



**UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR**  
Covilhã | Portugal

Optimização do Planeamento da Cobertura de  
Sistemas de Televisão Digital Terrestre em  
Portugal

**Luis da Silva Rodrigues**

(Licenciado)

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Electromecânica

Orientador: Professor Fernando José da Silva Velez

Junho de 2008



# Optimização do Planeamento da Cobertura de Sistemas de Televisão Digital Terrestre em Portugal

**Luis da Silva Rodrigues**

(Licenciado)

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Electromecânica

**Orientador:** Professor Fernando José da Silva Velez

**Departamento:** Engenharia Electromecânica

**Instituição:** Universidade da Beira Interior, Instituto de Telecomunicações

## **Agradecimentos**

Ao Professor Fernando José da Silva Velez pela sua dedicação, acompanhamento e incentivo ao longo da dissertação de mestrado, estando sempre disponível para ajudar e para oferecer todas as condições necessárias para a sua realização.

Ao meu colega de trabalho Engenheiro José Rola pela sua dedicação e incentivo estando sempre disponível para ajudar.

Aos meus colegas de trabalho que directa ou indirectamente me incentivaram e colaboraram, nomeadamente o Engenheiro Fernando Cruz, Engenheiro Júlio Sales, Engenheiro Filipe Varandas, Engenheiro José Filipe, Engenheiro Marques da Silva, José Delgado e António Nunes.

A toda a minha família pelo incentivo e compreensão da minha ausência em determinados momentos, em especial as minhas queridas filhas, esposa, pais e irmãos.

A todos aqueles que contribuíram directa ou indirectamente para a elaboração desta dissertação desejo ainda expressar o meu agradecimento.



## Resumo

Estando prevista a introdução da televisão digital terrestre em Portugal para os próximos anos, coloca-se o desafio de projectar o seu desenvolvimento, sendo os aspectos do planeamento de frequências e da cobertura fundamentais para a concepção de um sistema a nível nacional. Dado que em Portugal se irá utilizar *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (COFDM) 8K (6817 portadoras), com alcances máximos de cerca de 67 km por estação transmissora, neste trabalho, para além de se abordarem os aspectos globais da norma *Digital Video Broadcast* (DVB) e das suas variantes terrestre, por cabo, via satélite e móvel, abordam-se sistemas de difusão terrestres em particular, identificando-se as características do sistema que terão um forte impacto no planeamento, aspectos de cobertura DVB-T, atribuição e planeamento de frequências e ferramentas gráficas de planeamento recorrendo a sistemas de informação geográfica (SIG).

Obtiveram-se resultados do planeamento de uma rede DVB-T em SFN no modo 8K com COFDM em modulação 64-QAM para a área geográfica da Beira Interior, utilizando uma frequência que irá ficar disponível após o “switch-off”.

A tecnologia DVB dá um grande contributo para que no futuro se ocupe menos espectro radioeléctrico com mais e melhores serviços que os prestados actualmente com tecnologia analógica, tal contributo só é possível graças ao desenvolvimento de algoritmos complexos para compressão de vídeo e áudio a transmitir.

No planeamento da rede DVB-T Beira Interior chega-se à conclusão que o número de emissores e potências utilizadas são menores, comparando com o sistema analógico actual, conseguindo-se uma cobertura boa de 87% da população, cobertura aceitável de 95% da população e cobertura portátil interior na cidade da Covilhã.

### Palavras Chave:

DVB-T

Padrão H.264/AVC

OFDM

Planeamento

Cobertura.



## Abstract

As the introduction of terrestrial digital TV in Portugal is foreseen for the next years, the endeavour of designing its development needs to be faced, and the aspects of frequency and coverage are essential for the conception and deployment of a system with national availability.

As in Portugal the option is to use Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing (COFDM) 8K (6817 carriers), with maximum coverage ranges per Station around 68 km, in this work, besides the general aspects of Digital Video Broadcast (DVB) and its terrestrial, cable, satellite and mobile variants, one specifically addresses terrestrial broadcast systems in particular. The characteristics with the strongest impact in the planning process are identified, as well as DVB-T coverage aspects, frequency assignment and planning, and geographical information systems graphical planning tools issues (GIS).

Planning results were obtained for a DVB-T OFDM based network operating at Single Frequency Network (SFN), 8K mode, with 64-QAM modulation. The Beira Interior region was considered, and the frequency band that will be available for this Portuguese region after Switch-off of analog TV was considered.

DVB gives a strong contribute to the reduction of spectrum wastage in the television broadcast sector while providing more and better services support in comparison to analog TV. This advantage is only possible owing to the development of complex algorithms for the compression of video and audio content to be transmitted.

In the region of Beira Interior, Portugal, the number of transmitting stations and the transmitter powers are clearly lower than the ones for the today analog TV system. The following follows were achieved for the actual coverage of the population: “good” coverage of 87% of the population, acceptable coverage of 95% of the population and portable indoor coverage within the city of Covilhã.

Keywords:

DVB-T

H.264/AVC standard

OFDM

Planning

Coverage





# Índice

<b>Lista de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Siglas</b>	<b>xii</b>
<b>Capítulo 1 - Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação	1
1.2 Abordagem	5
1.3 Estrutura da Dissertação	6
<b>Capítulo 2 – Conceitos Básicos de Compressão de Vídeo;</b>	
<b>Padrão H.264/AVC</b>	<b>8</b>
2.1 Conceitos Básicos de Compressão de Vídeo	8
2.1.1 Espaço de Cores e Sub amostragem de Cores	8
2.1.2 Redundância de Dados na Representação de Vídeos	10
2.1.3 Modelo de Codificador/Decodificador de Vídeo	11
2.1.4 Métricas de Comparação	15
2.2 O Padrão H.264/AVC	17
2.2.1 História do Padrão	17
2.2.2 Terminologia	19
2.2.3 Perfis e Níveis	20
2.2.4 Formato de Dados Codificados	23
2.2.5 Núcleo do Codec H.264/AVC	23
2.2.6 Principais Desafios	26
<b>Capítulo 3 - Modulação</b>	<b>31</b>
3.1 Técnicas Básicas de Modulação em DVB	31
3.2 Modulação OFDM	33
<b>Capítulo 4 - Planeamento</b>	<b>40</b>
4.1 Parametrização	40
4.2 Planeamento de Uma Rede SFN Regional	42

