



Guilherme Fernandes Pisco

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Recolha Oportunística de Energia em Sistemas de Comunicação Sem Fios

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Rodolfo Oliveira,
Prof. Auxiliar com Agregação, Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. João Goes

Arguente: Prof. Paulo Montezuma

Vogal: Prof. Rodolfo Oliveira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março, 2019

Recolha Oportunistica de Energia em Sistemas de Comunicação Sem Fios

Copyright © Guilherme Fernandes Pisco, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Antes de mais gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Rodolfo Oliveira por todo o apoio prestado na realização deste trabalho, pela paciência e pelo tempo disponibilizado. Quero também agradecer ao António Furtado por me orientar numa fase bastante importante da realização desta dissertação.

De seguida quero agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa por me ter proporcionado um percurso académico bastante enriquecedor e por ter assegurado todas as condições para a conclusão do mesmo. Destaco também o apoio do Instituto de Telecomunicações através do projecto CoSHARE (LISBOA-01-0145-FEDER-0307095 - PTDC/EEI-TEL/30709/2017), financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Regional LISBOA (LISBOA2020), e por fundos nacionais, através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT).

À minha família, especialmente aos meus pais, à minha irmã e aos meus avós, quero agradecer pelo apoio em todos os momentos, que indiretamente foram cruciais não só na realização desta dissertação, mas em todo o meu percurso académico. Quero também agradecer a todos os meus amigos e colegas, por tornarem todo este percurso mais fácil.

Por fim, um muito obrigado à Mariana Fernandes por todo o apoio e dedicação, por estar sempre presente em todos os momentos e fazer parte da minha vida.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo comparativo entre a potência medida em três tecnologias sem fios, sendo elas o Wifi, o GSM e o DECT e identificar outros fatores que possam afetar essa potência, nomeadamente a localização tridimensional do emissor e do recetor. A medição da potência pretende identificar de uma forma prática qual a energia que poderá ser recolhida e armazenada num cenário de *Energy Harvesting* a partir do espectro RF. No decorrer do trabalho foram realizadas medições de potência nos canais utilizados por cada tecnologia, com a utilização de um analisador espectral *sweep-tuned*, para várias configurações do cenário de medição.

Os resultados relativos às medições de potência são reportados na forma de várias imagens espectrais e em tabelas, onde são apresentadas as várias potências calculadas para cada cenário de medição, assim como uma análise estatística onde são calculados a variância, o desvio padrão e a incerteza recorrendo à distribuição normal *t-student* com um grau de incerteza de 95%. Este estudo permite concluir que em média a tecnologia onde se poderá recolher mais energia é o GSM. Tal como era esperado, é também possível concluir que a localização tridimensional do emissor e do recetor e a distância entre eles poderá influenciar significativamente a quantidade de energia que poderá ser recolhida.

Palavras-chave: Análise espectral, Potência, Frequências Rádio (RF), *Energy Harvesting*

ABSTRACT

This work presents a comparative study between the power measured in three wireless technologies: Wifi, GSM, and DECT. The goal is to identify multiple factors that may affect the received power, including the location of the transmitter and the receiver. The power measurements aim to identify the amount of energy that can be collected and stored in an Energy Harvesting scenario from the RF spectrum. Throughout the work multiple power measurement methodologies are described for the channels adopted by each technology, using a sweep-tuned spectral analyzer for various operational configurations.

The results related to the power measurements are reported in the form of several spectral images and tables. The power results for each measurement scenario are presented and a statistical analysis is performed, which includes the variance, the standard deviation and the uncertainty of the measurements. The uncertainty was computed using to the normal t-student distribution with a degree of uncertainty of 95%. This study concludes that, from the measured technologies, GSM is the technology where more energy can be harvested. It is also possible to conclude that the three-dimensional location of the transmitter and the receiver and the distance between them strongly influence the amount of energy that can be harvested, as expected.

Keywords: Spectrum analysis, Power, Radio frequencies (RF), Energy Harvesting

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE FIGURAS.....	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	1
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 TRABALHO RELACIONADO	3
2.1 MÉTRICAS DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	3
2.1.1 <i>Near-Field e Specific Absortion Rate (SAR)</i>	4
2.1.2 <i>Far-Field e densidade de potência</i>	4
2.2 EXPOSIÇÃO A RADIAÇÃO EM DE RADIOFREQUÊNCIAS.....	5
2.2.1 <i>Dosimetria RF</i>	5
2.2.2 <i>Standards SAR</i>	7
2.2.3 <i>Limites e diretrizes (ICNIRP)</i>	12
2.2.4 <i>Exposição de crianças a campos EM</i>	13
2.3 REDUÇÃO DA EXPOSIÇÃO	13
2.3.1 <i>SAR Shielding</i>	13
2.3.2 <i>Controlo de potência</i>	14
2.3.3 <i>Beamforming</i>	14
2.3.4 <i>Coordinated Multipoint (CoMP)</i>	14
2.3.5 <i>Massive MIMO</i>	14
2.4 PROJETOS/CONSÓRCIOS SOBRE EXPOSIÇÃO A RADIAÇÃO EM	15
3 TECNOLOGIAS RF	17
3.1 WIFI	17
3.1.1 <i>RTL8821AE</i>	17
3.1.2 <i>Modulações</i>	18
3.2 GSM	21
3.2.1 <i>GMSK</i>	22
3.3 DECT	23
4 EQUIPAMENTO E METODOLOGIA DE MEDIÇÃO	25
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	25

4.2	ANALISADOR ESPECTRAL	26
4.3	WIFI	32
4.3.1	<i>Materiais e Configuração do cenário de medição</i>	32
4.3.2	<i>Metodologia de medição</i>	33
4.4	GSM	37
4.4.1	<i>Materiais e configuração do cenário de medição</i>	37
4.4.2	<i>Metodologia de medição</i>	37
4.5	DECT	39
4.5.1	<i>Materiais e configuração do cenário de medição</i>	39
4.5.2	<i>Metodologia de medição</i>	39
5	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	41
5.1	RESULTADOS.....	41
5.1.1	<i>WIFI</i>	41
5.1.2	<i>GSM</i>	49
5.1.3	<i>DECT</i>	53
5.2	ANÁLISE COMPARATIVA	57
5.2.1	<i>WIFI</i>	57
5.2.2	<i>GSM</i>	59
5.2.3	<i>DECT</i>	63
5.2.4	<i>WIFI vs GSM vs DECT</i>	66
6	CONCLUSÕES	69
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
6.2	TRABALHO FUTURO.....	70
7	BIBLIOGRAFIA	71
	APÊNDICE A.FOTOS REAIS DOA CENÁRIOS E MATERIAIS UTILIZADOS	75
	APÊNDICE B.IMAGENS ESPECTRAIS	80

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 CAMPOS DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICO [1].	3
FIGURA 2.2 EXEMPLO DE DOSIMETRIA EXPERIMENTAL COM UTILIZAÇÃO DE UM <i>PHANTOM</i> [5].	6
FIGURA 2.3 COMPONENTES DE CAMPO NAS EXTREMIDADES DO VOXEL [6].	6
FIGURA 2.4 SONDA UTILIZADA PARA MEDIR SAR [9].	8
FIGURA 2.5 VISTA LATERAL DO <i>PHANTOM</i> ONDE SE PODE VER LOCALIZAÇÕES IMPORTANTES PARA O POSICIONAMENTO DO DISPOSITIVO [7].	10
FIGURA 2.6 LINHAS DE REFERÊNCIA HORIZONTAL E VERTICAL DO TELEMÓVEL [7].	10
FIGURA 2.7 POSIÇÃO "CHECK" [7].	11
FIGURA 2.8 POSIÇÃO "TILT" [7].	11
FIGURA 3.1 REPRESENTAÇÃO DE SUB-PORTADORAS OFDM [31].	18
FIGURA 3.2 CONSTELAÇÃO RETANGULAR M-QAM PARA M=4, 8, 16, 32 E 64 [32].	19
FIGURA 3.3 EXEMPLO DE SINAL BPSK (ADAPTADA DE [32]).	20
FIGURA 3.4 EXEMPLO DE SINAL QPSK [32].	21
FIGURA 3.5 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO TDMA [34].	22
FIGURA 3.6 DENSIDADE ESPECTRAL DE UM SINAL MSK E GMSK [37].	23
FIGURA 4.1 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS ÂNGULOS DE ROTAÇÃO DOS DISPOSITIVOS TESTADOS.	26
FIGURA 4.2 SOFTWARE MCS.	27
FIGURA 4.3 PAINEL DE CONFIGURAÇÕES DO ANALISADOR ESPECTRAL NO SOFTWARE MCS.	28
FIGURA 4.4 ANTENA HYPERLOG 7060 [40].	30
FIGURA 4.5 PADRÃO HORIZONTAL DA ANTENA HYPERLOG 7060 [40].	30
FIGURA 4.6 PADRÃO VERTICAL DA ANTENA HYPERLOG 7060 [40].	31
FIGURA 4.7 ESQUEMA DA CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO DE MEDIÇÃO PARA O WIFI.	32
FIGURA 4.8 LARGURA DOS CANAIS 802.11G/N (OFDM).	33
FIGURA 4.9 PAINEL DE CONFIGURAÇÕES PARA O WIFI.	34
FIGURA 4.10 PAINEL DE CALIBRAÇÃO (MCS).	34
FIGURA 4.11 PONTO IMAGINÁRIO A) VISTA LATERAL B) VISTA FRONTAL (ADAPTADA DE [36]).	35
FIGURA 4.12 ESQUEMA DA CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO DE MEDIÇÃO PARA O GSM.	37
FIGURA 4.13 PAINEL DE CONFIGURAÇÕES PARA O GSM.	38
FIGURA 4.14 ESQUEMA DE CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO DE MEDIÇÃO PARA O DECT.	39
FIGURA 4.15 PAINEL DE CONFIGURAÇÕES PARA O DECT.	40
FIGURA 5.1 DENSIDADE DE PROBABILIDADE E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL (D = 120 CM).	42
FIGURA 5.2 DENSIDADE DE PROBABILIDADE E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL (D = 170 CM).	43
FIGURA 5.3 DENSIDADE DE PROBABILIDADE E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL (D = 220 CM).	44
FIGURA 5.4 DENSIDADE DE PROBABILIDADE E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL (ROTAÇÃO DE 0°).	45
FIGURA 5.5 DENSIDADE DE PROBABILIDADE E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL (ROTAÇÃO DE 90°).	46
FIGURA 5.6 DENSIDADE DE PROBABILIDADE E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL (ROTAÇÃO DE 180°).	47
FIGURA 5.7 DENSIDADE DE PROBABILIDADE E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL (ROTAÇÃO DE 270°).	48
FIGURA 5.30 GRÁFICO DA POTÊNCIA MÉDIA DO CANAL 1 DO WIFI PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS (ROTAÇÃO DE 0°).	58

FIGURA 5.31 GRÁFICO DA POTÊNCIA MÉDIA DO CANAL 1 DO WIFI PARA DIFERENTES POLARIZAÇÕES (D = 170 CM)	59
FIGURA 5.32 GRÁFICO DA POTÊNCIA MÉDIA FINAL DOS CANAIS GSM PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS (ROTAÇÃO DE 0°)	60
FIGURA 5.33 GRÁFICO DA POTÊNCIA MÉDIA DOS BURSTS GSM PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS (ROTAÇÃO DE 0°)	61
FIGURA 5.34 GRÁFICO DA POTÊNCIA MÉDIA FINAL DOS CANAIS GSM PARA VÁRIAS POLARIZAÇÕES (D = 170 CM)	62
FIGURA 5.35 GRÁFICO DA POTÊNCIA MÉDIA FINAL DOS CANAIS DECT PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS (ROTAÇÃO DE 0°)	63
FIGURA 5.36 GRÁFICO DA POTÊNCIA MÉDIA DOS BURSTS NOS CANAIS DECT PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS (ROTAÇÃO DE 0°)	65
FIGURA 5.37 GRÁFICO DA POTÊNCIA MÉDIA FINAL DOS CANAIS DECT PARA VÁRIAS POLARIZAÇÕES (D = 170 CM)	66
FIGURA 5.38 GRÁFICO DA POTÊNCIA MÉDIA FINAL PARA AS TECNOLOGIAS WIFI, GSM E DECT PARA TODAS AS DISTÂNCIAS CONSIDERADAS (ROTAÇÃO DE 0°)	67
FIGURA A 1 TELEFONE E BASE DECT SIEMENS GIGASET AC180	75
FIGURA A 2 TELEMÓVEL PARLA MINU P123	76
FIGURA A 3 CENÁRIO DE MEDIÇÃO (WIFI - ASUS K550J)	77
FIGURA A 4 ANALISADOR ESPECTRAL SPECTRAN HF 6065	78
FIGURA A 5 ESTAÇÃO BASE USRP B100	79
FIGURA B 1 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO CANAL 1 DO WIFI (D = 120 CM)	80
FIGURA B 2 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO CANAL 1 DO WIFI (D = 170 CM)	81
FIGURA B 3 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO CANAL 1 DO WIFI (D = 220 CM)	82
FIGURA B 4 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO CANAL 1 DO WIFI (ROTAÇÃO DE 0°)	83
FIGURA B 5 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO CANAL 1 DO WIFI (ROTAÇÃO DE 90°)	84
FIGURA B 6 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO CANAL 1 DO WIFI (ROTAÇÃO DE 180°)	85
FIGURA B 7 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO CANAL 1 DO WIFI (ROTAÇÃO DE 270°)	86
FIGURA B 8 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO DOMÍNIO DO TEMPO NUM CANAL GSM NA FREQUÊNCIA DE 838,6 MHz (D = 120 CM)	87
FIGURA B 9 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO DOMÍNIO DO TEMPO NUM CANAL GSM NA FREQUÊNCIA DE 838,6 MHz (D = 155 CM)	88
FIGURA B 10 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA NUM CANAL GSM (D = 155 CM)	89
FIGURA B 11 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO DOMÍNIO DO TEMPO NUM CANAL GSM NA FREQUÊNCIA DE 838,6 MHz (D = 191 CM)	90
FIGURA B 12 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO DOMÍNIO DO TEMPO NUM CANAL GSM NA FREQUÊNCIA DE 836,6 MHz (ROTAÇÃO DE 0°)	91
FIGURA B 13 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO DOMÍNIO DO TEMPO NUM CANAL GSM NA FREQUÊNCIA DE 836,6 MHz (ROTAÇÃO DE 90°)	92
FIGURA B 14 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO DOMÍNIO DO TEMPO NUM CANAL GSM NA FREQUÊNCIA DE 836,6 MHz (ROTAÇÃO DE 180°)	93
FIGURA B 15 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO DOMÍNIO DO TEMPO NUM CANAL GSM NA FREQUÊNCIA DE 836,6 MHz (ROTAÇÃO DE 270°)	94
FIGURA B 16 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO DOMÍNIO DO TEMPO NUM CANAL DECT NA FREQUÊNCIA DE 1882 MHz (D = 120 CM)	95
FIGURA B 17 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO DOMÍNIO DO TEMPO NUM CANAL DECT NA FREQUÊNCIA DE 1882 MHz (D = 170 CM)	96
FIGURA B 18 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO DOMÍNIO DO TEMPO NUM CANAL DECT NA FREQUÊNCIA DE 1882 MHz (D = 220 CM)	97
FIGURA B 19 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO DOMÍNIO DO TEMPO NUM CANAL DECT NA FREQUÊNCIA DE 1882 MHz (ROTAÇÃO DE 0°)	98
FIGURA B 20 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO DOMÍNIO DO TEMPO NUM CANAL DECT NA FREQUÊNCIA DE 1882 MHz (ROTAÇÃO DE 90°)	99
FIGURA B 21 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO DOMÍNIO DO TEMPO NUM CANAL DECT NA FREQUÊNCIA DE 1882 MHz (ROTAÇÃO DE 180°)	100
FIGURA B 22 GRÁFICO DA ANÁLISE ESPECTRAL NO DOMÍNIO DO TEMPO NUM CANAL DECT NA FREQUÊNCIA DE 1882 MHz (ROTAÇÃO DE 270°)	101

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 REQUISITOS PARA A SONDA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA E DOS PARÂMETROS DOS LÍQUIDOS [7]	9
TABELA 2.2 LIMITES SAR DO ICNIRP PARA FREQUÊNCIAS DE 100 KHZ ATÉ 10 GHZ [4].....	12
TABELA 2.3 LIMITES DE DENSIDADE DE POTÊNCIA DO ICNIRP PARA FREQUÊNCIAS ATÉ 300 GHZ [4].....	12
TABELA 3.1 POTÊNCIA MÁXIMA DOS CANAIS A OPERAR NOS 2.4 GHZ [29].....	18
TABELA 3.2 SINAIS QPSK E MAPEAMENTO COM AS MENSAGENS (ADAPTADA DE [32])	21
TABELA 4.1 EXEMPLO DE COMO OS DADOS SÃO EXPORTADOS	29
TABELA 4.2 ESPECIFICAÇÕES DA ANTENA HYPERLOG 7060 [40].....	30
TABELA 4.3 INCERTEZAS ADICIONAIS DE MEDIÇÃO PARA DISPOSITIVOS DE GRANDES DIMENSÕES [36].....	33
TABELA 4.4 ESQUEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE CALCULO DAS MÉDIAS PARA O WIFI.....	36
TABELA 5.1 MÉDIA FINAL E DADOS ESTATÍSTICOS - WIFI (D = 120 CM)	42
TABELA 5.2 MÉDIA FINAL E DADOS ESTATÍSTICOS – WIFI (D = 170 CM)	43
TABELA 5.3 MÉDIA FINAL E DADOS ESTATÍSTICOS - WIFI (D = 220 CM)	44
TABELA 5.4 MÉDIA FINAL E DADOS ESTATÍSTICOS - WIFI (ROTAÇÃO DE 0°).....	45
TABELA 5.5 MÉDIA FINAL E DADOS ESTATÍSTICOS - WIFI (ROTAÇÃO DE 90°)	46
TABELA 5.6 MÉDIA FINAL E DADOS ESTATÍSTICOS - WIFI (ROTAÇÃO DE 180°).....	47
TABELA 5.7 MÉDIA FINAL E DADOS ESTATÍSTICOS - WIFI (ROTAÇÃO DE 270°).....	48
TABELA 5.8 POTÊNCIA MÉDIA CALCULADA E DADOS ESTATÍSTICOS - GSM (D = 120 CM)	49
TABELA 5.9 POTÊNCIA MÉDIA CALCULADA E DADOS ESTATÍSTICOS - GSM (D = 155 CM)	50
TABELA 5.10 POTÊNCIA MÉDIA CALCULADA E DADOS ESTATÍSTICOS - GSM (D = 191 CM).....	50
TABELA 5.11 POTÊNCIA MÉDIA CALCULADA E DADOS ESTATÍSTICOS - GSM (ROTAÇÃO DE 0°)	51
TABELA 5.12 POTÊNCIA MÉDIA CALCULADA E DADOS ESTATÍSTICOS - GSM (ROTAÇÃO DE 90°).....	51
TABELA 5.13 POTÊNCIA MÉDIA CALCULADA E DADOS ESTATÍSTICOS - GSM (ROTAÇÃO DE 180°).....	52
TABELA 5.14 POTÊNCIA MÉDIA CALCULADA E DADOS ESTATÍSTICOS - GSM (ROTAÇÃO DE 270°).....	52
TABELA 5.15 POTÊNCIA MÉDIA CALCULADA E DADOS ESTATÍSTICOS - DECT (D = 120 CM).....	53
TABELA 5.16 POTÊNCIA MÉDIA CALCULADA E DADOS ESTATÍSTICOS - DECT (D = 170 CM).....	54
TABELA 5.17 POTÊNCIA MÉDIA CALCULADA E DADOS ESTATÍSTICOS - DECT (D = 220 CM).....	54
TABELA 5.18 POTÊNCIA MÉDIA CALCULADA E DADOS ESTATÍSTICOS - DECT (ROTAÇÃO DE 0°).....	55
TABELA 5.19 POTÊNCIA MÉDIA CALCULADA E DADOS ESTATÍSTICOS - DECT (ROTAÇÃO DE 90°).....	55
TABELA 5.20 POTÊNCIA MÉDIA CALCULADA E DADOS ESTATÍSTICOS - DECT (ROTAÇÃO DE 180°)	56
TABELA 5.21 POTÊNCIA MÉDIA CALCULADA E DADOS ESTATÍSTICOS - DECT (ROTAÇÃO DE 270°)	56
TABELA 5.22 POTÊNCIA MÉDIA FINAL E DADOS ESTATÍSTICOS - WIFI (D = 120 CM, 170 CM E 220 CM)	57
TABELA 5.23 POTÊNCIA MÉDIA FINAL E DADOS ESTATÍSTICOS - WIFI (ROTAÇÕES DE 0°, 90°, 180° E 270°)	58
TABELA 5.24 POTÊNCIA MÉDIA NOS CANAIS GSM, POTÊNCIAS MÉDIAS FINAIS E DADOS ESTATÍSTICOS (D = 120 CM, 155 CM E 191 CM).....	59
TABELA 5.25 POTÊNCIA MÉDIA DOS BURSTS NOS CANAIS GSM, POTÊNCIAS MÉDIAS FINAIS E DADOS ESTATÍSTICOS (D = 120 CM, 155 CM E 191 CM).....	60

TABELA 5.26 POTÊNCIA MÉDIA NOS CANAIS GSM, POTÊNCIAS MÉDIAS FINAIS E DADOS ESTATÍSTICOS (ROTAÇÕES DE 0°, 90°, 180° E 270°)	61
TABELA 5.27 POTÊNCIA MÉDIA NOS CANAIS DECT, POTÊNCIAS MÉDIAS FINAIS E DADOS ESTATÍSTICOS (D = 120 CM, 170 CM E 220 CM).....	63
TABELA 5.28 POTÊNCIA MÉDIA DOS BURSTS NOS CANAIS DECT, POTÊNCIAS MÉDIAS FINAIS E DADOS ESTATÍSTICOS (D = 120 CM, 170 CM E 220 CM)	64
TABELA 5.29 POTÊNCIA MÉDIA NOS CANAIS DECT, POTÊNCIAS MÉDIAS FINAIS E DADOS ESTATÍSTICOS (ROTAÇÕES DE 0°, 90°, 180° E 270°)	65
TABELA 5.30 POTÊNCIAS MÉDIAS FINAIS PARA AS TECNOLOGIAS WIFI, GSM E DECT (D = 120 CM E ROTAÇÃO DE 0°)	66

ACRÓNIMOS

- AP** *Access Point*
- BPSK** *Binary Phase-shift keying*
- CCK** *Complementary Code Keying*
- CoMP** *Coordinated Multipoint*
- CSV** *Comma-Separated Values*
- CTIA** *Cellular Telecommunications and Internet Association*
- DECT** *Digital Enhanced Cordless Telecommunications*
- DSSS** *Direct Sequence Spread Spectrum*
- E** *Intensidade do Campo Elétrico*
- EM** *Eletromagnético*
- FDM** *Frequency Division Multiplexing*
- FDMA** *Frequency Division Multiple Access*
- FDTD** *Finite-Difference Time-Domain*
- GMSK** *Gaussian Minimum Shift Keying*
- GSM** *Global System for Mobile Communications*
- H** *Intensidade do Campo Magnético*
- IC** *Intervalo de Confiança a 95%*
- ICNIRP** *International Commission on Non-Ionising Radiation Protection*
- IoT** *Internet of Things*
- MIMO** *Multiple-input and multiple-output*
- MSK** *Minimum Shift Keying*
- NRZ-L** *Non-return-to-zero*
- OFDM** *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
- OMS** *Organização Mundial de Saúde*

osaSAR *Organ-Specific Averaged SAR*
psaSAR *Peak Spatial-Averaged SAR*
PSD *Power Spectral Density*
PSK *Phase-shift keying*
QAM *Quadrature Amplitude Modulation*
QPSK *Quadrature Phase-shift keying*
RBW *Resolution Bandwidth*
RF *Rádio frequências*
RMS *Root Mean Square*
SAR *Specific Absorption Rate*
SI *Sistema Internacional*
TDMA *Time Division Multiple Access*
UDP *User Datagram Protocol*
VSWR *Voltage Standing Wave Ratio*
wbaSAR *Whole-Body Averaged SAR*
WLAN *Wireless Local Area Network*



INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Atualmente as redes de sensores tem um peso significativo nos mais diversos setores económicos e acredita-se que pode crescer. Dois dos principais desafios das redes de sensores são a eficiência energética e a forma como os nós da rede recebem a energia, que os permite comunicarem entre si.

De forma a solucionar o segundo desafio surgiu o conceito de *Energy Harvesting*, que consiste em recolher e armazenar a energia existente no espectro de rádio frequência (RF), que é transmitida pelos dispositivos móveis e propagada através das ondas eletromagnéticas. Este conceito trará grandes benefícios para os dispositivos de baixo consumo energético, pois será possível alimentá-los através dos emissores de comunicações, como aqueles que serão estudados neste trabalho, realizando transferência de energia sem-fios [46, 47]. Isto permitirá aos transmissores ou recetores comunicarem e ainda acumularem energia, sem qualquer requisito de estarem ligados fisicamente a uma infraestrutura elétrica. Mesmo que a energia acumulada não seja em grandes quantidades, será o suficiente para, por exemplo, enviar alguns pacotes de informação esporadicamente [45], visto que estamos a falar da sua utilização em dispositivos de baixo consumo energético.

Para que este conceito seja posto em prática e tenha sucesso, é necessário haver energia propagada pelas ondas eletromagnéticas transmitidas pelos dispositivos sem fios, e que essa energia seja suficiente para ser recolhida e armazenada. Deste modo, o que se pretende com esta dissertação é tentar perceber, de uma forma experimental, qual é a quantidade de energia transmitida por diferentes dispositivos sem fios e que eventualmente poderá ser usada num cenário de *Energy Harvesting*.

1.2 Objetivos

Neste trabalho pretende-se quantificar a energia transmitida por diferentes dispositivos sem fios a operar nas frequências de rádio (RF), quantificação que será realizada de uma forma experimental e assumindo diferentes configurações de e cenários de medição.

Com o auxílio de um analisador espectral *sweep-tuned* será medida a potência recebida, proveniente dos diferentes dispositivos, para diferentes configurações espaciais de medição.

Após a obtenção desses dados pretende-se realizar uma análise comparativa do desempenho das diferentes tecnologias, no que diz respeito à potência medida, para os diferentes cenários de medição considerados, assim como uma análise estatística dos resultados obtidos.

1.3 Estrutura da dissertação

No capítulo 2 é dada uma noção geral de exposição a radiação eletromagnética (EM). São apresentadas as métricas utilizadas para quantificar a exposição a radiação EM consoante a distância considerada entre o emissor e o recetor. São também descritas normas que visam normalizar a forma como é quantificada a exposição a radiação EM e limitar a intensidade dos campos EM, onde são apresentadas metodologias e materiais utilizados nos processos de medição dos campos EM. São ainda apresentadas algumas técnicas que permitem uma redução da exposição a radiação EM. Por fim fala-se de alguns projetos e consórcios relativos a esta temática.

No capítulo 3 são descritas algumas das características de nível físico das tecnologias sem fios consideradas neste trabalho. É importante ter uma noção das particularidades destas tecnologias, nomeadamente das modulações utilizadas, de modo a fazer a ponte entre a forma como estas tecnologias se comportam e a forma como são realizadas as medições e análise espectral.

No capítulo 4 serão abordadas as metodologias e equipamentos utilizados para a realização das medições. É feita uma descrição do funcionamento do equipamento utilizado para fazer as medições de potência nas diferentes bandas RF, que neste caso foi um analisador espectral. Serão também descritas as configurações dos cenários considerados nas medições para as tecnologias consideradas neste trabalho, assim como a forma como foram extraídos os resultados das medições.

No capítulo 5 são apresentados todos os resultados obtidos nas medições, tais como os gráficos da análise espectral realizada pelo analisador espectral, as tabelas com os resultados relativos aos vários cenários considerados e análise estatística, onde são calculados alguns parâmetros, tais como desvio padrão, variância e incerteza com grau de incerteza de 95% na distribuição normal *t-student*. Por fim é realizada a discussão dos resultados obtidos, nomeadamente as comparações das potências calculadas nas diferentes configurações dos cenários de medição, assim como a comparação da potência medida no Wi-Fi, no DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) e no GSM (Global System for Mobile Communications).

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas algumas considerações finais relativas aos resultados obtidos e são também apresentados alguns tópicos relativos a possíveis considerações nos trabalhos futuros.



TRABALHO RELACIONADO

Neste capítulo é apresentada uma noção geral de exposição a radiação eletromagnética. São apresentadas as métricas utilizadas para quantificar a exposição a radiação EM consoante a distância considerada entre o emissor e o recetor. São também descritas normas que visam normalizar a forma como é quantificada a exposição a radiação EM e limitar a intensidade dos campos EM. São igualmente apresentadas metodologias e materiais utilizados nos processos de medição dos campos EM. São ainda apresentadas algumas técnicas que permitem uma redução da exposição a radiação EM. Por fim fala-se de alguns projetos e consórcios relativos a esta temática.

2.1 Métricas de Radiação Eletromagnética

Quando se trata de medir a exposição a radiação eletromagnética, a distância à antena de transmissão é um fator de elevada importância. Isto porque as regiões do campo eletromagnético (EM) em torno da antena em transmissão são classificadas de maneira diferente, devido às propriedades do campo EM, baseado na distância relativamente à antena. Assim, as métricas usualmente utilizadas para avaliar a exposição à radiação EM, são distintas para as várias regiões de campo EM [1].

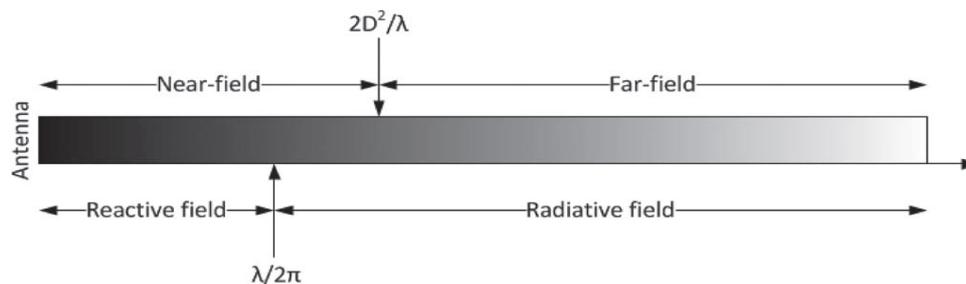


Figura 2.1 Campos de Radiação Eletromagnético [1].

Em torno das antenas em transmissão existem duas regiões que são definidas pelos campos elétrico e magnético, de acordo com a distância relativamente à antena. Estas são denominadas de: *near-field* e *far-field*. Os campos nestas duas regiões comportam-se de maneira diferente, pelo que a exposição à radiação eletromagnética nestas duas regiões é avaliada de maneira diferente por duas métricas distintas; o Specific Absorption Rate (SAR) é normalmente usado no *near-field*, enquanto que no *far-field* é usada a densidade de potência [1].

2.1.1 *Near-Field e Specific Absortion Rate (SAR)*

A região *near-field* corresponde a áreas próximas da antena. Como é possível verificar na Figura 2.1, esta região é dividida em duas áreas distintas; a área reativa e a radiativa. A região reativa *near-field* começa na antena até a distância de $\lambda/2\pi$, onde λ é o comprimento de onda [1]. É esta região que mais contribui para a exposição das pessoas no *near-field*, pelo facto da energia armazenada em torno da fonte (antena) ser facilmente absorvida pelos tecidos do corpo humano. Na região radiativa a energia começa a sofrer perdas de propagação e a força dos campos diminui com a distância [2].

A métrica SAR é uma medida da taxa de absorção de energia pelo corpo quando exposto a radiação EM. A sua unidade SI (Sistema Internacional) é Watts por Quilograma de massa corporal (W/Kg) e é habitualmente usada para medir o nível de exposição a radiação EM na região *near-field* ponderado ao longo do tempo (normalmente em minutos) [1]. É expresso matematicamente como [3]:

$$SAR = \frac{\delta}{\delta t} \left(\frac{\delta W}{\delta m} \right) = \frac{\delta}{\delta t} \left(\frac{\delta W}{\rho \delta V} \right), \quad (2.1)$$

onde W, m, V e ρ representam a energia absorvida pelo corpo, a massa, o volume e a densidade do corpo, respetivamente. Pode também ser calculada através da expressão

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho}, \quad (2.2)$$

onde E é o valor eficaz do campo elétrico no tecido a considerar (V/m), σ é a condutividade do tecido (S/m), ρ é a densidade do tecido (Kg/m^3) [3].

A SAR é medida de forma diferente para diferentes partes do corpo, devido às suas diferentes taxas de absorção.

O *Whole-Body Averaged SAR* (wbaSAR) e o *Organ-Specific Averaged SAR* (osaSAR) são métricas que nos dão a média da SAR para uma determinada massa do corpo. O wbaSAR dá-nos o rácio de toda a potência absorvida pelo corpo e toda a massa corporal. Para conformidade regulatória o wbaSAR é ponderado durante um período de 6 minutos. Pode ser expresso como [1][3].

$$wbaSAR = \frac{1}{M} \int_R SAR \delta m = \frac{1}{M} \int_R \sigma |E|^2 \delta V \quad (2.3)$$

onde M, R e V, representam a massa total do corpo, a região do corpo e o volume total de tecidos do corpo, respetivamente. Já o osaSAR dá-nos a média de SAR relativamente à massa de um órgão ou tecido em específico e é definido por

$$osaSAR = \frac{1}{M_{\text{orgão}}} \int_R SAR \delta m = \frac{1}{M_{\text{orgão}}} \int_R \sigma |E|^2 \delta V \quad (2.4)$$

onde $M_{\text{orgão}}$ é a massa do órgão ou tecido que se está a considerar [1][3].

Outra métrica usada é a *Peak Spatial-Averaged SAR* (psaSAR). Esta é definida como sendo o valor máximo de SAR para uma massa ou volume específica de tecido, normalmente de 10g em forma de cubo, durante um período de 6 minutos [3].

