou como valor indicativo do aço  $1.58 \text{ €}/kg$  [47], conforme anteriormente referido.

No entanto, uma torre de telecomunicações pode ser construída também por betão ao invés de aço. A Tabela 4.2 apresenta o peso volúmico de cada material. Os mais utilizados neste tipo de construção são o aço e betão armado, uma vez que o betão simples não possui tanta resistência.

Tabela 4.2: Peso volúmico de cada material [49].

Peso Volúmico [ $kN/m^3$ ]	
Aço	77
Betão Armado	25
Betão Simples	24

Existem diversos tipos de aço, sendo o mais recorrente no catálogo utilizado ([48]), em torres do tipo *monopole*, a classe S275. Relativamente ao betão também são classificados em diferentes classes de resistência de acordo com a sua força compressiva.

A Figura 4.6 ilustra o custo associado a cada tipo de estrutura tubular com uma altura de 30 metros, calculado por meio de um algoritmo desenvolvido em  $R$  que recorre ao catálogo da Metalgalva [48] para determinar a equação da reta correspondente a cada cenário. É evidente que as torres camufladas são as mais dispendiosas, enquanto que torres tubulares transportáveis apresentam um custo menor que as torres tubulares médias.

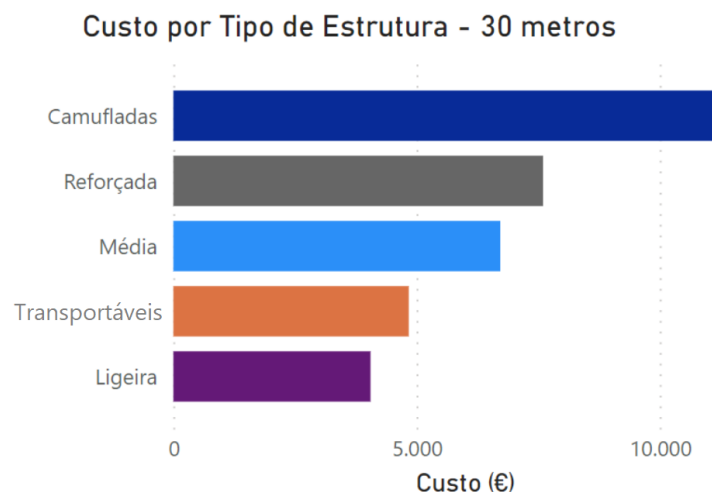


Figura 4.6: Custo por tipo de estrutura tubular com uma dimensão de 30 metros.

### Custos Adicionais

Custos adicionais incluem tanto custos fixos como variáveis. De entre as despesas fixas podem constar porta anti-escalamento, suporte pára-raios, balizagem noturna e de antenas. A Figura 4.7 apresenta percentagens de custos indicativos deste tipo de componentes.

As plataformas de trabalho de 3.3x3.3 representam o maior custo fixo sendo 36.3% das despesas não variáveis. Segue-se a fundação com uma média de 19.47%. Por outro lado, o suporte de balizamento noturno e pára-raios são os custos menos significantes, caracterizando 3.45% e 1.81% dos custos, respetivamente. Importa mencionar que, a luz noturna é tipicamente utilizada em todas as estações com mais de 30 metros de altura.

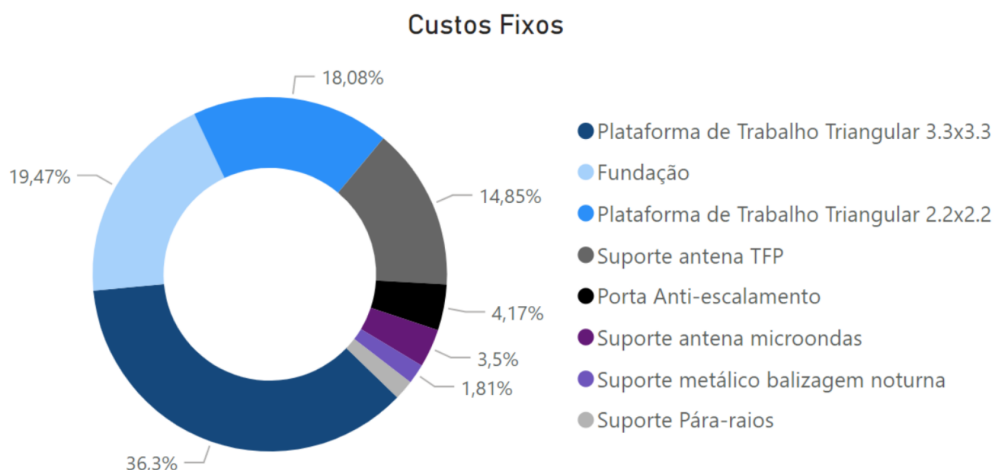


Figura 4.7: Percentagem de custos de uma torre de telecomunicações não dependentes de altura nem distância à costa.

Quanto aos custos afetados pela distância à costa, tem-se principalmente o sistema de segurança. O serviço de pintura e conjunto de chumbadouros, utilizados para fixar o poste da torre à fundação, também são dependentes desta distância.

Estes custos são variáveis no sentido em que o material necessita de uma resistência diferente, devido às condições climáticas, dependendo da distância à costa que é categorizada em zonas de vento.

Esta categorização segue a norma europeia EN 1991-1-4, sendo que em Portugal existem duas, zonas A e B. A Figura 4.8 apresenta os principais aspetos de uma escada típica, ilustrando uma calha de um sistema de segurança, patim de descanso e suporte de cabos e de afixação da escada. Esta imagem é proveniente de documentação interna de uma empresa de infraestrutura de telecomunicações.

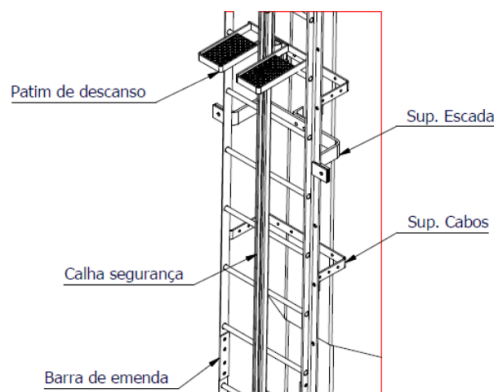


Figura 4.8: Componentes chave de uma escada de uma torre de telecomunicações.

A Figura 4.9 reflete os custos de uma torre situada em zona de vento "A". Conclui-se que o serviço de pintura tem uma maior influência no que diz respeito a despesas variáveis, além do poste da torre. De salientar que, o custo da pintura é consideravelmente afetado pela altura da torre. Os sistemas de segurança são a segunda maior despesa, seguidos pelos conjuntos de chumbadouros e escada com suporte para caminho de cabos. O custo de patins de descanso é o menos impactante, apresentando uma variação muito mais reduzida com o aumento da altura da estação base, porém tem uma implicação de 18% no que toca a custos.

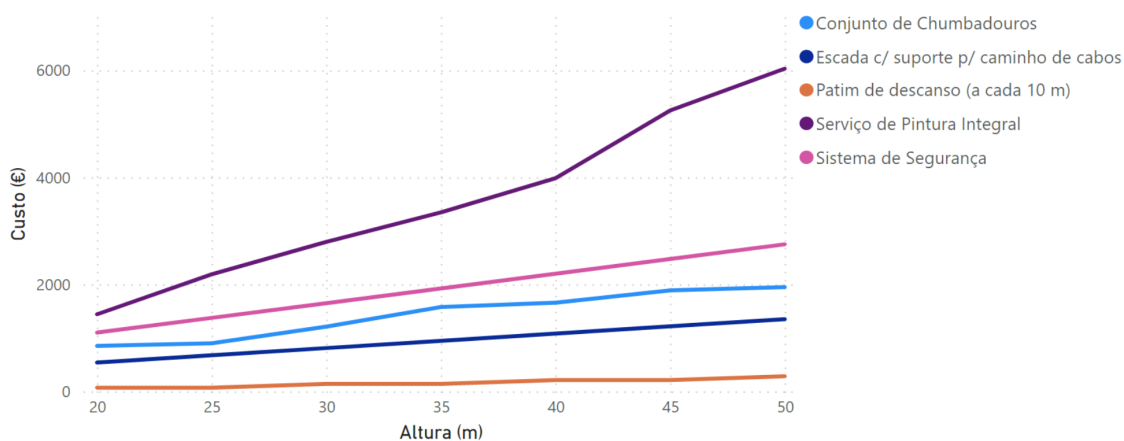


Figura 4.9: Custos de uma torre - zona de vento A.

O outro zonamento do território em termos de vento existente em Portugal é a zona B, cujos custos estão representados na Figura 4.10. Sucede exatamente o mesmo comportamento observado na Figura 4.9, havendo diferenças ligeiras de valores relativamente aos custos de chumbadouros e serviço de pintura. Importa mencionar que a pintura e seu custo são influenciados pela localização da torre, recorrendo-se a esquemas de pintura mais completos e mais caros em zonas de ambiente agressivo, como junto à costa oceânica e zonas industriais. Por consequência, existem normas para definir o esquema de pintura para cada zona do território nacional.