4.2.1 Configuração da Rede	44
4.2.1.1 Modulação	44
4.2.1.2 Taxa de Código	45
4.2.1.3 Intervalo de Guarda	45
4.2.1.4 Modo de Funcionamento / Número de Portadoras	46
4.2.1.5 Modo de Sincronismo Entre as Estações de Difusão	47
4.2.1.5.1 Sincronização de Tempo	48
4.2.1.5.2 Sincronização de Frequência	48
4.2.1.5.3 Sincronização de Conteúdo	48
4.2.2 Cobertura Radioelétrica	49
4.2.3 Ferramenta de Planeamento	52
4.2.4 Estações de Emissão	57
4.3 Resultados de Cobertura da Rede DVB-T Beira Interior	58
 <b>Capítulo 5 - Conclusões</b>	 <b>74</b>
 <b>Referências</b>	 <b>76</b>
 <b>Bibliografia</b>	 <b>77</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Modelo inicial simplificado de codificador de vídeo	12
Figura 2.2 – Modelo completo simplificado de codificador de vídeo	14
Figura 2.3 – Modelo genérico de codificador de vídeo	15
Figura 2.4 – Perfis Baseline, Main, Extended e High do padrão H.264/AVC	22
Figura 2.5 – Diagrama de blocos de um codificador H.264/AVC	24
Figura 2.6 – Diagrama de blocos de um decodificador H.264/AVC	24
Figura 3.1 – Modulação em amplitude (ASK)	32
Figura 3.2 – Modulação de fase (PSK)	32
Figura 3.3 – Modulação em quadratura e amplitude (QAM)	32
Figura 3.4 – Constelação 64 – QAM	33
Figura 3.5 – Sistemas DVB	33
Figura 3.6 – Ortogonalidade das portadoras	34
Figura 3.7 – Intervalo de guarda	35
Figura 3.8 – Intervalo de guarda (exemplo)	35
Figura 3.9 – Intervalo de guarda e subportadoras em OFDM	36
Figura 3.10 – Padrão de inserção das SPS	38
Figura 4.1 – Cobertura DVB-T de âmbito distrital disponível após o “Switch-off”	43
Figura 4.2 – Sincronismo da rede SFN	47
Figura 4.3 – Classificação morfológica na área da grande Lisboa	50
Figura 4.4 – Densidade populacional na área da grande Lisboa “pequenas áreas”	51
Figura 4.5 – Densidade populacional na área da Beira Interior “pequenas áreas”	51
Figura 4.6 – Software de planeamento utilizado para a rede DVB-T Beira Interior	53
Figura 4.7 – Software de cálculo das antenas emissoras para a rede DVB-T Beira Interior	53
Figura 4.8 – Mapa da Beira Interior 1:500 000 com a identificação dos emissores	59
Figura 4.9 – Mapa de cobertura para resolução de DTM 500 metros por pixel, com probabilidade de 70% de localização, antena de receção exterior	60
Figura 4.10 – Dados da População com cobertura para resolução de DTM 500 metros por pixel, com probabilidade de 70% de localização, antena de receção exterior	60
Figura 4.11 – Mapa de cobertura sobre o mapa de distribuição da população para resolução de DTM 500 metros por pixel, com probabilidade de 70% de localização, antena de receção exterior	61

Figura 4.12 – Mapa de cobertura com a área de influência de cada emissor, para resolução de DTM 500 metros por pixel, com probabilidade de 70% de localização, antena de recepção exterior _____	62
Figura 4.13 – Dados da População com cobertura para resolução de DTM 100 metros por pixel, com probabilidade de 70% de localização, antena de recepção exterior_	63
Figura 4.14 – Mapa de cobertura para resolução de DTM 100 metros por pixel, com probabilidade de 95% de localização, antena de recepção exterior_____	63
Figura 4.15 – Dados da População com cobertura para resolução de DTM 100 metros por pixel, com probabilidade de 95% de localização, antena de recepção exterior_	64
Figura 4.16 – Dados da População com cobertura para resolução de DTM 500 metros por pixel, com probabilidade de 95% de localização, antena de recepção exterior_	64
Figura 4.17 – Mapa de cobertura para resolução de DTM 100 metros por pixel, com probabilidade de 85% de localização, antena portátil interior_____	65
Figura 4.18 – Dados da População com cobertura para resolução de DTM 100 metros por pixel, com probabilidade de 85% de localização, antena portátil interior_____	65
Figura 4.19 – Mapa de cobertura da cidade da Covilhã para resolução de DTM 100 metros por pixel, com probabilidade de 85% de localização, antena portátil interior__	66
Figura 4.20 – Dados gerais da antena da Gardunha _____	67
Figura 4.21 – Diagrama de cada painel elementar da antena da Gardunha _____	67
Figura 4.22 – Dados do sistema radiante da Gardunha_____	68
Figura 4.23 – Diagrama horizontal do sistema radiante da Gardunha _____	68
Figura 4.24 – Dados gerais da antena da Barroca Grande _____	69
Figura 4.25 – Diagrama de cada painel elementar da antena da Barroca Grande_____	69
Figura 4.26 – Dados do sistema radiante da Barroca Grande _____	70
Figura 4.27 – Diagrama horizontal do sistema radiante da Barroca Grande _____	70
Figura 4.28 – Dados gerais da antena do Mosteiro _____	71
Figura 4.29 – Diagrama de cada painel elementar da antena do Mosteiro _____	71
Figura 4.30 – Dados do sistema radiante do Mosteiro _____	72
Figura 4.31 – Diagrama horizontal do sistema radiante do Mosteiro _____	72

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Valores numéricos dos parâmetros OFDM para o modo 2K e 8K para um canal de LB de 8 MHz	37
Tabela 3.2 – Duração da parte do símbolo conforme o intervalo de guarda para o modo 2K e 8K para um canal de LB de 8 MHz	37
Tabela 3.3 – Índice de inserção das portadoras TPS	38
Tabela 3.4 – Índices de inserção das portadoras CPC	39
Tabela 3.5 – Débito binário (Mbit/s) versus modulação para canal com LB de 8 MHz	39
Tabela 4.1 – Resumo dos parâmetros técnicos a utilizar de acordo com a norma: ETSI EN 300 744 V1.5.1 (2004-11)	46
Tabela 4.2 – Valores medianos de intensidade mínima do campo eléctrico do canal 64 [814 – 822 MHz]	52
Tabela 4.3 – Estações emissoras utilizadas no planeamento	58
Tabela 4.4 – Cobertura terrestre da Beira Interior para o mux BI	66
Tabela 4.5 – Potência das estações emissoras	73