2.1.2 *Far-Field e densidade de potência*

A região far-field começa a uma distância superior a $2D^2/\lambda$ da fonte, onde D corresponde à maior dimensão da antena (comprimento, largura ou diâmetro) [1]. Nesta região mais afastada da antena, os campos elétrico e magnético começam a apresentar algumas semelhanças. Uma delas é o facto do rácio entre as suas amplitudes ser a mesma ao longo do espaço, atingindo-se o valor correspondente à impedância característica do espaço livre ($|E|/|H|=377 \text{ ohm}$ [3]). Assim, a densidade de potência num

determinado ponto do espaço pode ser representada apenas pela componente elétrica através da seguinte expressão

$$S = EH = \frac{E^2}{Z_0} = \frac{E^2}{377}, \quad (2.5)$$

onde E e H são os campos elétrico e magnético, respetivamente e Z_0 a impedância característica do meio em espaço livre [4].

2.2 Exposição a Radiação EM de Radiofrequências

Tem havido um crescimento considerável das tecnologias sem fios, não só devido ao aumento do número de subscritores dos dispositivos móveis, mas também pelo aumento das tecnologias sem fios *indoor* tais como o WI-FI, que está presente na maioria das nossas casas e ultimamente com o crescimento do IoT (*Internet of Things*). Isto significa que estamos rodeados de radiação eletromagnética, que tem trazido alguma preocupação não só para o público em geral, mas também para a comunidade científica.

Estas preocupações caem essencialmente sobre os telemóveis, pois pensa-se que apresentam maior risco visto que são utilizados muito próximo do nosso corpo [1].

2.2.1 Dosimetria RF

Segundo o ICNIRP (*International Commission on Non-Ionising Radiation Protection*) [4], a dosimetria corresponde à “medição ou determinação por meio de cálculos da força do campo elétrico ou da densidade da corrente induzida, da absorção específica de energia, ou da distribuição da taxa de absorção específica de energia, em humanos ou animais expostos a campos EM”. Por outras palavras, pode-se dizer que é o processo de quantificar a exposição RF dentro dos tecidos através dessas grandezas. Existem duas técnicas distintas de dosimetria, a avaliação experimental (por meios físicos) e a avaliação numérica (por meio de simulação recorrendo a pacotes de software especificamente escritos para o efeito).

2.2.1.1 Avaliação experimental do SAR

A avaliação experimental consiste na medição dos campos internos com a utilização de *Phantoms* (Figura. 2.2) preenchidos com líquidos, que na sua constituição possuem determinados elementos químicos com características e propriedades elétricas muito semelhantes aos tecidos do corpo humano, para várias frequências. Podem ser utilizados para simular a cabeça ou todo o corpo humano [2].

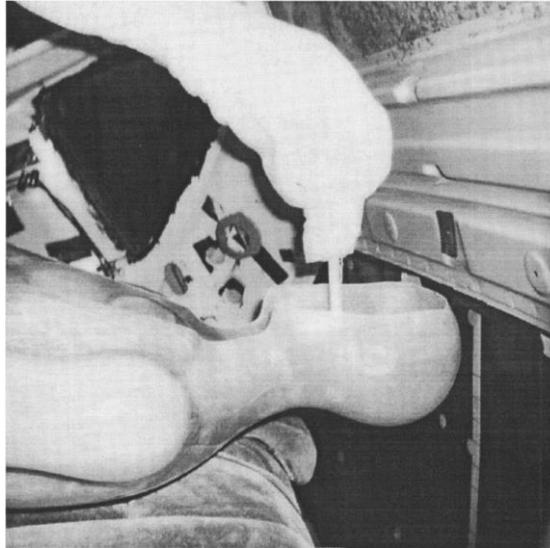


Figura 2.2 Exemplo de dosimetria experimental com utilização de um *phantom* [5].

2.2.1.2 Avaliação numérica do SAR

A avaliação numérica consiste na utilização de modelos de simulação. Habitualmente é usado o método FDTD (*Finite-difference time-domain*), que está normalizado pelo IEEE e IEC [6] e que tem sido ajustado ao longo do tempo de forma a possibilitar o cálculo do SAR.

O FDTD é um modelo numérico que permite simular e calcular campos elétricos recorrendo a um volume cúbico, designado por voxel, onde os campos elétricos se encontram nas suas extremidades (Figura. 2.3). O voxel permite simular um volume de um determinado tecido do corpo, sendo que é programado para ter a mesma condutividade e densidade que os tecidos a serem considerados.

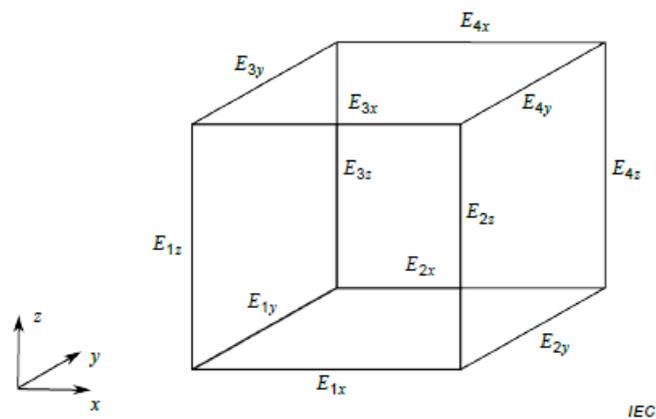


Figura 2.3 Componentes de campo nas extremidades do voxel [6]

Para calcular o SAR para um único *voxel*, são usadas as 12 amplitudes de campo elétrico para calcular a média no centro do *voxel* recorrendo a interpolação linear

$$E_x = \frac{1}{4}(E_{1x} + E_{2x} + E_{3x} + E_{4x}), \quad (2.6)$$

$$E_y = \frac{1}{4}(E_{1y} + E_{2y} + E_{3y} + E_{4y}), \quad (2.7)$$

$$E_z = \frac{1}{4}(E_{1z} + E_{2z} + E_{3z} + E_{4z}), \quad (2.8)$$

O SAR é então calculado pela seguinte expressão

$$SAR = \sigma_{voxel} \frac{|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2}{2\rho_{voxel}}, \quad (2.9)$$

onde σ_{voxel} e ρ_{voxel} são a condutividade e a massa associada ao voxel, respetivamente [6].

2.2.2 Standards SAR

Várias diretrizes e normas foram desenvolvidas por algumas organizações (i.e., ICNIRP, IEEE) com o intuito de limitar a exposição das pessoas à radiação eletromagnética, assim como estabelecer limites de segurança nos valores da SAR e da densidade de potência. Standards como o IEEE 1528-2003 e a sua revisão de 2013 ou a sua versão internacional IEC 62209-1 visam regular os métodos de medição para assegurar o cumprimento de determinadas práticas.

Nas seções seguintes são apresentadas a instrumentação e os procedimentos standard para determinar de forma adequada o *peak spatial-averaged* SAR na cabeça.

2.2.2.1 Instrumentação

No que diz respeito à instrumentação ideal necessária para proceder à medição do SAR, no standard IEEE 1528-2013 (Revisão de IEEE 1528-2003) [7] para o cálculo do *peak spatial-average* SAR na cabeça humana é recomendada a utilização de uma sonda de pequenas dimensões, que:

- deverá ser menor que o comprimento de onda nos líquidos equivalentes aos tecidos;
- deve ser isotrópica (independente da direção da radiação);
- deve também ter uma resposta linear ao quadrado da intensidade do campo elétrico;

e deve introduzir muito pouca interferência no campo a ser medido. Este tipo de sondas tem muito mais sensibilidade comparativamente a sondas térmicas. Enquanto que com sondas térmicas as medições de SAR são realizadas na ordem de 1W/kg com sondas de campo elétrico é possível realizar medições abaixo de 10mW/kg [8].

Na Figura 2.4 podemos ver uma sonda de SAR acoplada a um braço robótico para efetuar medições dos campos nos líquidos ou no ar, que cumpre os requisitos das normas [9].



Figura 2.4 Sonda utilizada para medir SAR [9]

É importante conhecer a sensibilidade da sonda para que se possa determinar a sua calibração e a incerteza de medição. A sonda deve ser calibrada para todos os líquidos usados nas medições, devido às diferentes respostas da sonda em diferentes meios. A calibração deve indicar a permitividade, condutividade, frequência, temperatura e características do sinal nos quais a incerteza da sonda é válida [7].

A Tabela 2.1 apresenta os requisitos de diâmetro da sonda e da distância mais próxima em relação à superfície interior do *phantom*. Na tabela $Z_{50\%}$ representa a distância no qual o SAR baixa 50% em relação ao SAR na superfície e Z_{M1} a distância máxima entre a sonda e a superfície interna do phantom.

Tabela 2.1 Requisitos para a sonda em função da frequência e dos parâmetros dos líquidos [7]

f (MHz)	Medium relative permittivity (ϵ_r)	Medium conduc- tivity (σ) (S/m)	Wavelength in the medium (λ) (mm)	Plane wave skin depth (δ) (mm)	Max. probe tip diameter (mm)	50% distance for MI [$z_{50\%} =$ $\delta \ln(2)/2$] (mm)	Max. distance for MI (z_{MI}) (mm)
300	45.3	0.87	148.6	46.1	8	16.0	5
450	43.5	0.87	101.1	42.9	8	14.9	5
750	41.9	0.89	61.8	39.8	8	13.8	5
835	41.5	0.90	55.8	38.9	8	13.5	5
900	41.5	0.97	51.7	36.1	8	12.5	5
1450	40.5	1.20	32.5	28.6	8	9.9	5
1500	40.4	1.23	31.5	27.9	8	9.7	5
1640	40.2	1.31	28.9	26.1	8	9.0	5
1750	40.1	1.37	27.1	24.9	8	8.6	5
1800	40.0	1.40	26.4	24.3	8	8.4	5
1900	40.0	1.40	25.0	24.3	8	8.4	5
2000	40.0	1.40	23.7	24.2	8	8.4	5
2100	39.8	1.49	22.6	22.8	7.5	7.9	5
2300	39.5	1.67	20.8	20.2	6.9	7.0	5
2450	39.2	1.80	19.6	18.7	6.5	6.5	5
2600	39.0	1.96	18.5	17.2	6.2	5.9	5
3000	38.5	2.40	16.1	13.9	5.4	4.8	5
4000	37.4	3.43	12.3	9.6	4.1	3.3	3.3
5000	36.2	4.45	10.0	7.3	3.3	2.5	2.5
5200	36	4.66	9.6	7.0	3.2	2.4	2.4
5400	35.8	4.86	9.3	6.7	3.1	2.3	2.3
5600	35.5	5.07	9.0	6.4	3.0	2.2	2.2
5800	35.3	5.27	8.7	6.1	2.9	2.1	2.1
6000	35.1	5.48	8.4	5.9	2.8	2.0	2.0

2.2.2.2 Metodologias e procedimentos de medição

De forma a serem realizadas medições de qualidade deve-se proceder a uma boa prática laboratorial, de acordo com o ISSO/IEC 17025:2005. Existem alguns laboratórios com capacidade para realizar medições de SAR cumprindo os requisitos de diferentes normas, nomeadamente o IRACONS e o MET labs.

São necessários protocolos bem definidos para que se obtenham medições aceitáveis do *peak spatial-averaged SAR*. Para isso é necessário incluir nos procedimentos informação detalhada relativamente aos seguintes tópicos [7]:

- 1) Setup e calibração (sonda, *phantom*, parâmetros dos dielétricos, validação do sistema);
- 2) Procedimentos utilizados para configurar os dispositivos de acordo com as configurações pretendidas e para verificar as condições de operação dos dispositivos;
- 3) Posicionamento do dispositivo em relação ao *phantom*;
- 4) Procedimentos de varrimento de forma a determinar as localizações e valores do *peak spatial-average SAR*, incluindo métodos de interpolação e extrapolação utilizados;
- 5) Aplicabilidade dos procedimentos de teste para testar um único dispositivo.

Os dispositivos a serem testados devem ser configurados para transmitir à potência média mais alta que lhes é possível, para cada modo de transmissão. Caso não seja possível, os dispositivos podem ser configurados a transmitir a uma potência mais baixa e, em seguida, dimensionar essa potência para a potência média mais alta fornecida para a qual o SAR dimensionado é maior ou igual ao SAR esperado para esse dispositivo com essa configuração [7].

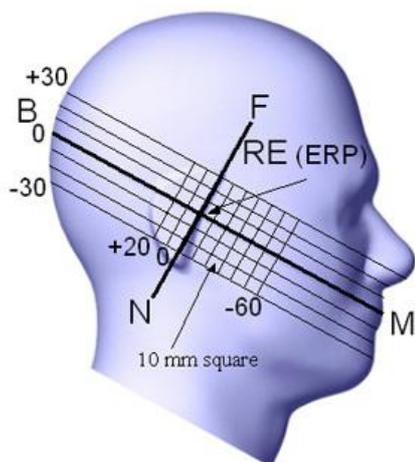


Figura 2.5 Vista lateral do *phantom* onde se pode ver localizações importantes para o posicionamento do dispositivo [7]

No que diz respeito ao posicionamento do dispositivo em teste relativamente à cabeça do *phantom*, existem duas posições recomendadas em que os testes devem ser realizados, estas posições designam-se por posição *check* ou posição *tilt*. Em ambas as posições, o telemóvel é posicionado relativamente à cabeça do *phantom* de forma a alinhar as linhas de referência do terminal móvel (Figura 2.6) com as da cabeça do *phantom* (Figura 2.5) [7].

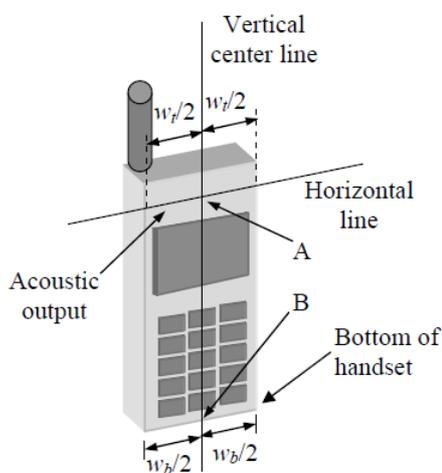


Figura 2.6 Linhas de referência horizontal e vertical do telemóvel [7].

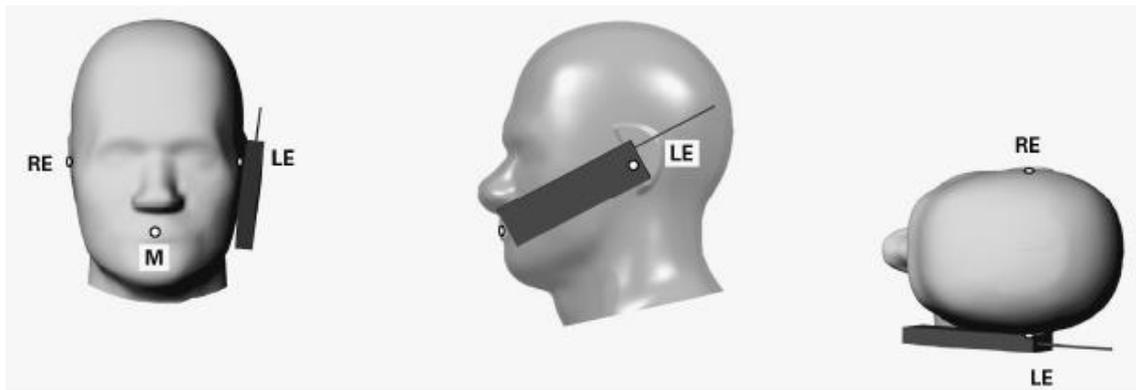


Figura 2.7 Posição "Check" [7].

Na posição *check* o objetivo é que a linha de centro vertical e a linha horizontal do dispositivo (Figura 2.7) fiquem em plano e coincidindo com os eixos B-M e N-F da cabeça do *phantom* (Figura 2.6), respectivamente. Este alinhamento pode ser verificado na Figura 2.8. O dispositivo deve também estar encostado à orelha do *phantom*.

Na posição *tilt* o dispositivo deve ser posicionado da mesma forma, mas rodando o dispositivo 15 graus sobre a sua linha horizontal (Figura 2.9) [7].

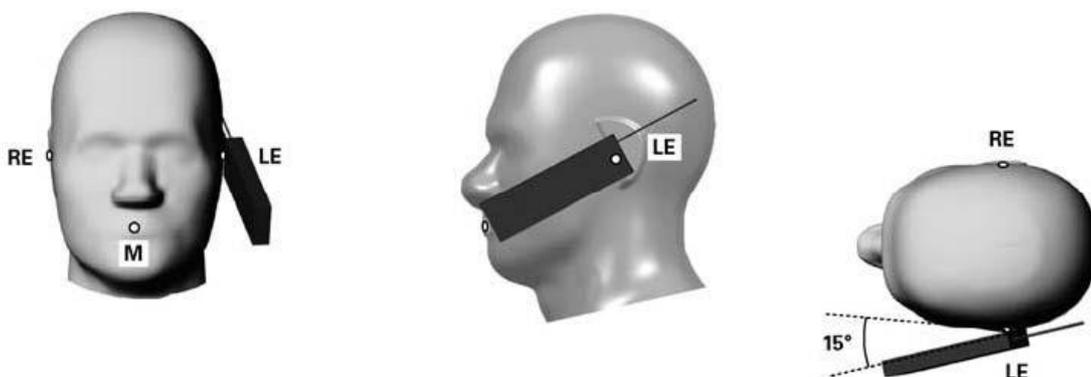


Figura 2.8 Posição "Tilt" [7].

Para realizar as medições do *peak spatial-averaged SAR* primeiramente é necessário medir o SAR num ponto de referência estacionário. Nesse ponto, o SAR deve exceder o limite inferior de detecção do sistema de medição. De seguida é realizado um varrimento de área, em que a sonda percorre os líquidos de forma a encontrar as localizações aproximadas dos picos de SAR. Localizados esses picos é feito um segundo varrimento em torno da sua localização de forma a obter os valores do *peak spatial-averaged SAR*. Por fim, calcula-se o SAR local no mesmo sítio do ponto de referência calculado inicialmente. O desvio entre as duas medições de SAR deve ser anotado e esse desvio deve ser mantido entre $\pm 5\%$. Estas medições devem então ser realizadas para todas as posições, configurações e modos de transmissão do dispositivo em teste [7].

Inicialmente utiliza-se o canal no qual a frequência é mais próxima da frequência central (f_c). Num segundo passo, utilizando as configurações onde foram obtidos os valores de *peak spatial-averaged SAR* mais elevados procede-se a novas medições, mas agora para outros canais de frequência.

Essas frequências devem ser escolhidas da seguinte forma: se o comprimento da banda de transmissão, $\Delta f = f_{high} - f_{low}$ (onde f_{high} é a maior frequência na banda e f_{low} a menor) exceder a frequência central em 1% devem também ser testadas a frequência mais alta e a mais baixa da banda. No caso desse excedente ser superior a 10%, deve utilizar-se a fórmula (2.10) para determinar o número de canais testados [7].

$$N_c = 2 \times \text{roundup} \left[\frac{10(f_{high} - f_{low})}{f_c} \right] + 1 \quad (2.10)$$

A função *roundup* arredonda o valor que recebe para o inteiro mais próximo acima desse valor. Neste caso os canais de frequência devem ter um espaçamento semelhante entre si e devem ser incluídos os valores mais alto e mais baixo da banda de frequências [7].

2.2.3 Limites e diretrizes (ICNIRP)

O ICNIRP, foi reconhecido formalmente pela OMS (Organização Mundial de Saúde) para desenvolver as diretrizes internacionais de exposição a campos EM com ondas até 300 GHz presentes na publicação [4]. Esta publicação teve como principal objetivo estabelecer diretrizes de forma a limitar a exposição a campos EM, garantindo assim proteção contra efeitos adversos á saúde.

Os limites de SAR e densidade de potência do ICNIRP estão apresentados nas tabelas 2.2 e 2.3, respectivamente.

Tabela 2.2 Limites SAR do ICNIRP para frequências de 100 kHz até 10 GHz [4].

	Público em geral	Profissional
Todo o corpo (W/Kg)	0.08	0.4
Localizado (cabeça/tronco) (W/Kg)	2	10
Localizado (membros) (W/Kg)	4	20

Tabela 2.3 Limites de densidade de potência do ICNIRP para frequências até 300 GHz [4].

	Densidade de Potência (W/m ²)
Público em geral	10
Profissionais	50

Os “profissionais” mencionados na tabela são pessoas treinadas e conscientes das possíveis mazelas da radiação e tomam as devidas precauções, enquanto que o “público em geral” são pessoas de todas as idades, que não tomam as precauções necessárias.

Estes limites foram estabelecidos para valores de SAR máximos obtidos em cada de 10g de tecido ponderados para um tempo de 6 minutos. Os valores de densidade de potência foram ponderados sobre secções de 20 cm^2 de área e um período de $68/f^{1.05}$ minutos (em que f é em GHz) [4].

É importante salientar que estes limites foram estabelecidos com um intervalo de segurança bastante confortável, o que quer dizer que os limites dados pelo ICNIRP se encontram bastante abaixo daquele que é o limite real em que a radiação começa realmente a ter implicações para a saúde [10].

2.2.4 Exposição de crianças a campos EM

Uma publicação de 2008 [11], demonstrou que cerca de 79,1% das crianças entre 7-14 anos de idade que responderam ao questionário tinham acesso a telemóveis, o que demonstra que há um grande número de crianças expostas a campos EM. Isto levanta preocupações, pois a morfologia e fisiologia das crianças é diferente da dos adultos, nomeadamente a condutividade e permitividade dos tecidos é dependente da idade [12], o que provoca um possível aumento da absorção de energia nos tecidos de uma criança relativamente a um adulto. Esta diferença é possível ser verificada em [13], onde foi medido o SAR em modelos de cabeças com diferentes dimensões e é possível concluir que para os modelos mais pequenos (crianças) os valores de SAR são mais elevados do que em modelos maiores (adultos).

Em [14] foram realizadas várias medições a dispositivos a que as crianças normalmente têm acesso, tais como, dispositivos de vigilância a bebês, dispositivos DECT, *routers* WLAN (*Wireless Local Area Network*), dispositivos *bluetooth* e brinquedos que utilizam rádio frequências, de forma a avaliar a exposição a campos EM. Concluíram que todos os resultados obtidos na região *far-field* se encontram abaixo dos limites apresentados pelo ICNIRP. Apenas o dispositivo de vigilância de bebês a operar a uma frequência de 40.5 MHz, perto da cabeça da criança, demonstrou ultrapassar os valores limite do ICNIRP. É aconselhado pelos autores deste artigo que as crianças tomem uma distância de segurança relativamente aos dispositivos de pelo menos um metro.

A OMS na declaração de esclarecimento [15], afirma que os limites e diretrizes estabelecidos pelo ICNIRP, descritos no secção 3.2.3, foram desenvolvidos para proteger o público em geral, incluindo as crianças.

2.3 Redução da exposição

Com o desenvolvimento da tecnologia, um dos grandes desafios tem sido minimizar o consumo de energia nos dispositivos, reduzindo a potência necessária de funcionamento. Um exemplo são as redes móveis, em que a própria rede está otimizada para que os dispositivos móveis comuniquem utilizando a menor potência possível, contribuindo para o problema do consumo de energia e da exposição a radiação EM.

Também as novas gerações de comunicações móveis são desenhadas de forma a aumentar a eficiência espectral. Prevê-se, que na quinta geração o próprio critério da exposição a radiação eletromagnética seja tido em conta [16].

Neste capítulo serão descritas algumas técnicas que permitem reduzir o SAR e/ou a potência de transmissão e consequentemente a exposição a radiação EM.

Com isto é possível perceber que há um esforço e preocupação de reduzir a exposição das pessoas á radiação EM, devido ao aumento significativo do uso dos dispositivos de comunicação moveis durante elevados períodos de tempo e aos riscos que esta exposição pode trazer para a saúde [1].

2.3.1 SAR Shielding

Esta técnica consiste na utilização de materiais com certas características, que são colocados no telemóvel entre a antena e a cabeça humana. Estes materiais, nomeadamente o ferrite e os meta-materiais

permitem reduzir os níveis de SAR [1]. A ferrite consegue cancelar a componente de campo magnético resultante de ondas EM incidentes [17], já os meta-materiais possuem condutividade e/ou permeabilidade negativas [18].

Em [19] foi detetada uma redução de 47.68% nos níveis de SAR sobre 1 grama de tecido, quando usado ferrite de 42.12% quando usados meta-materiais. Foi também mostrado em [20] que há uma redução de SAR, pela utilização de meta-materiais, de pelo menos 27% e 52%, a frequências de 900 MHz e 1800 MHz, respetivamente, sobre 1 grama de tecido, mostrando também haver menos interferência no desempenho da antena, em relação à ferrite.

2.3.2 Controlo de potência

O controlo de potência é aplicado ao sistema de comunicações móveis, tanto para *downlink* como para *uplink*. No caso do *uplink*, o controlo de potência tem como objetivo controlar a potência de transmissão dos terminais móveis, para que a força dos sinais recebidos na estação base seja semelhante, independentemente da localização dos terminais. Isto permite reduzir as interferências na estação base, assim como reduzir o consumo de bateria nos terminais móveis. No *downlink* o principal objetivo é fazer com que a estação base consiga transmitir para os terminais móveis com a menor potência possível [21]. Visto que a potência de transmissão está diretamente relacionada com o SAR e consequentemente com a exposição à radiação EM, pode-se concluir que esta técnica representa uma mais valia no que diz respeito à redução da exposição à radiação EM.

2.3.3 Beamforming

A técnica denominada de *Beamforming* consiste na utilização de várias antenas na mesma estação base, de forma a orientarem a radiação numa determinada direção. A ideia é que o sinal de cada utilizador seja ajustado em termos de amplitude e de fase em direção ao destino desejado. Através da utilização de algoritmos de processamento de sinal digital, o *beamforming* permite saber a posição do utilizador, maximizando assim o sinal recebido na direção desejada e desta forma reduzir a potência de transmissão e consequentemente a exposição à radiação EM [1].

2.3.4 Coordinated Multipoint (CoMP)

Segundo [22], o CoMP consiste num modo de coordenação dinâmica entre várias transmissões que se encontram separadas geograficamente ou entre pontos de receção.

Com o CoMP é possível reduzir a potência de transmissão devido à comunicação que existe com as estações base vizinhas e assim, consequentemente, a exposição à radiação EM pode ser reduzida. O *beamforming* pode ser utilizado juntamente com o CoMP, atuando no *uplink* ao fazer com que os terminais móveis comuniquem com as estações base localizadas no lado contrário da cabeça do utilizador, desta forma pode-se reduzir significativamente a exposição à radiação EM [1].

2.3.5 Massive MIMO

Esta tecnologia consiste na utilização de várias antenas de menores dimensões na estação base, de forma que cada antena possa servir uma quantidade mais reduzida de utilizadores. O *massive MIMO* (*Multiple-Input and Multiple-Output*) permite que cada antena transmita a potências bastante baixas [23], aumentando a eficiência energética e diminuindo a potência total emitida, sendo esta última muito importante para a redução da exposição à radiação EM [24], como já foi referido.

2.4 Projetos/consórcios sobre exposição a radiação EM

Ao longo dos anos têm vindo a ser realizados vários projetos/consórcios relativamente à temática da exposição à radiação EM. Isto demonstra que realmente há alguma preocupação nesta área e que se tem tentado de alguma forma prevenir ou reduzir a exposição das pessoas à radiação EM. Este tipo de projetos tem como objetivos investigar os possíveis efeitos para a saúde da radiação EM, reduzir a exposição à radiação EM e/ou reduzir a potência transmitida nas comunicações móveis [1]. De seguida serão apresentados alguns projetos internacionais.

O *International EMF Project* é um projeto internacional estabelecido pela OMS em 1996 de forma a avaliar as evidências científicas de possíveis efeitos dos campos EM para a saúde numa faixa de frequências de 0 a 300 GHz. Este projeto tem o intuito de incentivar pesquisas que visem preencher lacunas importantes no conhecimento, assim como promover o desenvolvimento de standards aceitáveis internacionalmente para limitarem a exposição aos campos EM [25].

O projeto *Low EMF Exposure Networks (LEXNET)*, lançado por 17 entidades de topo ligadas às telecomunicações (operadores, vendedores, centros de pesquisa e instituições académicas) e apoiado pela União Europeia é um projeto de pesquisa que tem como objetivo o desenvolvimento de mecanismos suficientemente eficazes para reduzir a exposição das pessoas a campos EM em pelo menos 50%, sem comprometer a qualidade de serviço [26].

O *GreenTouch* foi um consórcio concluído em 2015, que tinha como objetivo fornecer, até 2015, a arquitetura, especificações e tecnologias necessárias para aumentar em 1000 vezes a eficiência energética da rede em relação a 2010 [27].



TECNOLOGIAS RF

Neste capítulo são descritas algumas das características de nível físico das tecnologias sem fios consideradas neste trabalho. É importante ter uma noção das particularidades destas tecnologias, nomeadamente das modulações utilizadas, de modo a fazer a ponte entre a forma como estas tecnologias se comportam e a forma como são realizadas as medições e análise espectral.

3.1 WIFI

Para realização das medições na tecnologia Wifi, foi utilizado um computador portátil com o *chipset* Realtek 8821AE 802.11ac (RTL8821AE).

3.1.1 RTL8821AE

O Realtek RTL8821AE é um chip único 802.11b/g/n/ac, suportando assim todos os métodos de transmissão e respetivas taxas de transmissão. O chip também integra *Bluetooth* [28].

De forma a suportar a taxa de dados do 802.11b e do 802.11g estão incluídos o *Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)*, *Complementary Code Keying (CCK)* e *OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)*[28].

O 802.11ac OFDM suporta débitos até 433Mbps, através da combinação das modulações BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM e 256-QAM [28].

Tabela 3.1 Potência máxima dos canais a operar nos 2.4 GHz [29]

Banda/Modo	Canal	SISO Target Power (dBm)	Frequências
802.11b	1-11	14	2.400GHz ~ 2.4835GHz 5.1500GHz ~ 5.3500GHz 5.4700GHz ~ 5.8500GHz
802.11g	1	13	
	6	14	
	11	13	
802.11n 20MHz	1	11	
	6	14	
	11	11	
802.11n 40MHz	3	11	
	6	14	
	9	11	

3.1.2 Modulações

3.1.2.1 OFDM

O OFDM é um tipo de modulação multi-portadora, em que os dados a transmitir são divididos por várias *streams* utilizando diferentes sub-portadoras [30]. Ao contrário do que acontece no FDM o OFDM não utiliza bandas guarda, poupando assim uma quantidade considerável de largura de banda. As interferências neste caso são evitadas pela ortogonalidade das sub-portadoras, isto significa que estas estão separadas igualmente umas das outras, esta separação é dada por $\Delta f = 1/TN$, em que TN é o tempo de um símbolo. Assim, quando uma sub-portadora atinge o seu pico, as outras são nulas, como é possível ver na Figura 3.1 [31].

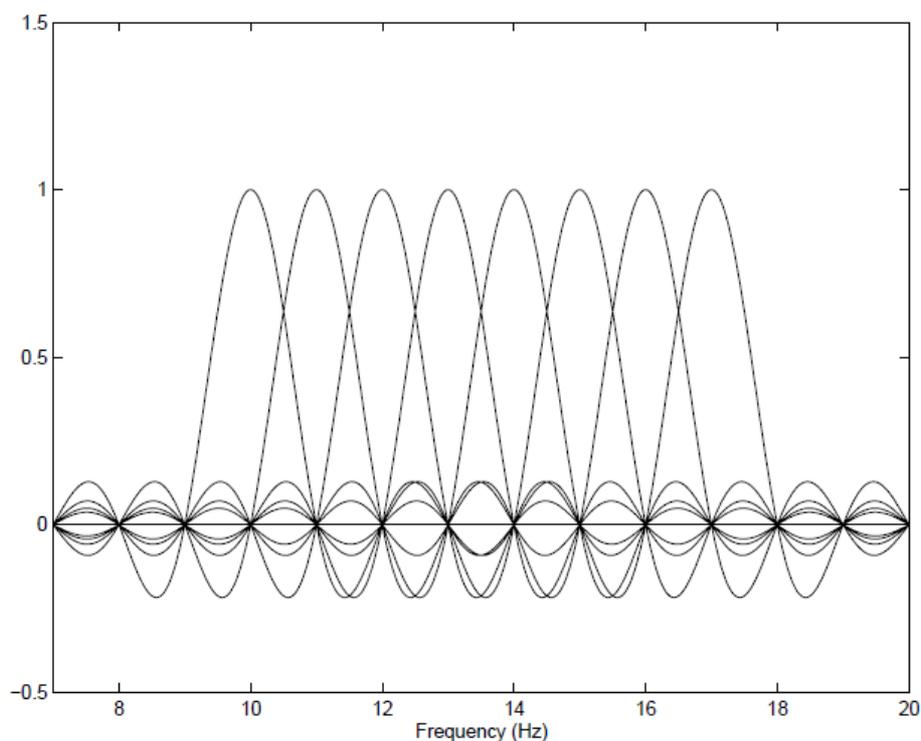


Figura 3.1 Representação de sub-portadoras OFDM [31]

3.1.2.2 M-QAM

M-QAM (*M*-ary *Q*uadrature *A*mplitude *M*odulation) é uma modulação *M*-ary, o que quer dizer que as *stream* de bits são constituídas por grupos de λ bits. Deste modo serão possíveis λ^2 padrões diferentes, o que significa $M = \lambda^2$, em que cada padrão de bits é mapeado num sinal diferente [32].