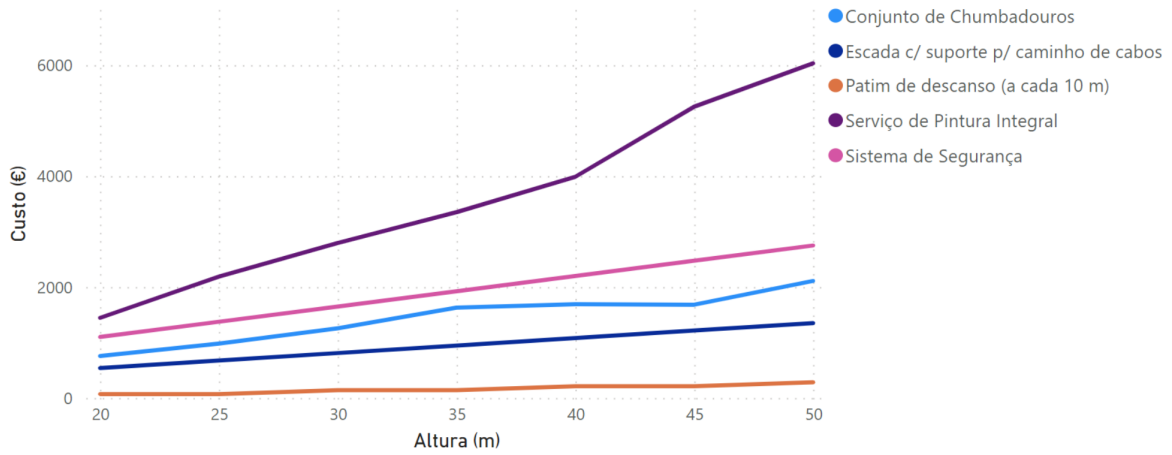


Figura 4.10: Custos de uma torre - zona de vento B.

Pode-se constatar que a diferença, quanto ao tipo de zona de vento, em termos de despesas não representa uma influência chave no custo total de uma torre de telecomunicações móveis, não tendo qualquer influência no que diz respeito ao custo da escada e sistema de segurança.

#### 4.2.2 Operational Expenditure (OPEX)

Relativamente às despesas operacionais, representam o pagamento referente às atividades de gestão do negócio e vendas de serviços e produtos. O OPEX pode ser dividido em:

- **Espetro:** custo mensal do espetro;
- **Energia:** custo de energia no local, que tipicamente é uma despesa da *TowerCo*;
- **Arrendamentos:** taxa de aluguer relativa ao imóvel onde o local está localizado, que é também normalmente um custo da *TowerCo*;
- **Manutenção:** todos os custos relacionados com manutenção, cuidados ou conservação de qualquer material relacionado com uma estação base.

As taxas de energia e aluguer são tipicamente uma despesa da *TowerCo*, uma vez que a torre pode ter mais do que um *MNO* no local. Relativamente aos custos energéticos, ainda não há forma de a empresa saber que percentagem de consumo cada operador tem, pelo que os operadores, enquanto inquilinos, pagam uma taxa de serviço à *TowerCo* no que diz respeito à energia e ao aluguer. Com a instalação de sistemas de *smart meters* será possível saber a fatia de consumo do operador.

As equações seguintes apresentam o cálculo do OPEX. A equação 4.11 apresenta os custos operacionais do operador. O custo do espetro é designado como  $C_{Bandwidthn_i}$ , manutenção por  $C_{Maintenancen_i}$  e  $N_{Preventive Maintenance_i}$  corresponde ao número de estações base onde foi efetuada manutenção preventiva, também designada manutenção programada, que inclui inspeções e manutenção.  $C_{wages}$  reflete os custos que a empresa tem com os colaboradores e  $C_{Network}$  os custos com o OSS.

$$C_{OPEX_{MNO_i}} = N_{BS_i} \times \sum_{n=0}^N (C_{Bandwidthn_i}) + N_{Preventive Maintenance_i} \times \sum_{n=1}^N (C_{Maintenancen_i}) + C_{wages} + C_{Network} \quad (4.11)$$

A equação 4.12 reflete o OPEX da *TowerCo* que é constituído pelas principais despesas operacionais e pelos desmantelamentos, que não irão ser explorados neste documento por não serem um foco do negócio.

$$C_{OPEX_{TowerCo_i}} = OPEX_{Main\ expenses} + OPEX_{Decomm} \quad (4.12)$$

As principais despesas são compostas pelos custos energéticos, aluguer e manutenção preventiva, como se pode observar na equação 4.13.

$$OPEX_{Main\ expenses} = N_{BS_i} \times \sum_{n=0}^N (C_{Power\ Consumption_{n_i}} + C_{Site\ Leases_{n_i}}) + N_{Preventive\ Maintenance_i} \times \sum_{n=1}^N (C_{Maintenance_{n_i}}) \quad (4.13)$$

Detalhando-se um pouco mais os custos operacionais relativos a desmantelamentos, a equação 4.14 demonstra que os mesmos são determinados através do custo do desmantelamento vezes o número de sites descomissionados,  $N_{BS_{exit_i}}$ .

$$OPEX_{Decomm} = N_{BS_{exit_i}} \times C_{Decomm_i} \quad (4.14)$$

A Figura 4.11 apresenta as despesas operacionais de operador e *TowerCo* para GBT e RTT. Verifica-se que o OPEX do MNO é em ambos os casos de 30 k€, enquanto os custos da empresa de infraestruturas de telecomunicações são tipicamente de cerca de 11 k€ para GBT e 13 k€ para RTT. De referir que o custo do espetro é a principal razão para os custos do operador serem superiores aos da *TowerCo*.

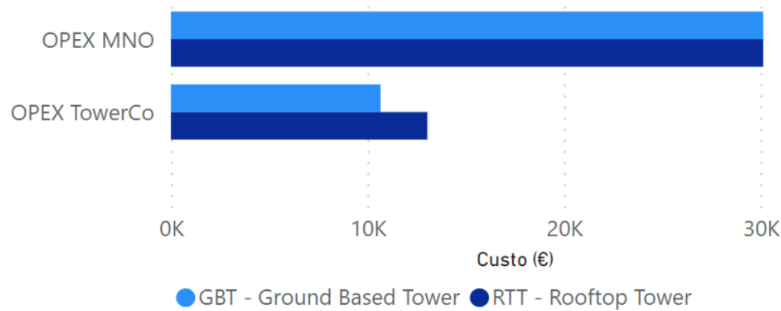


Figura 4.11: Custo do OPEX.

A Tabela 4.3 exhibe a duração média de equipamentos de âmbito energético constituintes de um site. As baterias são os equipamentos com necessidade de troca com uma maior frequência, cerca de 4 anos.

Tabela 4.3: Duração típica dos equipamentos.

	Anos
Baterias	4
Retificadores	15
Ar condicionado e unidades de arrefecimento	20

A aquisição de equipamentos para a manutenção pode compensar a compra de mais equipamentos do que necessário, por ser monetariamente mais benéfico. Deste modo, uma vez que há equipamentos que poderão ser utilizados  $x$  anos após a sua aquisição, a depreciação do ativo tem de ser considerada.

A Equação 4.15 permite-nos determinar o custo de investimento em manutenção ao longo de  $N$  anos para uma estação base. Isto pode ocorrer por compensar monetariamente adquirir mais equipamento do que é necessário no ano  $n$ .

$$C_{MI_i} = N_{BS} \times \sum_{n=1}^N \left[ \frac{C_{Maintenanc_{en_i}}}{(1+d)^{n-1}} \right] \quad (4.15)$$

A equação (4.15) considera a taxa de desconto  $d$  que representa a depreciação anual do ativo, que normalmente é de 20% durante 5 anos e 10% durante 10 anos. A taxa de depreciação do operador de rede móvel pode ser dada por uma taxa de desconto de 20% e de infraestruturas e cabos de 10%, enquanto que as linhas elétricas e instalações relacionadas podem ser dadas por uma taxa de 5%. As energias renováveis podem ser utilizadas no local e os painéis solares têm uma taxa de desvalorização de 25% [50].

Assim, o custo total de propriedade TCO é tipicamente dado pela equação 4.16 ao invés da equação 4.1.

$$TCO = \sum_i C_{CAPEX_i} + C_{OPEX_i} + C_{MI_i} \quad (4.16)$$

Ainda relativamente à manutenção sabe-se que a manutenção preventiva do lado da *TowerCo* está dividida em inspeções de torres e manutenção de torres, que têm um custo médio de 795,94€ e 692,64€ por ano para as torres (GBT), respetivamente, (valores provenientes de documentação interna de uma empresa de infraestrutura de telecomunicações) enquanto que os *rooftop* (RTT) deveriam ter encargos semelhantes, pelo que se assumiu que as despesas são em média de 696,13€ por ano para inspeções e 605,78€ por ano para manutenção.

A Figura 4.12 apresenta a previsão do OPEX de uma torre versus *rooftop*. É possível concluir que as despesas energéticas são ligeiramente superiores em *rooftops*, o que pode ser explicado com o facto de RTTs estarem presentes maioritariamente em ambientes urbanos e, portanto, áreas que necessitam de uma maior capacidade. Outra razão plausível é os contentores técnicos em RTT estarem em locais de altitude superior, sendo deste modo mais afetados por temperaturas elevadas.