## **Lista de Siglas**

**ANACOM** – *Instituto das Comunicações de Portugal – Autoridade Nacional de Comunicações*

**ASK** – *Amplitude Shift Keying*

**ATSC** – *Advanced Television Systems Committee*

**AUS** – *Audio Video Coding Standard*

**B** – *Bi-predictive*

**CABAC** – *Context – Based Adaptive Binary Arithmetic Coding*

**CAVLC** – *Context – Based Adaptive Variable Length Coding*

**Cb** – *Chrominance blue*

**CDD** – *Centro de Difusão Digital*

**COFDM** – *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex*

**CPC** – *Continual Pilot Carriers*

**Cr** – *Chrominance red*

**DAB** – *Digital Audio broadcasting*

**DC** – *Direct Current*

**DCT** – *Discrete Cosine Transform*

**DPCM** – *Differential pulse Code Modulation*

**DTM** – *Digital Terrain Model*

**DVB** – *Digital Video Broadcasting*

**DVB-C** – *Digital Video Broadcasting - Cable*

**DVB-H** – *Digital Video Broadcasting - Handheld*

**DVB-S** – *Digital Video Broadcasting - Satellite*

**DVB-T** – *Digital Video Broadcasting - Terrestrial*

**EDTV** – *Enhanced Definition Television*

**ELG** – *European Launching Group*

**ETSI** – *European telecommunications Standards Institute*

**FRExt** – *Fidelity Range Extensions*

**GPS** – *Sistema de Posicionamento Global*

**H.264/AVC** – *A Video Coding Standard / Advanced Video Coding*

**H422P** – *High 4:2:2 Profile*

**H444P** – *High 4:4:4 Profile*

**HDTV** – *High Definition Television*

**Hi10P** – *High 10 Profile*

**HSI** – *Hue, Saturation, Intensity*

**I** – *Intra*

**INE** – *Instituto Nacional de Estatística*

**I-PCM** – *Intra – frame Pulse Code Modulation*

**ISDB** – *Integrated Services Digital Broadcasting*

**ISI** – *Inter – Symbol Interference*

**ISO/IEC** – *International Organization for Standardization / International Electrotechnical  
Comission*

**IUT-T** – *International Telecommunication Union - Telecommunication*

**JPEG** – *Joint Picture Experts Group*

**JVT** – *Joint Video Team*

**LB** – *Largura de Banda*

**LDTV** – *Limited Definition Television*

**MC** – *Motion Compensation*

**ME** – *Motion Estimation*

**MFN** – *Multi Frequency Network*

**MHP** – *Multimedia Home Platform*

**MIP** – *Mega-frame Identification Packet*

**MoU** – *Memorandum of Understanding*

**MPEG** – *Moving Picture Experts Group*

**MPML** – *Main Profile Main Level*

**MSE** – *Mean Squared Error*

**NAL** – *Network Abstraction Layer*

**OFDM** – *Orthogonal Frequency Division Multiplex*

**P** – *Predictive*

**PAR** – *Potência Aparente Radiada*

**PSK** – *Phase Shift Keying*

**PSNR** – *Peak Signal – to – Noise – Ratio*

**Q** – *Direct Quantization*

**$Q^{-1}$**  – *Inverse Quantization*

**QAM** – *Quadrature Amplitude Modulation*

**QP** – *Quantization Parameter*



**RGB** – *Red, Green, Blue*  
**RRC-06** – *Regional Radiocommunication Conference – 2006*  
**SDTV** – *Standard Definition Television*  
**SFN** – *Single Frequency Network*  
**SI** – *Switching I*  
**SNR** – *Signal to Noise Ratio*  
**SP** – *Switching P*  
**SPS** – *Scattered Pilot cells*  
**T** – *Direct Transform*  
**T<sup>-1</sup>** – *Inverse Transform*  
**TDT** – *Televisão Digital Terrestre*  
**TPS** – *transmission Parameter Signaling*  
**TV** – *Televisão*  
**UHF** – *Ultra – High Frequency*  
**UIT** – *Union International Telecommunication*  
**VCEG** – *Video Coding Experts Group*  
**VCL** – *Video Coding Layer*  
**VCO** – *Voltage Controlled Oscillator*  
**VHF** – *Very – High Frequency*  
**WGS84** – *World Geodetic System 1984*  
**Y** – *Luminance*

# Capítulo 1 – Introdução

## 1.1 Motivação

Em meados da década de 1980 a possibilidade de difusão digital de televisão era considerada uma realidade muito longe de ser alcançada. O principal motivo para este pensamento era a necessidade de se ter taxas de transmissão consideradas elevadas, entre 108 Mbit/s a 207 Mbit/s, para não ser necessário o uso da codificação.

Além das limitações tecnológicas, a *Televisão* (TV) digital teve que disputar o seu espaço de implantação com a *High Definition TV* (HDTV). O conceito que se tem de TV digital confundiu-se com o de HDTV. Enquanto a HDTV tinha a preocupação de melhorar a imagem através da alta definição a TV digital estava focada em aumentar o número de canais, programas e serviços disponíveis. Contudo, ainda não havia sido encontrada a solução tecnológica para que tal fosse possível.

Verifica-se, então, no início dos anos 90, a rápida evolução de algoritmos de compressão de dados que atingem níveis (de compressão) elevados para a transmissão de imagens digitais. Foi com o surgimento de tecnologias como o *Joint Picture Experts Group* (JPEG), para a fotografia e o *Moving Picture Experts Group* (MPEG) para imagens em movimento que a imagem e o vídeo digitais se começaram a afirmar.

Os equipamentos tornaram-se acessíveis para o desenvolvimento da TV digital e, por outro lado, começou-se a perceber que o preço dos receptores de HDTV não iriam atingir rapidamente um nível de preço acessível ao consumidor. Por estas razões e pelo facto de os consumidores estarem interessados no conteúdo e no número de programas oferecidos, intensificaram-se as pesquisas acerca dos sistemas de transmissão de TV digital. Hoje em dia todo um sistema completo de televisão, que é composto fundamentalmente por três componentes, (estúdio, transmissão e recepção de TV) pode ser digitalizado, ou seja, a imagem, o áudio e demais informações são geradas, transmitidas e recebidas na forma de sinais digitais.

Em 1991, foi constituído o *European Launching Group* (ELG). O ELG tinha como função definir e normalizar um sistema de transmissão digital de televisão na Europa. Em Setembro de 1993, foi criado o *Digital Video Broadcasting* (DVB), baseado no *Main Profile Main Level*

(MPML) da norma internacional de compressão MPEG-2. De modo a englobar todos os meios de transmissão de televisão, o DVB tinha os seguintes objectivos iniciais [1]:

- Difusão digital de vídeo de alta qualidade (até HDTV);
- Difusão com boa qualidade de programas através de canais de banda estreita e/ou aumentar o número de programas nos canais actuais;
- Recepção em terminais de bolso equipados com pequenas antenas de recepção (recepção portátil);
- Recepção móvel de programas de televisão com boa qualidade;
- Possibilidade de transmissão simples através de várias redes de telecomunicações e integração com o mundo dos computadores.

Verificou-se, após 1993, uma expansão do ELG-DVB que passou a incluir os maiores grupos interessados no sector audiovisual na Europa (radiodifusão pública e privada, indústria electrónica, operadores de rede e reguladores). O ELG-DVB começou a elaborar o *Memorandum of Understanding* (MoU), no qual se estipulavam as regras a utilizar no desenvolvimento e harmonização do DVB [7]. O MoU foi o ponto de partida para a unificação de muitos interesses, significando que interesses comerciais rivais precisavam de ter em consideração requisitos e objectivos comuns.

O DVB juntou os maiores interesses televisivos europeus num único grupo, com o intuito de desenvolver um sistema completo de Televisão Digital. Tornou-se claro que o satélite e o cabo iriam fornecer os primeiros serviços de Televisão Digital. Menos problemas técnicos e uma fácil normalização das suas especificações, levaram a que estes se desenvolvessem mais rapidamente que o sistema terrestre. Porém, foi através do sistema terrestre que o DVB se estabeleceu plenamente.

No ano de 1997, o desenvolvimento do projecto DVB tinha atingido os seus objectivos iniciais, dando origem às seguintes normas de transmissão DVB:

- *Digital Video Broadcasting – Satellite* (DVB DVB-S e DVBS2);
- *Digital Video Broadcasting – Cable* (DVB DVB-C);
- *Digital Video Broadcasting – Terrestrial* (DVB DVB-T).

Pouco tempo depois apareceu o cenário da Televisão Digital Interactiva - *Multimedia Home Platform* (MHP) com ferramentas (middleware) que permitem usar uma única set-top box para todos os serviços e aplicações, posteriormente *Digital Video Broadcasting – Handheld* (DVB-H).

Para além do DVB existem outros sistemas de TV Digital, como por exemplo:

- O *Advanced Television Systems Committee* (ATSC) – patrocinado pelos EUA;
- O *Integrated Services Digital Broadcasting* (ISDB) – patrocinado pelo Japão;
- O *Audio Video Coding Standard* (AUS) – patrocinado pela China;
- O *Sistema Brasileiro de TV Digital* (SBTVD).

À semelhança do que já está a acontecer noutros países Europeus, em Portugal irá introduzir-se a *Televisão Digital Terrestre* (TDT) nos próximos anos (2008-2010), o que motiva que a normalização internacional e Europeia passe gradualmente a ser adoptada a nível nacional, definindo-se regras e realizando-se o concurso para a rede de distribuição da TDT. A consulta pública para a DVB-T, que terminou em 15 de Outubro de 2007, tinha como objectivo definir:

- A atribuição de frequências;
- O regulamento do multiplexer de canais em sinal aberto;
- O regulamento dos multiplexers de canais por assinatura;
- A capacidade remanescente do multiplexer de canais em sinal aberto.

Após a Consulta Pública, e da publicação da Resolução de Conselho de Ministros nº 12/2008, de 22 de Janeiro, que determina o destino da capacidade de espectro radioeléctrico remanescente no Multiplexer A, associado ao concurso público para a atribuição de um direito de utilização de frequências de âmbito nacional para o serviço de radiodifusão televisiva digital terrestre, foi publicado na II Série do Diário da República de 25 de Fevereiro de 2008 em Suplemento o Regulamento nº95-A/2008 (doravante também designado por **Regulamento do Concurso Mux A**), aprovado pelo *Instituto das Comunicações de Portugal–Autoridade Nacional de Comunicações* (ICP-ANACOM), por deliberação de 30 de Janeiro [2].