Na modulação M-QAM as mensagens são codificadas tanto quem amplitude como em fase, fazendo assim com que as constelações sejam bidimensionais, envolvendo deste modo duas funções base ortogonais [32]:

$$\phi_I(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (3.1)$$

$$\phi_Q(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (3.2)$$

Dando assim origem ao seguinte sinal resultante:

$$S_i(t) = \sqrt{E_i} \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_c t - \theta_i) \quad (3.3)$$

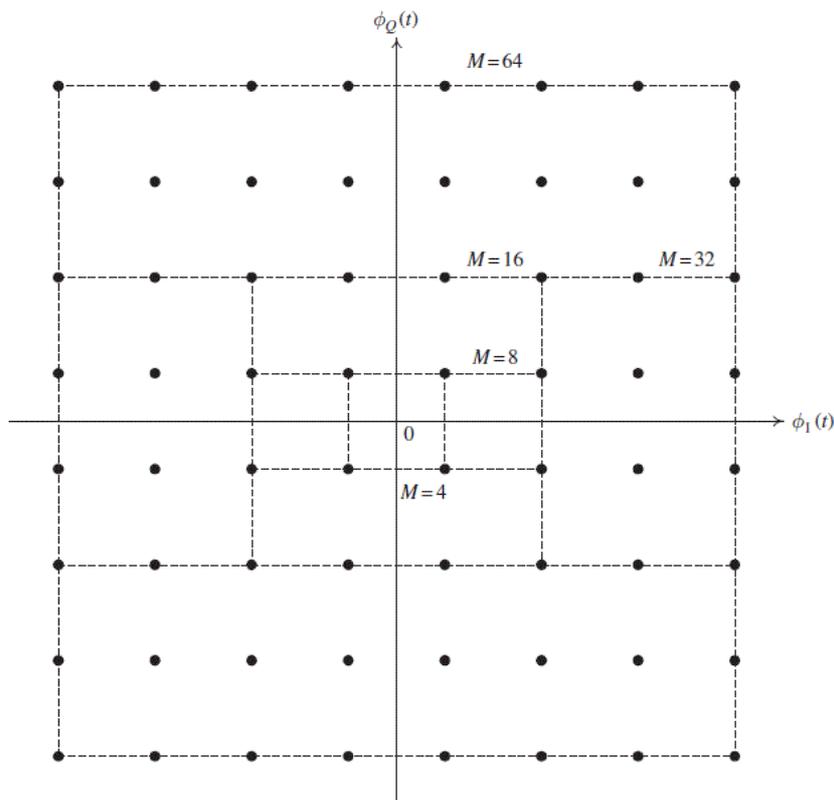


Figura 3.2 Constelação retangular M-QAM para M=4, 8, 16, 32 e 64 [32]

Na figura 3.2 pode-se ver os pontos do sinal que definem os valores das componentes do sinal que afetam a sua fase e amplitude.

3.1.2.3 BPSK

BPSK ou *binary PSK (Phase-shift keying)*, como o próprio nome indica é uma modulação binária. Um sinal BPSK é gerado através da modelação em amplitude da portadora com um sinal NRZ-L (*Non-return-to-zero*) de amplitude ± 1 . O sinal transmitido é $s(t) = m(t)c(t)$ (onde $m(t)$ é um sinal NRZ-L e $c(t) = V \cos(2\pi f_c t)$ com uma fase de 0 ou π [32]).

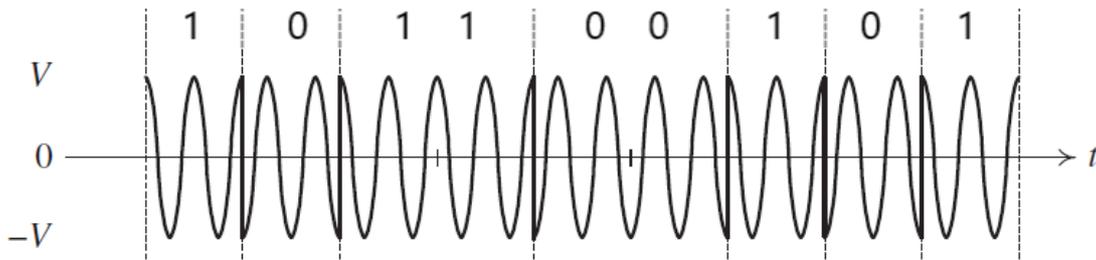


Figura 3.3 Exemplo de sinal BPSK (Adaptada de [32])

O esquema dos sinais é dado pela seguinte expressão [32]:

$$\begin{cases} S_1(t) = -V \cos(2\pi f_c t), & \text{se "0"} \\ S_2(t) = +V \cos(2\pi f_c t), & \text{se "1"} \end{cases}, \quad 0 < t \leq T_b \quad (1)$$

A energia de um sinal BPSK é dada pela seguinte expressão [32]:

$$E_{BPSK} = \frac{V^2 T_b}{2} [J] \quad (2)$$

E o PSD (*Power Spectral Density*) para um sinal BPSK é dado por [32]:

$$S_{BPSK}(f) = \frac{V^2}{4} \left[\frac{\sin^2(\pi(f - f_c)T_b)}{\pi^2(f - f_c)^2 T_b} + \frac{\sin^2(\pi(f + f_c)T_b)}{\pi^2(f + f_c)^2 T_b} \right] \quad (3)$$

3.1.2.4 QPSK

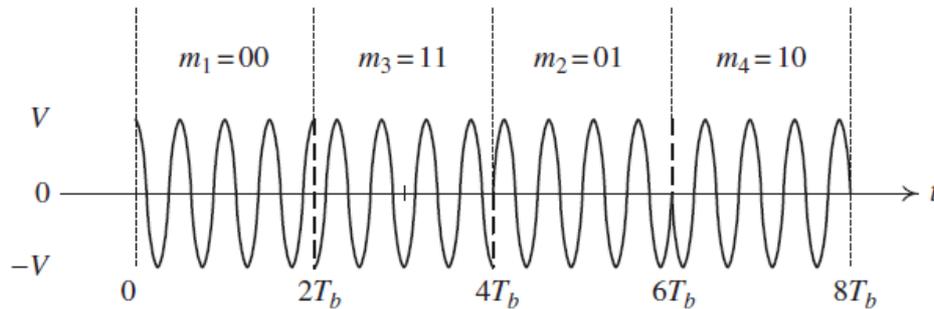


Figura 3.4 Exemplo de sinal QPSK [32]

Como $\cos(2\pi f_c t)$ e $\sin(2\pi f_c t)$ são ortogonais para o intervalo $[0, T_b]$ quando $f_c = k/T_b$, sendo k um inteiro, é possível transmitir duas mensagens diferentes na mesma banda de frequência. Para isso cada *stream* de bits é composta por dois bits e mapeada em sinais, como se pode ver na Tabela 3.2. É este o conceito por detrás do QPSK (*Quadrature Phase-shift keying*) [32]

Tabela 3.2 Sinais QPSK e mapeamento com as mensagens (Adaptada de [32])

Padrão de bit	Mensagem	Sinal transmitido
00	m_1	$s_1(t) = V \cos(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T_s = 2T_b$
01	m_2	$s_2(t) = V \sin(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T_s = 2T_b$
11	m_3	$s_3(t) = -V \cos(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T_s = 2T_b$
10	m_4	$s_4(t) = -V \sin(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T_s = 2T_b$

Como na modulação QPSK são usados dois bits por sinal, cada sinal tem uma energia associada de $E_s = V^2 T_b$ [J], correspondendo a uma média por bit de $E_b = E_s/2 = V^2 T_b/2$, o mesmo que na BPSK [32].

Na modulação QPSK, o *bit rate* pode ser duplicado sem ter de haver um aumento da largura de banda ou mesmo diminuir o desempenho relativamente aos erros. Desta forma, a QPSK demonstra vantagem relativamente à BPSK [32].

3.2 GSM

No GSM (*Global System for Mobile Communications*) estão disponíveis duas bandas de frequência diferentes, 890-915 MHz para transmissões do terminal móvel para a estação base e 935-960MHz para transmissões da estação base para o terminal móvel. Estas bandas são divididas por 124 frequências de portadora espaçadas por 200KHz. Estas portadoras são alocadas em *slots* de tempo TDMA (*Time Division Multiple Access*) e os *bursts* são as transmissões feitas nesse período. Desta forma pode-se dizer que o GSM usa uma combinação de TDMA e FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) [33].

O TDMA é utilizado tanto no *uplink* como no *downlink*, adotando uma modulação GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) [33].

Cada *slot* dura 0.577 ms e os *bursts* duram um pouco menos, 0.546 ms. Um conjunto de 8 *slots*, numerados de 0 a 7, formam uma *frame* GSM que dura 4.615 ms. Um canal físico corresponde à recorrência de um *slot* de tempo em cada *frame* GSM [33].

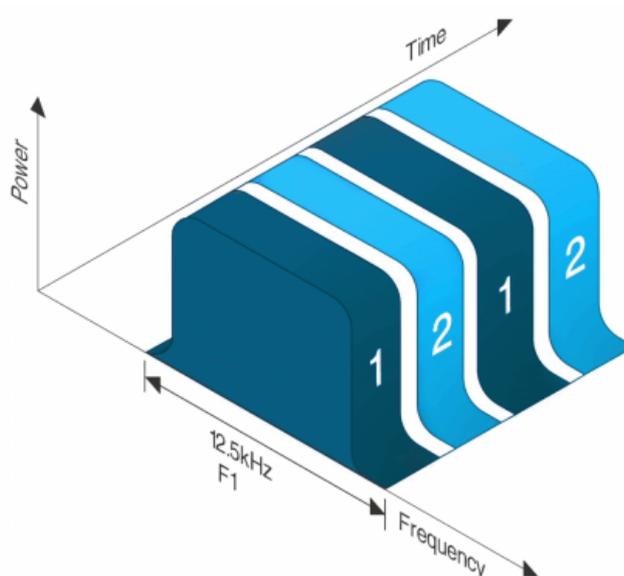


Figura 3.5 Representação gráfica do TDMA [34]

3.2.1 GMSK

O GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) é baseado no MSK (*Minimum Shift Keying*) sendo também um esquema de fase contínua. Basicamente no GMSK o sinal binário original é passado por um filtro Gaussiano antes de ser modulado pelo MSK. Esta filtragem faz com que a densidade espectral caía mais rapidamente (Figura 3.6), evitando assim interferências em sinais com frequências adjacentes [35].

Esta modulação codifica um bit por símbolo, com 148 símbolos por *slot* [36].

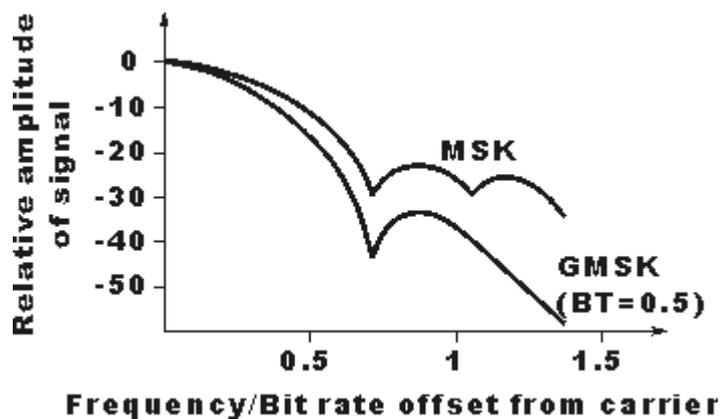


Figura 3.6 Densidade espectral de um sinal MSK e GMSK [37]

3.3 DECT

Na Europa o DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*) utiliza as bandas de frequências de 1880MHz até 1980MHz e de 2010MHz até 2025MHz, sendo que a banda mais utilizada é a de 1880MHz até 1900MHz [38].

De forma a aceder ao meio esta tecnologia utiliza TDMA. Cada trama DECT é composta por 24 *slots*, com 480 símbolos por *slot* e cada trama dura 10 ms [38].

A potência transmitida pode ser classificada de duas formas: (1) a potência transmitida, que é a potência média entregue sobre um ciclo de frequência, ou (2) a potência transmitida normal (NTP), que se trata de uma média da potência transmitida desde o início de um pacote físico até ao fim desse mesmo pacote [38].

O DECT utiliza a modulação *Gaussian frequency shift keying* (GFSK). O GFSK é um método de modulação digital usado não só no DECT, mas também noutras tecnologias sem-fios, como é o caso do *Bluetooth*. O GFSK utiliza apenas o 0 e o 1 como símbolos. À semelhança do que acontece no PSK a informação é codificada através da alteração da frequência da portadora, em que a frequência diminui na duração do símbolo 0 e para representar o símbolo 1 a frequência aumenta. O sinal é passado por um filtro Gaussiano antes de ser modulado, tornando assim mais suave o formato dos pulsos, evitando as altas frequências causadas pelo *switching* [39].



EQUIPAMENTO E METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

No presente capítulo serão abordadas as metodologias e equipamentos utilizados para a realização das medições. É feita uma descrição do funcionamento do equipamento utilizado para fazer as medições de potência nas diferentes bandas RF, que neste caso foi um analisador espectral. Serão também descritas as configurações dos cenários considerados nas medições para as tecnologias consideradas neste trabalho, assim como a forma como foram extraídos os resultados das medições.

4.1 Considerações Gerais

Como será apresentado mais à frente neste trabalho, as medições foram realizadas para diferentes configurações dos cenários de medição. Foram efetuadas medições para diferentes distâncias entre o dispositivo a ser testado e a antena do analisador espectral e para diferentes polarizações. Foram recolhidos dados para quatro polarizações diferentes, 0° , 90° , 180° e 270° , sendo que estes ângulos correspondem aos ângulos de rotação do dispositivo sobre o seu eixo vertical, como se pode ver na Figura 4.1. Deste modo, uma rotação de 0° é quando a parte frontal do dispositivo está direcionada para a antena do analisador, 90° quando o lado direito está direcionado com a antena, 180° quando a parte de trás está direcionada com a antena e 270° quando o lado esquerdo está direcionado para a antena.

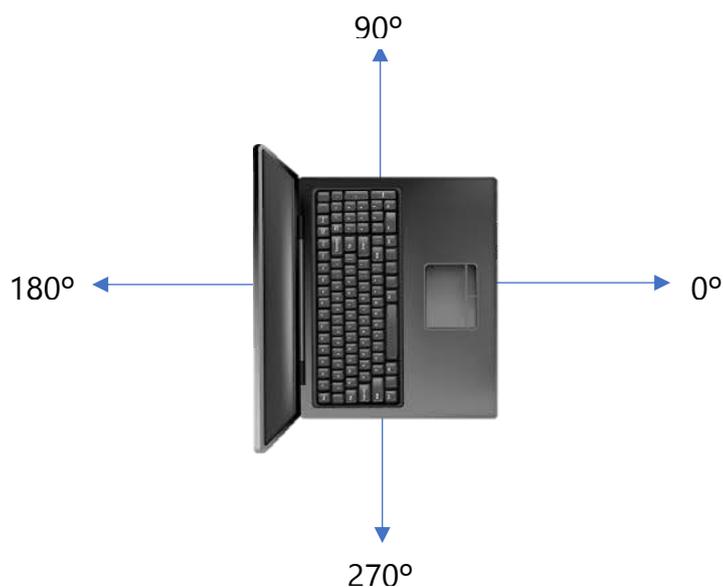


Figura 4.1 Representação gráfica dos ângulos de rotação dos dispositivos testados

A antena mantém-se assim sempre direcionada aos 0° e apenas os dispositivos a serem testados rodam sobre si, de 90° em 90° .

De forma a reduzir as reflexões das ondas radiadas pelos dispositivos, foi utilizado um conjunto de painéis absorventes de radiação incidente, como se pode ver na Figura A 3. A câmara utilizada apenas impede as reflexões laterais, pelo que, as reflexões no teto e na mesa na qual a antena de medição e os dispositivos sobre teste estão apoiados, poderão ter algum efeito sobre as medições, mesmo que pouco significativo, pelo facto da antena utilizada ser direcional.

O aparelho de medição utilizado foi um analisador espectral, descrito na secção 4.2.

4.2 Analisador Espectral

O analisador espectral utilizado neste trabalho foi o Spectran HF 6065 da Aaronia (Figura A 4), o qual opera na banda de frequências de 10MHz até 6GHz, com um tempo de amostra mínimo de 1ms e com uma precisão de aproximadamente $\pm 2\text{dBm}$. Para apoio na visualização e recolha dos resultados foi utilizado o software MCS (Figura 4.2).

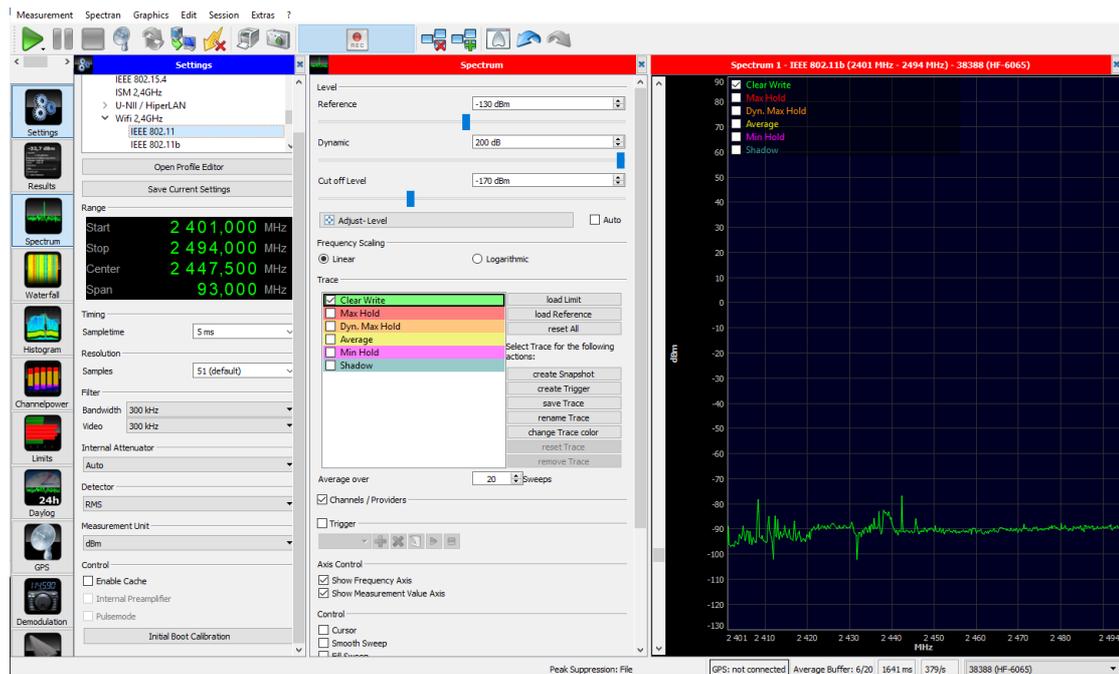


Figura 4.2 Software MCS

Este analisador é um analisador de *sweep*, o que quer dizer que utiliza um filtro passa banda, com uma determinada largura de banda (RBW), que basicamente é como se fizesse um varrimento sobre uma determinada banda de frequência. Mas, na verdade o que acontece é que, uma parte do espectro do sinal recebido é convertida para a frequência central do filtro passa-banda RBW (*Resolution Bandwidth*), também conhecida como frequência intermédia e o oscilador faz o varrimento na banda de frequência. Como detetor foi usado o RMS (*Root Mean Square*), de modo a calcular a potência média eficaz do sinal.

Com a utilização do software MCS é possível configurar o funcionamento do analisador como se pode ver na Figura 4.3.

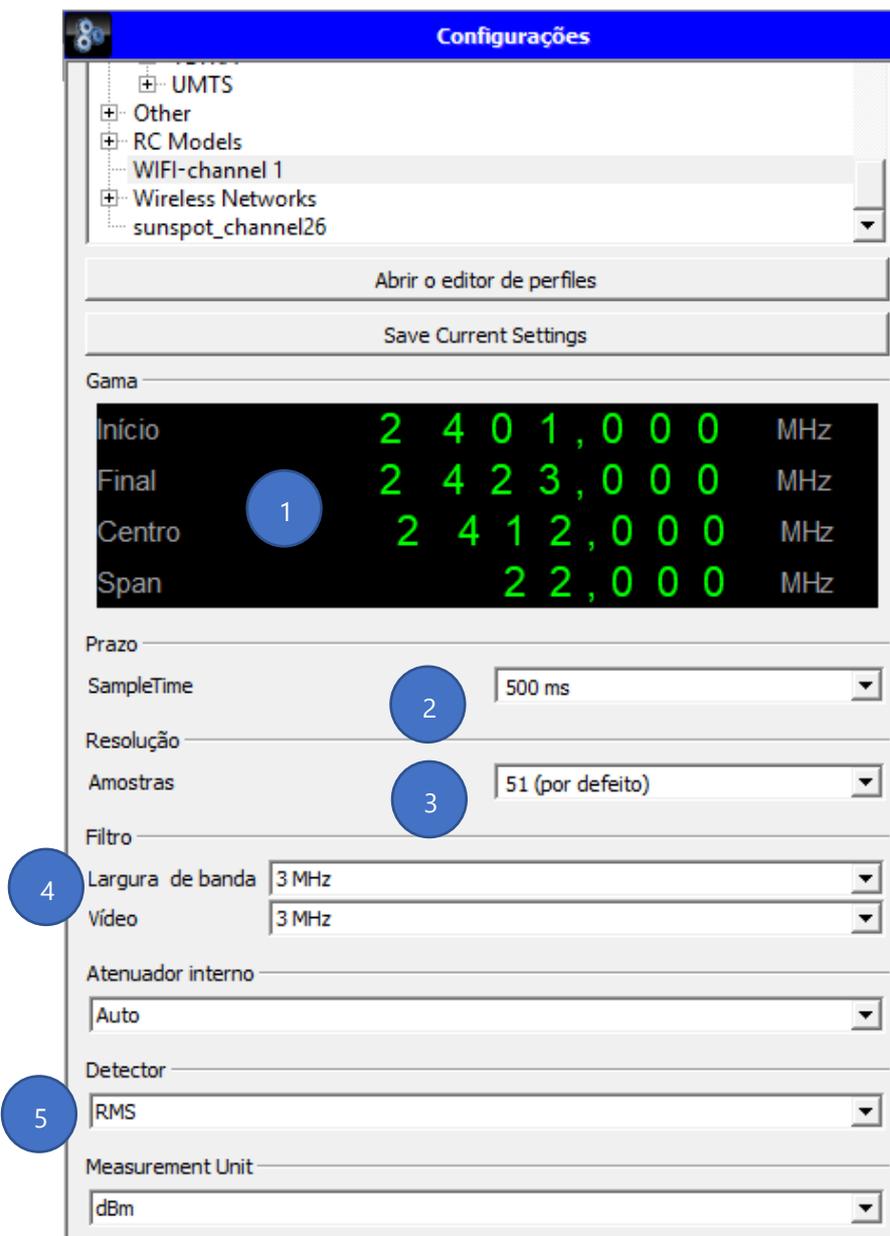


Figura 4.3 Painel de configurações do analisador espectral no software MCS

1 Aqui podemos ver a frequência inicial, final e central da banda de frequências a ser medida, assim como o “Span”, que é a largura dessa banda, que no caso da Figura 1 é o canal 1 da banda do WIFI (802.11 2.4Ghz).

2 O “SampleTime” é o tempo que cada amostra demora a ser calculada. Este valor tem influência no tempo de cada varrimento, mas não coincide com os valores gravados e exportados para o ficheiro CSV (Comma-Separated Values). Esta diferença deve-se ao facto de que a velocidade de processamento do analisador espectral não ser constante, daí o tempo de cada varrimento variar ligeiramente.

3

Aqui pode-se ver o número mínimo de amostras que irão ser calculadas na respetiva banda. Caso o valor de amostras obtido pelo dobro da divisão do Span pela largura de banda do filtro RBW (Exemplo Figura 1. $(22 \text{ MHz}/3 \text{ MHz}) * 2$) seja maior que o valor do campo das amostras, é esse valor que é aplicado e não o valor deste campo.

4

RBW: Esta é a largura de banda do filtro RBW. Esta largura de banda determina a forma como os sinais serão mostrados pelo analisador espectral. Quando menor for esta largura de banda, mas fácil será de apresentar sinais com frequências muito próximas, reduzindo também o ruído de fundo que é medido. Por outro lado, quanto mais baixo for o RBW mais lento será o varrimento.

VBW: Esta é a largura de banda de vídeo serve para atenuar as oscilações da linha mostrada.

5

O tipo de detetor usado para calcular a amplitude do sinal para cada amostra, sendo que o tipo por defeito é o RMS.

Os dados das medições são exportados para um ficheiro CSV em tempo real, e são representados no formato apresentado na Tabela 4.1, onde se tem a potência medida para cada frequência em vários instantes. O tempo entre os *Timestamp* é o tempo de cada varrimento. As frequências apresentadas são as frequências centrais obtidas pelo varrimento da banda com o filtro RBW. Estas frequências encontram-se espaçadas $RBW/2$.

Tabela 4.1 Exemplo de como os dados são exportados

Timestamp	Unidade de medida	2401000000 Hz	2401440000 Hz	2401880000 Hz	2402320000 Hz	...
21:12:39.022	dBm	-87.871	-88.516	-88.343	-87.700	...
21:12:39.115	dBm	-88.604	-86.736	-88.550	-86.160	...
21:12:39.225	dBm	-87.364	-87.439	-87.937	-87.571	...
21:12:39.334	dBm	-87.664	-88.968	-87.495	-88.348	...
21:12:39.444	dBm	-87.823	-87.232	-87.481	-88.170	...
21:12:39.569	dBm	-87.435	-87.734	-87.751	-87.726	...
21:12:39.670	dBm	-87.125	-88.091	-88.466	-88.975	...
21:12:39.780	dBm	-88.582	-87.267	-88.843	-87.499	...
21:12:39.873	dBm	-86.680	-88.457	-87.891	-88.648	...
21:12:39.998	dBm	-87.290	-90.095	-87.996	-88.614	...
21:12:40.108	dBm	-87.181	-89.115	-88.145	-87.874	...
21:12:40.217	dBm	-86.716	-87.490	-88.282	-87.524	...
21:12:40.326	dBm	-87.489	-87.857	-88.150	-88.191	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

No caso do GSM e do DECT o formato dos dados exportados para o CSV é diferente, visto que para estas tecnologias é utilizado *span 0*, para que seja possível medir os *bursts* de transmissão para uma determinada frequência. Assim, a tabela exportada terá apenas uma frequência.

A este analisador espectral foi acoplada uma antena direcional HyperLOG 7060 (Figura A 4), que opera na banda de frequências de 700MHz a 6GHz.



Figura 4.4 Antena HyperLOG 7060 [40]

Estas são algumas das especificações da antena utilizada nas medições:

Tabela 4.2 Especificações da antena HyperLOG 7060 [40]

Potência de transmissão máxima	100 W CW (400MHz)
Impedância nominal	50 Ohm
VSWR (typ.)	<1-2
Ganho (typ.)	5dBi
Fator de antena	26-41dB/m
Pontos de calibração	533 (10MHz steps)
Dimensões (L/W/D)	(340x200x25) mm

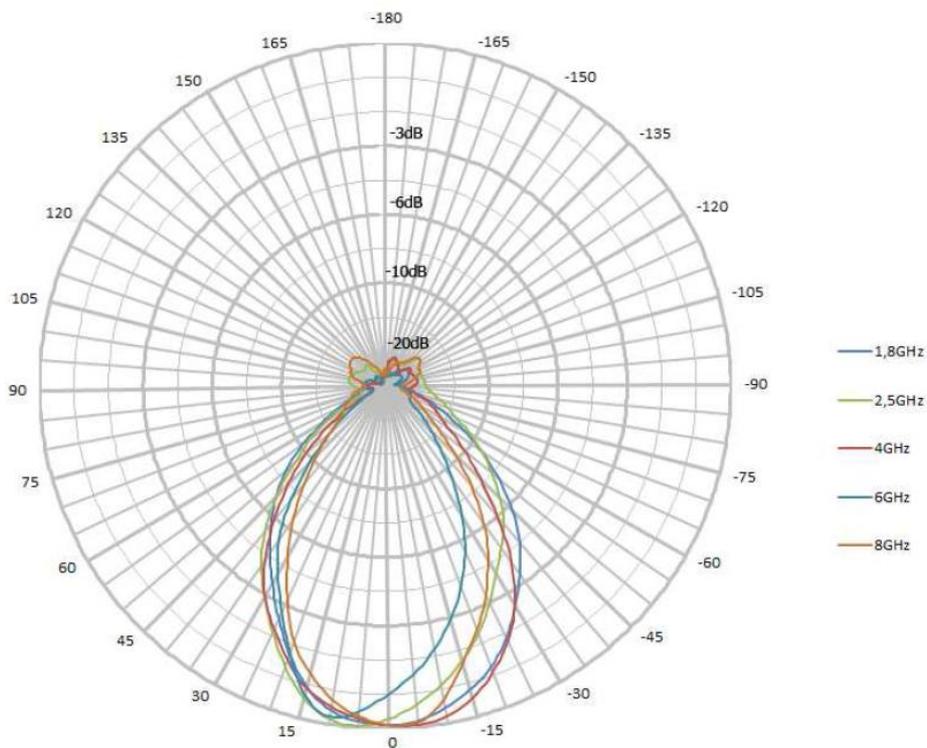


Figura 4.5 Padrão horizontal da antena HyperLOG 7060 [40]

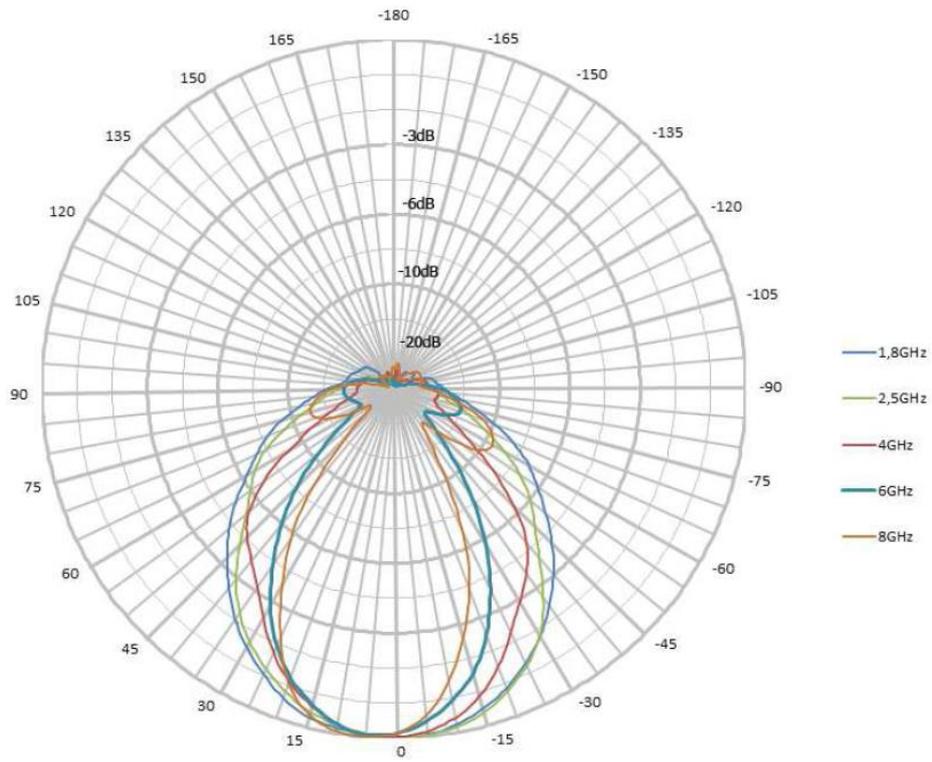


Figura 4.6 Padrão vertical da antena HyperLOG 7060 [40]

4.3 WIFI

4.3.1 Materiais e Configuração do cenário de medição

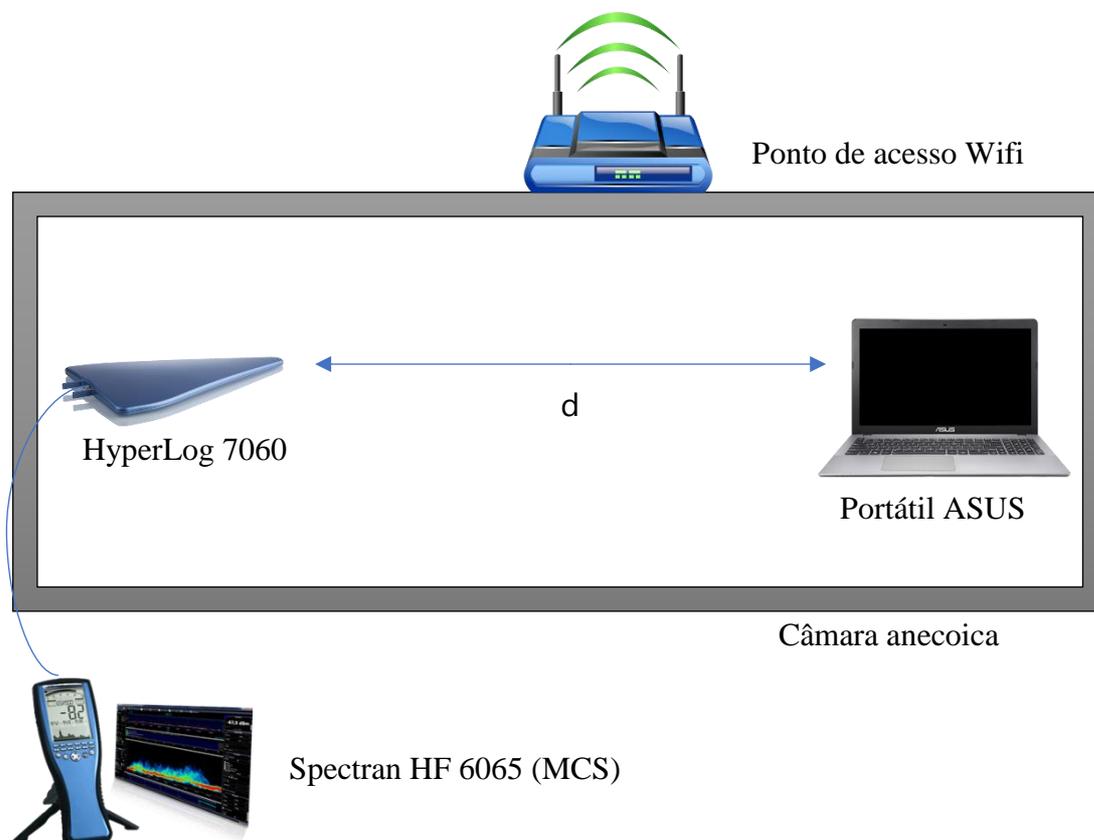


Figura 4.7 Esquema da configuração do cenário de medição para o Wifi

Para as medições realizadas na tecnologia WIFI foi usado como emissor um computador portátil ASUS 550J. Este computador possui uma placa de rede Realtek 8821AE 802.11ac. Em todas as medições foi utilizada uma câmara anecoica (Figura A 3).