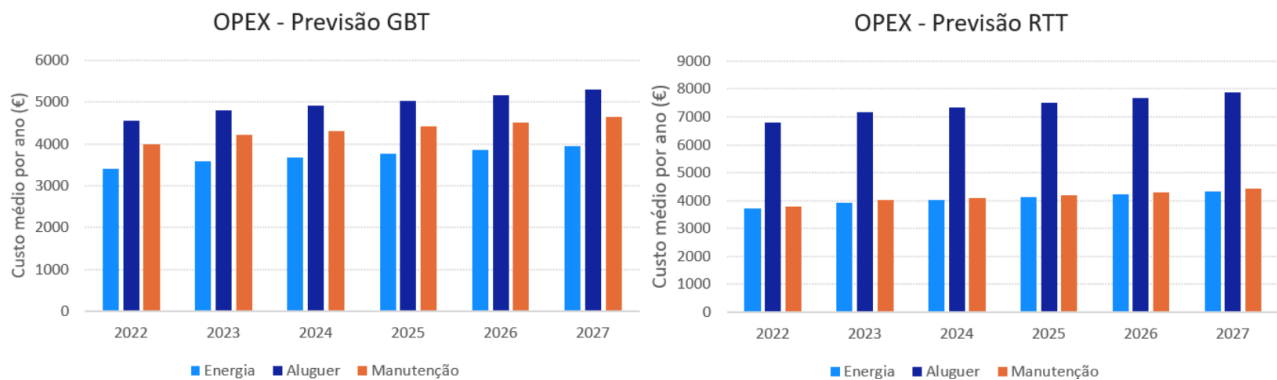


Figura 4.12: Previsão OPEX médio por site.

Importa mencionar que relativamente aos RTTs é bastante distinguível que o principal custo operacional seja referente ao aluguer do espaço, o que pode ser explicado com o facto de estarem inseridos em edifícios. Isto é relevante pois existe tipicamente receio da presença de estações base devido à radiação eletromagnética emitida pelas suas antenas, conforme explicado na subsecção 4.1.

Quanto às despesas de manutenção, em GBT são ligeiramente superiores, pois existem mais equipamentos/peças a serem inspecionados e com necessidade de manutenção.

É necessário ter em consideração que a energia, o aluguer e os encargos de manutenção são uma média do mercado português à data desta dissertação. Quanto às taxas de inflação consideradas para a previsão foram as seguintes [51, 52]:

Tabela 4.4: Taxas de inflação [51, 52].

	Inflação
2022	8.1%
2023	5.5%
2024	2.3%
2025	2.4%
2026	2.5%
2027	2.6%

Os anos 2022 a 2024 são uma média do Banco Central Europeu [51] e as previsões de taxa de inflação de 2025 a 2027 foram consideradas com a mesma variação apresentada em [52] que não se encontra, à data da escrita deste documento, atualizado a 2022.

### 4.2.3 Caso de Uso - Inteligência Artificial (IA)

Uma vez que o consumo energético das estações base tem impacto no custos operacionais e a nível ambiental, é fundamental otimizar o mesmo, tendo a Inteligência Artificial (IA) um papel fulcral para alcançar este objetivo.

A Inteligência Artificial (IA) pode trazer entre 5% a 10% de poupança adicional, conforme defendido em [53], onde referem que dois terços dos operadores esperam ter poupanças de energia superiores a 10% nos próximos 2 anos.

A Figura 4.13 mostra o consumo de energia por ambiente com e sem recurso a IA, sendo que com utilização da IA com funcionalidades de *micro sleep* e *sleep mode* alcança-se poupanças de 5%. O ambiente urbano tem um maior consumo médio de energia do que as zonas suburbanas ou rurais que apresentam valores semelhantes, sendo o ambiente suburbano ligeiramente superior. Isto deve-se a em zonas suburbanas ser necessária maior capacidade que em ambientes rurais, porém, em contrapartida, ambientes rurais necessitam de maior potência, de forma a ter um raio de célula superior. Em suma atingiu-se uma poupança de 121 € por site por ano em suburbano versus 119 € por site por ano em áreas rurais. Já em meios urbanos, a poupança é, em média, correspondente a 168 € por site por ano.

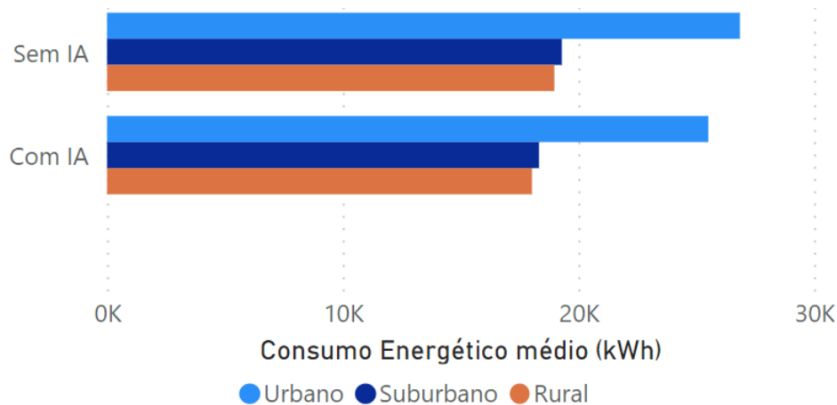


Figura 4.13: Impacto médio da IA no consumo energético por ambiente.

Em termos energéticos, verifica-se em meio urbano uma diferença de  $1.3 \text{ GWh}$ , em suburbano de  $965 \text{ kWh}$  e em áreas rurais menos  $949 \text{ kWh}$ .

Por conseguinte, a Figura 4.14 apresenta o consumo energético com e sem IA durante um ano para GBT e RTT. Verifica-se que o recurso a inteligência artificial leva a um benefício de  $156 \text{ €}$  por site por ano em torres e  $168 \text{ €}$  por site por ano em *rooftops*, o que em termos de consumo energético representa menos  $1.25 \text{ GWh}$  em GBT e menos  $1.34 \text{ GWh}$  em RTT.

RTT apresenta um maior consumo do que a GBT, devido ao facto de os RTT serem tipicamente existentes em cenários urbanos, portanto, num ambiente que requer mais capacidade. Outra razão é como resultado de o RTT ter os armários, onde estão as BBUs e sistemas de refrigeração e baterias, normalmente num local mais elevado, visto que o ar quente é menos denso do que o frio, pelo que os equipamentos nos RTT são mais afetado por temperaturas elevadas. Quanto ao consumo médio de energia, pode observar-se uma diferença significativa com e sem a utilização de IA.

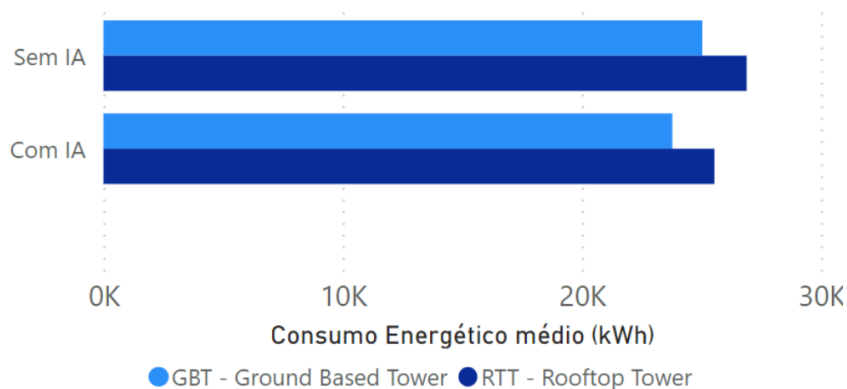


Figura 4.14: Impacto médio da IA no consumo energético por tipo de estação.

De salientar que se assumiu uma poupança de 5% e uma taxa de  $0.125 \text{ €/kWh}$  [36], com um custo de  $5 \text{ €}$  por funcionalidade por site por ano. O custo por *feature* por site por ano diz respeito à IA que pode ser implementada no OSS como uma característica *Self-Optimizing Network* (SON).

Os 5% de poupança assumidos provêm de uma análise efetuada onde se chegou a 4.64% de poupança recorrendo-se a IA nas funcionalidades LTE *micro sleep* e *sleep mode* [39].

Importa ressaltar que o custo de energia tende a aumentar, portanto a poupança será superior quando o custo energético for mais elevado.

Analisou-se ainda que percentagem de poupança se adquiriria com recurso a IA no controlo da *feature* 2G BCCH *Power Saving*, que individualmente leva a uma economização de 11.8% no consumo energético da tecnologia 2G [39]. A Tabela 4.5 apresenta as poupanças adquiridas por funcionalidades ativas.

Tabela 4.5: Poupanças adquiridas através de funcionalidades.

Funcionalidades ativas	Poupança
<i>Micro Sleep + Sleep Mode</i>	4.635%
<i>Micro Sleep + Sleep Mode + BCCH Power Saving</i>	6.096%

Alcançou-se, juntamente com as poupanças adquiridas pelas 2 *features* 4G anteriormente mencionadas, uma poupança de 6.096%, que leva a um decréscimo de custos energéticos de 188 € por site por ano em GBTs e 202 € por site por ano em RTTs. Do ponto de vista de tipo de ambiente alcança-se poupanças de 201 € em zonas urbanas, 145 € em suburbanas e 142 € por site por ano em áreas rurais. A nível de consumo energético representa poupanças entre os 1.1 *GWh* e os 1.6 *GWh* por ano.