O concurso rege-se pelas disposições constantes da Lei n.º 5/2004, de 10 de Fevereiro, do Regulamento n.º 95-A/2008, de 25 de Fevereiro, e do caderno de encargos aprovado pelo ICP-ANACOM, por deliberação de 30 de Janeiro [2].

Em Simultâneo, foi publicada, na I série do Diário da República, a Portaria n.º207-A/2008, de 25 de Fevereiro, que aprova o Regulamento do Concurso público para atribuição de direitos de utilização de frequências de âmbito nacional e parcial para o serviço de radiodifusão televisiva digital terrestre e de licenciamento de operador de distribuição (doravante também designado por **Regulamento do Concurso Muxes B a F**) [2].

No âmbito dos concursos para 6 multiplexers, um Mux para sinal aberto (Mux A) e 5 Muxes (B, C, D, E, e F) para canais com assinatura.

As frequências a utilizar no Continente e nas Regiões Autónomas para a realização da cobertura de âmbito nacional em *Single Frequency Network* (SFN) relativa ao multiplexer A são as seguintes:

- **Território Continental**

Canal 67 [838-846 MHz]

- **Região Autónoma dos Açores**

Canal 47 [678-686 MHz] (Ilha de São Jorge)

Canal 56 [750-758 MHz] (Ilha do Pico)

Canal 61 [790-798 MHz] (Ilhas de São Miguel e Graciosa)

Canal 64 [814-822 MHz] (Ilha do Faial)

Canal 67 [838-846 MHz] (Ilhas da Terceira, Santa Maria, Flores e Corvo)

- **Região Autónoma da Madeira**

Canal 67 [838-846 MHz]

As frequências a utilizar no Continente e nas Regiões Autónomas para a realização das coberturas relativas aos multiplexers B, C, D, E e F em *Multi-frequency Network* (MFN) são as seguintes:

- **Território Continental**

*Âmbito Nacional*

MUX B - Canal 69 [854-862 MHz]

MUX C - Canal 60 [782-790 MHz]

*Âmbito Parcial*

MUX D - Canal 65 [822-830 MHz]

MUX E - Canal 66 [830-838 MHz]

MUX F - Canal 68 [846-854 MHz]

A zona passível de cobertura destes 3 multiplexers D, E e F comporta a área litoral do território continental até cerca de 80 km da fronteira, devendo ser assegurado que no território Espanhol o campo interferente não ultrapasse 22dBµV/m, 10 metros de altura.

- **Região Autónoma dos Açores**

MUX B - Canal 48 [686-694 MHz] (Ilha de São Jorge)

- Canal 57 [758-766 MHz] (Ilha do Pico)

- Canal 62 [798-806 MHz] (Ilhas de São Miguel e Graciosa)
- Canal 65 [822-830 MHz] (Ilha do Faial)
- Canal 68 [846-854 MHz] (Ilhas da Terceira, Santa Maria, Flores e Corvo)

MUX C - Canal 49 [694-702 MHz] (Ilha de São Jorge)

- Canal 58 [766-774 MHz] (Ilha do Pico)
- Canal 63 [806-814 MHz] (Ilhas de São Miguel e Graciosa)
- Canal 66 [830-838 MHz] (Ilha do Faial)
- Canal 69 [854-862 MHz] (Ilhas da Terceira, Santa Maria, Flores e Corvo)

- **Região Autónoma da Madeira**

MUX B - Canal 63 [806-814 MHz]

MUX C - Canal 69 [854-862 MHz]

## 1.2 Abordagem

Neste contexto, os aspectos de normalização, planeamento de frequências (e cobertura), instalação, operação e manutenção da TDT, através da norma Digital, DVB-T, ganham um interesse crescente para os operadores (de televisão, de telecomunicações, etc.).

A necessidade de se realizar investigação e desenvolvimento em aspectos de planeamento de frequências para TDT em Portugal está a ganhar portanto especial relevância, o que motiva a realização da investigação para esta dissertação de Mestrado. Este interesse crescente também é partilhado por operadores móveis, por exemplo, na perspectiva da introdução do DVB-H, e por operadores de radiodifusão em geral, por exemplo, com a introdução do *Digital Audio Broadcasting* (DAB).

A TDT proporciona uma maior racionalidade do espectro radioelétrico, mais canais e serviços, interactividade, personalização, robustez a erros, qualidade de imagem e som, fácil processamento, mais próximo do computador, fácil multiplexagem, fácil encriptação e possibilidade de regeneração [1].

Os requisitos para a TV Digital terrestre são os seguintes:

- Recepção fixa, portátil e móvel;
- Imunidade a multi-percursos;
- Implementação de redes de frequência única (SFN);
- Flexibilidade de configuração;

- Resistência a interferências provocadas pelos serviços analógicos;
- Facilidade de transcodificação para e de outros meios de transmissão (satélite, cabo, fibra óptica);
- Baixo custo dos receptores.

As especificações DVB e também normas *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) especificam todos os módulos da cadeia de difusão que necessitam de uma definição normativa, quer usando normas desenvolvidas por outros organismos de normalização, quer desenvolvendo especificações próprias [1].

Os principais módulos especificados são [1]:

- A codificação de áudio e vídeo – MPEG-2; foca-se neste trabalho o MPEG-4 Parte 10 do *Advanced Video Coding / A Video Coding Standard* (AVC/H.264);
- A sincronização e multiplexagem;
- A codificação de canal;
- A modulação;

No contexto do planeamento existem dois cenários independentes, um tem a ver com a actual situação em que existe difusão de sinal televisivo analógico, em que existem algumas frequências disponíveis em VHF e UHF, para se proceder ao concurso público para a TDT, que está actualmente a decorrer (ano 2008). O outro cenário é colocado após o fim da difusão de sinal televisivo analógico, cenário também conhecido como “switch-off”, que irá ter lugar até ao ano de 2012. Após o “switch-off” ter-se-á um espectro radioelétrico disponível muito diferente do actual. Neste contexto haverá uma redistribuição do espectro radioelétrico para vários serviços, tais como o DVB-T regional de âmbito distrital, o DAB, o DVB-H e mesmo a possível atribuição de espectro a serviços de telecomunicações. O planeamento realizado nesta dissertação insere-se no segundo cenário, utilizando-se uma frequência distrital que fica disponível para o efeito após o “switch-off”.

### **1.3 Estrutura da Dissertação**

O texto da presente dissertação está organizado em cinco capítulos.

Após o primeiro capítulo onde se descreve a motivação e abordagem da dissertação, com grande ênfase do concurso da TDT em Portugal e frequências a utilizar, o capítulo 2 descreve os conceitos básicos de compressão de vídeo, com ênfase no padrão H.264/AVC.

O capítulo 3 descreve os tipos de modulação empregues na tecnologia DVB, nomeadamente a

modulação COFDM, realçando-se a norma “ETSI EN 300 744 V.15.1 (2004-11)”, tendo em atenção a sua importância para a realização desta dissertação.

O capítulo 4 é dedicado ao planeamento de uma rede DVB-T em SFN na região da Beira Interior e evidencia a aplicabilidade da norma “ETSI EN 300 744 V.15.1 (2004-11)”.

O capítulo 5 apresenta as conclusões da dissertação.