A configuração do cenário de medição utilizado é esquematizada na Figura. 4.7.

Como recetor WIFI foi usado um ponto de acesso *zaapa* WA2204B que opera com o 802.11g. O canal utilizado pelo computador e pelo AP (*Access Point*) foi o canal 1 pelo que a frequência central é 2412 MHz, utilizando assim o OFDM. Este canal tem uma banda de 20MHz, sendo que só são usados 16.25 MHz pelas sub-portadoras (Figura 4.7). Deste modo, os resultados obtidos para o WIFI foram obtidos dentro da banda dos 16.25 MHz.

Através da utilização de um programa em java, o computador foi colocado a transmitir ininterruptamente pacotes UDP (*User Datagram Protocol*) *broadcast* para o ponto de acesso WIFI, permitindo assim realizar medições na tecnologia WIFI com uma taxa de transmissão contínua.

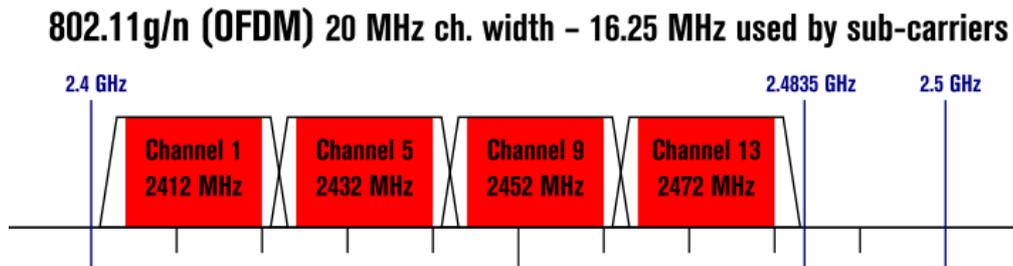


Figura 4.8 Largura dos canais 802.11g/n (OFDM)

A distância de 120 cm entre a antena do analisador espectral e o computador, não cumpre os requisitos de distância mínima do *far-field* para a tecnologia em questão, pelo que, seria necessário, assim como indica o CTIA (*Cellular Telecommunications and Internet Association*) [36], incluir uma contribuição de incerteza adicional conforme indica a Tabela 4.3. Esta incerteza foi desprezada neste trabalho, pois, como foi referido anteriormente, a frequência central de operação utilizada no Wifi (2412 MHz) situa-se entre a o intervalo com incerteza de 0.20 dB e o intervalo onde não existe impacto na incerteza.

Tabela 4.3 Incertezas adicionais de medição para dispositivos de grandes dimensões [36]

Raio de frequências	Incerteza adicional
699-894 MHz	0.25 dB
1574-2360 MHz	0.20 dB
2496-2690 MHz	Sem impacto

A distância entre o computador e o AP utilizada nas medições foi de aproximadamente 3 metros.

4.3.2 Metodologia de medição

1. Para começar, foi necessário definir os parâmetros de configuração do analisador espectral adequados para realizar as medições em WIFI.

As configurações utilizadas foram as seguintes:

- RBW: 100KHz
- VBW: 3MHz
- Tempo de amostra: 200ms
- Amostras: 441
- Span: 22MHz

Estes parâmetros são definidos diretamente no software MCS, como se pode ver na Figura 4.9.

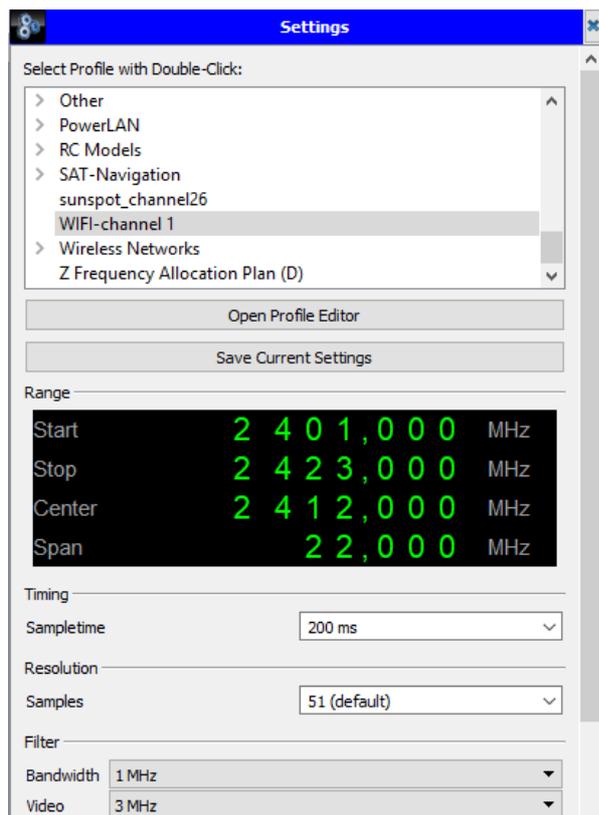


Figura 4.9 Painel de configurações para o Wifi

2. A calibração do aparelho é também ela feita através do MCS no painel de calibração, a calibração é feita automaticamente pelo software, bastando seleccionar qual a antena e cabo utilizados. Neste caso, não era necessário seleccionar a antena visto que a unidade de medida utilizada nas medições deste trabalho foi o dBm.

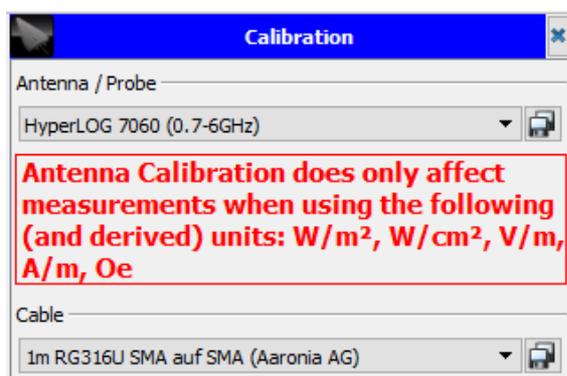


Figura 4.10 Painel de calibração (MCS)

3. O posicionamento do dispositivo emissor em relação à antena foi definido com base nas recomendações do CTIA. Assim sendo foi definido um ponto imaginário no centro dos eixos z-x e z-y, sendo que nas medições a antena se encontrava aproximadamente alinhada com este ponto.

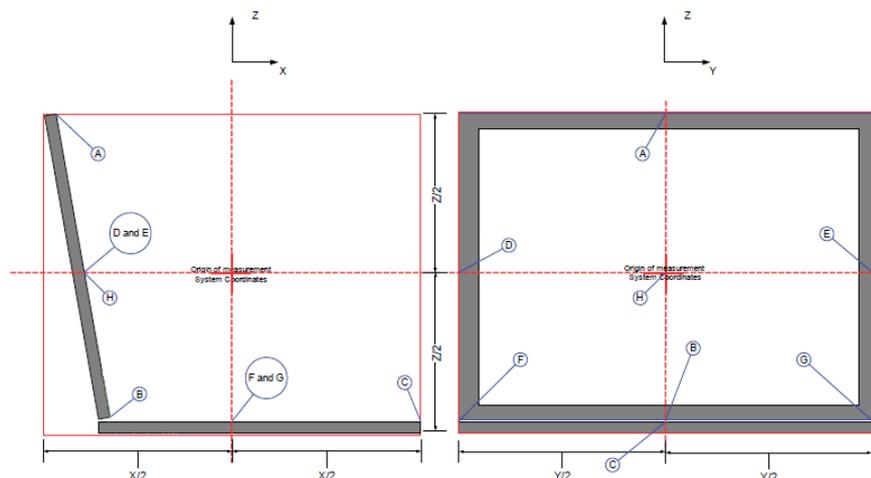


Figura 4.11 Ponto imaginário a) vista lateral b) vista frontal (Adaptada de [36])

4. As medições foram realizadas durante aproximadamente 6 minutos com diferentes distâncias entre o emissor e a antena de medição (120 cm, 170cm e 220cm) e com diferentes polarizações (0° , 90° , 180° e 270°). À medida que a medição era realizada os dados eram escritos para um ficheiro CSV. No final das medições obteve-se uma matriz de dimensão $N \times 441$. Obtiveram-se 441 amostras de frequência, mas apenas 325 foram usadas, que são as que se encontram na banda dos 16,25MHz para a frequência central de 2412MHz. Não são o número de medições feitas no tempo de medição, correspondendo ao número de *sweeps*, este valor varia consoante o tempo de cada medição. De forma a que as medições fiquem todas com o mesmo número de amostras, este valor foi fixado em 237 para todas as medições, ficando-se assim com uma matriz 237×325 em que nas colunas temos as frequências da banda e nas linhas os *sweeps*. Mas como para cada distância foram realizadas 6 medições, a amostra foi ampliada para 1422 (237×6) e no caso das polarizações a amostra aumentou para 711, pois foram feitas 3 medições para cada polarização. Na Tabela 4.4 encontra-se esquematizado todo o processo de cálculo da potência média para o WIFI, em que $n=325$ e $m=1442$ para as distâncias e $m=711$ para as polarizações.

Tabela 4.4 Esquematização do processo de calculo das médias para o Wifi

	f1	f2	f3	...	fn
s1	X11	X12	X13	...	X1n
s2	X21	X22	X23	...	X2n
s3	X31	X32	X33	...	X3n
s4	X41	X42	X43	...	X4n
...
sm	Xm1	Xm2	Xm3	...	Xmn

$$\mu_1 = \frac{1}{m} \sum_1^m X_{m1}$$

$$\mu_2 = \frac{1}{m} \sum_1^m X_{m2}$$

$$\mu_3 = \frac{1}{m} \sum_1^m X_{m3}$$

$$\dots$$

$$\mu_n = \frac{1}{m} \sum_1^m X_{mn}$$

$$\mu_{final} = \frac{1}{n} \sum_1^n \mu_n$$

4.4 GSM

4.4.1 Materiais e configuração do cenário de medição

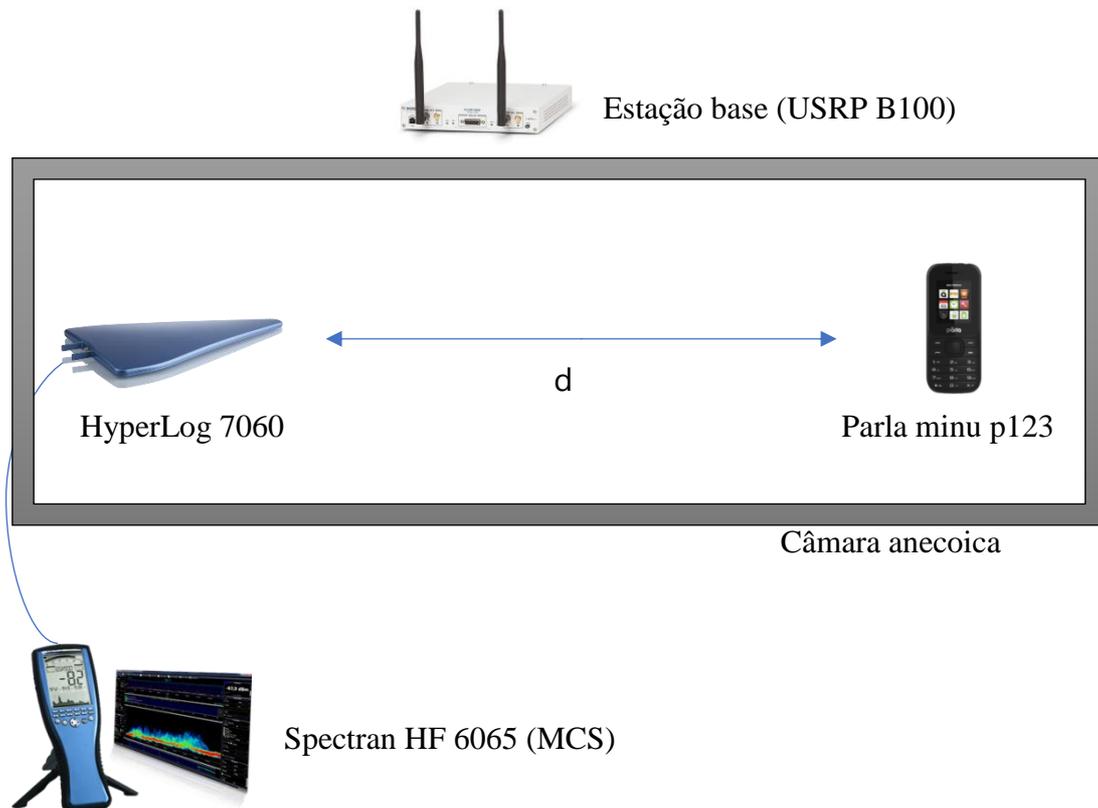


Figura 4.12 Esquema da configuração do cenário de medição para o GSM

Nas medições da tecnologia GSM foi utilizado como emissor um terminal móvel Parla minu p123 (Figura A 2) e como recetor uma estação base USRP B100 (Figura A 5).

Com a utilização do programa OpenBTS criaram-se canais para comunicação com o terminal móvel. Através da utilização do código de teste 2602, foi possível colocar o terminal móvel a receber um tom contínuo a partir da estação base. As medições foram realizadas para cinco canais *uplink* (ARFCN 190/200/215/230/250), uma vez que as medições foram feitas ao terminal móvel.

Assim como nas medições do WIFI, o terminal móvel encontrava-se a aproximadamente 3 metros da estação base.

4.4.2 Metodologia de medição

1. Para começar foram definidos os parâmetros do analisador espectral necessários para realizar as medições no GSM.

Os parâmetros utilizados foram os seguintes:

- RBW e VBW: 300KHz
- Tempo de amostra: 1ms

- Span: 0
- Frequências: 836.6 MHz, 838.6 MHz, 841.6 MHz, 844.6 MHz, 848.6 MHz

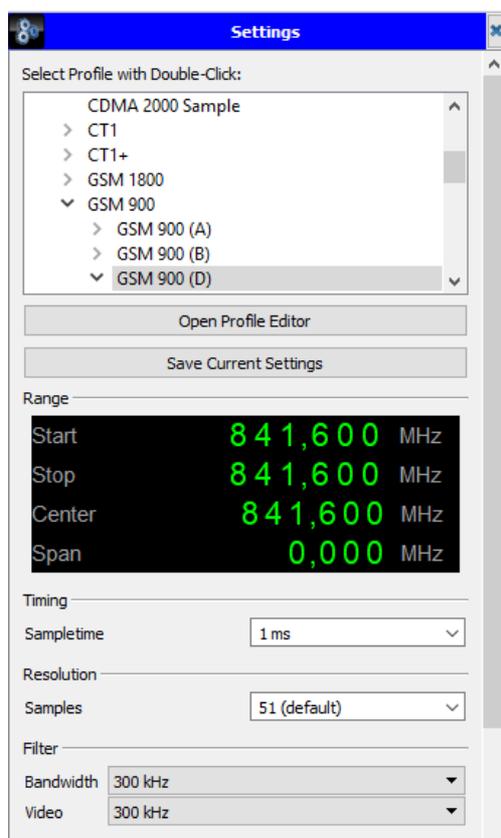


Figura 4.13 Painel de configurações para o GSM

Estes parâmetros permitem calcular e visualizar os *bursts* que são transmitidos do terminal móvel para a estação base;

2. A calibração foi a mesma do WIFI (ver 4.2.2, ponto 2);
3. O posicionamento foi definido de modo a que a antena de medição ficasse aproximadamente alinhada com o ponto de cruzamento entre o eixo horizontal e vertical do terminal móvel (Figura 2.6), eixos este que são definidos pelo CTIA e pelo IEEE nas normalizações de medição do SAR;
4. Ao contrário do que acontece no WIFI, em que as medições são feitas na banda do canal (16.25MHz) através de varrimentos nessa mesma banda (*sweeps*), no GSM o analisador é fixado (*span 0*) à frequência do canal GSM que está a ser utilizado entre o terminal móvel e a estação base. Deste modo, o analisador mede a potência nessa frequência a cada 1 ms, aproximadamente.

Assim como no WIFI, as medições foram realizadas para diferentes distâncias entre o emissor e a antena de medição (120cm, 155cm, 191cm) e diferentes polarizações (0°, 90°, 180° e 270°) e para cada um dos casos foram realizadas medições para as frequências 836.6 MHz, 838.6 MHz, 841.6 MHz, 844.6 MHz, 848.6 MHz.

4.5 DECT

4.5.1 Materiais e configuração do cenário de medição

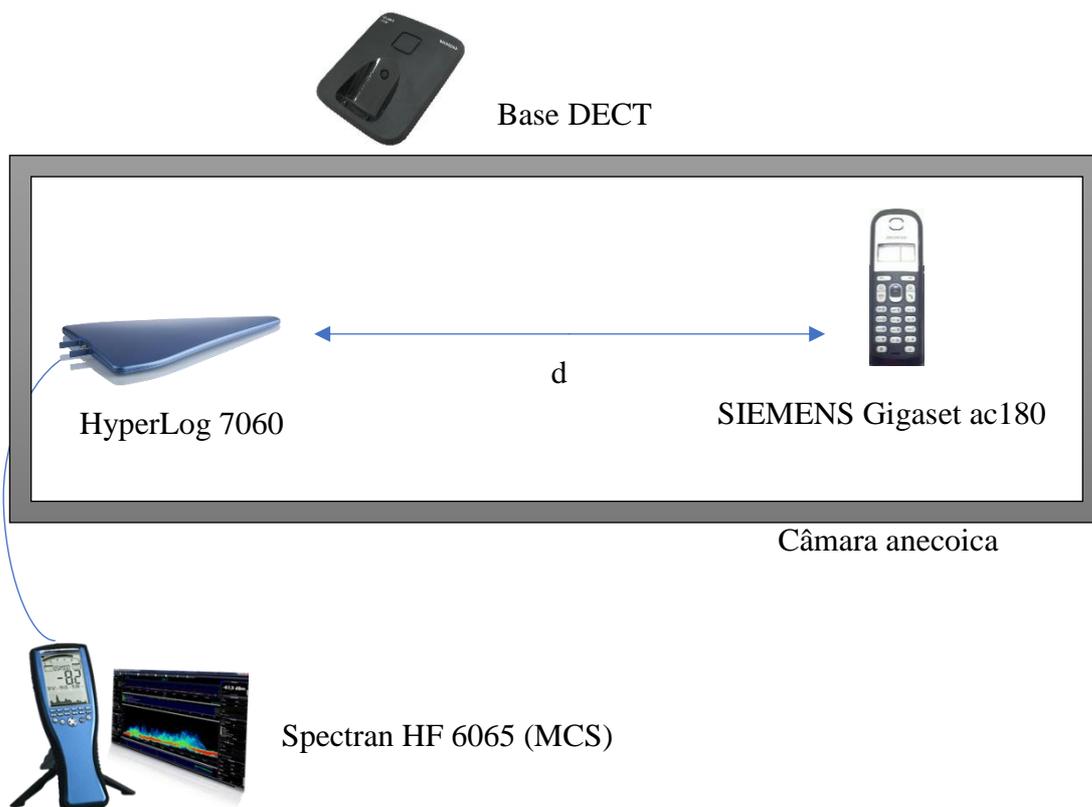


Figura 4.14 Esquema de configuração do cenário de medição para o DECT

Para as medições na tecnologia DECT foi utilizado o telefone SIEMENS Gigaset ac180 (Figura A 1). O terminal foi colocado a comunicar com a base através de uma chamada de teste, em que o terminal pinga a base repetidamente, permitindo assim as medições.

Assim como aconteceu nos cenários anteriores (WIFI e GSM), o terminal móvel foi colocado a uma distância da base de aproximadamente 3 metros.

4.5.2 Metodologia de medição

1. Foram definidos os parâmetros de operação do analisador espectral, tendo em conta as suas configurações por defeito para realização de medições em 0 *Span*, isto é, de forma a possibilitar a medição de *bursts* de uma determinado canal.

Os parâmetros definidos foram os seguintes:

- RBW: 3 MHz
- VBW: full
- Span: 0
- *Sample time*: 10 ms

- Frequências: 1882 MHz, 1885 MHz, 1889 MHz, 1890 MHz, 1892 MHz, 1894 MHz, 1896 MHz.

As frequências apresentadas acima são frequências correspondentes a alguns dos 10 canais do DECT, estes canais foram escolhidos pelo terminal.

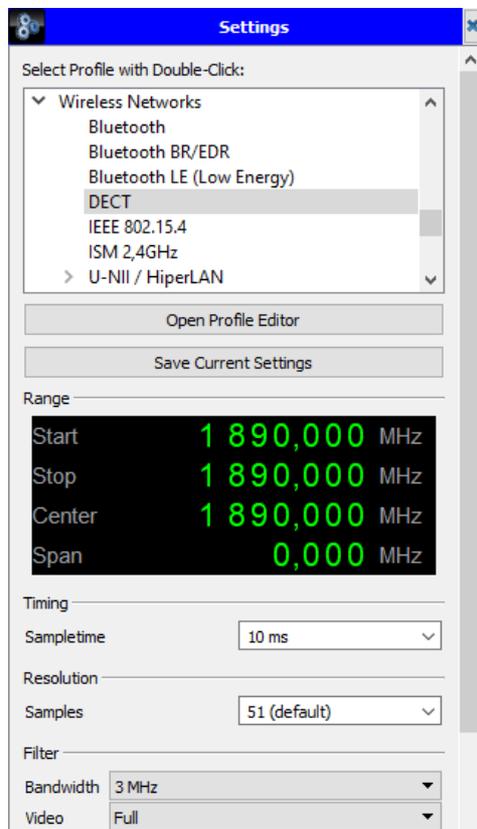


Figura 4.15 Painel de configurações para o DECT

2. Mesma calibração dos cenários anteriores (ver 4.2.2, ponto 2);
3. O posicionamento do terminal móvel em relação à antena do analisador espectral foi estabelecido considerando os mesmos eixos que foram considerados para o GSM (Figura 2.6), assim a antena do analisador foi colocada em linha com o ponto de cruzamento dos eixos vertical e horizontal do terminal móvel.
4. Tal como no GSM, no DECT as medições foram realizadas em *span 0*, ou seja, os varrimentos foram realizados no domínio do tempo para as frequências acima indicadas. Esta configuração permitiu recolher os *bursts* de transmissão e assim fazer uma média da potência do canal em questão. As medições para cada frequência realizaram-se num período suficiente de modo a atingir 40000 amostras.

Utilizaram-se, nestas medições, distâncias de 120 cm, 170 cm e 220 cm entre o emissor e antena do analisador e polarizações de 0°, 90°, 180° e 270°



AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Neste capítulo são apresentados todos os resultados obtidos nas medições, tais como os gráficos da análise espectral realizada pelo analisador espectral, as tabelas com os resultados relativos aos vários cenários considerados e análise estatística, onde são calculados alguns parâmetros, tais como desvio padrão, variância e incerteza com grau de incerteza de 95% na distribuição normal *t-student*. Por fim é realizada a discussão dos resultados obtidos, nomeadamente as comparações das potências calculadas nas diferentes configurações dos cenários de medição, assim como a comparação da potência medida no Wifi, no DECT e no GSM.

5.1 Resultados

5.1.1 WIFI

5.1.1.1 Distância vs Potência (0°)

Nos gráficos da análise espectral estão apresentadas as amostras calculadas pelo analisador espectral, como se poder ver nas Figuras 5.1, 5.3, 5.5, 5.7, 5.9, 5.11 e 5.13. Estas amostras são ligadas entre si, apresentando assim uma linha continua. Como já foi indicado anteriormente, a banda presente nesses gráficos é uma banda de 22 MHz, onde está inserida a banda que pertence ao canal 1 do WIFI. É importante perceber que as imagens do espectro que são mostradas abaixo foram recolhidas após 6 minutos de medição. Nos gráficos espectrais são apresentadas três linhas distintas, em que a vermelha corresponde aos valores mais altos (picos) calculados em cada varrimento durante toda a medição, a amarela corresponde à média dos valores calculados em todos os varrimentos na duração da medição e a lilás aos valores mais baixos dessas mesmas medições feitas a cada varrimento.

Recorde-se que a banda considerada relevante neste trabalho foi de 16,25 MHz, pois é a banda utilizada pelas sub-portadoras no OFDM. É possível ainda, pela análise do espectro, ver as bandas guarda na extremidade dessa banda, onde a potência decai abruptamente.

De modo a fazer uma análise estatística aos dados recolhidos foi usada a função de densidade de probabilidade baseada na distribuição normal. Os gráficos estatísticos apresentados foram gerados pela função *dfittool* do Matlab.

- **120 cm**

Para a distância de 120 cm entre o portátil e a antena do analisador espectral obtiveram-se, como se pode ver na Figura B 1, valores de pico entre os -45 dBm e os -50 dBm, maioritariamente. Os valores médios encontram-se um pouco mais abaixo, por volta dos -70 dBm. Os valores mais baixos calculados durante a medição encontram-se na ordem dos -105 dBm.

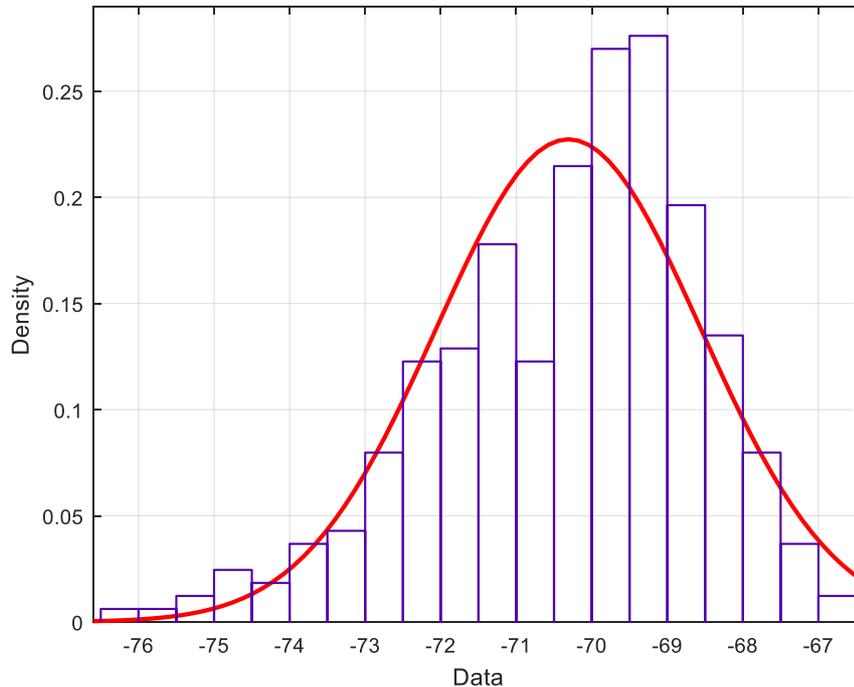


Figura 5.1 Densidade de probabilidade e curva de distribuição normal ($d = 120$ cm)

Tabela 5.1 Média final e dados estatísticos - Wifi ($d = 120$ cm)

n	325
\bar{X}	-70.3089 dBm
$var(X)$	3.0795
σ	1.75485
$IC_{\mu,95\%} = \left[\bar{X} \pm 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$	$-70.3089 \pm 0.1905 \text{ dBm}$

Como se pode ver no gráfico de densidade de probabilidade da Figura 5.1, os valores mais prováveis são os que se encontram entre -69,5 dBm e -69 dBm. O valor médio calculado foi de -70.3089 dBm, com uma incerteza de ± 0.1905 dBm, para um grau de incerteza de 95%.

- **170 cm**

Através da análise das curvas do espectro apresentado na Figura B 2, pode-se verificar que os valores máximos se encontram essencialmente entre os -55 dBm e os -50 dBm. Os valores médios apresentam uma variação acentuada ao longo da banda dos 16,25 MHz, que se pode observar através do formato curvo da linha amarela nessa banda, o que não acontece para os 120 cm. Esta variação vai-se refletir num aumento da variância e conseqüente aumento da incerteza. Os valores mínimos encontram-se maioritariamente entre os -100 dBm e os -105 dBm.

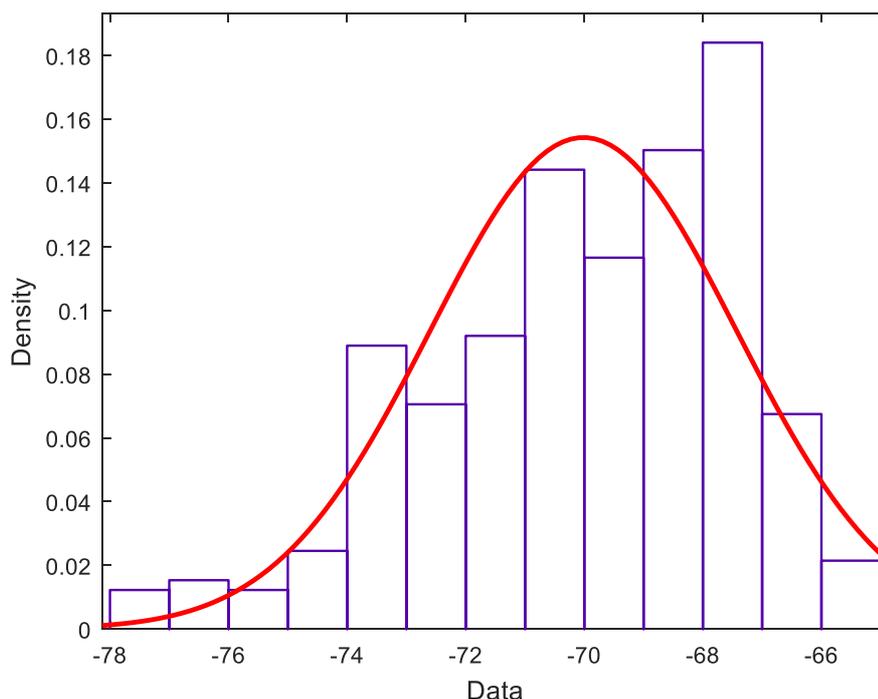


Figura 5.2 Densidade de probabilidade e curva de distribuição normal (d = 170 cm)

Tabela 5.2 Média final e dados estatísticos – Wifi (d = 170 cm)

n	325
\bar{X}	-70.015 dBm
$var(X)$	6.68659
σ	2.58584
$IC_{\mu,95\%} = \left[\bar{X} \pm 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$	$-70.015 \pm 0.2807 dBm$

Como era de esperar, pela observação do gráfico espectral da Figura 5.2, a variância foi superior à anterior, com um valor de 6.68659 e uma média de potência de -70.017 dBm com uma incerteza de 0.2807 dBm.

- **220 cm**

Como se pode ver na Figura B 3 as curvas do espectro para os 220 cm são bastante idênticas às que foram obtidas para os 170 cm. É, também, possível observar o decaimento de potência nas extremidades da banda. Observando o espectro, pode-se dizer que os valores de pico andam em média por volta dos -55 dBm, enquanto que os valores médios se situam entre os -65 dBm e os -75 dBm, os valores mínimos estão na ordem dos -105 dBm, aproximadamente.

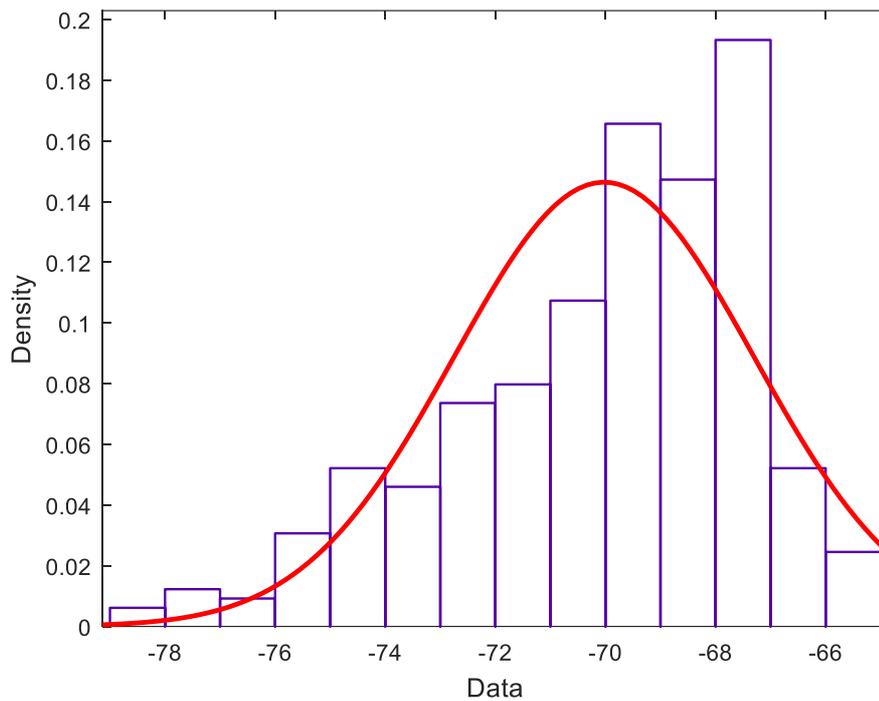


Figura 5.3 Densidade de probabilidade e curva de distribuição normal (d = 220 cm)

Tabela 5.3 Média final e dados estatísticos - Wifi (d = 220 cm)

n	325
\bar{X}	-70.0255 dBm
$var(X)$	7.4274
σ	2.72532
$IC_{\mu,95\%} = \left[\bar{X} \pm 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$	-70.0255 \pm 0.2958 dBm

Como seria de esperar pela elevada discrepância dos valores das amostras na curva dos valores médios, a variância é bastante elevada, com um valor de 7.4274. O valor médio final calculado foi de -70.0255 dBm com uma incerteza de 0.2958 dBm.