A Tabela 4.6 é um quadro de resumo que expõe as reduções de custos anuais por tipo de estação base e morfologia determinados com base nas poupanças de 6.096% apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.6: Redução de custos através de funcionalidades.

Redução de custo anual por site	
GBT	188€
RTT	202€
Urbano	201€
Suburbano	145€
Rural	142€

### 4.3 Consumo Energético

Sem energia nenhum equipamento funciona. Por esse motivo, e para as estações continuarem a funcionar em caso de catástrofe, os equipamentos de uma EB funcionam em DC. Dessa forma, as estações base são equipadas com sistemas de baterias, sendo que o tempo de autonomia das baterias está condicionado ao nível de importância da EB. Podem até haver estações que, numa primeira instância, enquanto o ramal de energia não está concluído, funcionem diretamente a partir de geradores, ou que simplesmente sejam alimentadas através de energias renováveis.

Importa mencionar que ao longo desta sub-secção, quando se mencionar contentor ou sala técnica entende-se como o retificador necessário à conversão AC/DC sendo da *TowerCo*, e armário *light* como o retificador sendo do MNO. Esta segunda hipótese acontece quando não existe sala técnica. A comparação tem como intuito compreender se há diferenças significativas em haver ou não contentores ou sala técnica nos consumos energéticos.

Esta subsecção encontra-se dividida em três partes. Na primeira parte, em 4.3.1 o consumo energético anual, em 4.3.2 estudo do consumo energético DC, e, por fim, em 4.3.3 uma análise de consumos da rede elétrica.

### 4.3.1 Consumo Energético Anual

A Figura 4.15 apresenta a percentagem de consumo energético anual médio de estações base Macro, Macro+DAS, Transmissão e DAS público. As estações base Macro e Macro+DAS são as que apresentam maior consumo energético, seguidas pelos sites de transmissão e por fim DAS públicos. Todas estas categorias existem em ambiente urbano, sendo que os sites de transmissão e DAS públicos só existem neste tipo de área, o que explica a diferença de 4.37% e 9.37%, respetivamente, em comparação com as estações base macro.

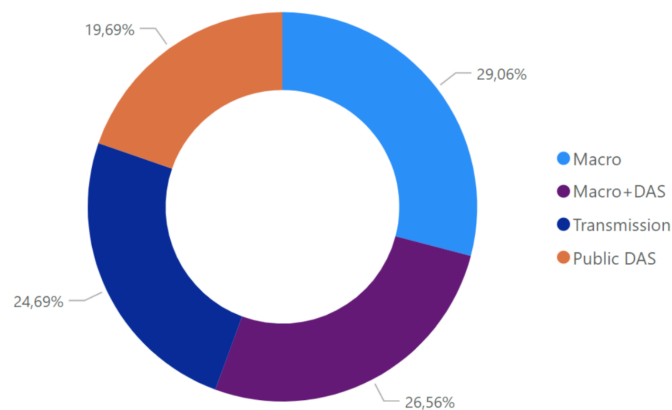


Figura 4.15: Consumo energético anual médio por categorização por sistema de transmissão.

A Figura 4.16 apresenta o consumo energético anual médio para macro, Macro+DAS, transmissão e DAS público para sites em que o retificador pertence ao operador, armário *light*, e em que o retificador pertence à empresa detentora da infraestrutura de telecomunicações, contentor ou sala técnica.

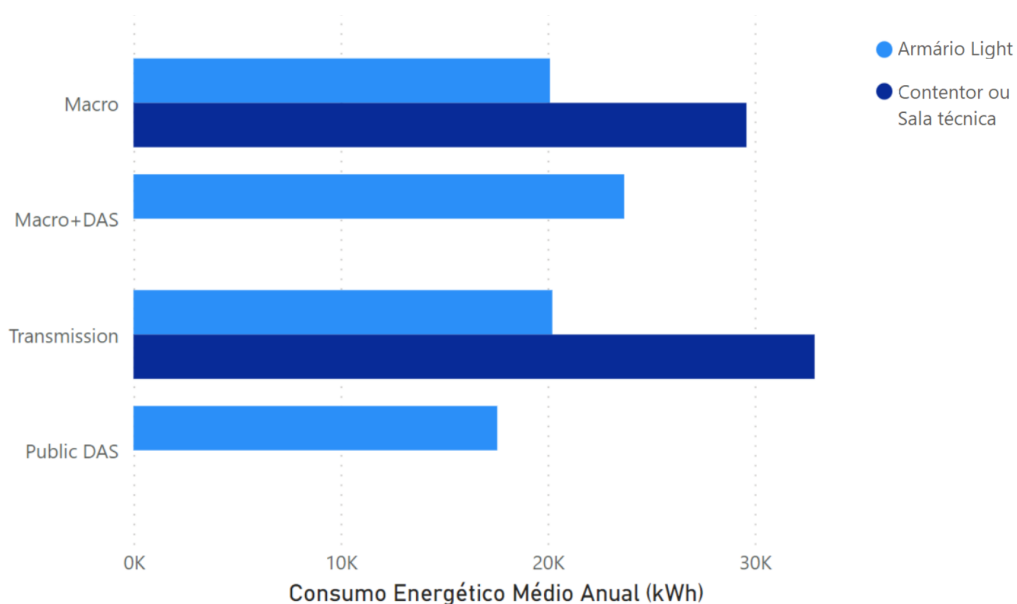


Figura 4.16: Consumo energético anual médio por sistema de transmissão - Contentor técnico.

Observa-se que a média do consumo anual de energia apresenta maior divergência quando a categorização por sistema de transmissão é por *Transmission* e o conversor AC/DC pertence à *TowerCo*, existindo portanto sala técnica, tendo sido em média 13 *GWh* superior ao recurso a armários *light*. Já nos sites macro verifica-se um consumo anual médio 9 *GWh* superior a quando o retificador pertence ao MNO. Os DAS em análise possuem todos armário *light* e consomem em média anualmente menos 3 *GWh* que os de transmissão com armário *light*.

A Figura 4.17 apresenta o consumo energético anual médio por tipo de site. Os sites GBT e RTT com contentor ou sala técnica consomem em média anualmente mais 10 *GWh* que os sites com armário *light*.

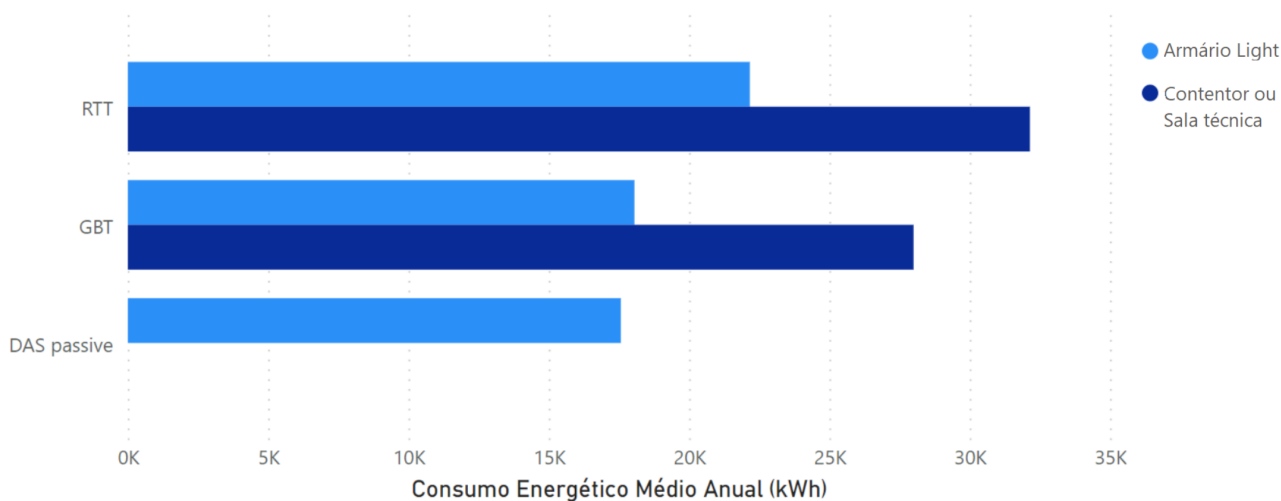


Figura 4.17: Consumo energético anual médio por tipo de site - Contentor técnico.

Deste modo, é interessante concluir que nos locais onde existe sala técnica há um maior consumo médio anual de energia independentemente de se tratar de uma torre ou *rooftop*.

### 4.3.2 Consumo Energético DC

Uma vez que todo o equipamento necessário para o funcionamento de uma estação base funciona em DC, é relevante avaliar apenas o consumo DC de uma EB, ao invés do consumo global, uma vez que assim não se contabiliza os sistemas de refrigeração. Se observarmos o consumo DC das estações Macro+DAS, verificamos que apresentam um maior consumo energético, como mostra a Figura 4.18, do que os sites Macro. Os sites de transmissão representam o menor consumo de energia DC entre os quatro, o que significa que os locais de transmissão têm um grande consumo de AC, já que na subsecção 4.3.1 os sites de transmissão representavam 24.69% do consumo energético enquanto os DAS públicos refletiam 19.69%. Este maior gasto energético pode ser explicado pela necessidade de um maior recurso a sistemas de AVAC onde os sites estão localizados, assim como a conexão a clientes empresarias.