## Capítulo 2 - Conceitos Básicos de Compressão de Vídeo;

### Padrão H.264/AVC

#### 2.1 Conceitos Básicos de Compressão de Vídeo

##### 2.1.1 Espaço de Cores e Sub amostragem de Cores

A representação digital de um vídeo colorido está associada à interpretação das cores pelo sistema visual humano. O sistema humano de visão possui elementos sensíveis à luz chamados bastonetes e cones. Os bastonetes são utilizados para visão noturna e apresentam um elevado ganho, mas captam imagens com baixa resolução, ou seja, com pouco nível de detalhes. Por outro lado, os cones são sensíveis às cores vermelho, verde, azul e amarelo e são capazes de identificar detalhes de elevada resolução, mas precisam de maior luminosidade para o seu funcionamento. As saídas dos cones são pré-processadas por camadas de neurónios presentes na própria retina, logo acima da dos cones. Esta camada de neurónios codifica a imagem num canal de luminância (tons de cinza) e dois canais de crominância, um para gerar vermelho e verde e outro para gerar azul e amarelo. O sistema visual humano é capaz de discernir milhares de cores distintas a partir de combinações de intensidades diferentes das cores captadas pelos cones. Por outro lado, o sistema visual humano consegue distinguir mais do que cinco dúzias de tons de cinza, que indicam a intensidade luminosa da imagem (luminância) [3].

Existem várias formas de representar as cores de forma digital. Um sistema para representar cores é chamado de espaço de cores e a definição do espaço de cor a ser utilizado para representar um vídeo é essencial para a eficiência da codificação desse vídeo.

São vários os espaços de cores usados para representar imagens digitais, tais como [4]: *Red, Green, Blue* (RGB); *Hue, saturation, Intensity* (HSI) e *Luminance, Chrominance blue, Chrominance red* (YCbCr). O espaço de cores RGB é um dos mais comuns e conhecidos, tendo em vista que é este o espaço de cores utilizado nos monitores coloridos para interacção computador - utilizador. O RGB representa, em três matrizes distintas, as três cores primárias captadas pelo sistema visual humano: vermelho, verde e azul.

No espaço de cores YCbCr, as três componentes utilizadas são luminância (Y), que define a intensidade luminosa ou o brilho, a crominância azul (Cb) e a crominância vermelha (Cr).

Os componentes R, G e B possuem um elevado grau de correlação, o que não é desejável do ponto de vista da compressão de vídeos. Por isso, a compressão é aplicada para espaços de

cores do tipo luminância e croma, como o YCbCr [4]. Outra vantagem do espaço de cor YCbCr sobre o espaço RGB é a seguinte: no espaço YCbCr, a informação de cor está completamente separada da informação de brilho. Deste modo, estas informações podem ser tratadas de forma diferenciada pelos codificadores de imagens estáticas e de vídeos.

O sistema visual humano é mais sensível a informações de luminância do que a informações de croma. Então, os padrões de compressão de imagens estáticas e vídeos podem explorar esta característica humana para aumentar a eficiência de codificação através da redução da taxa de amostragem dos componentes de croma em relação aos componentes de luminância [4]. Esta operação é chamada de sub-amostragem de cores e é realizada sob o espaço de cores YCbCr, nos padrões de compressão de vídeo actuais.

Existem várias formas de relacionar os componentes de croma com o componente de luminância para realizar a sub amostragem. Os formatos mais comuns são o 4:4:4, o 4:2:2 e o 4:2:0. No formato 4:4:4, para cada quatro amostras de Y, existem quatro amostras de Cb e quatro amostras de Cr. Por isso, os três componentes de cor possuem a mesma resolução e existe uma amostra de cada elemento de cor para cada pixel da imagem e, assim, a sub amostragem não é aplicada. No formato 4:2:2, para cada quatro amostras de Y na direcção horizontal, existem apenas duas amostras de Cb e duas amostras de Cr. Neste caso, as amostras de croma possuem a mesma resolução vertical das amostras de luminância, mas possuem metade da resolução horizontal. No formato 4:2:0, para cada quatro amostras de Y, existe apenas uma amostra de Cb e uma amostra de Cr. Neste caso, as amostras de croma possuem metade da resolução horizontal e metade da resolução vertical do que as amostras de luminância. A nomenclatura 4:2:0 é usada por motivos históricos, pois os números não representam a relação lógica entre os componentes de cor [5].

A sub-amostragem de cor aumenta significativamente a eficiência da codificação, uma vez que parte da informação da imagem é simplesmente descartada, sem causar impacto visual perceptível.

Considerando o formato 4:2:0 como exemplo, uma vez que cada componente de croma possui exactamente um quarto das amostras presentes no componente de luminância, então um vídeo YCbCr no formato 4:2:0 irá utilizar exactamente a metade das amostras necessárias para um vídeo RGB ou YCbCr no formato 4:4:4. Isso implica que iremos ter uma taxa de compressão de 50%, considerando apenas a sub amostragem.

O padrão H.264/AVC, considera que os dados do vídeo de entrada estão no espaço de cores YCbCr. Sub amostragens de cor nos formatos 4:2:0, 4:2:2 e 4:4:4 são permitidas, mas o

formato mais usado é o 4:2:0. Este formato é muito adequado para a capacidade de percepção do sistema visual humano.

### 2.1.2 Redundância de Dados na Representação de Vídeos

A codificação de vídeos pretende diminuir a quantidade de dados considerados redundantes na representação computacional das informações da imagem ou do vídeo. Considera-se redundante, aquele dado que não contribui com novas informações relevantes para a representação da imagem.

Basicamente, existem três tipos diferentes de redundâncias exploradas na compressão de vídeo:

- **Redundância Espacial** – A redundância espacial é, também, chamada de “redundância intra-quadro” [6] ou “redundância inter-pixel” e advém da correlação existente entre os pixels espacialmente distribuídos num quadro (entenda-se quadro como uma imagem instantânea, ou seja parada num instante ínfimo de tempo). Esta correlação pode ser percebida, tanto no domínio espacial, como no domínio das frequências. Esta correlação é visualmente percebida no domínio espacial quando são observados pixels vizinhos num quadro, que tendem a possuir valores semelhantes. Neste caso, a redundância pode ser reduzida através da operação chamada de codificação “intra-quadro”, presente em alguns padrões de codificação de vídeo actuais.

No domínio das frequências a operação realizada para reduzir a redundância espacial é chamada de quantização. Para aplicar a quantização, antes as informações da imagem devem ser transformadas do domínio espacial para o domínio das frequências. A quantização é uma divisão inteira dos coeficientes gerados pela transformação e reduz grande parte dos coeficientes é zero. Esta operação é irreversível, pois o resto da divisão não é armazenado e, deste modo, a quantização gera perdas no processo de codificação. Mas é importante ressaltar que estas perdas tendem a interferir de forma nula ou pouco significativa na qualidade perceptual da imagem.

- **Redundância Temporal** – A redundância temporal, também chamada de “redundância inter-quadros” [6] ou “redundância inter-frame”, é causada pela correlação existente entre quadros temporalmente próximos num vídeo. Na verdade, a redundância temporal poderia ser classificada como apenas mais uma dimensão da redundância espacial [3]. Muitos blocos de pixels simplesmente não mudam de valor

de um quadro para outro num vídeo, como por exemplo, num fundo que não foi alterado de um quadro para outro. Outros pixels apresentam uma pequena variação de valores causada, por exemplo, por uma variação de iluminação. Por fim, também é possível que o bloco de pixels simplesmente se tenha deslocado de um quadro para o outro, como por exemplo, o movimento de um objecto numa cena. Todos os padrões actuais de codificação de vídeo visam reduzir a redundância temporal. A exploração eficiente da redundância temporal conduz a elevadas taxas de compressão, o que é fundamental para o sucesso dos codificadores.