5.1.1.2 Polarização vs Potência (170cm)

- 0°

Para uma rotação de 0°, isto é, com o ecrã do telemóvel virado para a antena do analisador espectral, obtiveram-se valores de pico entre -65 dBm e -60 dBm, valores médios entre os -70 dBm e os -80 dBm e valores mínimos entre os -95 dBm e os -110 dBm, como se pode ver na Figura B 4.

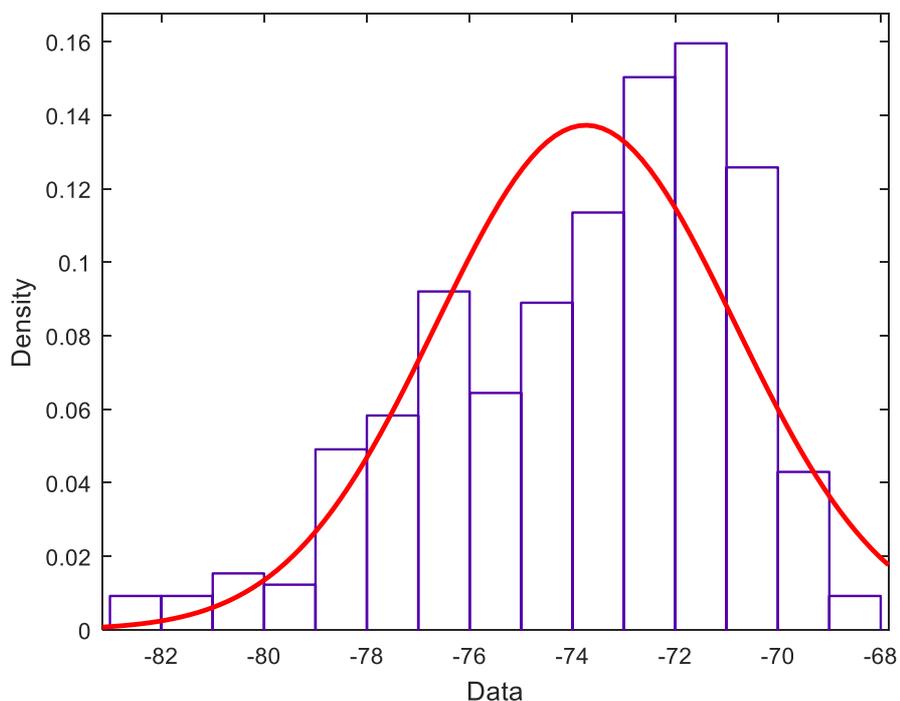


Figura 5.4 Densidade de probabilidade e curva de distribuição normal (Rotação de 0°)

Tabela 5.4 Média final e dados estatísticos - Wifi (Rotação de 0°)

n	325
\bar{X}	-73.739 dBm
$var(X)$	8.45036
σ	2.90695
$IC_{\mu,95\%} = \left[\bar{X} \pm 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$	$-73.739 \pm 0.315562 dBm$

Para esta configuração de cenário os valores mais prováveis de serem medidos são valores entre -71 dBm e -73 dBm. A média final das medições foi de -73.739 dBm e uma incerteza de 0.315562 dBm.

- 90°

Para uma rotação de 90°, isto é, com a lateral direita o terminal móvel virado para a antena, obteve-se a imagem espectral presente na Figura B 5, com valores de pico a incidirem essencialmente entre os -50 dBm e os -60 dBm, valores médios entre os -65 dBm e -80 dBm e valores mínimos entre -95 dBm e -110 dBm maioritariamente.

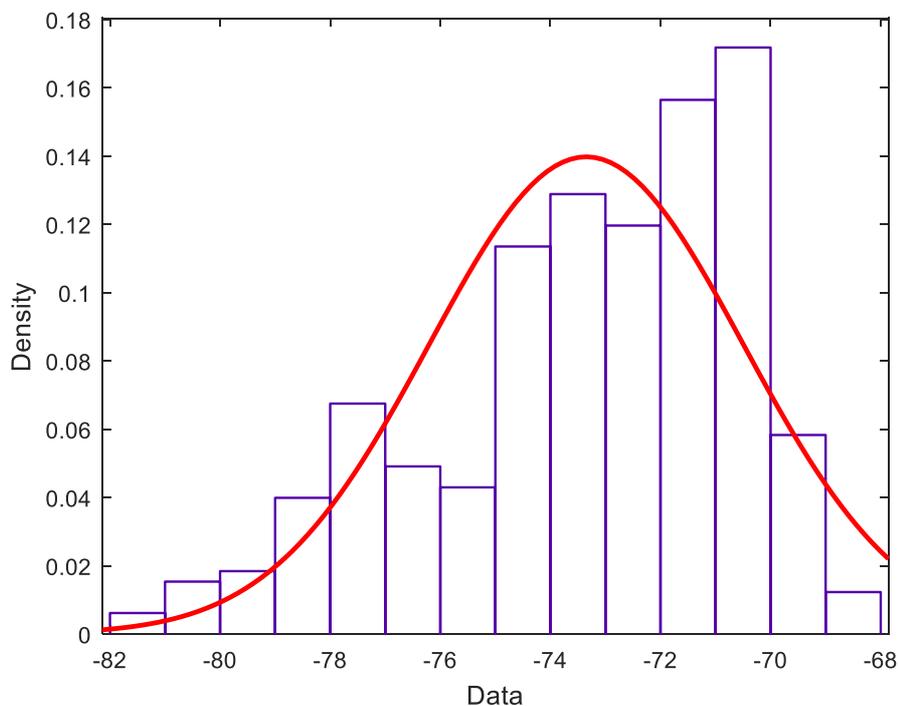


Figura 5.5 Densidade de probabilidade e curva de distribuição normal (Rotação de 90°)

Tabela 5.5 Média final e dados estatísticos - Wifi (Rotação de 90°)

n	325
\bar{X}	-73.3483 dBm
$var(X)$	8.14827
σ	2.85452
$IC_{\mu,95\%} = \left[\bar{X} \pm 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$	$-73.3483 \pm 0.309870 dBm$

Para este cenário obteve-se um valor médio final para o canal de -73.3483 dBm com uma incerteza de aproximadamente 0.31 dBm. Apesar desta média, os valores mais prováveis são valores entre -72 dBm e -70 dBm.

- 180°

Com a parte de trás do terminal móvel direcionada para a antena de medição obteve-se a imagem espectral presente na Figura B 6, em que é possível verificar que os valores mais altos medidos se encontram entre os -45 dBm e os -55 dBm, os valores médios encontram-se entre -60 dBm e -75 dBm e os valores mínimos entre -90 dBm e -110 dBm, aproximadamente. É possível verificar, observando as linhas e comparando-a com a dos outros cenários, que existe menos oscilação de potência ao longo da banda, que se refletirá na incerteza da média final.

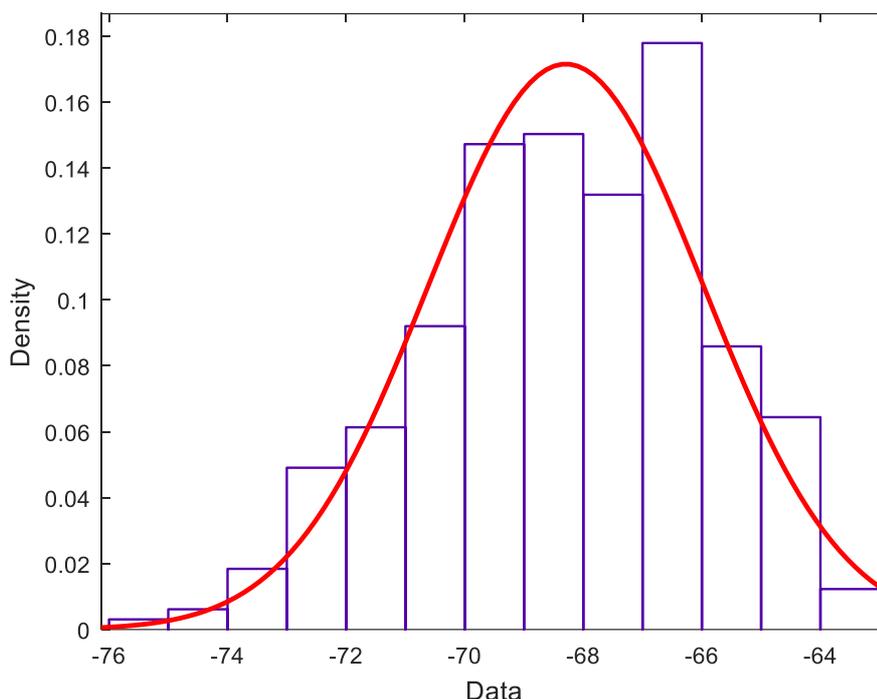


Figura 5.6 Densidade de probabilidade e curva de distribuição normal (Rotação de 180°)

Tabela 5.6 Média final e dados estatísticos - Wifi (Rotação de 180°)

n	325
\bar{X}	-68.2935 dBm
$var(X)$	5.40788
σ	2.32549
$IC_{\mu,95\%} = \left[\bar{X} \pm 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$	-68.2935 ± 0.252442dBm

Para este cenário obteve-se uma média de potência final de -68.2935 dBm com uma incerteza de 0.252442 dBm. Os valores mais prováveis estão entre os -66 dBm e -67 dBm.

- 270°

Por fim para uma rotação de 270°, que corresponde ao cenário em que a lateral esquerda do terminal móvel está direcionada para a antena de medição, como se pode ver na Figura B 7, foram obtidos valores de pico entre os -55 dBm e os -75 dBm, valores médios entre os -65 dBm e os -85 dBm e valores mínimos entre os -95 dBm e os -110 dBm, aproximadamente.

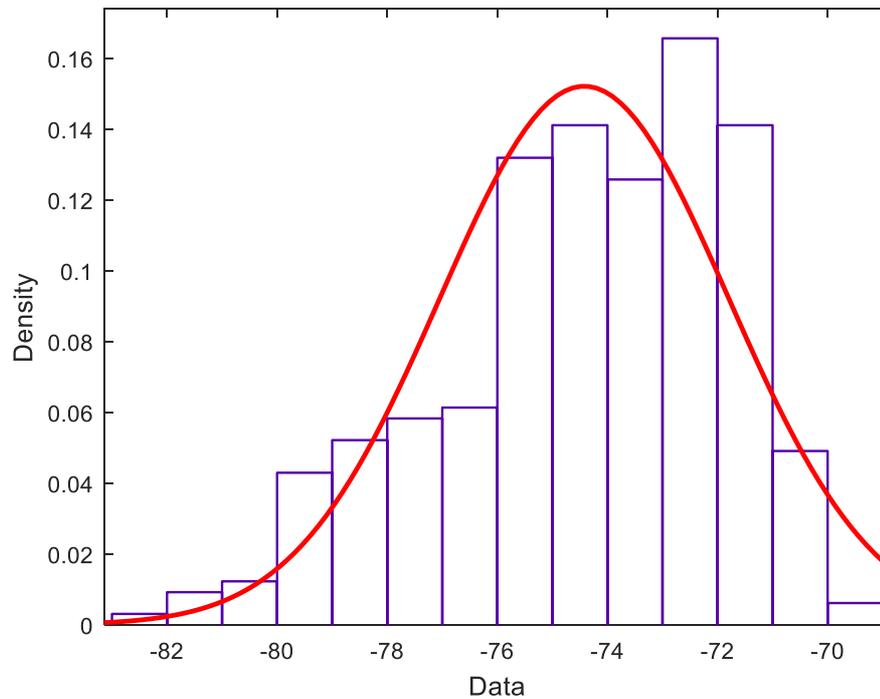


Figura 5.7 Densidade de probabilidade e curva de distribuição normal (Rotação de 270°)

Tabela 5.7 Média final e dados estatísticos - Wifi (Rotação de 270°)

n	325
\bar{X}	-74.4213 dBm
$var(X)$	6.87762
σ	2.62252
$IC_{\mu,95\%} = \left[\bar{X} \pm 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$	-74.4213 \pm 0.284686 dBm

O valor médio final de potência do canal, para este cenário de medição foi de -74.4213 dBm com uma incerteza de 0.284686 dBm. O intervalo de potência mais provável é -72 dBm a -73 dBm.

5.1.2 GSM

5.1.2.1 Distância vs Potência (0°)

Tal como foi referido no capítulo 4, de forma a medir a potência média de um canal GSM foi usado *span 0*. Desta forma a imagem espectral será no domínio do tempo, em que é possível observar os *bursts* numa determinada janela temporal, como se pode ver nas Figuras 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21.

Foram obtidas duas médias finais diferentes. Uma é a média das médias de todos os canais e a outra a média das médias dos *bursts* de cada canal. De forma a recolher os valores dos *bursts* foi usado um *threshold* de potência de -50 dBm, que fica entre o ruído de fundo e os picos dos *bursts*.

Como se poderá observar nas imagens abaixo, os *bursts* não têm todos o mesmo espaçamento entre si, isto deve-se ao facto de o tempo de amostragem utilizado, que foi o valor mínimo suportado pelo analisador espectral (1 ms), ser superior ao tempo de um burst GSM (0.546 ms), esta diferença faz com que possam ser perdidos *bursts*. O inverso também se pode verificar, isto é, é possível que sejam feitas algumas leituras de *bursts* emitidos por outros dispositivos na vizinhança que estejam a usar um *slot* na mesma trama GSM.

Inicialmente nas medições realizadas no GSM foram detetadas algumas interferências para a distância de 170 cm, que provocavam uma ligeira queda nas potências medidas. De forma a despistar a possibilidade destas interferências se deverem ao facto de as diferenças das distâncias de medição utilizadas primeiramente (120 cm, 170 cm e 220 cm) não serem múltiplas do comprimento de onda, isto é, múltiplas de 35 cm assumindo uma frequência de 850 MHz, foram escolhidas as distâncias 120 cm, 155 cm e 190 cm.

- **120 cm**

Tabela 5.8 Potência média calculada e dados estatísticos - GSM (d = 120 cm)

	Média do canal	Média dos bursts
836,6 MHz (190)	-49.2353 dBm	-15.4703 dBm
838,6 MHz (200)	-51.5090 dBm	-16.9557 dBm
841,6 MHz (215)	-47.8025 dBm	-18.1096 dBm
844,6 MHz (230)	-51.9479 dBm	-18.0878 dBm
848,6 MHz (250)	-48.4234 dBm	-19.7597 dBm
\bar{X}	-49.7836 dBm	-17.6766 dBm
$var(X)$	3.43413	2.52078
σ	1.8531	1.5877
$IC_{\mu,95\%}$	1.6244	1.3917

Os valores de potência medidos para este cenário foram de -49.7836 dBm de média de todos os canais, com uma incerteza de 1.6244 dBm e uma média de *bursts* para todos os canais de -17.6766 dBm com uma incerteza de 1.3917 dBm.

- 155 cm

Também é possível representar graficamente o espectro de um canal GSM no domínio da frequência, tal como se pode ver na Figura B 10. Na Figura B 9 estão representados a vermelho os valores mais altos calculados, a verde os valores calculados no último varrimento e a amarelo os valores médios dos valores calculados em todos os varrimentos. A maior densidade espectral, como se pode ver, situa-se na frequência central do canal, nos 838,6 MHz.

Tabela 5.9 Potência média calculada e dados estatísticos - GSM (d = 155 cm)

	Média do canal	Média dos bursts
836,6 MHz (190)	-54.2458 dBm	-21.8653 dBm
838,6 MHz (200)	-55.7776 dBm	-21.3669 dBm
841,6 MHz (215)	-53.8878 dBm	-21.1505 dBm
844,6 MHz (230)	-55.6232 dBm	-20.5952 dBm
848,6 MHz (250)	-57.9896 dBm	-23.0733 dBm
\bar{X}	-55.5048 dBm	-21.6102 dBm
$var(X)$	2.61562	0.876608
σ	1.6173	0.9363
$IC_{\mu,95\%}$	1.4176	0.8207

Nestas medições foi obtida uma média de potência de -55.5048 dBm com uma incerteza de 1.4176 dBm e uma média dos bursts de -21.6102 dBm com uma incerteza de 0.8207 dBm.

- 191 cm

Tabela 5.10 Potência média calculada e dados estatísticos - GSM (d = 191 cm)

	Média do canal	Média dos bursts
836,6 MHz (190)	-56.1736 dBm	-21.3915 dBm
838,6 MHz (200)	-57.2674 dBm	-21.9761 dBm
841,6 MHz (215)	-58.3518 dBm	-23.4393 dBm
844,6 MHz (230)	-58.6145 dBm	-23.3574 dBm
848,6 MHz (250)	-59.6383 dBm	-23.4672 dBm
\bar{X}	-58.0091 dBm	-22.7263 dBm
$var(X)$	1.76435	0.950037
σ	1.3283	0.9747
$IC_{\mu,95\%}$	1.1643	0.8544

Por fim, para uma distância de 191,4 cm foram medidos -58.0091 dBm de potência média dos canais, com uma incerteza de 1.1643 dBm e -22.7263 dBm para a média dos bursts, com uma incerteza de 0.8544 dBm.

5.1.2.2 Polarização vs Potência

- 0°

Tabela 5.11 Potência média calculada e dados estatísticos - GSM (Rotação de 0°)

	Média do canal	Média dos bursts
836,6 (190)	-58.0200 dBm	-23.2371 dBm
838,6 (200)	-60.4455 dBm	-26.8937 dBm
841,6 (215)	-58.9851 dBm	-25.6885 dBm
844,6 (230)	-60.6691 dBm	-27.9908 dBm
848,6 (250)	-58.7641 dBm	-27.4721 dBm
\bar{X}	-59.3767 dBm	-27.7328 dBm
$var(X)$	1.29549	3.58282
σ	1.1382	1.8928
$IC_{\mu,95\%}$	0.9977	1.6591

Com uma rotação de 0° obteve-se uma média final da potência dos canais de -59.3767 dBm com uma incerteza de 0.997 dBm e uma média de bursts de -27.7328 dBm com uma incerteza de 1.6591 dBm.

- 90°

Tabela 5.12 Potência média calculada e dados estatísticos - GSM (Rotação de 90°)

	Média do canal	Média dos bursts
836,6 (190)	-58.2360 dBm	-23.7696 dBm
838,6 (200)	-61.0173 dBm	-27.8457 dBm
841,6 (215)	-63.5699 dBm	-30.3794 dBm
844,6 (230)	-64.6166 dBm	-28.1774 dBm
848,6 (250)	-61.5729 dBm	-32.9929 dBm
\bar{X}	-61.8025 dBm	-28.6330 dBm
$var(X)$	6.10787	11.6347
σ	2.4714	3.4110
$IC_{\mu,95\%}$	2.1663	2.9898

Para uma rotação de 90° foram obtidos -61.8025 dBm de média dos canais com uma incerteza de 2.1663 dBm e -28.630 dBm para a média de bursts com uma incerteza de 2.9898 dBm.

- **180°**

Tabela 5.13 Potência média calculada e dados estatísticos - GSM (Rotação de 180°)

	Média do canal	Média dos bursts
836,6 (190)	-61.4640 dBm	-29.4022 dBm
838,6 (200)	-62.1727 dBm	-27.9032 dBm
841,6 (215)	-60.9858 dBm	-28.2757 dBm
844,6 (230)	-59.5579 dBm	-27.1888 dBm
848,6 (250)	-58.1472 dBm	-27.3327 dBm
\bar{X}	-60.4655 dBm	-28.0205 dBm
$var(X)$	2.59511	0.788204
σ	1.6109	0.8878
$IC_{\mu,95\%}$	1.4120	0.7782

Para uma rotação de 180° foram obtidos -60.4655 dBm de média dos canais com uma incerteza de 1.4120 dBm e -28.0205 dBm para a média de bursts com uma incerteza de 0.7782 dBm.

- **270°**

Tabela 5.14 Potência média calculada e dados estatísticos - GSM (Rotação de 270°)

	Média do canal	Média dos bursts
836,6 (190)	-58.9781 dBm	-25.2800 dBm
838,6 (200)	-61.9485 dBm	-28.2148 dBm
841,6 (215)	-58.4888 dBm	-24.9023 dBm
844,6 (230)	-61.6187 dBm	-28.3212 dBm
848,6 (250)	-57.1966 dBm	-26.5534 dBm
\bar{X}	-59.6462 dBm	-26.6544 dBm
$var(X)$	4.2445	2.5455
σ	2.0602	1.5955
$IC_{\mu,95\%}$	1.8059	1.3985

Finalmente, para uma rotação de 270° foram obtidos -59.6462 dBm de média dos canais com uma incerteza de 1.8059 dBm e -26.6544 dBm para a média de bursts com uma incerteza de 1.3985 dBm.

5.1.3 DECT

5.1.3.1 Distância vs Potência (0°)

Assim como o GSM, o DECT é uma tecnologia que utiliza pulsos de transmissão, os *bursts*. Deste modo, a análise espectral foi feita da mesma forma que no GSM, tendo-se realizado uma medição do canal no domínio do tempo, como é possível ver nas imagens espectrais apresentadas abaixo. Foram também calculadas as duas médias referidas no GSM, considerando também um *threshold* de potência de -50 dBm.

No DECT, os problemas de interferência por parte de outros dispositivos a transmitir na vizinhança na mesma frequência, são muito pouco prováveis, pelo facto de que a banda de DECT ser exclusiva para esta tecnologia e a probabilidade de haver outro dispositivo a transmitir com a mesma tecnologia e com a mesma frequência na vizinhança ser muito baixa.

- 120 cm

Tabela 5.15 Potência média calculada e dados estatísticos - DECT (d = 120 cm)

	Média do canal	Média dos bursts
1882 MHz	-63.5212 dBm	-35.9001 dBm
1885 MHz	-61.2438 dBm	-33.9333 dBm
1889 MHz	-62.2861 dBm	-34.4860 dBm
1890 MHz	-63.4985 dBm	-35.1450 dBm
1892 MHz	-64.4130 dBm	-34.9929 dBm
1894 MHz	-61.9935 dBm	-34.2164 dBm
1896 MHz	-60.8745 dBm	-35.4450 dBm
\bar{X}	-62.5472 dBm	-34.8741 dBm
$var(X)$	1.70104	0.489085
σ	1.3042	0.6993
$IC_{\mu,95\%}$	0.9662	0.5181

Para uma distância de 120 cm obteve-se uma média final de todos os canais de -62.5472 dBm com uma incerteza de 0.9662 dBm para a média final dos *bursts* obteve-se -34.8741 dBm com uma incerteza de 0.5181 dBm.

- **170 cm**

Tabela 5.16 Potência média calculada e dados estatísticos - DECT (d = 170 cm)

	Média do canal	Média dos bursts
1882 MHz	-65.6111 dBm	-39.4989 dBm
1885 MHz	-66.0576 dBm	-38.9278 dBm
1889 MHz	-69.1375 dBm	-39.9750 dBm
1890 MHz	-72.0799 dBm	-43.5721 dBm
1892 MHz	-60.3348 dBm	-36.3607 dBm
1894 MHz	-64.6432 dBm	-37.6729 dBm
1896 MHz	-63.1222 dBm	-38.6525 dBm
\bar{X}	-65.8552 dBm	-39.2372 dBm
$var(X)$	14.839	5.09381
σ	3.8521	2.2569
$IC_{\mu,95\%}$	2.8537	1.6720

Com uma distância de 170 cm obteve-se uma média de todos os canais de -65.8552 dBm com uma incerteza de 2.8521 dBm e uma média dos *bursts* de -39.2372 dBm com uma incerteza de 1.6720 dBm.

- **220 cm**

Tabela 5.17 Potência média calculada e dados estatísticos - DECT (d = 220 cm)

	Média do canal	Média dos bursts
1882 MHz	-68.2671 dBm	-40.5817 dBm
1885 MHz	-64.1457 dBm	-39.4930 dBm
1889 MHz	-72.1161 dBm	-42.9767 dBm
1890 MHz	-69.3011 dBm	-40.9788 dBm
1892 MHz	-66.8305 dBm	-39.7918 dBm
1894 MHz	-63.7764 dBm	-39.4866 dBm
1896 MHz	-62.0910 dBm	-38.3646 dBm
\bar{X}	-66.6468 dBm	-40.2390 dBm
$var(X)$	12.478	2.16591
σ	3.5324	1.4717
$IC_{\mu,95\%}$	2.6169	1.0903

Por fim, para uma distância de 220 cm obteve-se uma média final dos canais de -66.6468 dBm com uma incerteza de 2.6169 dBm e uma média de *bursts* de -40.2390 dBm com uma incerteza de 1.0903 dBm.

5.1.3.2 Polarização vs Potência

- 0°

Tabela 5.18 Potência média calculada e dados estatísticos - DECT (Rotação de 0°)

	Média do canal	Média dos bursts
1882 MHz	-65.5238 dBm	-37.8626 dBm
1883 MHz	-67.1680 dBm	-39.6204 dBm
1885 MHz	-70.1836 dBm	-39.7902 dBm
1890 MHz	-66.7772 dBm	-40.2049 dBm
1894 MHz	-62.6388 dBm	-36.0282 dBm
\bar{X}	-66.4583 dBm	-38.7013 dBm
$var(X)$	7.48617	3.03506
σ	2.7361	1.7421
$IC_{\mu,95\%}$	2.3983	1.5271

Para uma rotação de 0°, obteve-se -66.4583 dBm de média final dos canais, com uma incerteza de 2.3983 e para a média final dos *bursts* obteve-se -38.7013 dBm com uma incerteza de 1.5271.

- 90°

Tabela 5.19 Potência média calculada e dados estatísticos - DECT (Rotação de 90°)

	Média do canal	Média dos bursts
1882 MHz	-65.4214 dBm	-37.8701 dBm
1883 MHz	-67.8758 dBm	-40.0701 dBm
1885 MHz	-69.5283 dBm	-40.1034 dBm
1890 MHz	-66.0610 dBm	-38.6755 dBm
1894 MHz	-65.7770 dBm	-38.0470 dBm
\bar{X}	-66.9327 dBm	-38.9532 dBm
$var(X)$	3.0015	1.16044
σ	1.7325	1.0772
$IC_{\mu,95\%}$	1.5186	0.9442

Para uma rotação de 90° obteve-se uma média final dos canais de -66.9327 dBm com uma incerteza de 1.5186 dBm e uma média de *bursts* final de -38.9532 dBm com uma incerteza de 0.9442 dBm.

- 180°

Tabela 5.20 Potência média calculada e dados estatísticos - DECT (Rotação de 180°)

	Média do canal	Média dos bursts
1882 MHz	-65.2912 dBm	-38.1758 dBm
1883 MHz	-67.7122 dBm	-40.1504 dBm
1885 MHz	-70.1077 dBm	-40.2468 dBm
1890 MHz	-66.5099 dBm	-39.5307 dBm
1894 MHz	-64.8107 dBm	-37.9006 dBm
\bar{X}	-66.8863 dBm	-39.2008 dBm
$var(X)$	4.5134	1.21147
σ	2.1245	1.1007
$IC_{\mu,95\%}$	1.8622	0.9648

Para a rotação de 180°, obteve-se como média final dos canais, -66.8863 dBm com uma incerteza de 1.8622 dBm e uma média final dos *bursts* de -39.2008 dBm com uma incerteza de 0.9648 dBm.

- 270°

Tabela 5.21 Potência média calculada e dados estatísticos - DECT (Rotação de 270°)

	Média do canal	Média dos bursts
1882 MHz	-66.2991 dBm	-39.5764 dBm
1883 MHz	-67.1325 dBm	-40.1617 dBm
1885 MHz	-70.2890 dBm	41.2478 dBm
1890 MHz	-66.2835 dBm	-40.7575 dBm
1894 MHz	-66.4383 dBm	-40.5900 dBm
\bar{X}	-67.2885 dBm	-40.4667 dBm
$var(X)$	2.93482	0.398888
σ	1.7131	0.6316
$IC_{\mu,95\%}$	1.5016	0.5536

Por fim, com uma rotação de 270°, obteve-se como média final dos canais, -67.2885 dBm com uma incerteza de 1.5016 dBm e uma média final dos *bursts* de -40.4667 dBm com uma incerteza de 0.5536 dBm.

5.2 Análise comparativa

5.2.1 WIFI

Tabela 5.22 Potência média final e dados estatísticos - Wifi (d = 120 cm, 170 cm e 220 cm)

	120 cm	170 cm	220 cm
n	325	325	325
\bar{X}	-70.3089 dBm	-70.015 dBm	-70.0255 dBm
$var(X)$	3.0795	6.68659	7.4274
σ	1.75485	2.58584	2.72532
$IC_{\mu,95\%}$	0.1905dBm	0.2807dBm	0.2958dBm

Como se pode ver na Tabela 5.22, os valores médios de potência medidos para as distâncias de 120 cm, 170 cm e 220 cm entre o emissor e a antena de medição, foram de -70.3089 ± 0.1905 dBm, -70.015 ± 0.2807 dBm e -70.055 ± 0.2958 dBm, respectivamente. Os valores de potência média são muito idênticos, como se pode verificar na Tabela 5.22, não se podendo assim dizer que há uma variação significativa da potência com a distância, pelos menos para os cenários de medição e distâncias assumidas neste trabalho. Em relação à incerteza é possível verificar que nos resultados obtidos esta aumenta com a distância.

No estudo realizado em [41] foram testadas três camaras de filmar que utilizam WIFI. Para realização das medições foi usado o analisador espectral SPECTRAN HF-6065 e o software MCS e a distância utilizada entre os emissores e a antena do analisador foi de 3m. Neste estudo foram obtidos valores entre -30 dBm e -35 dBm para uma das camaras, para outra, valores entre -50 dBm e -70 dBm e entre -70 dBm e -85 dBm para outra. Percebe-se assim que a potência transmitida varia muito de um dispositivo para outro.

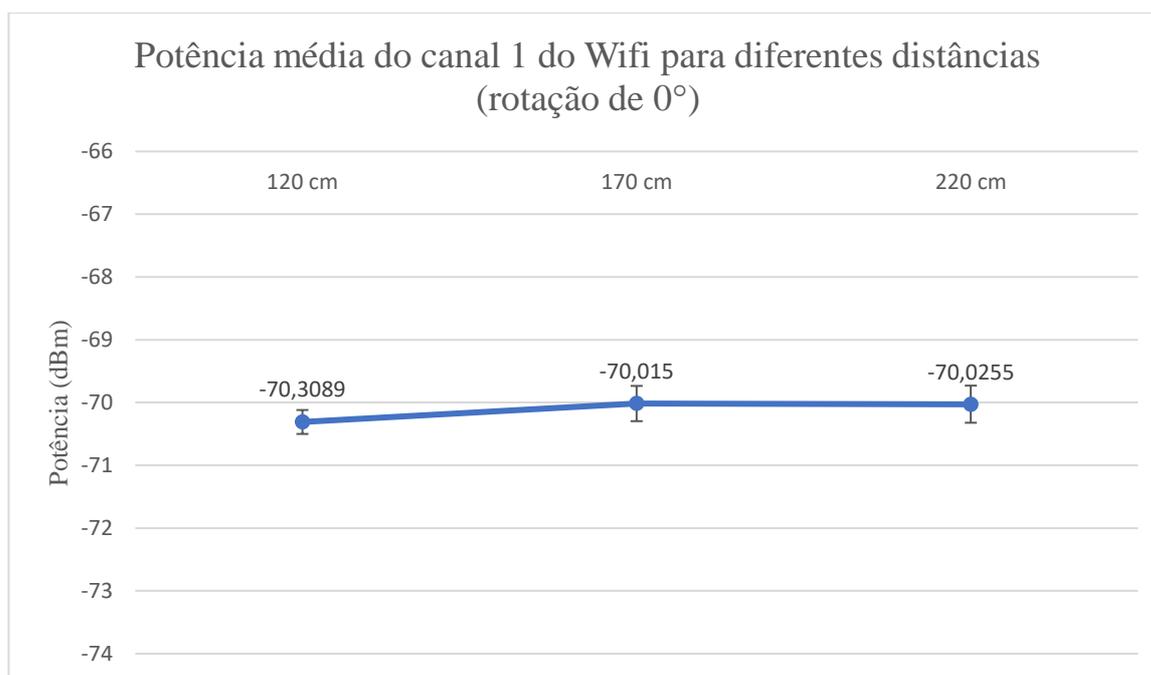


Figura 5.8 Gráfico da potência média do canal 1 do Wifi para diferentes distâncias (rotação de 0°)

Tabela 5.23 Potência média final e dados estatísticos - Wifi (rotações de 0°, 90°, 180° e 270°)

	0°	90°	270°	180°
n	325	325	325	325
\bar{X}	-73.739 dBm	-73.3483 dBm	-74.4213 dBm	-68.2935 dBm
$var(X)$	8.45036	8.14827	6.87762	5.40788
σ	2.90695	2.85452	2.62252	2.32549
$IC_{\mu,95\%}$	0.315562	0.309870	0.284686	0.252442

Para as polarizações, como podemos ver na Tabela 5.23, os resultados obtidos para as rotações de 0°, 90° e 270° são muito idênticos, não só o valor médio de potência do canal, mas também a incerteza associada. Já para uma rotação de 180° os valores obtidos destacam-se dos restantes já que temos uma potência de canal de -68.2935 dBm e uma incerteza associada de 0.252442 dBm, se se comparar as polarizações de 0° e de 180°, que têm uma diferença de polarização de 180°, pode-se verificar que existe uma diferença de potência de 5.4455 dB entre ambas, assim como uma diferença considerável nas suas incertezas.