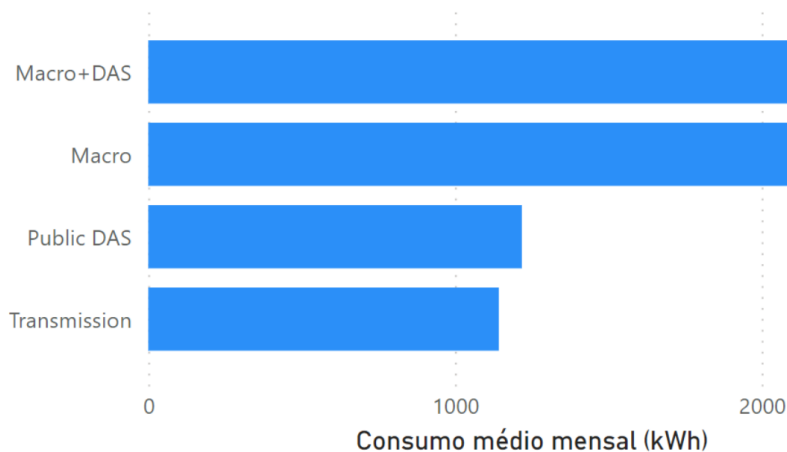


Figura 4.18: Consumo energético DC médio por sistema de transmissão - Agosto 2022.

A Figura 4.19 apresenta o consumo médio de energia DC por existência ou não de contentor técnico em Agosto de 2022. Os locais cujo retificador pertence ao MNO têm, em média, um consumo ligeiramente superior. Esta diferença representa 0,44% do consumo médio mensal de energia do mês em análise, não parecendo haver impacto nem associação há possibilidade de haver ou não sala técnica.

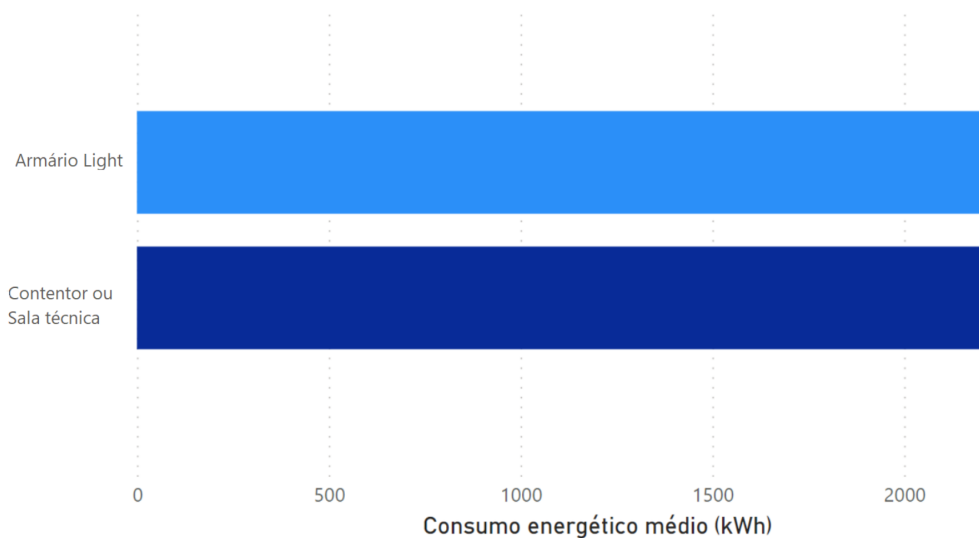


Figura 4.19: Consumo energético DC médio - Agosto 2022 - Contentor técnico.

É relevante analisar como o consumo de energia DC varia num espaço de um ano, ainda mais quando nesta linha temporal ocorreu a implementação de uma nova tecnologia, o 5G. A Figura 4.20 demonstra este estudo em relação ao tipo de local onde, mais uma vez, podemos constatar que os RTT tem uma maior discrepância de utilização de energia entre Outubro de 2021 e Setembro de 2022. As *Rooftop Towers* estão localizadas principalmente em áreas urbanas, que são o foco principal na implementação da tecnologia NR e, por essa razão, explicam o aumento de 146,41 kWh em Setembro de 2022. A discrepância relativamente a DAS passivos em relação aos outros tipos é expectável porque pode não exigir tanta capacidade como os outros dois tipos de site, e existem muito menos dados para a analisar com rigor.

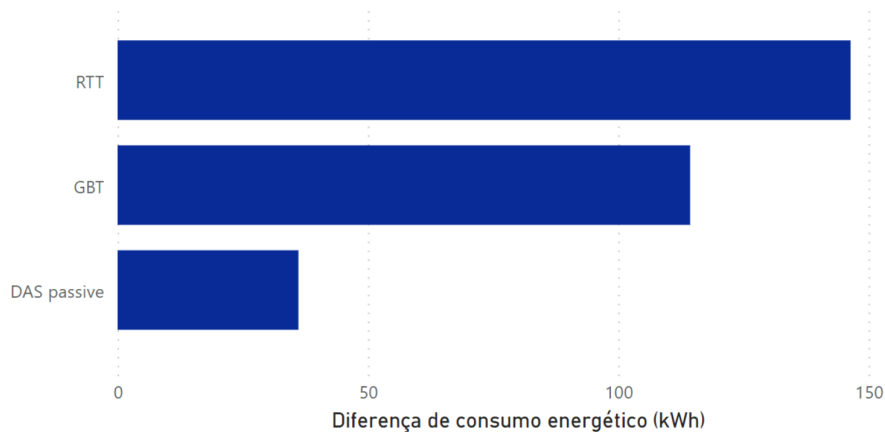


Figura 4.20: Diferença de consumo energético DC médio por tipo de site - Setembro 2021 vs Outubro 2022.

Estas diferenças são uma comparação da visão mensal que representa aproximadamente, em média, mais  $3,7 \text{ kWh}$  por dia para GBTs,  $4,7 \text{ kWh}$  por dia para o RTTs e  $1,2 \text{ kWh}$  por dia para DASs.

A Figura 4.21 aponta o consumo de energia DC por sistema de transmissão. Os Macro + DAS representam a maior diferença entre os dois meses, com uma média de incremento de  $141,22 \text{ kWh}$  em Setembro de 2022, o que dá uma média de mais  $4,6 \text{ kWh}$  por dia. É natural que as categorias Macro, Macro + DAS e Transmissão tenham uma diferença superior, uma vez que são sites macro e, por essa razão, são mais suscetíveis a ter uma maior utilização.

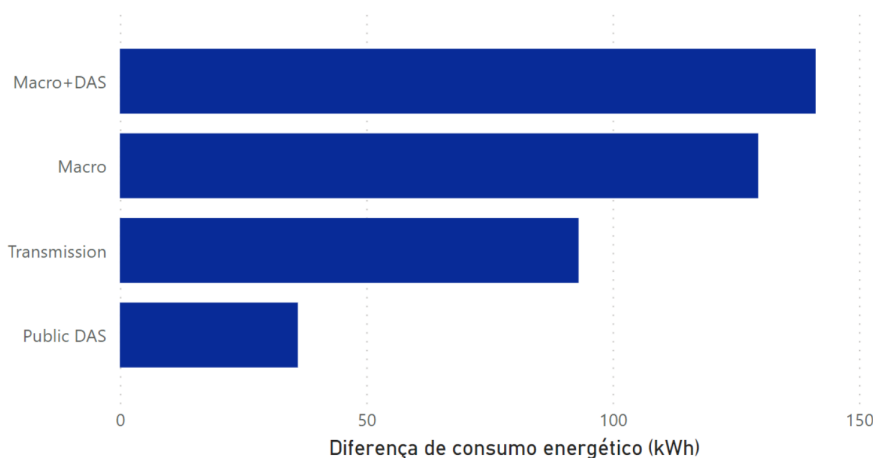


Figura 4.21: Diferença de consumo energético DC médio por categorização por sistema de transmissão - Setembro 2021 vs Outubro 2022.

As estações Macro + DAS possuem uma média de mais  $4,2 \text{ kWh}$  por dia de consumo energético, enquanto que os sites de transmissão têm um aumento de  $3 \text{ kWh}$  por dia. Importa notar que estes números não estão apenas relacionados com a implementação de 5G, visto que nem todas as estações de base têm NR, porém podem ter relação com um crescimento de dispositivos conectados.

É possível concluir que os sistemas RTT e Macro + DAS apresentam as maiores discrepâncias entre Setembro de 2021 e Outubro de 2022, ou seja, foram as tipologias onde se refletiu um maior aumento de consumo de energia. Isto parece estar relacionados, já que os sistemas Macro + DAS são sempre sites RTT.