- **Redundância Entrópica** – A redundância entrópica está relacionada com as probabilidades de ocorrência dos símbolos codificados. A entropia é uma medida da quantidade média de informação transmitida por símbolo do vídeo. A quantidade de informação nova transmitida por um símbolo diminui na medida em que a probabilidade de ocorrência deste símbolo aumenta. Então, os codificadores que exploram a redundância entrópica têm por objectivo transmitir o máximo de informação possível por símbolo codificado e, deste modo, representar mais informações com um número menor de bits. A “codificação de entropia”, como é chamada, utiliza diferentes técnicas e algoritmos de compressão sem perdas para atingir este objectivo.

### 2.1.3 Modelo de Codificador/Descodificador de Vídeo

Antes de entrar em maiores detalhes sobre o padrão H.264/AVC propriamente dito, será definido um modelo simplificado de codificador e de descodificador de vídeo, com base na eliminação das redundâncias mencionadas no ponto anterior.

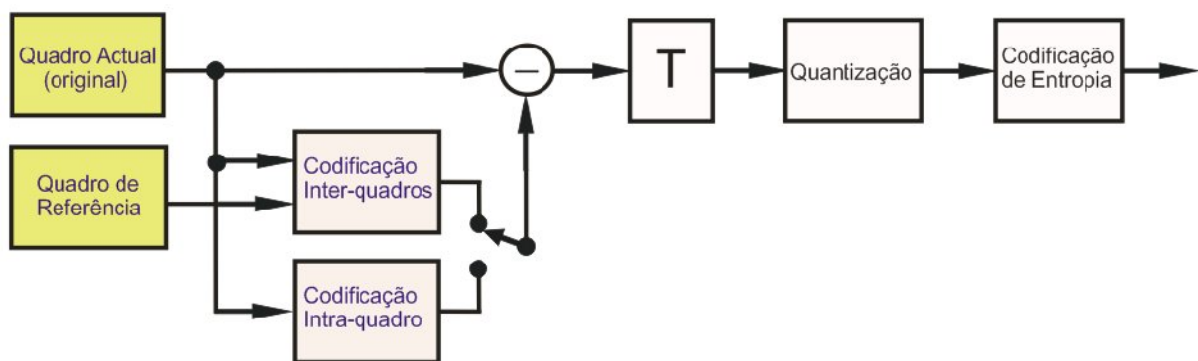
Este modelo tem como base os padrões actuais de compressão de vídeo e tem o intuito de localizar, com maior clareza, cada uma das principais operações realizadas por um codificador ou descodificador de vídeo.

A Figura 2.1 apresenta o modelo inicial de um codificador. Existe, neste modelo simplificado, dois quadros do vídeo a serem utilizados simultaneamente. Além do quadro actual, que está a se comprimido, também é utilizado um quadro de referência anteriormente processado. Os quadros são divididos em diversas partes, normalmente chamadas de blocos, para serem processados.

Para os modelos apresentados nesta secção, são considerados apenas dois tipos de quadros. Os quadros do tipo *Intra* (I), que são quadros utilizados no início do vídeo e para sincronizar o

sinal de vídeo. Os quadros tipo I podem ser codificados apenas com blocos do tipo I. A codificação dos blocos I não depende de blocos de quadros anteriores e é realizada considerando apenas as informações contidas no quadro. Deste modo, nos quadros do tipo I é explorada a redundância espacial. Os quadros tipo *Predictive* (P) são os quadros mais utilizados e são construídos a partir do quadro actual e de quadros previamente codificados. Os quadros do tipo P podem ser codificados usando blocos tipo I ou tipo P. Os blocos tipo P são blocos codificados a partir de blocos de quadros já processados e, por isso, exploram a redundância temporal. Então, um quadro do tipo P pode explorar, simultaneamente, as redundâncias espacial e temporal, dependendo do tipo de blocos que são usados na sua codificação.

Os blocos do quadro actual são codificados através da codificação inter-quadros ou através da codificação intra-quadro. A chave selectora na Figura 2.1 representa a decisão tomada pelo hardware de controlo do codificador sobre qual modo de codificação deve ser utilizado para cada bloco.



**Figura 2.1** - Modelo inicial simplificado de codificador de vídeo

O módulo de codificação intra-quadro é responsável por reduzir a redundância espacial, utilizando, para tanto, apenas a informação do quadro actual em processamento.

Este módulo é responsável por gerar blocos tipo I, usados na codificação de quadros tipo I ou P. Vários algoritmos podem ser utilizados para realizar a codificação intra-quadro e estes algoritmos são os mesmos utilizados na compressão de imagens estáticas.

O módulo de codificação inter-quadros é responsável por reduzir a redundância temporal, através da comparação dos blocos do quadro actual com os blocos do quadro de referência. Este módulo gera blocos do tipo P, para quadros do tipo P. O bloco do quadro de referência com maior semelhança ao bloco que está a ser processado do quadro actual é o escolhido. Então, é gerado um vector de movimento para identificar a posição deste bloco no quadro de

referência. A predição inter-quadros é, normalmente, dividida em duas etapas chamadas de estimativa (estimação) de movimento e compensação de movimento.

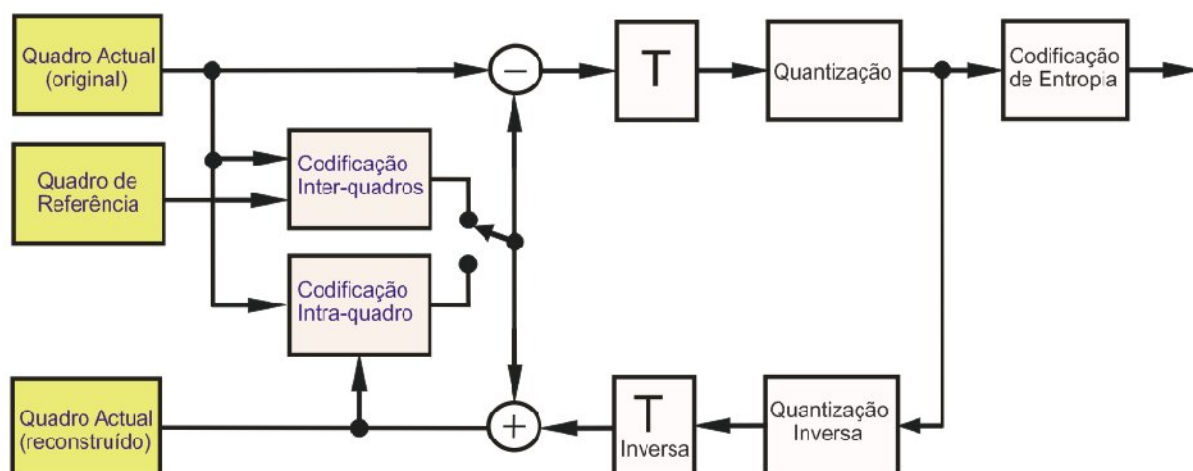
Após um bloco do quadro actual ser codificado pela codificação intra-quadro ou pela codificação inter-quadros, é realizada uma subtracção entre os valores do bloco original e os resultados da codificação. Esta diferença é chamada de resíduo.

O resíduo, então, é enviado para os módulos responsáveis por reduzir a redundância espacial no domínio das frequências. A primeira operação nesta direcção é a transformada (módulo T na Figura 2.1). O módulo *Transform* (T) transforma a informação do domínio espacial para o domínio das frequências. Neste domínio, a quantização pode ser aplicada, reduzindo a redundância espacial presente nos resíduos.

Por fim, a codificação de entropia reduz a redundância entrópica, que está relacionada à forma como os dados são codificados. Novamente, diversos algoritmos podem ser empregues para este fim.