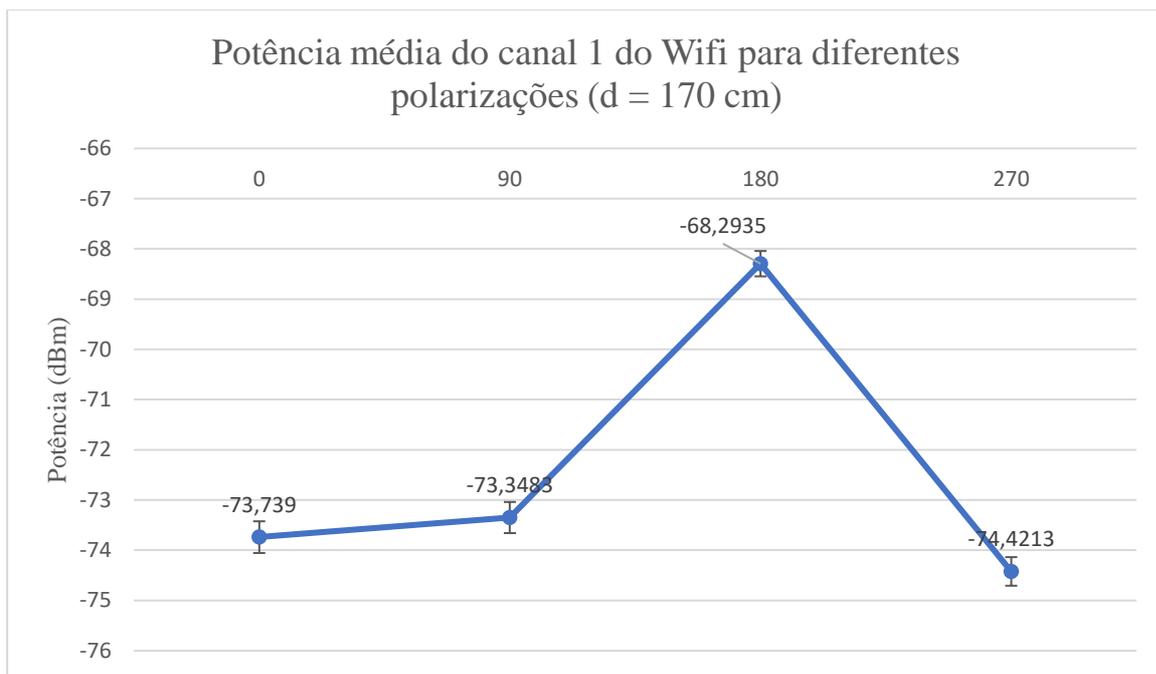


Figura 5.9 Gráfico da potência média do canal 1 do Wifi para diferentes polarizações (d = 170 cm)

5.2.2 GSM

Tabela 5.24 Potência média nos canais GSM, potências médias finais e dados estatísticos (d = 120 cm, 155 cm e 191 cm)

	120 cm	155 cm	191 cm
836,6 (190)	-49.2353 dBm	-54.2458 dBm	-56.1736 dBm
838,6 (200)	-51.5090 dBm	-55.7776 dBm	-57.2674 dBm
841,6 (215)	-47.8025 dBm	-53.8878 dBm	-58.3518 dBm
844,6 (230)	-51.9479 dBm	-55.6232 dBm	-58.614 dBm 5
848,6 (250)	-48.4234 dBm	-57.9896 dBm	-59.6383 dBm
\bar{X}	-49.7836 dBm	-55.5048 dBm	-58.0091 dBm
$var(X)$	3.43413	2.61562	1.76435
σ	1.8531	1.6173	1.3283
$IC_{\mu,95\%}$	1.6244	1.4176	1.1643

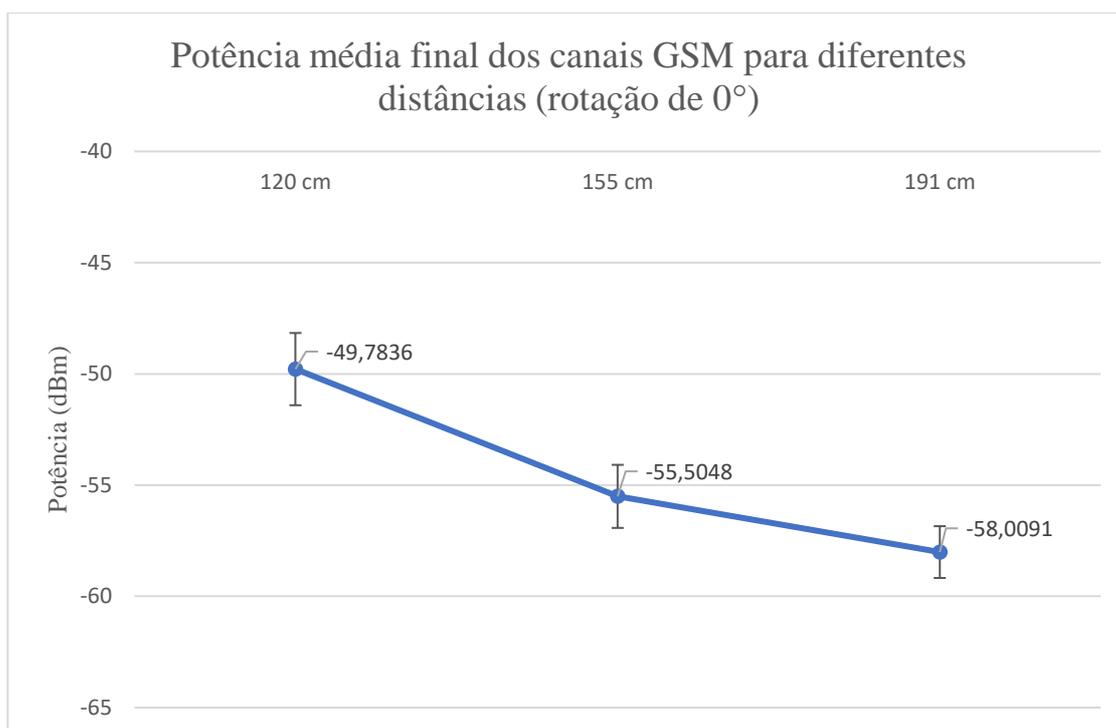


Figura 5.10 Gráfico da potência média final dos canais GSM para diferentes distâncias (rotação de 0°)

Nas medições realizadas no GSM, é possível verificar um padrão de decaimento de potência à medida que se afasta o emissor GSM da antena do analisador espectral, visível no gráfico da Figura 5.32, tal como era esperado. Ao contrário do que se verificou no WIFI, no GSM a incerteza associada a cada medição diminui com o afastamento do emissor à antena.

Média de *bursts* (threshold de -50dBm):

Tabela 5.25 Potência média dos bursts nos canais GSM, potências médias finais e dados estatísticos (d = 120 cm, 155 cm e 191 cm)

	120 cm	155 cm	191 cm
836,6 (190)	-15.4703 dBm	-21.8653 dBm	-21.3915 dBm
838,6 (200)	-16.9557 dBm	-21.3669 dBm	-21.9761 dBm
841,6 (215)	-18.1096 dBm	-21.1505 dBm	-23.4393 dBm
844,6 (230)	-18.0878 dBm	-20.5952 dBm	-23.3574 dBm
848,6 (250)	-19.7597 dBm	-23.0733 dBm	-23.4672 dBm
\bar{X}	-17.6766 dBm	-21.6102 dBm	-22.7263 dBm
	2.52078	0.876608	0.950037
σ	1.5877	0.9363	0.9747
$IC_{\mu,95\%}$	1.3917	0.8207	0.8544

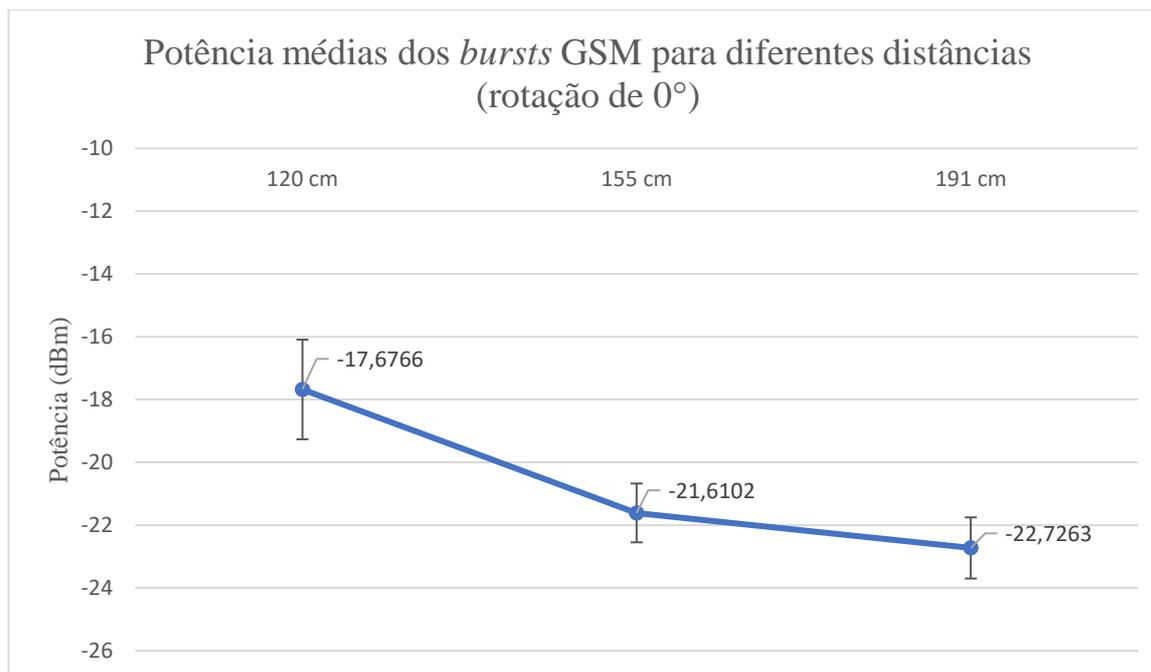


Figura 5.11 Gráfico da potência médias dos *bursts* GSM para diferentes distâncias (rotação de 0°)

Observando agora os picos de potência medidos, isto é, a potência dos *bursts* transmitidos pelo telemóvel, pode-se verificar um padrão idêntico ao verificado para a média do canal. Neste caso as incertezas são significativamente inferiores, podendo-se assim deduzir que o que mais afeta a incerteza da potência medida num canal GSM é o ruído de fundo, isto foi possível observar em tempo real enquanto as medições eram realizadas, era possível notar algumas oscilações do ruído de fundo.

Tabela 5.26 Potência média nos canais GSM, potências médias finais e dados estatísticos (rotações de 0°, 90°, 180° e 270°)

	0°	90°	270°	180°
836,6 (190)	-58.0200 dBm	-58.2360 dBm	-58.9781 dBm	-61.4640 dBm
838,6 (200)	-60.4455 dBm	-61.0173 dBm	-61.9485 dBm	-62.1727 dBm
841,6 (215)	-58.9851 dBm	-63.5699 dBm	-58.4888 dBm	-60.9858 dBm
844,6 (230)	-60.6691 dBm	-64.6166 dBm	-61.6187 dBm	-59.5579 dBm
848,6 (250)	-58.7641 dBm	-61.5729 dBm	-57.1966 dBm	-58.1472 dBm
\bar{X}	-59.3767 dBm	-61.8025 dBm	-59.6462 dBm	-60.4655 dBm
$var(X)$	1.29549	6.10787	4.2445	2.59511
σ	1.1382	2.4714	2.0602	1.6109
$IC_{\mu,95\%}$	0.9977	2.1663	1.8059	1.4120

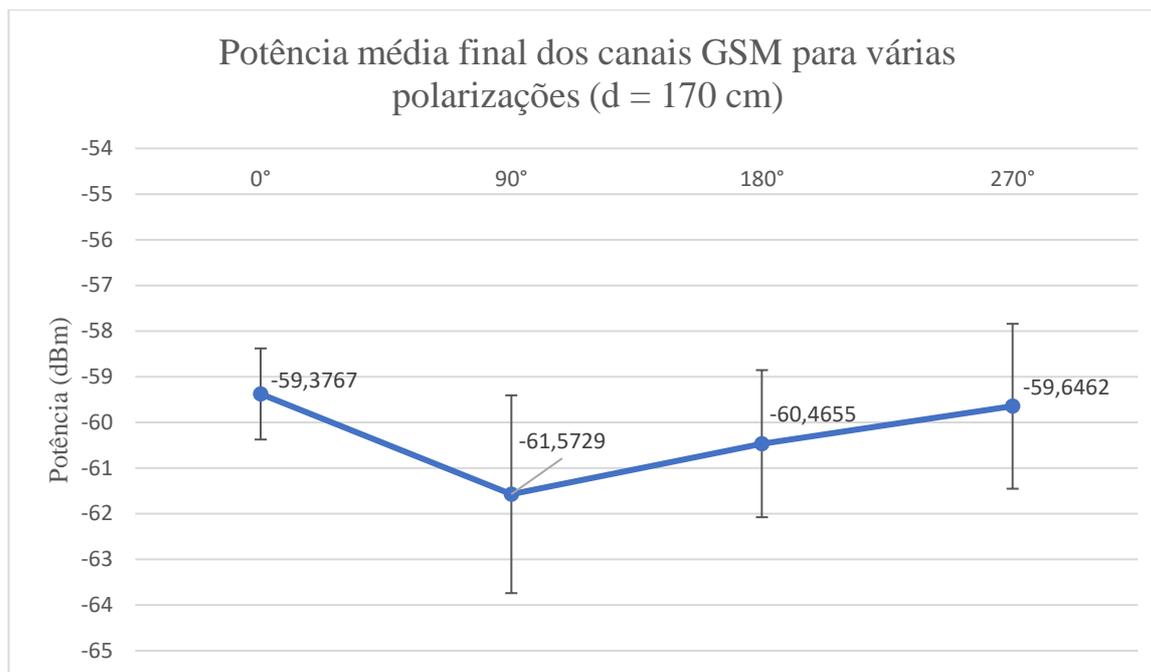


Figura 5.12 Gráfico da potência média final dos canais GSM para várias polarizações ($d = 170$ cm)

Relativamente às polarizações, a rotação onde foi medida a potência mais alta foi de 90° , porém os resultados obtidos são pouco conclusivos, pois os valores medidos são relativamente próximos uns dos outros e possuem incertezas elevadas.

Noutros trabalhos em que foi feita uma análise espectral na banda do GSM, que embora as medições tenham sido realizadas em ambientes não controlados, os resultados obtidos assemelham-se aos resultados aqui mostrados. É o caso do estudo [42] em que foram realizadas medições num estádio de futebol na banda dos 900 MHz e foram medidos -57.7 dBm de potência no final do jogo, altura em que a utilização do espectro é mais elevada. Em [43], também para um cenário não controlado e para a banda *uplink* de 900 MHz, o valor médio mais alto calculado foi de -44 dBm.

5.2.3 DECT

Tabela 5.27 Potência média nos canais DECT, potências médias finais e dados estatísticos (d = 120 cm, 170 cm e 220 cm)

	120 cm	170 cm	220 cm
1882 MHz	-63.5212 dBm	-65.6111 dBm	-68.2671 dBm
1885 MHz	-61.2438 dBm	-66.0576 dBm	-64.1457 dBm
1889 MHz	-62.2861 dBm	-69.1375 dBm	-72.1161 dBm
1890 MHz	-63.4985 dBm	-72.0799 dBm	-69.3011 dBm
1892 MHz	-64.4130 dBm	-60.3348 dBm	-66.8305 dBm
1894 MHz	-61.9935 dBm	-64.6432 dBm	-63.7764 dBm
1896 MHz	-60.8745 dBm	-63.1222 dBm	-62.0910 dBm
\bar{X}	-62.5472 dBm	-65.8552 dBm	-66.6468 dBm
$var(X)$	1.70104	14.839	12.478
σ	1.3042	3.8521	3.5324
$IC_{\mu,95\%}$	0.9662	2.8537	2.6169

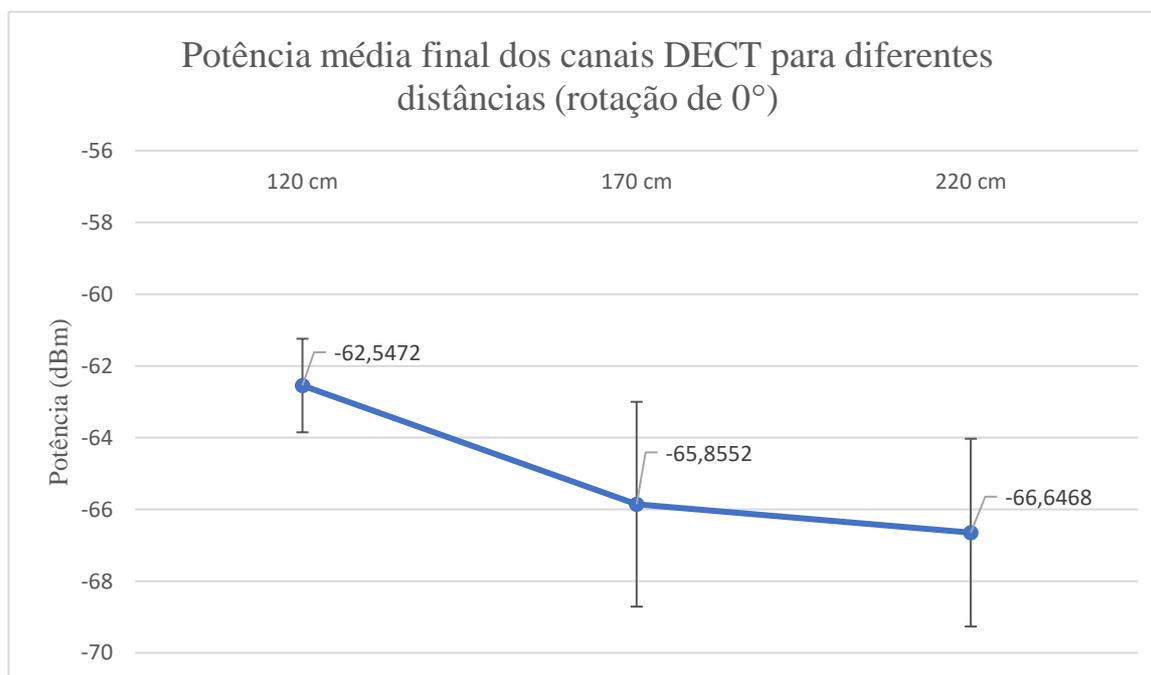


Figura 5.13 Gráfico da potência média final dos canais DECT para diferentes distâncias (rotação de 0°)

Os resultados medidos no DECT apresentam um padrão semelhante ao que foi observado no GSM, como se pode ver no gráfico em cima a potência medida decresce com o afastamento do terminal à antena do analisador espectral, sendo os valores de -62.5472 dBm, -65.8552 dBm e -66.6468 para as distâncias 120 cm, 170 cm e 220 cm respectivamente.

É possível observar que os valores medidos para as distâncias de 170 cm e 220 cm são relativamente próximas e o erro é bastante elevado para ambos os valores.

Tal com aconteceu inicialmente no GSM, no DECT também se verificaram algumas oscilações na potência, que provocaram uma incerteza elevada. Estas oscilações devem-se possivelmente a interferências, devido a possíveis reflexões, visto que a possibilidade dessa interferência ser proveniente de outros dispositivos na vizinhança a usar frequências idênticas ser descartada, pelo facto de que a banda de frequência usada pelo DECT ser exclusiva para esta tecnologia.

Média de bursts (threshold de -50dBm):

Tabela 5.28 Potência média dos bursts nos canais DECT, potências médias finais e dados estatísticos (d = 120 cm, 170 cm e 220 cm)

	120 cm	170 cm	220 cm
1882 MHz	-35.9001 dBm	-39.4989 dBm	-40.5817 dBm
1885 MHz	-33.9333 dBm	-38.9278 dBm	-39.4930 dBm
1889 MHz	-34.4860 dBm	-39.9750 dBm	-42.9767 dBm
1890 MHz	-35.1450 dBm	-43.5721 dBm	-40.9788 dBm
1892 MHz	-34.9929 dBm	-36.3607 dBm	-39.7918 dBm
1894 MHz	-34.2164 dBm	-37.6729 dBm	-39.4866 dBm
1896 MHz	-35.4450 dBm	-38.6525 dBm	-38.3646 dBm
\bar{X}	-34.8741 dBm	-39.2372 dBm	-40.2390 dBm
$var(X)$	0.489085	5.09381	2.16591
σ	0.6993	2.2569	1.4717
$IC_{\mu,95\%}$	0.5181	1.6720	1.0903

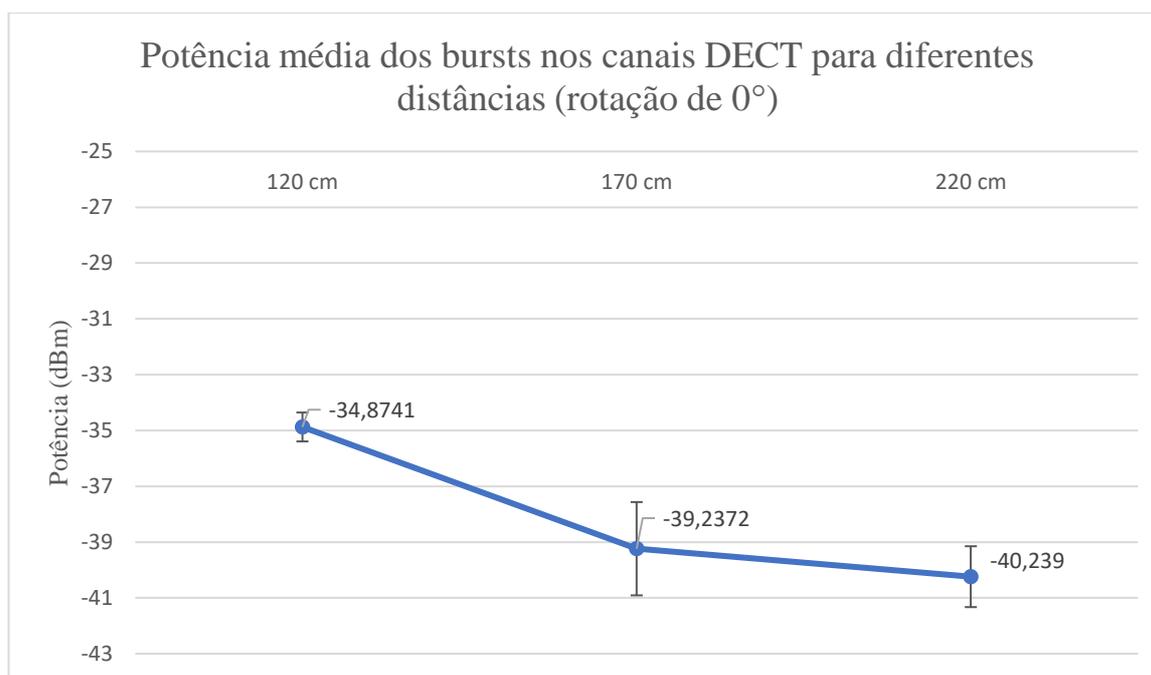


Figura 5.14 Gráfico da potência média dos bursts nos canais DECT para diferentes distâncias (rotação de 0°)

Os resultados obtidos da medição dos *bursts* mostram de novo o decaimento da potência com o aumento da distância, tal como era esperado.

É também possível verificar mais uma vez a diferença significativa que existe entre a incerteza da média dos *bursts* e a incerteza da média dos canais, reforçando mais uma vez a tese de que as oscilações de potência que mais afetam a incerteza, são as oscilações do ruído de fundo, visto que a incerteza da média da potência dos *bursts* é inferior á incerteza da potência média dos canais.

Tabela 5.29 Potência média nos canais DECT, potências médias finais e dados estatísticos (rotações de 0°, 90°, 180° e 270°)

	0°	270°	90°	180°
1882 MHz	-65.5238 dBm	-66.2991 dBm	-65.4214 dBm	-65.2912 dBm
1883 MHz	-67.1680 dBm	-67.1325 dBm	-67.8758 dBm	-67.7122 dBm
1885 MHz	-70.1836 dBm	-70.2890 dBm	-69.5283 dBm	-70.1077 dBm
1890 MHz	-66.7772 dBm	-66.2835 dBm	-66.0610 dBm	-66.5099 dBm
1894 MHz	-62.6388 dBm	-66.4383 dBm	-65.7770 dBm	-64.8107 dBm
\bar{X}	-66.4583 dBm	-67.2885 dBm	-66.9327 dBm	-66.8863 dBm
$var(X)$	7.48617	2.93482	3.0015	4.5134
σ	2.7361	1.7131	1.7325	2.1245
$IC_{\mu,95\%}$	2.3983	1.5016	1.5186	1.8622

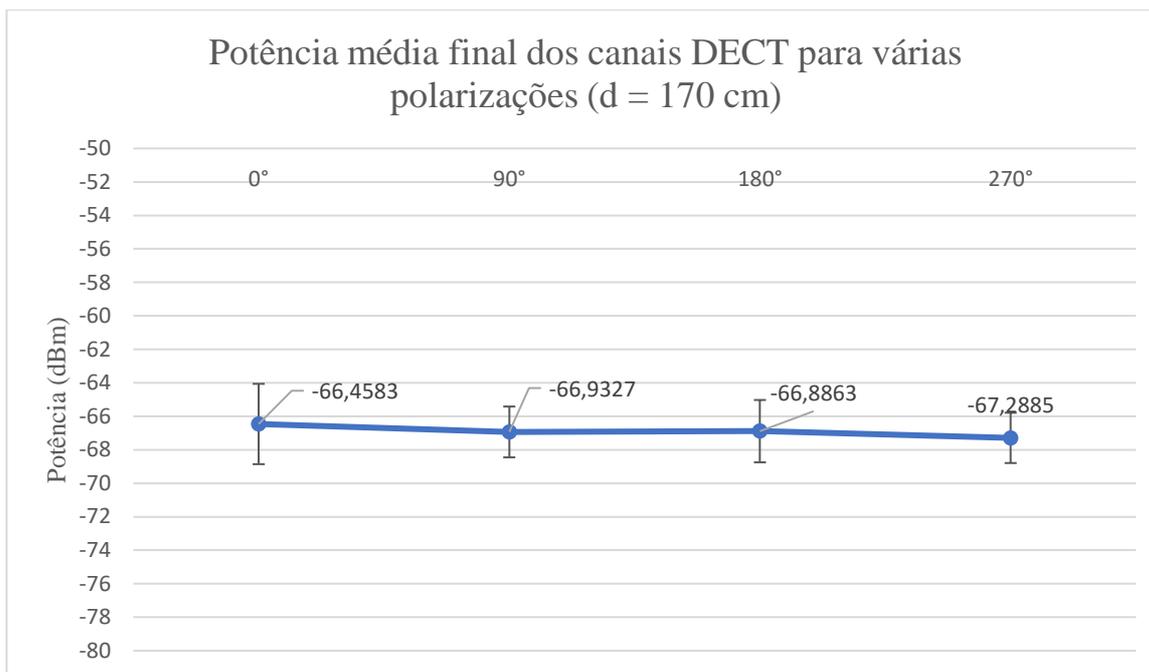


Figura 5.15 Gráfico da potência média final dos canais DECT para várias polarizações (d = 170 cm)

Os resultados obtidos para as diferentes polarizações são claramente inconclusivos em termos de diferenciação de resultados, isto porque os resultados obtidos são extremamente idênticos para todas as polarizações, assim como as respectivas incertezas.

Em [44] foram realizadas medições com o DECT num ambiente indoor não controlado. Nesse trabalho para uma distância de 5 m foram medidos -47 dBm de valor máximo, -66.4 dBm de valor mínimo e um valor médio de -55.6 dBm com um desvio padrão de 1.4 dBm. Estes valores de potência obtidos em [44] mostram-se mais elevados que os obtidos neste trabalho.

5.2.4 WIFI vs GSM vs DECT

120 cm e 0°

Tabela 5.30 Potências médias finais para as tecnologias Wifi, GSM e DECT (d = 120 cm e rotação de 0°)

	WIFI	GSM	DECT
\bar{X}	-70.3089 dBm	-49.7836 dBm	-62.5472 dBm
$var(X)$	3.0795	3.43413	1.70104
σ	1.75485	1.8531	1.3042
$IC_{\mu,95\%}$	0.1905	1.6244	0.9662

Por fim para as três tecnologias, para o mesmo cenário de medição obteve-se -70.3089 dBm para o WIFI, com uma incerteza de 0.1905m, -49.7836 dBm para o GSM, com uma incerteza de 1.6224 dBm e para o DECT obteve-se -62.5472 dBm com uma incerteza de 0.9662 dBm.

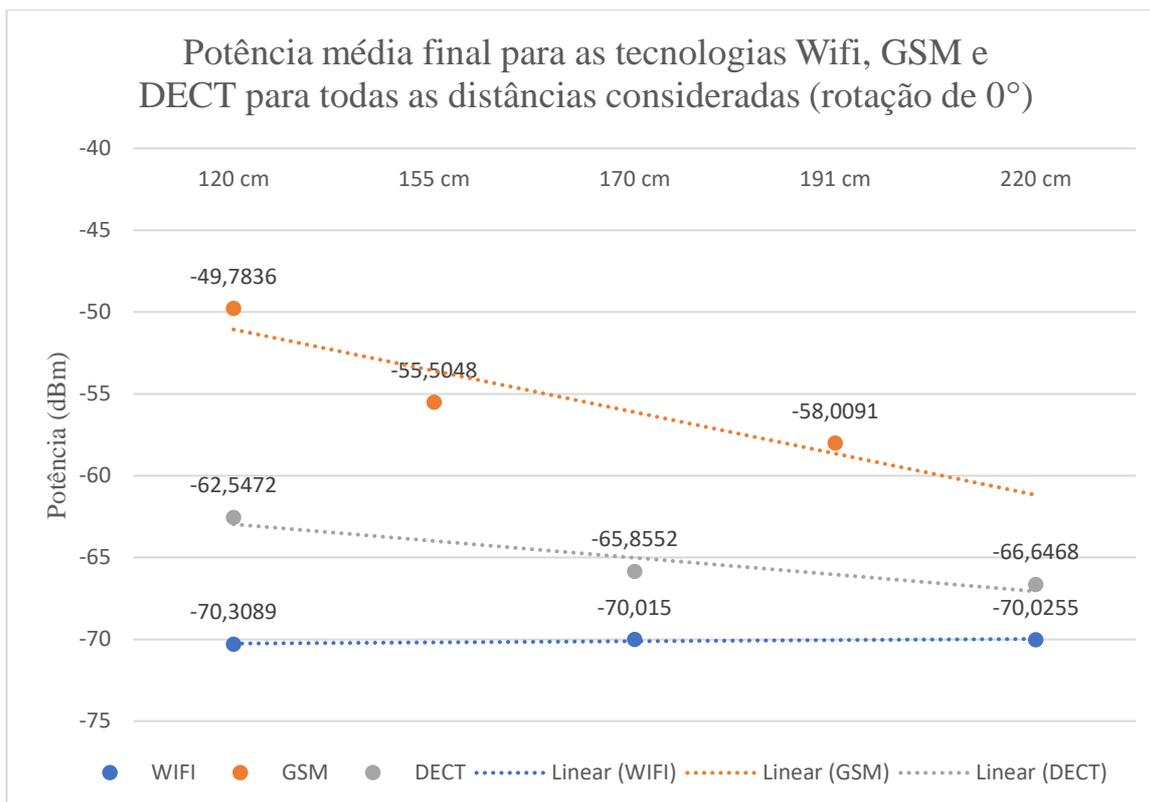


Figura 5.16 Gráfico da potência média final para as tecnologias Wifi, GSM e DECT para todas as distâncias consideradas (rotação de 0°)

Comparando agora as três tecnologias estudadas neste trabalho, é possível verificar que a tecnologia de onde foi possível medir maior potência foi o GSM, seguido do DECT e por fim do WIFI.

No gráfico da Figura 5-38 são apresentadas as linhas de tendências dos resultados obtidos nas três tecnologias. Estas linhas dão-nos uma perspetiva linear do decaimento da potência à medida que a distância entre o dispositivo emissor e a antena do analisador espectral aumenta, relativa aos resultados obtidos neste trabalho. Como é possível verificar, o decaimento de potência é mais rápido no GSM, depois no DECT e de seguida no Wifi. Um dos factores que pode levar a este acontecimento, é o facto de que para as tecnologias com maior largura de banda, como é o caso do Wifi, as perdas de potências por *fading* serem menos significativas na potência média final calculada, fazendo com que o aumento da distância tenha um impacto mais significativo na potência calculada nas tecnologias com bandas mais estreitas.



CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre três tecnologias sem fios, no que diz respeito à potência que poderá ser recolhida e armazenada num cenário de *Energy Harvesting*. São apresentados os resultados obtidos nas medições, assim como uma pequena análise estatística desses mesmos resultados.