### 4.3.3 Rede Elétrica

Quanto às redes elétricas podem ser analisadas por tipo de site e por sistema de transmissão de forma semelhante aos subcapítulos anteriores. A Figura 4.22 introduz a diferença média da rede de alimentação por categorização por tipo de site entre Outubro de 2021 e Setembro de 2022. É possível concluir que na linha temporal de Outubro 2021 a Setembro do ano seguinte, ocorreu um aumento no que diz respeito à capacidade. As *Rooftop Towers* (RTTs) acrescentam um crescimento de 49,18%, *Ground Based Tower* (GBT) de 39,08%, e *Distributed Antenna System* (DAS) de 11,74% que corresponde a 36,13 *kWh* (aproximadamente um aumento de 3,01 *kWh* por mês). A alteração da rede nos GBT corresponde a uma média de 12,61 *kWh* superior a cada mês, e RTT a uma média de 10,02 *kWh* a cada mês. Estes números permitem concluir que estes aumentos não estão apenas relacionados com a implementação de 5G, mas com um aumento da capacidade e/ou bandas nos locais.

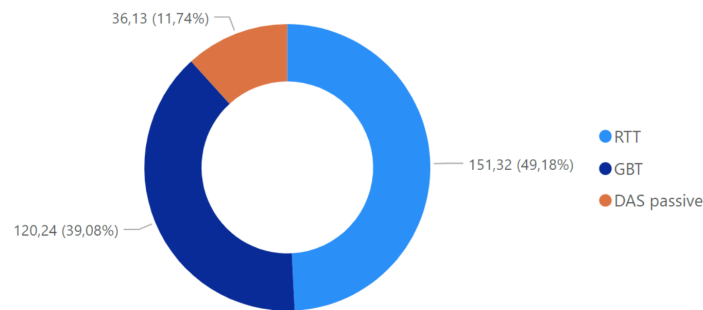


Figura 4.22: Diferença média da rede elétrica por tipo de site - Outubro 2021 versus Setembro 2022.

Em relação à Figura 4.23, apresenta a diferença média da rede por categorização por sistema de transmissão, entre Outubro de 2021 e Setembro de 2022, o que significa se é uma Macro, DAS, Macro + DAS ou um site de transmissão.

Os sistemas Macro + DAS tiveram um aumento de aproximadamente 13,475 *kWh* por mês durante este período, o que corresponde a 38,89%, os sistemas Macro com um aumento médio de 32,48% mostram-nos um crescimento de 11,25 *kWh* por mês. Relativamente aos sistemas de transmissão, a discrepância é menos significativa, representando 19,94%, o que corresponde a um aumento de 6,97 *kWh* por mês. Finalmente, os DAS públicos caracterizam 8,69% o que leva a um aumento de 3,01 *kWh* por mês, que é obviamente o valor apresentado na Figura 4.22 no tipo de categoria DAS.

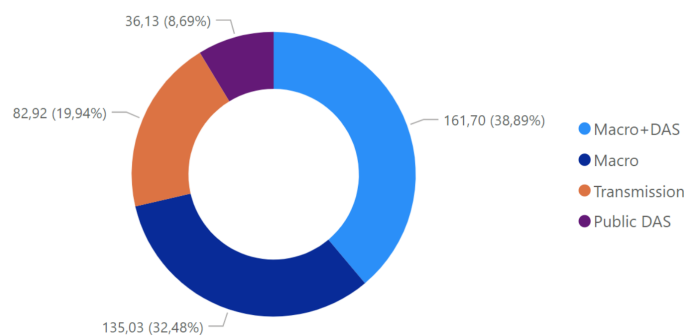


Figura 4.23: Diferença média da rede elétrica por categorização por sistema de transmissão - Outubro 2021 versus Setembro 2022.

## 4.4 Implementação de 5G

No final do ano de 2021 e no decorrer de 2022, em Portugal, foi implementada a rede 5G. Este acontecimento leva a um forte impacto tanto no CAPEX como OPEX de uma empresa, neste caso concreto, nas despesas de capital do operador e nos custos operacionais da empresa detentora da infraestrutura de telecomunicações, e possivelmente também do operador, dependendo do contrato assinado entre as duas empresas.

A Figura 4.24 exibe a percentagem de tecnologia *New Radio* (NR) nas bandas de 700 MHz e 3,5 GHz. Como esperado, há uma incidência muito maior nos ambientes urbanos, com 2.11% dos locais suburbanos com 5G implementados na banda de 3500 MHz e 18.5% locais na banda de 700 MHz. O raio de célula na banda dos 700 MHz é superior ao da banda dos 3500 MHz, pois o comprimento de onda da frequência de 700 MHz é superior, logo é uma banda com uma taxa de penetração mais elevada, face à banda dos 3500 MHz. Por consequência, a banda dos 700 MHz é utilizada para cobertura enquanto a de 3500 MHz é usada para capacidade, sendo então natural que em zonas de obrigações impostas pela ANACOM, conforme discutido no subcapítulo 4.1, seja colocada apenas a banda dos 700 MHz.

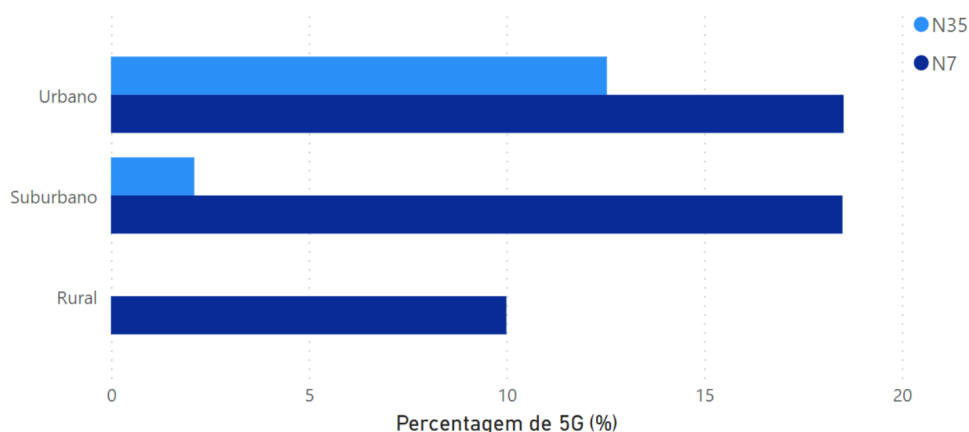


Figura 4.24: Percentagem de estações base com 5G por banda e tipo de ambiente.

Verifica-se que há 10% de EB com N7 (*New Radio* (NR) na banda dos 700 MHz) em zonas rurais enquanto não existe N35 no mesmo tipo de morfologia, confirmando a suposição. Importa ainda salientar que existe mais 5.99% de 5G na banda dos 700 MHz do que na dos 3.5 GHz em meios urbanos, mais 16.39% em zonas suburbanas e 10% em áreas rurais. A nível total de sites, há 7.33% mais N7 implementado que N35 na análise efetuada.

Para uma melhor percepção, a Figura 4.25 apresenta a percentagem de municípios por tipo de morfologia.

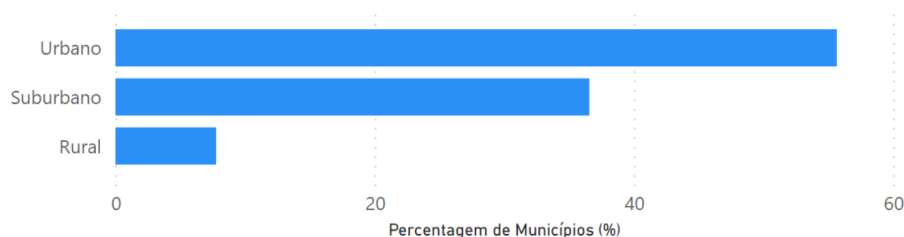


Figura 4.25: Percentagem de municípios por tipo de ambiente.

Observa-se que 55.66% dos municípios se encontram em zonas urbanas, 36.57% em ambientes suburbanos e 7.77% em áreas rurais. Isto permite concluir que foi investido com forte incidência na implementação de 5G na banda dos 700 MHz em zonas suburbanas e rurais.

## 4.5 Investimento SON

Por forma a alcançar os objetivos presentes na subsecção 4.2.3 é necessário possuir um *software Self-Optimizing Network* (SON) implementado no *Operations and Support System* (OSS) e as *features* que se pretende que sejam controladas pela Inteligência Artificial (IA) desbloqueadas pelo fornecedor.

A Tabela 4.7 apresenta o custo de toda a implementação necessária por estação base para a concretização do caso de uso apresentado na subsecção 4.2.3.

Tabela 4.7: Custo da implementação SON e IA.

	Custo por Site (€)
SON <i>software</i>	127.63 €
<i>Feature Micro Sleep</i> (Custo Anual)	12.76 €
<i>Feature Sleep Mode</i> (Custo Anual)	12.76 €
<i>Features IA</i>	10.00 €
Licenças (SON - Custo Anual)	15.95 €
Salários	134.01 €
Custo de colaborador por ano	11.17 €
Custo de Investimento	313.13 €

Estes custos têm a despesa monetária do *software* SON dividido por 5 anos, em que a empresa pagaria 50% no primeiro ano e o montante restante nos anos seguintes. As licenças e o desbloqueamento das funcionalidades de *micro sleep* e *sleep mode* são custos anuais, assim como a IA e os salários.