O modelo apresentado na Figura 2.1 actua na redução dos três tipos de redundância apresentados na secção anterior. Mas este modelo ainda não está completo e não é útil para a codificação de vídeo. É possível observar que o codificador não armazenou o resultado codificado do quadro actual. Deste modo, quando um próximo quadro é processado, o quadro actual não codificado passa a ser o quadro de referência. Como apenas o quadro codificado é transmitido, o decodificador não receberá o quadro original, recebendo apenas o quadro codificado. Como a codificação gera perdas de informação, o quadro codificado será diferente do quadro original após a decodificação [5]. Então, as referências utilizadas pelo codificador e pelo decodificador serão diferentes para o processamento de um mesmo quadro. Esta diferença na referência utilizada inviabiliza a aplicação deste tipo de solução. Para resolver este problema, o codificador descarta o quadro original depois de ser processado, e armazena o quadro reconstruído. A informação reconstruída é relevante tanto para a codificação inter-quadros quanto para a codificação intra-quadro. Na codificação inter-quadros, o quadro codificado é usado como quadro de referência para a codificação do próximo quadro. A codificação intra-quadro, em alguns padrões, utiliza as amostras dos blocos vizinhos que acabaram de ser codificados, como referência para a codificação dos próximos blocos. Em ambos os casos, a referência do codificador e do decodificador devem ser as mesmas. Para isso ser possível, parte da tarefa da decodificação é inserida também no codificador.

A Figura 2.2 apresenta o diagrama de blocos mais detalhado do codificador, agora considerando a reconstrução da imagem.



**Figura 2.2** - Modelo completo simplificado de codificador de vídeo

Como as perdas de informação, que geram a diferença entre o quadro actual original e o quadro actual reconstruído, acontecem no estágio de quantização, a imagem deve ser reconstruída a partir deste ponto. A codificação e descodificação de entropia são desnecessárias para a reconstrução do quadro actual justamente porque estas etapas não geram perdas. Então, é aplicada a operação inversa da quantização e, após a quantização inversa, é aplicada a transformada inversa, gerando os resíduos reconstruídos. Aos resíduos é somado o resultado da codificação intra-quadro ou inter-quadros do bloco reconstruído. Finalmente, o bloco reconstruído está pronto e pode ser armazenado para ser utilizado pela codificação inter-quadros do próximo quadro ou pode ser utilizado directamente pela codificação intra-quadro dos próximos blocos do quadro actual.

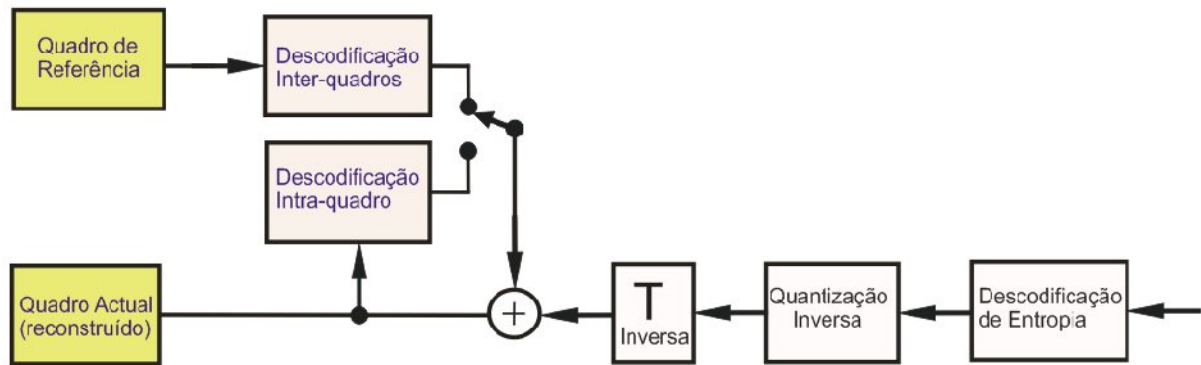
Finalmente, o modelo de codificador apresentado na Figura 2.2 está completo. Este tipo de codificador de vídeo é chamado de codificador híbrido, por explorar diversos tipos de redundância.

O modelo genérico do decodificador apresenta-se na Figura 2.3. Como pode ser observado a partir de uma comparação da Figura 2.3 com a Figura 2.2, a descodificação é muito parecida com a parte da reconstrução do quadro da codificação.

A descodificação de entropia reconstrói as amostras codificadas. Como a codificação de entropia não gera perdas de informação, a operação de descodificação de entropia gera exactamente o mesmo resultado gerado pela saída da quantização no codificador.

Após a descodificação de entropia, as amostras remontadas são entregues para a quantização inversa e para a transformada inversa, reconstruindo o resíduo. Estas operações são idênticas

às apresentadas no codificador.



**Figura 2.3** - Modelo genérico de decodificador de vídeo

A decodificação inter-quadros utiliza o quadro de referência e as informações de controlo (não apresentadas na Figura 2.3), para localizar os blocos dentro do quadro de referência. Estes blocos são, então, somados aos resíduos, para gerar os blocos reconstruídos. Finalmente, os blocos reconstruídos são armazenados para serem usados como referência para a decodificação do próximo quadro e para a visualização do vídeo decodificado.

A decodificação intra-quadro utiliza os blocos reconstruídos do quadro actual e informações de controlo (omitidas na Figura 2.3), para reconstruir os blocos codificados pelo codificador inter-quadros. De maneira similar à codificação inter-quadros, os macro-blocos que passam pela decodificação intra-quadro são somados aos resíduos e armazenados para serem usados como referência e para visualização do vídeo.

É importante salientar que, nos modelos apresentados nas Figuras 2.2 e 2.3, não estão apresentados os fluxos de sinais de controlo.

#### 2.1.4 Métricas de Comparação

Existem muitas técnicas e algoritmos bastante distintos para comprimir vídeos e os padrões de compressão de vídeo da actualidade exploram estas possibilidades de forma variada. Para comparar os resultados obtidos, é importante definir alguns critérios de comparação.

O primeiro critério de comparação é a eficiência de codificação, que é definida como sendo a redução no volume de dados obtidos por um determinado algoritmo de compressão. Por exemplo, uma eficiência de compressão de 70% significa que somente 30% dos dados originais são usados após a codificação.



Mas além da eficiência de codificação, é muito importante definir critérios para comparar a qualidade das imagens geradas. A medição da qualidade visual para determinar a qualidade de um algoritmo de codificação de vídeos é uma tarefa bastante imprecisa, porque há muitos factores que influenciam nesta definição e muitos destes factores são inerentemente subjectivos.

Por isso, existem dois tipos principais de métricas para avaliar a qualidade de um vídeo [5]: métricas subjectivas e métricas objectivas.

A qualidade objectiva é medida usando um algoritmo que compara o vídeo original com o vídeo codificado. Esta comparação realiza-se quadro a quadro, comparando todos os pixels dos quadros do vídeo original com os pixels do vídeo codificado.

O *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR) é o parâmetro de avaliação mais utilizado para comparar a qualidade objectiva de vídeos define-se da seguinte forma:

$$PSNR = 20 \times \log \left( \frac{MAX}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (2.1)$$

O *PSNR* é usado para realizar uma comparação entre dois quadros distintos que, neste caso, são o quadro original e o quadro reconstruído. Em (2.1), *MAX* é o valor máximo que uma amostra de luminância do vídeo que pode atingir. O *PSNR* é medido numa escala logarítmica, utilizando, como base, o critério de similaridade *Mean Squared Error* (*MSE*) entre o quadro original e o quadro reconstruído.

$$PSNR = 20 \times \log \left( \frac{MAX}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (2.1)$$

A qualidade objectiva pode ser directamente ligada ao valor do *PSNR* obtido. Valores altos indicam alta qualidade e valores baixos de *PSNR* indicam baixa qualidade. É importante salientar que o *PSNR* possui uma série de limitações como critério de qualidade, sendo que, em alguns casos, uma imagem que possui uma qualidade visual (subjectiva) superior pode ter um valor de *PSNR* inferior à outra com um resultado visual pior [5]. Isto ocorre porque o *PSNR* considera apenas o valor do *MSE* para cada pixel da imagem e, desta forma, não necessariamente avalia os critérios subjectivos de qualidade [5].