6.1 Considerações Finais

Após a realização das medições nas diferentes tecnologias sem fios, foram obtidos como média final de potência para o Wifi -70.3089 ± 0.1905 dBm, -70.015 ± 0.2807 dBm e -70.055 ± 0.2958 dBm, para as distâncias entre o computador e a antena do analisador espectral de, 120 cm, 170 cm e 220 cm, respetivamente. Para estes resultados verificou-se que, para as distâncias consideradas, as potências mantêm-se muito idênticas, já a incerteza associada aumenta com a distância. Nos resultados obtidos para as diferentes polarizações, a potência medida para uma rotação de 180° destacou-se das restantes, com um valor de -68.2935 ± 0.252442 dBm, que representa uma diferença de aproximadamente 5 dB em relação à segunda potência mais alta medida. No GSM verificou-se um decaimento da potência com a distância, tal como era esperado. Os resultados obtidos para as potências médias dos canais foram -49.7836 ± 1.6244 dBm, -55.5048 ± 1.4176 dBm e -58.0091 ± 1.1643 dBm, para as distâncias de 120 cm, 155 cm e 191 cm, respetivamente. Ao contrário do que aconteceu no Wifi, no GSM a incerteza diminuiu com o aumento da distância. Para as rotações, a rotação onde se obteve a potência mais alta, foi a de 90° , porém os resultados são pouco conclusivos visto que são relativamente idênticos e com incertezas bastante elevadas. No DECT, as potências médias finais obtidas para as diferentes distâncias foram de -62.5472 ± 0.9662 dBm, -65.8552 ± 2.8537 dBm e -66.6468 ± 2.6169 dBm, para as distâncias de 120 cm, 170 cm e 220 cm, respetivamente. Assim, como aconteceu no GSM verificou-se um leve decaimento da potência com o aumento da distância. Para as diferentes polarizações os resultados obtidos são muito semelhantes, tanto a potência medida como a incerteza associada, podendo-se assim dizer que para o DECT a polarização tem um impacto quase insignificante na potência recebida.

Olhando agora para as três tecnologias, verificou-se pelos resultados aqui apresentados, que a tecnologia de onde se poderia extrair mais energia seria do GSM, visto que foi a tecnologia de onde foram medidos os valores de potência mais elevados, que representam uma diferença que ronda os 10 dBm em relação ao DECT, que foi, a seguir ao GSM, a tecnologia que demonstrou maiores valores de potência. Por fim temos o Wifi, que foi a tecnologia de onde se mediram os valores mais baixos de potência das três tecnologias consideradas neste trabalho. Outros dos motivos que leva a crer que o GSM poderá ser a tecnologia de onde se poderá extrair mais energia é pelo elevado número de subscritores que possui, que leva a densidade espectral mais elevada devido à potência irradiada pelas várias estações base na mesma banda.

É também possível concluir dos resultados apresentados neste trabalho e como seria de esperar, que tanto a distância como a polarização dos dispositivos emissores terão influência na quantidade de energia que poderá ser recolhida e armazenada num cenário de *Energy Harvesting*.

6.2 Trabalho Futuro

No que diz respeito à análise comparativa da potência recebida pelas várias tecnologias sem fios, de modo a que sejam obtidos resultados mais precisos, seria necessário recorrer a aparelhos de medição mais precisos e ambientes de medição mais controlados. Outra melhoria seria aumentar o número de amostras, que levaria por sua vez a resultados mais fidedignos.

No contexto de *Energy Harvesting* talvez fosse interessante realizar medições em ambientes reais não controlados, de modo a perceber a quantidade de energia que poderia ser recolhida de um verdadeiro cenário, assim como realizar medições noutras tecnologias RF sem fios, nomeadamente para outras bandas da rede móvel.



BIBLIOGRAFIA

- [1] Y. A. Sambo, F. Heliot, and M. A. Imran, "A survey and tutorial of electromagnetic radiation and reduction in mobile communication systems," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 790–802, 2015.
- [2] National Radiation Protection board in Great Britain, "Health Effects from Radiofrequency," 2003.
- [3] IEEE, *IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*, vol. 2005, no. April. 2006.
- [4] F. O. R. Limiting, E. To, and M. Fields, "Icnirp Guidelines for Limiting Exposure To Time - Varying Guidelines for Limiting Exposure To Time-Varying," *Health Phys.*, vol. 74, no. (4), p. 494-522;, 1998.
- [5] D. O. McCoy, D. M. Zakharia, and Q. Balzano, "Field strengths and specific absorption rates in automotive environments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 48, no. 4, pp. 1287–1303, 1999.
- [6] IEC/IEEE, "62704-1: Recommended Practice For Determining The Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (Sar) In The Human Body From Wireless Communications Devices, 30 Mhz - 6 Ghz- Part 1: General Requirements For Using The Finite Difference Time Domain," *IEEE/IEC Draft Std PT 62704-1*, p. Draft, 2015.
- [7] IEEE/ICES, "IEEE Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques," *IEEE Std 1528-2013 (Revision IEEE Std 1528-2003)*, vol. 2005, no. February, pp. 1–246, 2013.
- [8] I. I. C. on E. Safety, "IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Radio Frequency Electromagnetic Fields With Respect to Human Exposure to Such Fields , 100 kHz – 300 GHz," *IEEE-SA Stand. Board*, vol. 2002, no. 2, pp. 1–133, 2008.
- [9] "Probes | SAR | MVG." [Online]. Available: http://www.mvg-world.com/en/products/field_product_family/sar-38/probes. [Accessed: 01-May-2018].
- [10] T. Barmueller, "Specific Absorption Rate: How to explain, how to measure," *ITU-T Work. " Pract. Meas. EMF Expo. "*, no. July, pp. 1–29, 2011.
- [11] F. Söderqvist, M. Carlberg, and L. Hardell, "Use of wireless telephones and self-reported health symptoms: A population-based study among Swedish adolescents aged 15-19 years," *Environ. Heal. A Glob. Access Sci. Source*, vol. 7, pp. 1–10, 2008.
- [12] M. Ibrani, L. Ahma, and J. Haxhibeqiri, "of Child Biological Tissues At Radio Fre-," *Prog.*

- Electromagn. Res. Lett.*, vol. 25, no. May, pp. 87–100, 2011.
- [13] M. Martínez-Búrdalo, A. Martín, M. Anguiano, and R. Villar, "Comparison of FDTD-calculated specific absorption rate in adults and children when using a mobile phone at 900 and 1800 MHz," *Phys. Med. Biol.*, vol. 49, no. 2, pp. 345–354, 2004.
- [14] L. Ahma, E. Hamiti, and M. Ibrani, "Assessment of the exposure of children to electromagnetic fields from wireless communication devices in home environments," *IET Commun.*, vol. 8, no. 12, pp. 2222–2228, 2014.
- [15] WHO, "WHO | Workshop on guiding public health policy in areas of scientific uncertainty," *Electromagnetic fields (EMF)*, 2016. [Online]. Available: http://www.who.int/peh-emf/meetings/ottawa_june05/en/index4.html. [Accessed: 01-May-2018].
- [16] N. (Cost) Cardona, "COST IC1004 White Paper on SCIENTIFIC CHALLENGES TOWARDS 5G," *COST IC1004*, 2013.
- [17] J. Pretorius, "Design and manufacture of a ferrimagnetic wave absorber for cellular phone radiations," *12th Int. Symp. Electron Devices Microw. Optoelectron. Appl. 2004. EDMO 2004.*, pp. 119–123, 2004.
- [18] R. Gomez-Villanueva, H. Jardón-Aguilar, and R. L. Y. Miranda, "State of the art methods for low SAR antenna implementation," *Antennas Propag. (EuCAP), 2010 Proc. Fourth Eur. Conf.*, 2010.
- [19] M. T. Islam and M. R. I. Faruque, "Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 9, 47–58, 2009," *WHO Reg. Off. Eur. Heal. Evid. Netw.*, vol. 9, pp. 47–58, 2009.
- [20] J. N. Hwang and F. C. Chen, "Reduction of the peak SAR in the human head with metamaterials," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 12, pp. 3763–3770, 2006.
- [21] S. Pinto, *Redes Celulares*, FCA-Edit. Lisbon, 2009.
- [22] 3GPP TR 36.814 V9.0.0, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)," *3rd Gener. Partnersh. Proj. Tech. Rep.*, vol. 9, no. 3, pp. 1–104, 2010.
- [23] F. Rusek *et al.*, "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40–60, 2013.
- [24] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 186–195, 2014.
- [25] WHO, "What is the International EMF Project?," *Electromagnetic fields (EMF)*, 2016. [Online]. Available: http://www.who.int/peh-emf/project/EMF_Project/en/. [Accessed: 02-May-2018].
- [26] A.- Comete, "LEXNET. Low EMF Exposure Future Networks," 2015. [Online]. Available: <http://www.lexnet.fr/>. [Accessed: 02-May-2018].
- [27] "About GreenTouch - GreenTouch." [Online]. Available: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/belllabs-microsite-greentouch/index.php?page=about-us.html>. [Accessed: 02-May-2018].
- [28] H. S. Park, "RTL8821AE Combo module User ' s Manual," 2013.
- [29] Compliance Certification Services Inc., "SAR TEST REPORT For Product Name: 802.11a/b/g/n/ac RTL8821AE Combo module," *Realt. Semicond. Corp.*, pp. 1–54, 2016.
- [30] F. Shams, G. Bacci, and M. Luise, "A survey on resource allocation techniques in OFDM(A) networks," *Comput. Networks*, vol. 65, pp. 129–150, 2014.
- [31] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, vol. 129, no. 4. Cambridge: Cambridge University Press,

- 2005.
- [32] H. H. Nguyen and E. Shwedyk, *A First Course In Digital Communications*, vol. 00562, no. February. New York: Cambridge University Press., 2009.
- [33] M. Rahnema, "Overview Of The GSM System and Protocol Architecture," *IEEE Commun. Mag.*, no. April, pp. 92–100, 1993.
- [34] "The difference between FDMA and TDMA | Tait Radio Academy." [Online]. Available: <https://www.taitradioacademy.com/topic/the-difference-between-fdma-and-tdma-1/>. [Accessed: 15-Mar-2019].
- [35] K. Murota and K. Hirade, "GMSK Modulation for Digital Mobile Radio Telephony," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 29, no. 7, pp. 1044–1050, 1981.
- [36] CTIA, "Test Plan for Wireless Device Over- the-Air Performance," *CTIA Certif.*, 2013.
- [37] "What is GMSK Modulation | Gaussian Minimum Shift Keying | Electronics Notes." [Online]. Available: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/modulation/what-is-gmsk-gaussian-minimum-shift-keying.php>. [Accessed: 15-Mar-2019].
- [38] L. E. Frenzel, "Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT)," *Handb. Ser. Commun. Interfaces*, vol. 1, no. Ci, pp. 285–287, 2015.
- [39] S. H. Gerez, "Implementation of Digital Signal Processing: Some Background on GFSK Modulation," *Univ. Twente, Dep. Electr. Eng.*, vol. 2, no. Version 5, p. 5, 2016.
- [40] Aaronia, "Log periodic broadband yagi antenna Series HyperLOG ® 70xx - span 700MHz to 6GHz," *HyperLOG 7060 Man.*, pp. 1–7, 2014.
- [41] J. Hart and V. Hartova, "Quality of transmission for WiFi cameras Netatmo NSC01-EU, D-Link DCS-5222L and Edimax IC-7113W," *Eng. Rural Dev.*, vol. 16, pp. 1012–1017, 2017.
- [42] O. Holland, P. Cordier, M. Muck, L. Mazet, C. Klöck, and T. Renk, "Spectrum power measurements in 2G and 3G cellular phone bands during the 2006 Football World Cup in Germany," *2007 2nd IEEE Int. Symp. New Front. Dyn. Spectr. Access Networks*, pp. 575–578, 2007.
- [43] Manuel Piñuela, Paul D. Mitcheson, and Stepan Lucyszyn, "Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 61, no. 7, pp. 2715–2726, 2013.
- [44] N. Papadakis, A. G. Kanatas, E. Angelou, N. Moraitis, and P. C. I. Sm, "Indoor Mobile Radio Channel Measurements and Characterization for DECT Picocells National Technical University of Athens Department of Electrical and Computer Engineering Mobile Communication Laboratory 4 . Data Analysis And Measurements," *Proc. Third IEEE Symp. Comput. Commun. ISCC'98. (Cat. No.98EX166)*.
- [45] L. Irio, R. Oliveira (2018) Impact of Mobility in Spectrum Sensing Capacity. In: Marques P., Radwan A., Mumtaz S., Noguét D., Rodriguez J., Gundlach M. (eds) Cognitive Radio Oriented Wireless Networks. CrownCom 2017
- [46] D. Oliveira and R. Oliveira, "Modeling energy availability in RF Energy Harvesting Networks," 2016 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), Poznan, 2016.
- [47] D. Oliveira and R. Oliveira, "Characterization of Energy Availability in RF Energy Harvesting Networks," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2016, Article ID 7849175, 9 pages, 2016.



Apêndice A. FOTOS REAIS DOA CENÁRIOS E MATERIAIS UTILIZADOS



Figura A 1 Telefone e base DECT Siemens Gigaset AC180



Figura A 2 Telemóvel Parla minu p123

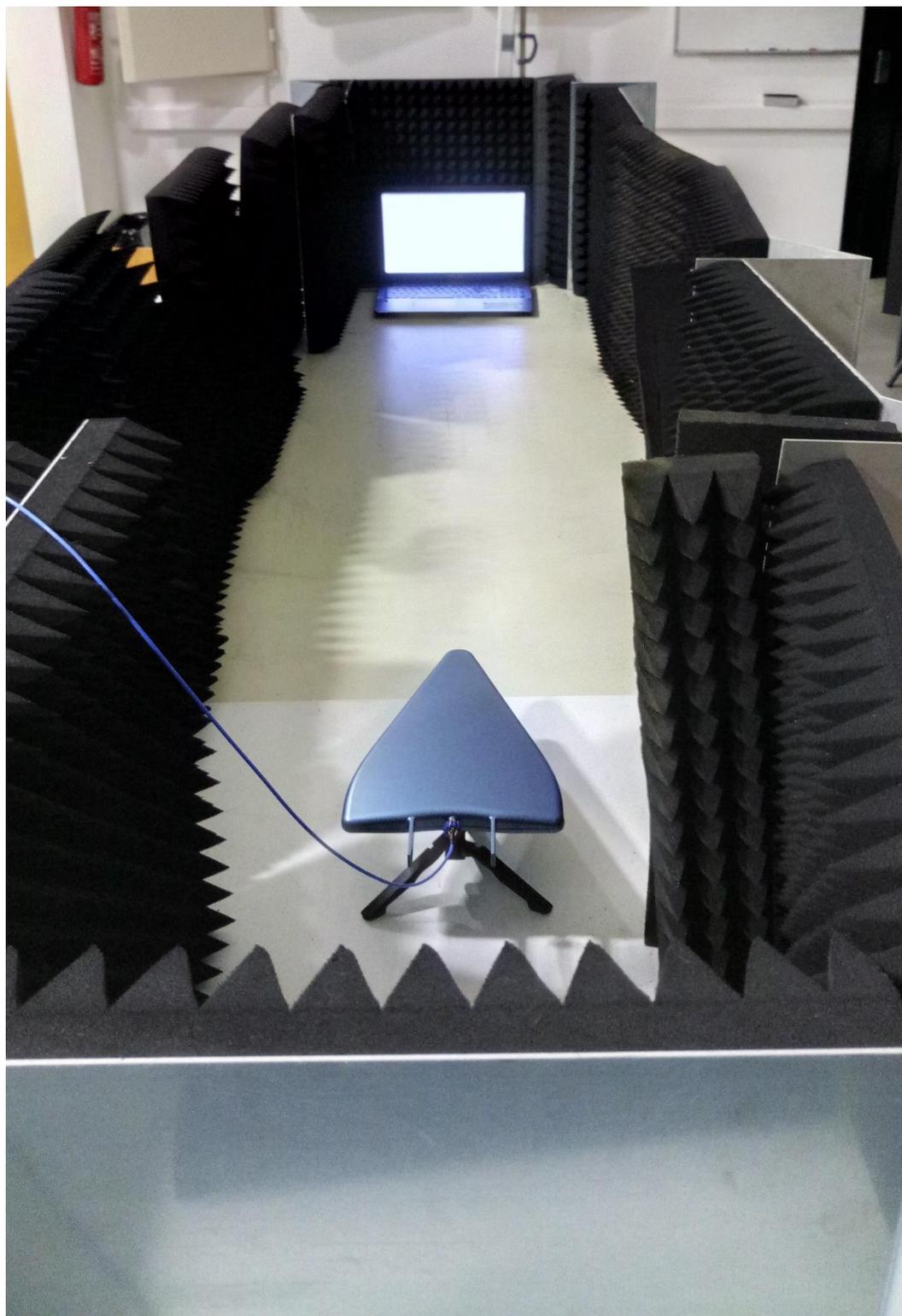


Figura A 3 Cenário de medição (Wifi - ASUS K550J)



Figura A 4 Analisador espectral Spectran HF 6065



Figura A 5 Estação base USRP B100



Apêndice B. IMAGENS ESPECTRAIS



Figura B 1 Gráfico da análise espectral no canal 1 do Wifi (d = 120 cm)



Figura B 2 Gráfico da análise espectral no canal 1 do Wifi (d = 170 cm)



Figura B 3 Gráfico da análise espectral no canal 1 do Wifi (d = 220 cm)

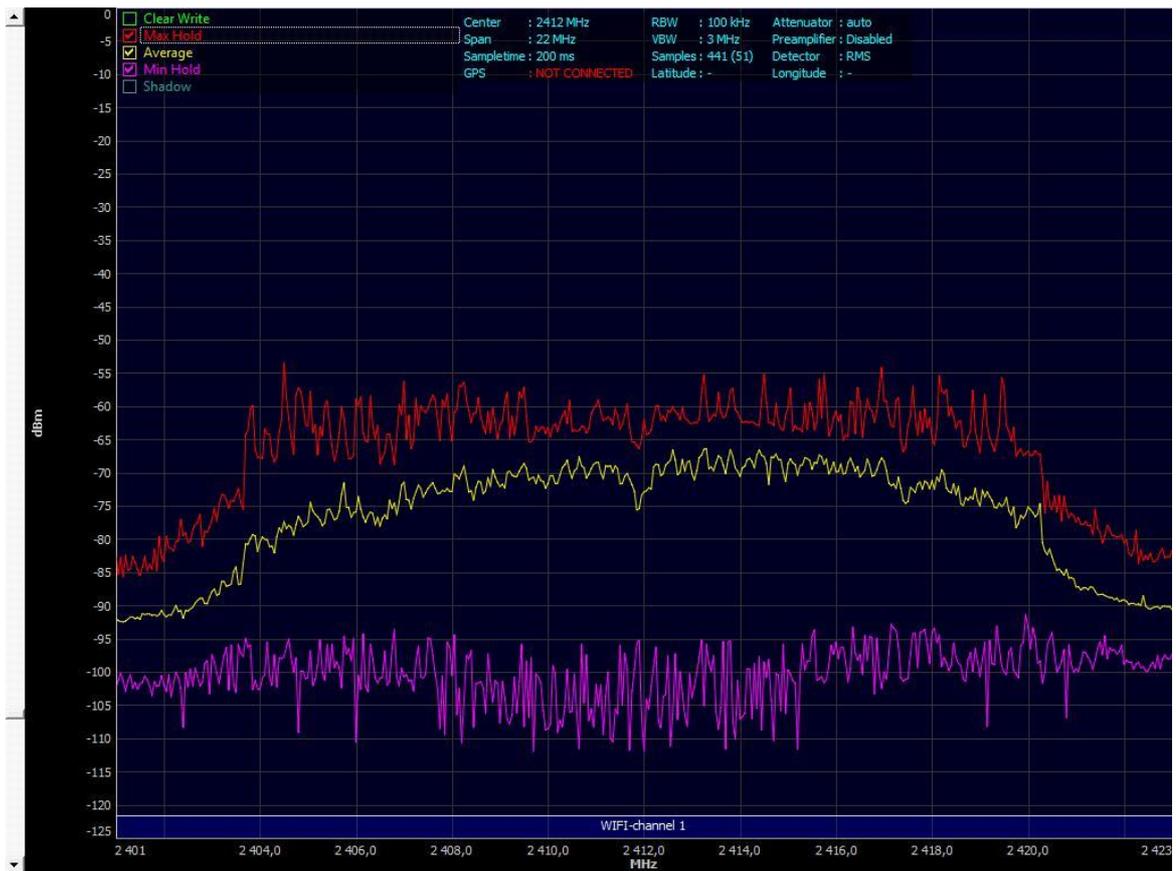


Figura B 4 Gráfico da análise espectral no canal 1 do Wifi (Rotação de 0°)

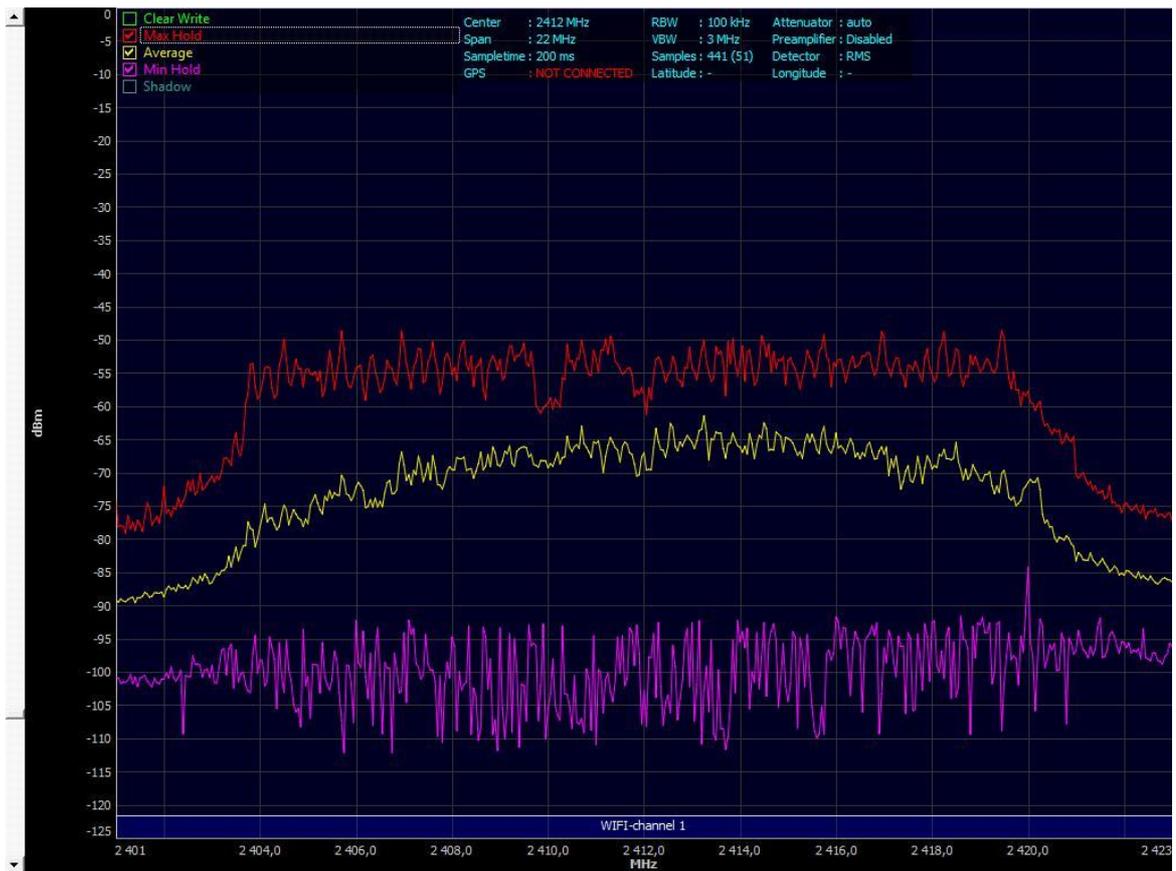


Figura B 5 Gráfico da análise espectral no canal 1 do Wifi (Rotação de 90°)

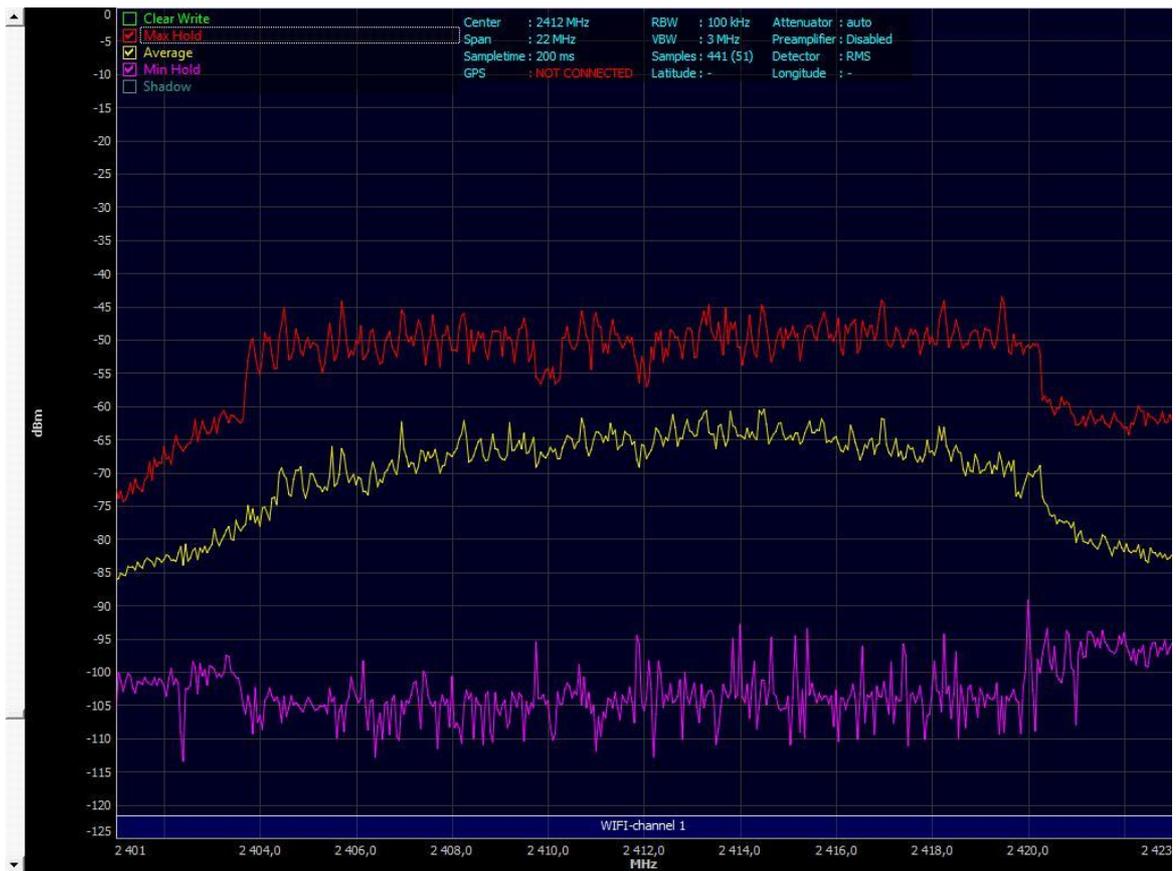


Figura B 6 Gráfico da análise espectral no canal 1 do Wifi (Rotação de 180°)



Figura B 7 Gráfico da análise espectral no canal 1 do Wifi (Rotação de 270°)

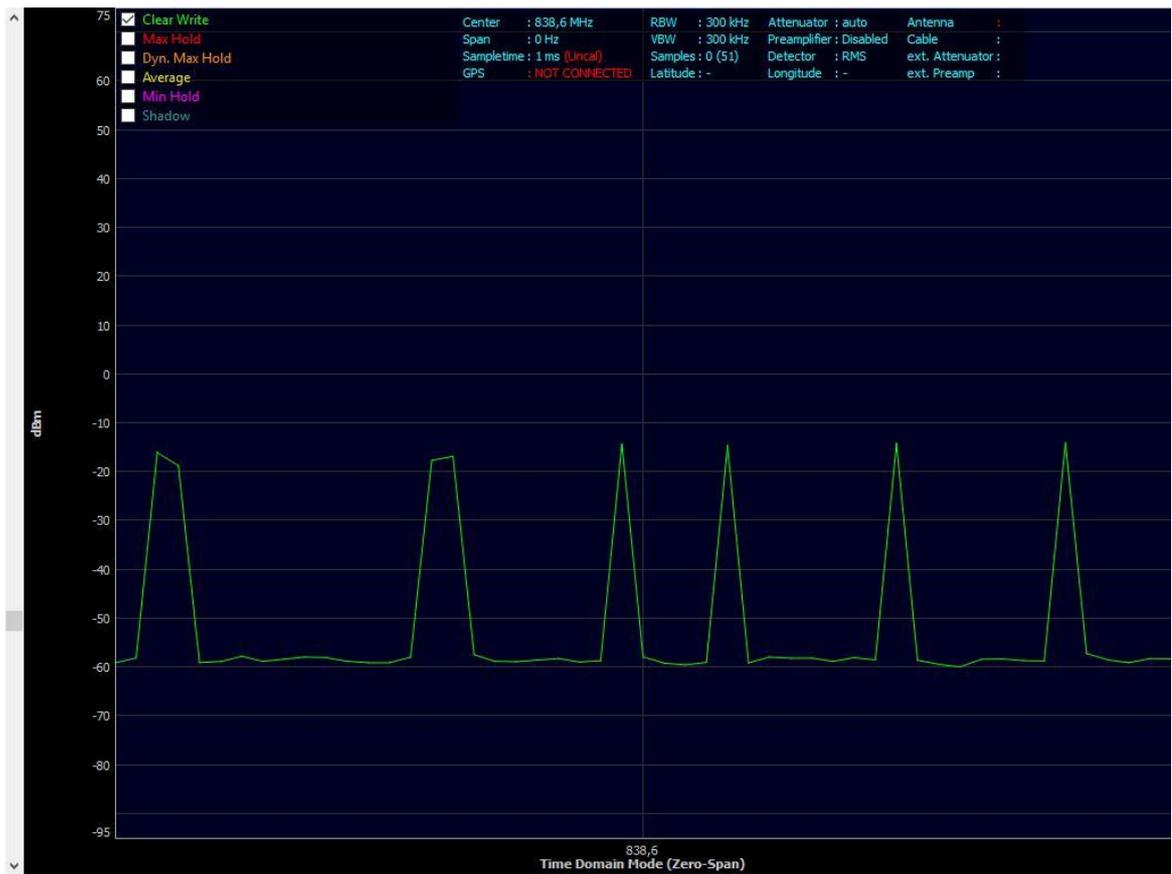


Figura B 8 Gráfico da análise espectral no domínio do tempo num canal GSM na frequência de 838,6 MHz (d = 120 cm)

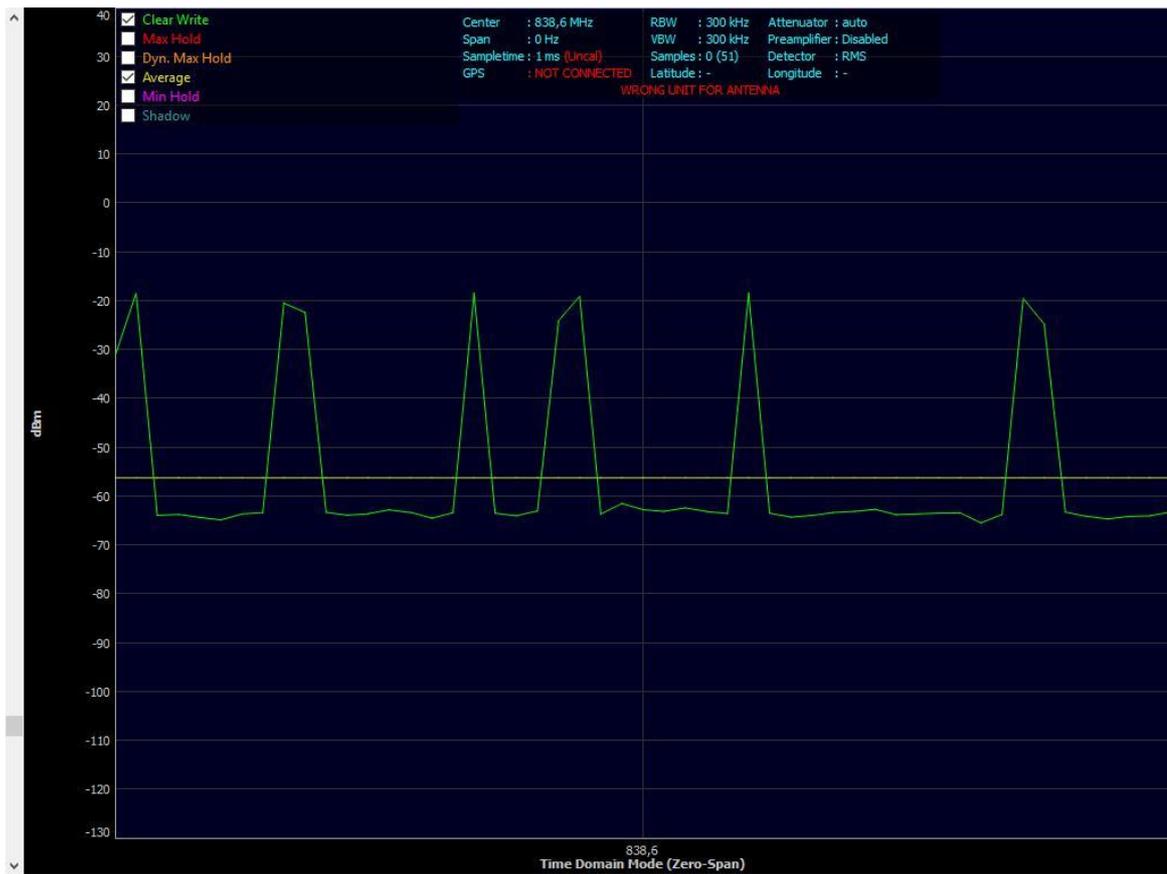


Figura B 9 Gráfico da análise espectral no domínio do tempo num canal GSM na frequência de 838,6 MHz (d = 155 cm)