A Figura 4.26 apresenta o custo de implementação, poupança de energia e despesas de consumo de energia reais versus cenário hipotético com investimento. É perceptível que em meados do quarto ano o investimento seja pago a partir das poupanças de energia. Isto é possível devido a SON, *Machine Learning* (ML), e 2 *features* de poupança de energia LTE, *micro sleep* e *sleep mode*.

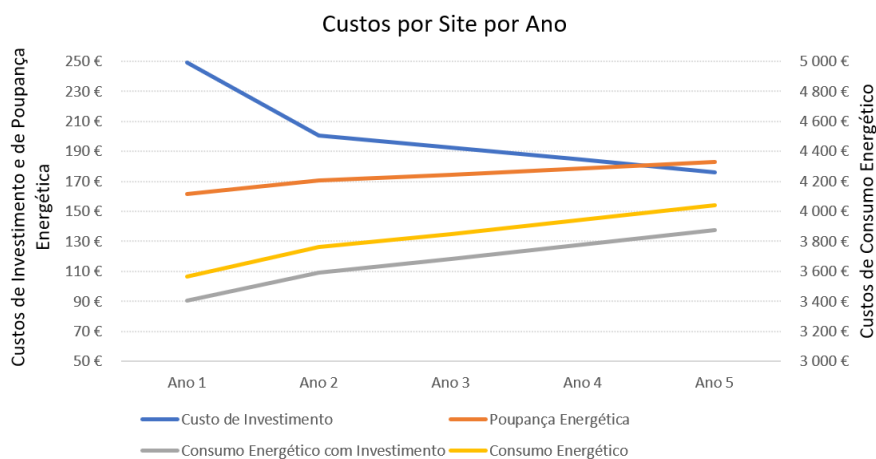


Figura 4.26: Custo do Investimento - 1º cenário.

A poupança energética representa o consumo de energia poupado com os 5% [39] que a IA permite, através deste investimento. A diferença entre o consumo energético e o consumo energético com investimento é dada pela poupança de energia.

Este primeiro cenário advém de uma redução de 10% dos colaboradores por ano e de um custo de investimento relativamente às despesas de algoritmo de 10 € por site por ano. A Figura 4.27 considere 3 *features* de poupança energética: *Micro Sleep*, *Sleep Mode* e *BCCH Power Saving*. Com 3 *features* a IA permite poupanças de 6% (valor concluído com base no estudo [39]). Este cenário apresenta os valores com um custo de 20 €/site/ano relativamente às despesas do algoritmo e 15% de redução de funcionários por ano. Observa-se que o investimento ficaria pago ao fim de quase três anos.

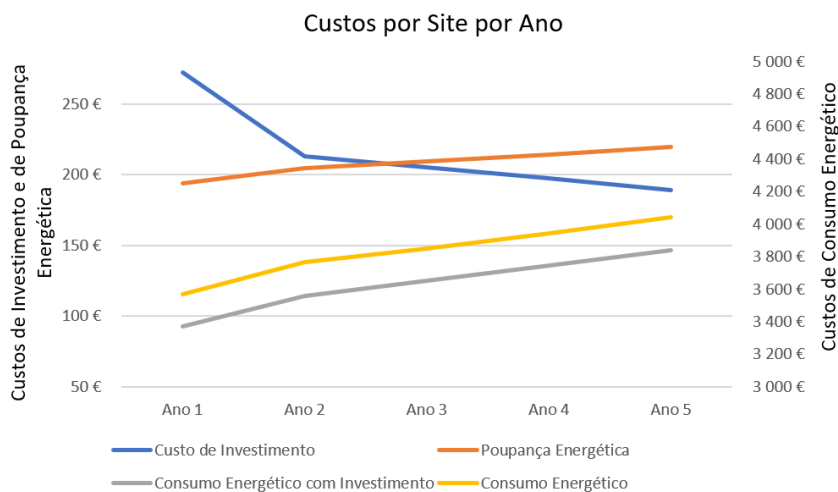


Figura 4.27: Custo do Investimento - 2º cenário.

De notar que as percentagens anuais de redução de colaboradores devido aos benefícios adquiridos com este investimento, estão de acordo com as expectativas de poupança energética devido a IA do documento "*The Mobile Economy 2022*" da *Group Special Mobile Association* (GSMA) [53].

# 5

## Conclusões

---

5.1	Conclusões . . . . .	72
5.2	Trabalho Futuro . . . . .	73

## 5.1 Conclusões

A crescente sensibilização para o impacto das atividades do quotidiano no ambiente tem vindo a ganhar cada vez mais relevância, levando as empresas a focarem-se na redução do seu consumo energético. Nesse sentido os operadores de redes móveis têm trabalhado no sentido de otimizar energeticamente a sua rede, uma medida que também contribui para uma empresa mais sustentável.

Esta dissertação começa por apresentar o fator corretivo desenvolvido para um modelo de consumo energético dos principais equipamentos ativos constituintes de uma estação base, nomeadamente BBUs e RRUs para as tecnologias 2G, 3G, 4G. Posteriormente à calibração desse modelo, este foi utilizado para analisar um conjunto de soluções de poupança energética sendo objeto de estudo a modernização de BBUs e RRUs, a desativação da tecnologia 3G, o RAN *sharing* e a ativação de funcionalidades de poupança energética. Através da modernização previu-se alcançar reduções de 35% por site que pagam o investimento em pouco mais de 1 ano. Já com o desligar do UMTS nas bandas dos 900 MHz e 2100 MHz chegou-se a poupanças de 14.7%. No cenário de partilha RAN verificaram-se reduções de 47.7% a nível de site (face a duas EBs) e aumento de 4.4% a nível de estação base. Estas três alterações permitem poupanças de 45.3% por estação base. Em conjunto com as funcionalidades de poupança de energia BCCH *Power Saving*, *Micro sleep* e *Sleep Mode*, que permitem poupanças de 14.12%, alcança-se um total de 59% por Estação Base (EB).

A nível ambiental, o funcionamento de uma estação base ao longo de um ano pode emitir cerca de 14.2  $kgCO_2e$ , sendo necessárias 21 árvores para compensar. Por sua vez, relativamente à construção de torres, verificou-se que uma torre de madeira pode emitir cerca de 53% menos toneladas de dióxido de carbono equivalente o que, embora implique um investimento adicional que pode rondar os 9000€, proporciona vantagens do ponto de vista da reputação ante clientes, fornecedores e *stakeholders*.

Desenvolveu-se ainda um modelo TCO para redes móveis, tendo-se considerado dois pontos de vista: o do operador e o da *TowerCo*, ambos no mercado português. Como despesas CAPEX para um novo site foi considerado equipamento rádio, banda base e transmissão, cabos, custos de torres e *rooftops*, etc. Já as despesas operacionais incluem manutenção, aluguer, consumo de energia, custo da largura de banda e desembolso referente ao OSS.

Concluiu-se que a implementação de uma nova estação base pode atingir 125 k€ para torres e 90 k€ em *rooftops*. Já os custos operacionais rondam os 41 k€ em GBTs e 43 k€ em RTTs por site por ano.

Verificou-se que a IA e funcionalidades de poupança de energia (tendo-se considerado duas *features* LTE) podem trazer pelo menos 5% de poupança para o operador. Alcançaram-se poupanças de 156€ por site por ano em torres e 168€ por site por ano em *rooftops*. Atendendo ao investimento inicial em SON, ferramentas de IA e o custo da ativação das funcionalidades de poupança de energia *micro sleep* e *sleep mode*, concluiu-se que o investimento atingiria o ponto de equilíbrio em meados do 4º ano. Adicionando a funcionalidade de BCCH *power saving*, o *break-even* seria atingido ao fim de quase 3 anos.

## 5.2 Trabalho Futuro

Relativamente ao trabalho futuro, através de um conjunto de dados mais vasto e atual (contemplando já o 5G), será possível estudar o benefício em outro tipo de locais e configurações, ou seja, o mesmo tipo de análise mas para diversos sites e com configurações iniciais diferentes, uma vez que neste estudo, face aos dados disponíveis, analisou-se apenas a configuração GSM900 + UMTS900 + UMTS2100 + LTE1800. Esta riqueza de dados permitirá efetuar a análise com diferentes tipos de morfologia (urbano, suburbano e rural) e, deste modo, apresentar soluções quanto à poupança energética, para os diferentes cenários implementados a nível nacional.