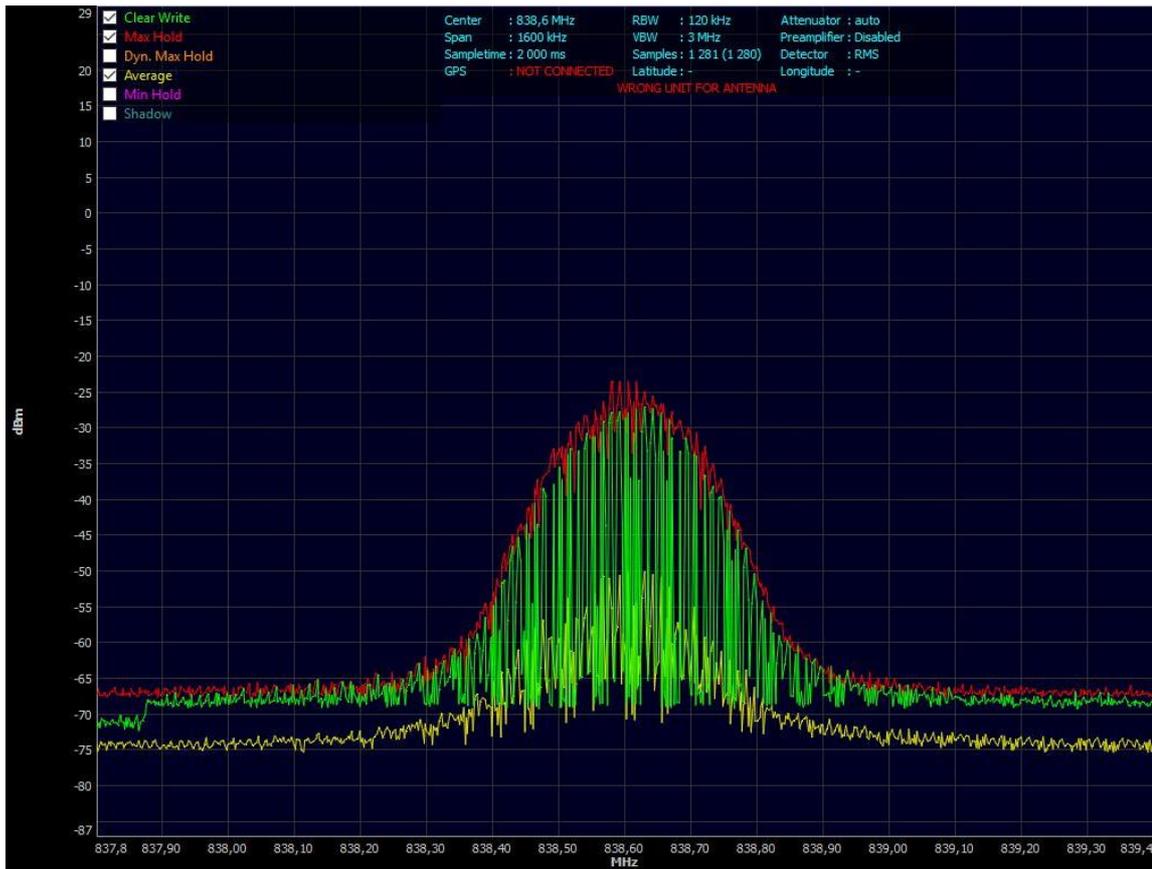


Figura B 10 Gráfico da análise espectral no domínio da frequência num canal GSM (d = 155 cm)

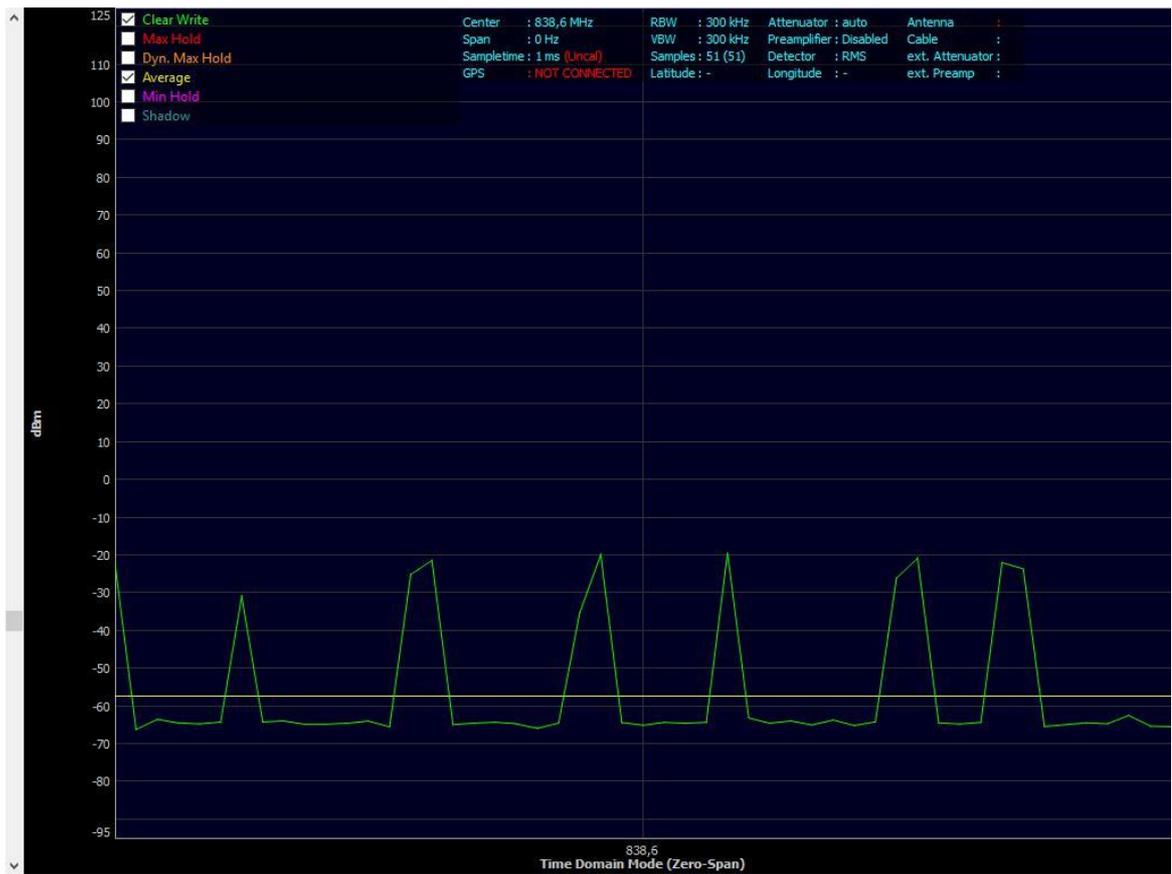


Figura B 11 Gráfico da análise espectral no domínio do tempo num canal GSM na frequência de 838,6 MHz (d = 191 cm)

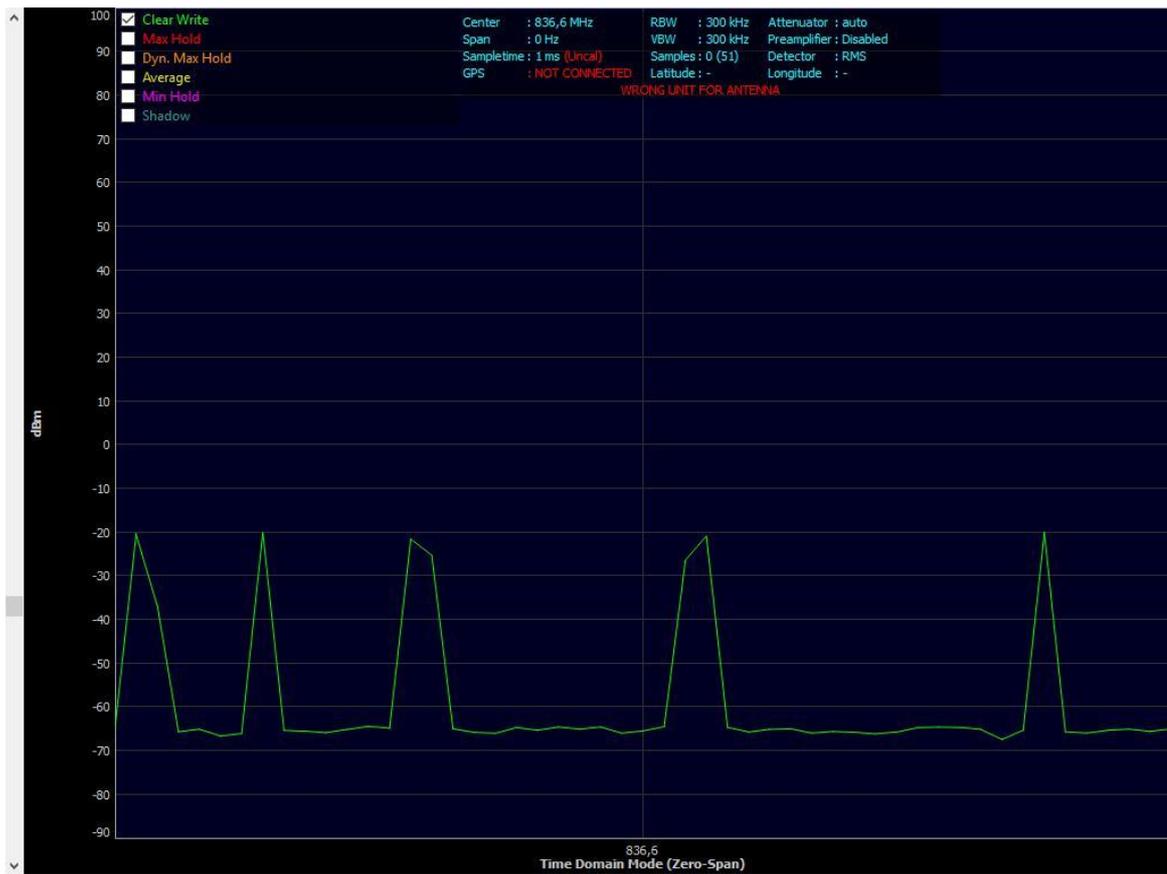


Figura B 12 Gráfico da análise espectral no domínio do tempo num canal GSM na frequência de 836,6 MHz (Rotação de 0°)

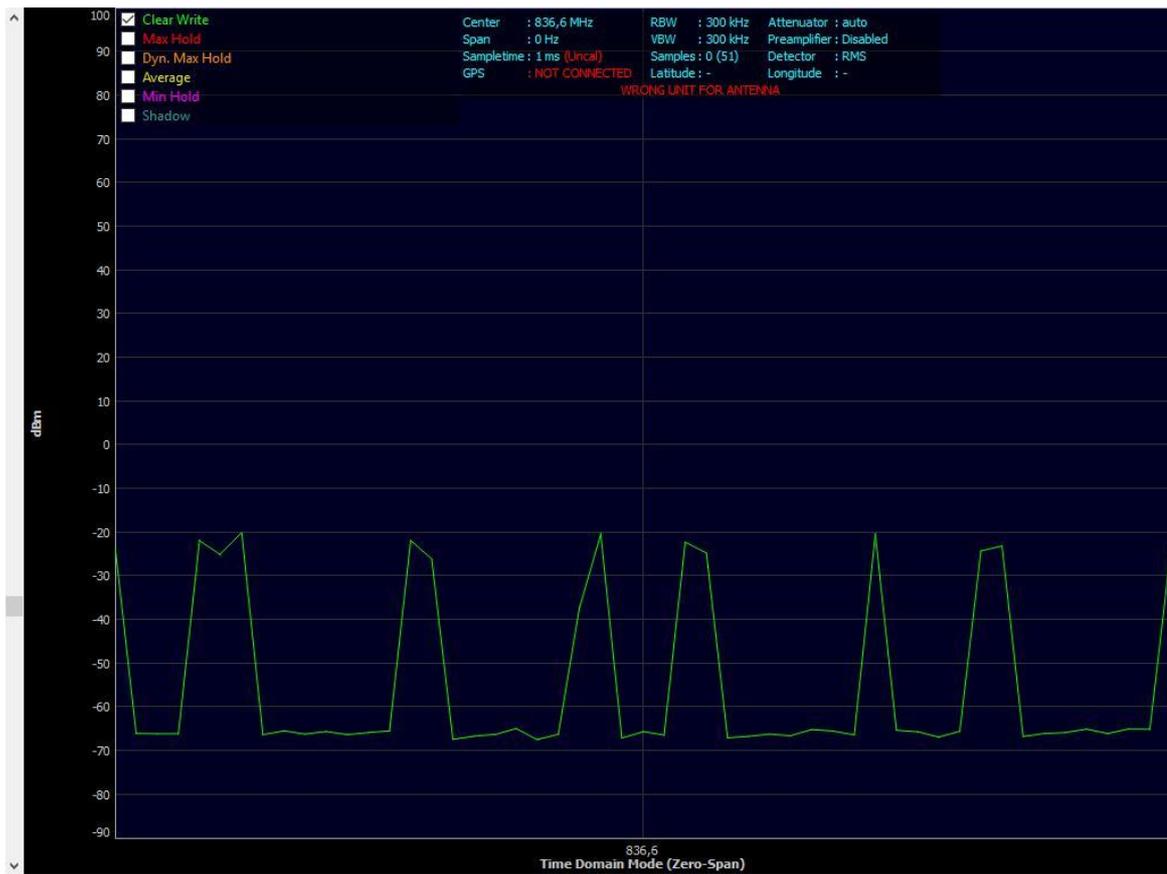


Figura B 13 Gráfico da análise espectral no domínio do tempo num canal GSM na frequência de 836,6 MHz (Rotação de 90°)

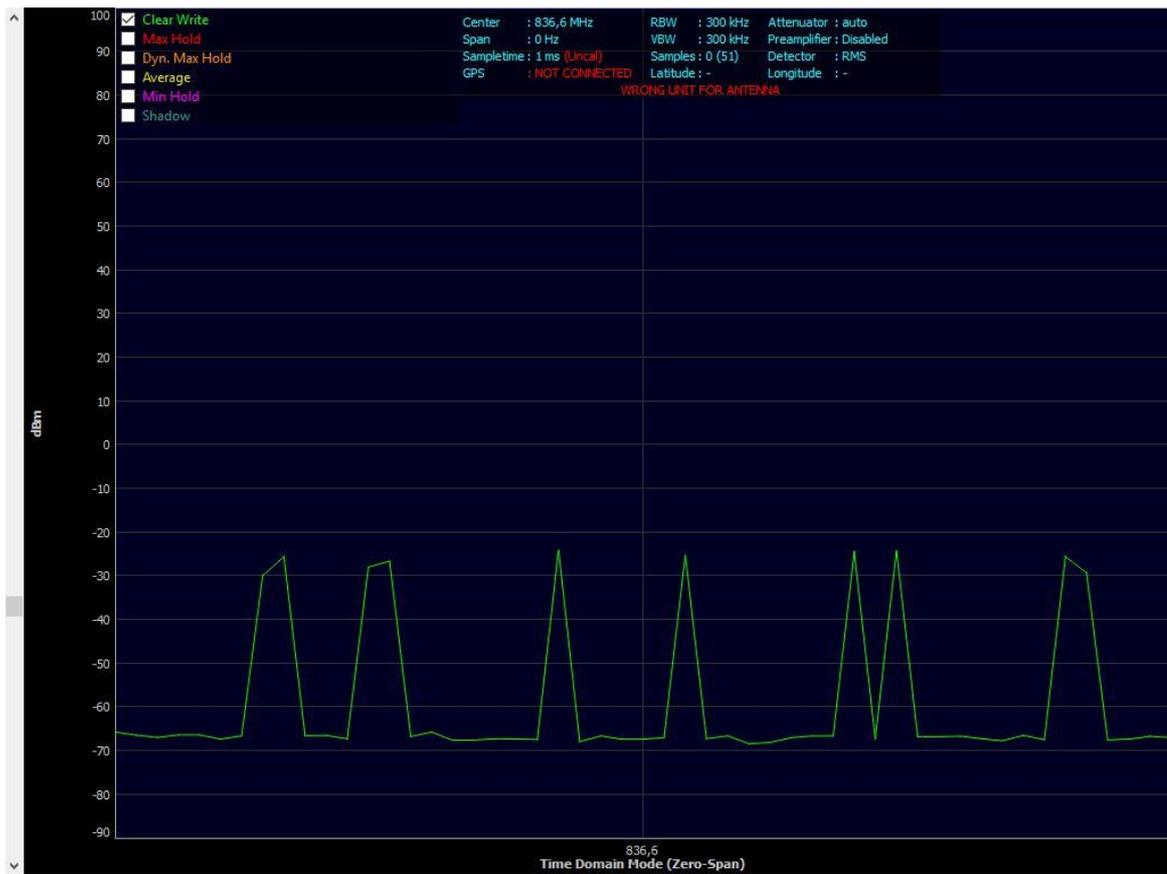


Figura B 14 Gráfico da análise espectral no domínio do tempo num canal GSM na frequência de 836,6 MHz (Rotação de 180°)

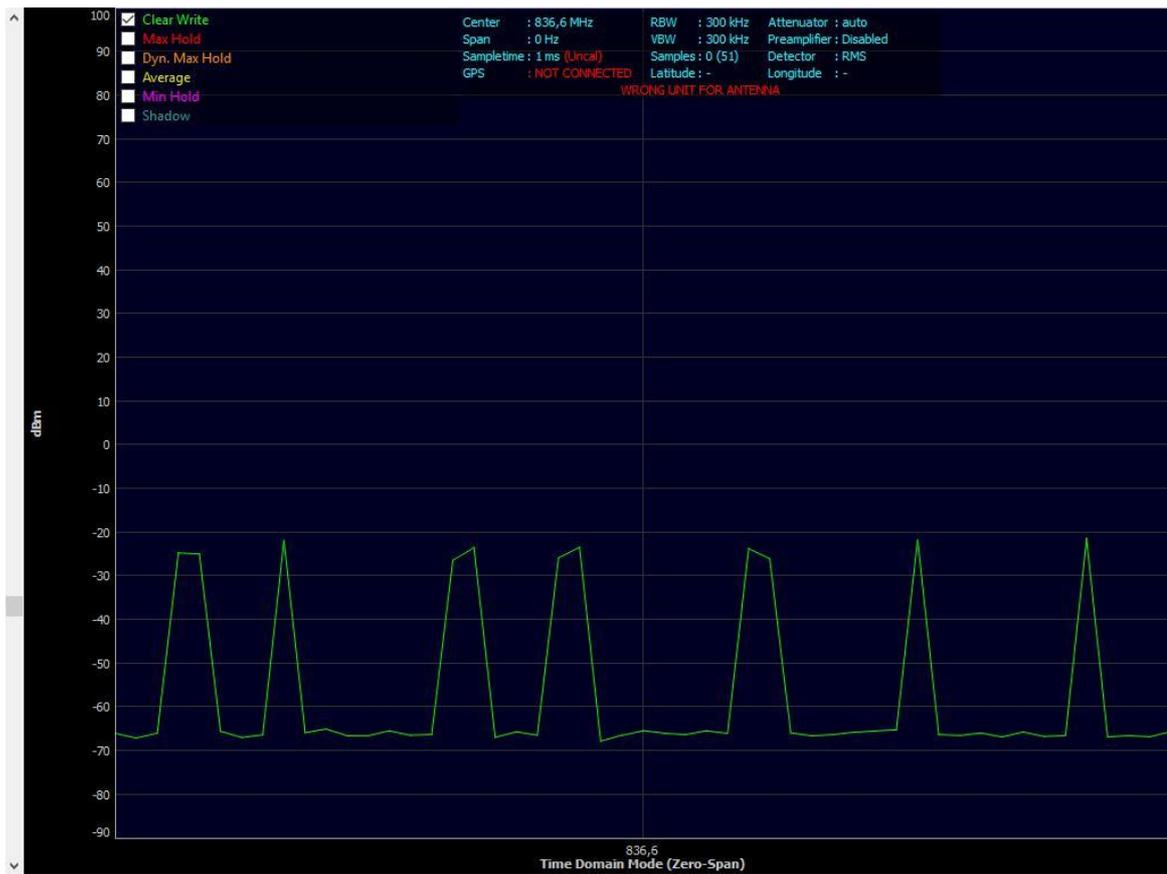


Figura B 15 Gráfico da análise espectral no domínio do tempo num canal GSM na frequência de 836,6 MHz (Rotação de 270°)



Figura B 16 Gráfico da análise espectral no domínio do tempo num canal DECT na frequência de 1882 MHz (d = 120 cm)



Figura B 17 Gráfico da análise espectral no domínio do tempo num canal DECT na frequência de 1882 MHz (d = 170 cm)



Figura B 18 Gráfico da análise espectral no domínio do tempo num canal DECT na frequência de 1882 MHz (d = 220 cm)

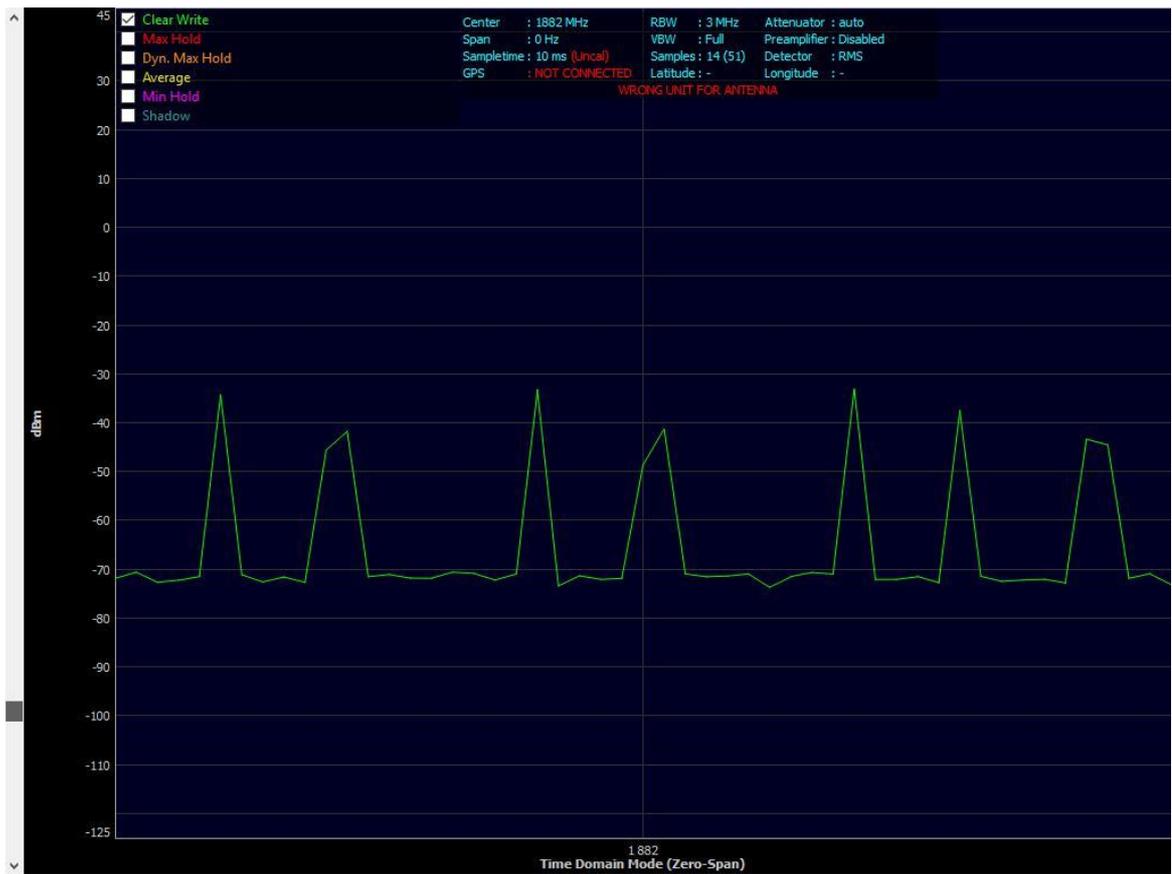


Figura B 19 Gráfico da análise espectral no domínio do tempo num canal DECT na frequência de 1882 MHz (Rotação de 0°)

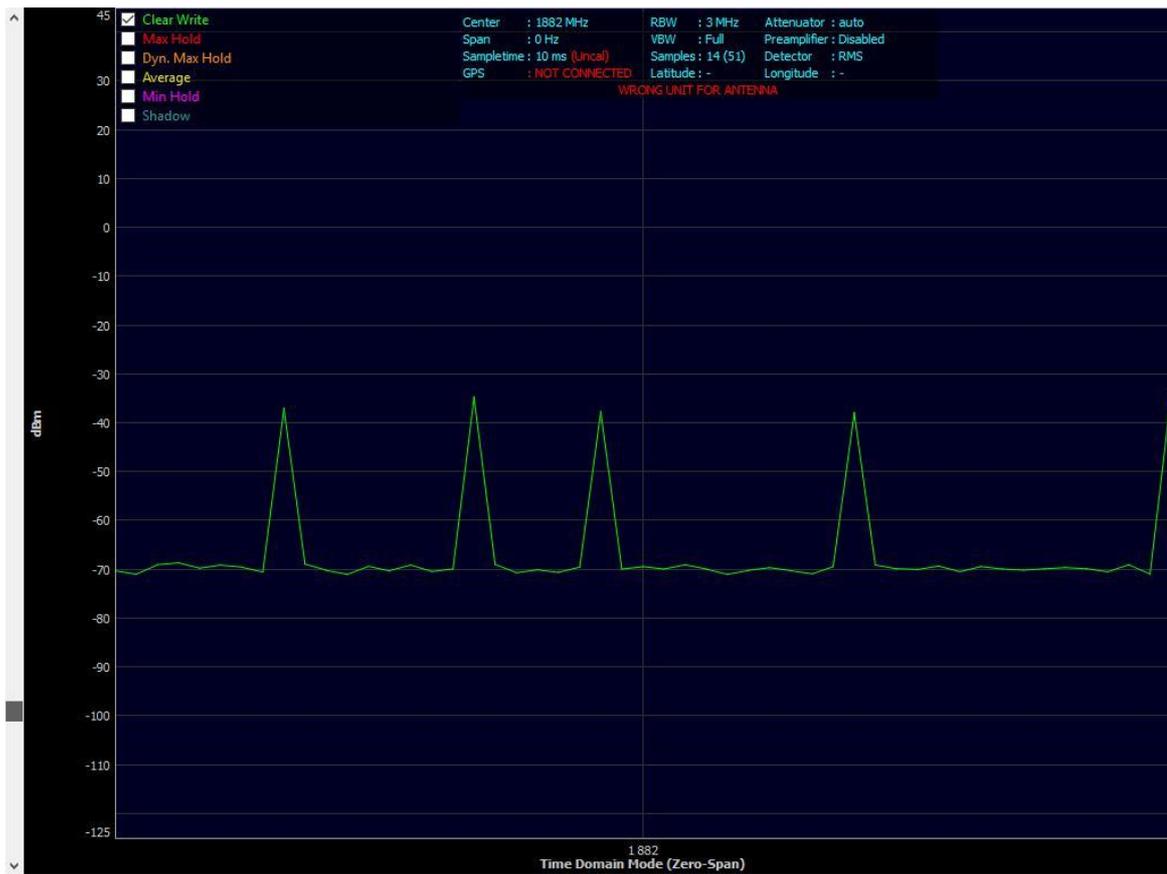


Figura B 20 Gráfico da análise espectral no domínio do tempo num canal DECT na frequência de 1882 MHz (Rotação de 90°)

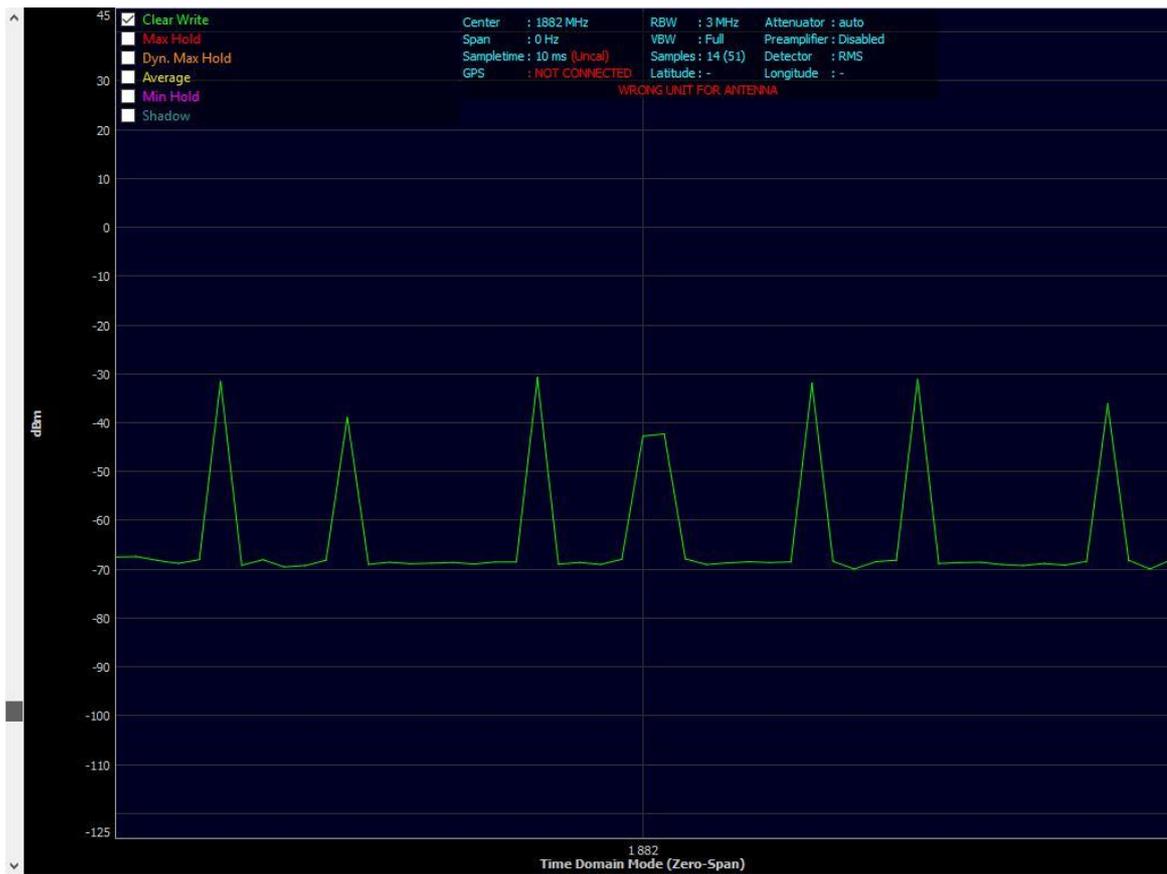


Figura B 21 Gráfico da análise espectral no domínio do tempo num canal DECT na frequência de 1882 MHz (Rotação de 180°)

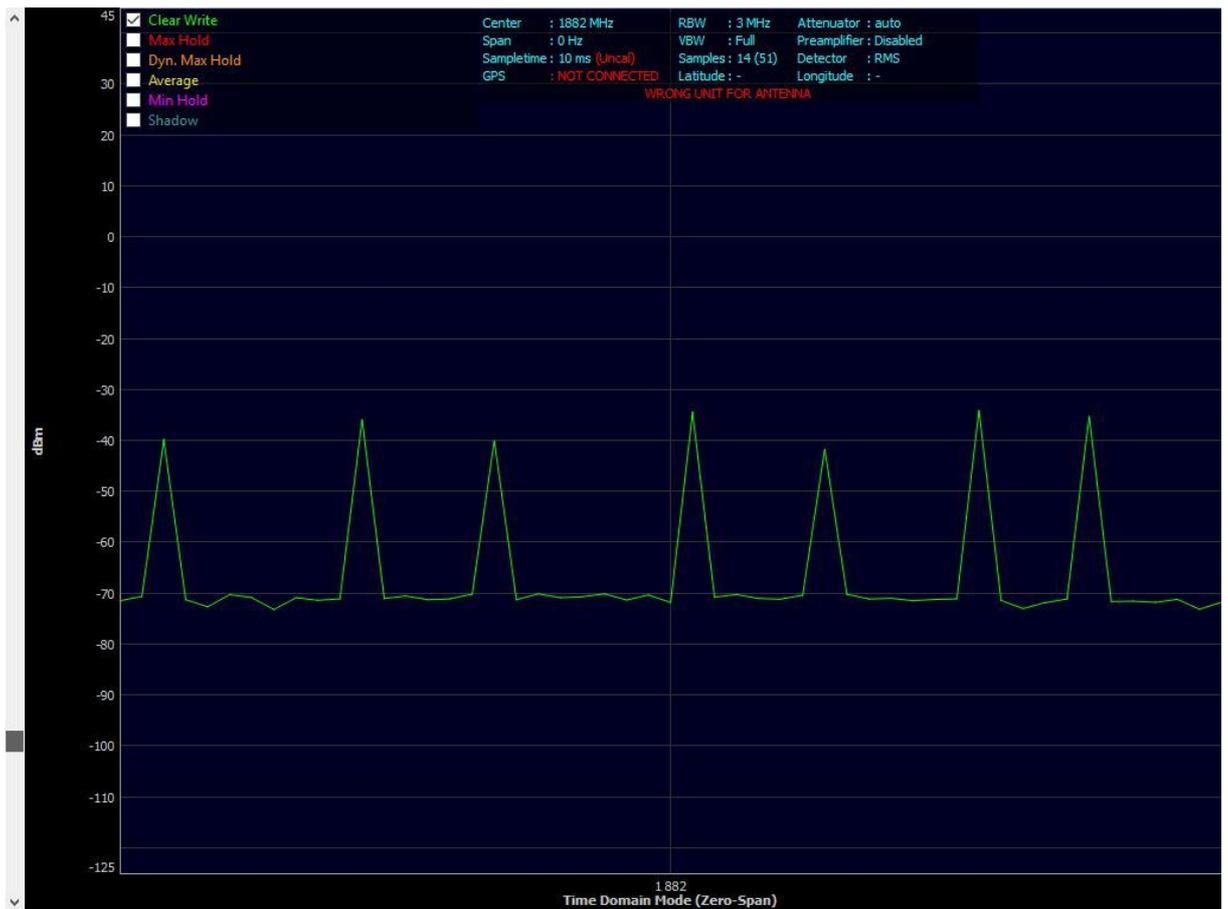


Figura B 22 Gráfico da análise espectral no domínio do tempo num canal DECT na frequência de 1882 MHz (Rotação de 270°)