# Referências

---

- [1] Z. Hasan, H. Boostanimehr, and V. K. Bhargava, “Green cellular networks: A survey, some research issues and challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 13, no. 4, pp. 524–540, 2011. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.092311.00031>.
- [2] I. P. Chochliouros, M.-A. Kourtis, A. S. Spiliopoulou, P. Lazaridis, Z. Zaharis, C. Zarakovitis, and A. Kourtis, “Energy Efficiency Concerns and Trends in Future 5G Network Infrastructures,” 2021. <https://doi.org/10.3390/en14175392>.
- [3] Ericsson, “Energy efficiency.” <https://www.ericsson.com/en/portfolio/networks/ericsson-radio-system/radio-system-solutions/energy-efficiency>, acessado em 2022-01-24.
- [4] A. R. Mishra, *Fundamentals of Network Planning and Optimisation 2G/3G/4G: Evolution to 5G*. WILEY, second ed., 2018.
- [5] J. Eberspächer, H.-J. Vögel, C. Bettstetter, and C. Hartmann, *GSM - Architecture, Protocols and Services (3. ed.)*. 01 2009. isbn: 978-0-470-03070-7.
- [6] H. Holma and A. Toskala, “WCDMA for UMTS: Radio Access For Third Generation Mobile Communications,” 2004.
- [7] Ericsson, “Long Term Evolution (LTE): an introduction,” 2007.
- [8] C. J. Casey, S. Rajagopalan, M. Yan, G. Booker, A. Sprintson, and W. Magnussen, “Supporting Voice over LTE: Solutions, Architectures, and Protocols,” 2013.
- [9] S. Park, S. Kim, K. Son, and H. Kim, “Security threats and countermeasure frame using a session control mechanism on volte,” 2015. <https://doi.org/10.1109/BWCCA.2015.11>.
- [10] M. Sauter, *From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*. WILEY, third ed., 2017.
- [11] T. N. Harri Holma, Antti Toskala, *5G Technology 3GPP New Radio*. John Wiley & Sons, first ed., 2020.
- [12] S. Ahmadi, *5G NR Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards*. Academic Press, 2019.

- [13] ETSI, *3GPP TS 38.401, 5G, NG-RAN, Architecture description*, 2018. Release 15.2.0 [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138400\\_138499/138401/15.02.00\\_60/ts\\_138401v150200p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138400_138499/138401/15.02.00_60/ts_138401v150200p.pdf).
- [14] ITU-R, *MT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*, 2015. ITU R M.2083-0 [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf).
- [15] P. V. Alexandra Mourato, David Duarte, “Desenvolvimento de um modelo de consumo energético para redes de acesso rádio 2G/3G/4G com base em dados reais,” 2017.
- [16] “Optical link,” 2022. [https://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_link](https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_link), acessado em 2022-01-23.
- [17] J. Lloret, J. Tomas, A. Canovas, and L. Parra, “An integrated iot architecture for smart metering,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 12, pp. 50–57, 2016. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.1600647CM>.
- [18] Ericsson, “Automating MIMO energy management with Machine Learning and AI.” <https://www.ericsson.com/en/cases/2019/augmenting-mimo-energy-management-with-machine-learning-and-ai>, acessado em 2022-01-09.
- [19] Celfinet, “RAN Energy Optimizer, Product Description,” 2016.
- [20] Tiago Gouveia e Cunha, “Energy Savings in 3G Using Dynamic Spectrum Access and Base Station Sleep Modes,” Master’s thesis, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2014.
- [21] 3rd Generation Partnership Project 3GPP, “Technical Specification Group Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 ,” no. 36.300, 2021. Version 16.7.0.
- [22] 3rd Generation Partnership Project 3GPP, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Self-configuring and self-optimizing network (SON) use cases and solutions ,” no. 36.300, 2021. Version 9.3.1.
- [23] D. Gadze, S. Aboagye, and K. Agyekum, “Real time traffic base station power consumption model for telcos in ghana,” 2016.
- [24] T. Saraiva, D. Duarte, I. Pinto, and P. Vieira, “An Improved BBU/RRU Energy Consumption Predictor for 4G and Legacy Mobile Networks using Mixed Statistical Models,” 2020.
- [25] “Ericsson rbs 6xxx.” [https://osmocom.org/projects/ericsson-rbs-6xxx/wiki/DUG\\_20](https://osmocom.org/projects/ericsson-rbs-6xxx/wiki/DUG_20), acessado em 2023-02-02.
- [26] “Ericsson kdu 127 161/3 r4f 20130122 duw 30 01 tu8xa34839.” <https://www.ebay.com/itm/114342888094>, acessado em 2023-02-02.

- [27] “Ericsson kdu 137 624/1 dus 41 01 lte multimodo unidade digital em banda de base para rbs.” <https://www.ebay.com/itm/175295079688>, acessido em 2023-02-02.
- [28] “Ericsson kdu137925/3 kdu137 986/1 da banda de base 5216 com gsm, lte bbu não testado.” <https://www.ebay.com/itm/334746850589>, acessido em 2023-02-02.
- [29] “Kdu137848/11 ericsson kdu 137 848/11 da banda de base 6630 com módulo de ventilador rack-mounts.” <https://www.ebay.com/itm/224483554650>, acessido em 2023-02-02.
- [30] “Krc 161 262/2.” <https://sparepart4you.com/shop/rf/ericsson-krc-161-2622-rrus-12-b8/>, acessido em 2023-02-02.
- [31] Ericsson, *Radio 2238*, 2021. 231/1551-LZA 701 6001/1 Uen AC.
- [32] Ericsson, *Remote Radio Unit Description - RRUS 11 and RRUS 61*, 2012.
- [33] Sapó, “Nowo já tem licença para avançar com serviços de 5g.” <https://tek.sapo.pt/noticias/telecomunicacoes/artigos/nowo-ja-tem-licenca-para-avancar-com-servicos-de-5g>, acessido em 2023-06-24.
- [34] E. Dinic, M. Vondra, and C. Cavdar, “Total cost of ownership optimazing for direct air-to-ground system design,” 2020. [https://www.researchgate.net/publication/343786254\\_Total\\_Cost\\_of\\_Ownership\\_Optimization\\_for\\_Direct\\_Air-to-Ground\\_System\\_Design](https://www.researchgate.net/publication/343786254_Total_Cost_of_Ownership_Optimization_for_Direct_Air-to-Ground_System_Design).
- [35] S. Tombaz, K. W. Sung, S. Han, and J. Zander, “An economic viability analysis on energy-saving solutions for wireless access networks,” *Computer Communications*, vol. 75, 10 2015. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2015.10.005>.
- [36] Tiago Gouveia e Cunha, “Desenvolvimento de um Modelo de Consumo Energético Multi-Tecnologia e Multi-Vendor para Nós de Acesso Rádio em Redes Móveis,” Master’s thesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2014.
- [37] XtremeLTE, “Ericsson basebands.” <https://www.xtremelte.com/ericssonbasebands.html>, acessido em 2023-01-12.
- [38] Ericsson, *DU and Baseband Capacity Examples*, 2018.
- [39] T. Martins, D. Duarte, and P. Vieira, “Análise de variação de consumo energético ao aplicar mecanismos de poupança energética lte e ao desligar tecnologia legacy em redes moveis multi-tecnologia e multi-banda,” 2022. [https://anacom.pt/streaming/apresentacao\\_URSI\\_2022\\_Tiago\\_Martins.pdf?contentId=1734563&field=ATTACHED\\_FILE](https://anacom.pt/streaming/apresentacao_URSI_2022_Tiago_Martins.pdf?contentId=1734563&field=ATTACHED_FILE), acessido em 2022-12-26.
- [40] Ericsson, “Under the hood of new multi-band remote radios.” <https://www.ericsson.com/en/blog/2022/6/under-the-hood-of-new-multi-band-radios>, acessido em 2023-03-29.

- [41] V. T. Portugal. <https://www.vantagetowers.com/en/our-european-markets/portugal>, acessido em 2023-04-10.
- [42] V. Towers, “Esg.” <https://www.vantagetowers.com/sites/tower-co-v2/files/investor/cmd/esg.pdf>, acessido em 2023-04-10.
- [43] EY-Parthenon, “The sustainability contribution of the european independent towercos sector.” [https://ewia.org/wp-content/uploads/EY-P-EWIA-2023-Sustainability-report\\_-EYG-no.-002230-23Gbl\\_V2.pdf](https://ewia.org/wp-content/uploads/EY-P-EWIA-2023-Sustainability-report_-EYG-no.-002230-23Gbl_V2.pdf), acessido em 2023-04-10.
- [44] Cellnex, “Environment and climate change report.” <https://www.cellnex.com/app/uploads/2023/03/ECC-Report-2022.pdf>, acessido em 2023-04-10.
- [45] Ecotelligent. <https://www.ecotelligent.fi>, acessido em 2023-04-12.
- [46] A. Research. <https://www.amaresearch.co.uk/report/access-equipment-market-report-uk-2018-2022/>, acessido em 2023-04-10.
- [47] E. Spence, “European steel prices hit new record on prospect of russian ban.” <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-03-21/european-steel-prices-hit-new-record-on-prospect-of-russian-ban>, acessido em 2022-06-01.
- [48] Metalgalva, “Telecomunicações.” <https://metalgalva.pt/wp-content/uploads/catalogos/Telecom.pdf>, acessido em 2022-06-01.
- [49] Instituto Português de Qualidade, *Eurocódigo 1 – Acções em estruturas Parte 1-1: Acções gerais Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios*, 2009.
- [50] D. da República, “Decreto regulamentar n.º 25/2009, de 14 de setembro.” <https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-regulamentar/25-2009-489774>, acessido em 2022-06-14.
- [51] E. C. Bank, “Economic, financial and monetary developments.” <https://www.ecb.europa.eu/pub/economic-bulletin/html/eb202206.en.html#toc1>, acessido em 2022-10-06.
- [52] Statista, “Portugal: Inflation rate from 1987 to 2027.” <https://www.statista.com/statistics/372347/inflation-rate-in-portugal/>, acessido em 2022-10-26.
- [53] GSMA, *The Mobile Economy 2022*, 2022. <https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2022/02/280222-The-Mobile-Economy-2022.pdf>, acessido em 2022-11-25.