Uma medida importante para avaliar a diferença entre dois quadros é o grau de similaridade entre eles. Este grau de similaridade pode ser mensurado a partir de diferentes funções de similaridade. As duas funções de similaridade de interesse para este trabalho são o *MSE*,

usado na definição do *PNSR*, e o *Sum of Absolute Differences (SAD)*, usado na predição inter-quadros.

O cálculo do *MSE* define-se da seguinte forma:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (R_{i,j} - O_{i,j})^2 \quad (2.2)$$

onde  $m$  e  $n$  são as dimensões do quadro a ser comparado e  $O$  e  $R$  são as amostras dos quadros, original e reconstruído, respectivamente.

O *SAD* calcula a distorção entre as regiões comparadas, a partir do somatório das diferenças absolutas, para cada ponto do quadro original e do quadro reconstruído. A função para o cálculo do *SAD* é dada por (2.3). Novamente,  $m$  e  $n$  são as dimensões do quadro a ser comparado e  $O$  e  $R$  são as amostras dos quadros, original e reconstruído, respectivamente.

$$SAD = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |R_{i,j} - O_{i,j}| \quad (2.3)$$

## 2.2 O Padrão H.264/AVC

### 2.2.1 História do Padrão

O padrão H.264/AVC foi desenvolvido por um período de aproximadamente quatro anos. As raízes deste padrão estão no projecto H.26L da *International Telecommunication Union – Telecommunication* (ITU-T). O H.26L foi iniciado pelo *Video Coding Experts Group* (VCEG) no início de 1998, através da construção da chamada para propostas. O primeiro *draft* deste novo padrão foi finalizado em Agosto de 1999. O objectivo do projecto H.26L era dobrar a eficiência de codificação atingida pelo padrão H.263.

Antes do padrão H.264/AVC surgir, alguns outros padrões já haviam sido criados e já estavam consolidados, servindo de base para o desenvolvimento do H.264/AVC. O primeiro padrão relevante para a construção do H.264/AVC foi o *A Video Coding Standard* (H.261) da ITU-T. Este padrão lançou as bases do que é usado até hoje na maioria dos padrões de compressão de vídeo: *Differential Pulse Code modulation* (DPCM) com estimação de movimento na direcção temporal, transformada discreta do co-seno aplicada no resíduo e quantização linear seguida de codificação de entropia.

Após o padrão H.261, surgiu o padrão MPEG-1 da *International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission* (ISO/IEC), seguido do padrão MPEG-2 da ISO/IEC, que também foi padronizado pela ITU-T como *A Video Coding*

*Standard* (H.262). O MPEG-2 ou H.262 tornou-se num padrão popular e é muito utilizado até à actualidade em diversas aplicações.

Apesar do grande sucesso do padrão MPEG-2, a evolução dos padrões de compressão de vídeo não parou. O padrão *A Video Coding Standard* (H.263) foi lançado no ano 2000 e incorporou alguns avanços obtidos pelos padrões MPEG-1 e MPEG-2, bem como técnicas novas que vinham sendo pesquisadas intensamente tanto pela indústria quanto pela academia. Em 2001, o grupo MPEG da ISO/IEC finalizou o desenvolvimento do padrão MPEG-4 Parte 2 (ISO/IEC, 1999). Ainda neste ano, o MPEG construiu uma nova chamada de propostas, similar à do H.26L da ITU-T, para melhorar ainda mais a eficiência de codificação atingida pelo MPEG-4. Então, o VCEG, da ITU-T resolveu submeter o seu *draft* em resposta à chamada de propostas do MPEG e propôs a união de esforços para completar o trabalho.

Analisando as respostas da sua chamada de propostas, o MPEG chegou a conclusões que reafirmaram as escolhas de desenvolvimento realizadas pelo VCEG no H.26L:

- A estrutura de compensação de movimento com a transformada discreta do co-seno (DCT) era melhor do que as outras.
- Algumas ferramentas de codificação de vídeo que foram excluídas no passado (do MPEG-2, do H.263 ou do MPEG-4 Parte 2) por causa da sua complexidade computacional, poderiam ser reexaminadas para inclusão no próximo padrão, devido aos avanços na tecnologia de hardware.
- Para maximizar a eficiência de codificação, a sintaxe do novo padrão não poderia ser compatível com os padrões anteriores.

Para permitir um avanço mais acelerado na construção do novo padrão e para evitar duplicação de esforços, o ITU-T e o ISO/IEC concordaram em unir esforços para desenvolverem, em conjunto, a próxima geração de padrão apropriado ao broadcasting para codificação de vídeo em alta definição e concordaram em usar o H.26L como ponto de partida. Então, foi criado, em Dezembro de 2001, o *Joint Video Team* (JVT), formado por especialistas do VCEG e do MPEG. O JVT tinha o objectivo de completar o desenvolvimento técnico do padrão até o ano de 2003.

A ITU-T decidiu adoptar o padrão com o nome de H.264 e a ISO/IEC decidiu adoptar o padrão com o nome de MPEG-4 parte 10 – AVC.

Num artigo de 2004, descrevendo o padrão, o coordenador do JVT, Gary Sullivan, decidiu utilizar o nome H.264/AVC para se referir ao padrão de forma equilibrada entre os nomes dados ao padrão pela ITU-T e pela ISO. O H.264 foi retirado do nome dado ao padrão pela ITU-T, enquanto que o AVC foi extraído do nome do padrão na ISO. Este nome, com um

misto dos nomes oficiais do padrão, acabou por ser usado por muitos autores desde então.

Em 2004, o H.264/AVC foi incluído no sistema de transporte do DVB [7].

O Sistema AVC não é compatível com o MPEG-2, este não produz a complacente bitstream, deste modo a sua introdução requer o uso de novo codificador e decodificador [7].

### 2.2.2 Terminologia

Para o padrão H.264/AVC a formação de uma imagem codificada pode acontecer a partir de um campo ou quadro, quando o vídeo é entrelaçado, ou a partir de um quadro, quando o vídeo é progressivo [5].

O padrão H.264/AVC considera que o espaço de cores utilizado para representar o vídeo de entrada é do tipo luminância e crominância, como o YCbCr.

A relação entre os elementos Y, Cb e Cr é dependente do perfil do padrão que está a ser considerado.

Um quadro codificado é formado por um número determinado de macro-blocos cada um contendo 16x16 amostras de luminância, associadas às amostras de crominância.

Dependendo do perfil utilizado, o tamanho das amostras de crominância de um macro-bloco pode variar. Além das amostras da imagem presentes nos macro-blocos, o quadro codificado também contém informações de controlo, que indicam o tipo de codificação adoptado, o início de macro-bloco, o tipo de macro-bloco, etc.

Cada elemento codificado, seja com informações de controlo ou com amostras da imagem, é chamado de elemento sintáctico [5].

Um quadro codificado possui um número de quadro, que é sinalizado no *bitstream*. Este número de quadro não está, necessariamente, relacionado à ordem de decodificação deste quadro. Cada campo codificado de um quadro progressivo ou entrelaçado possui um contador que indica a sua ordem de decodificação. Os quadros codificados anteriormente podem ser utilizados como quadros de referência para a predição de outros quadros. Os quadros de referência são organizados em duas listas, chamadas de lista 0 e lista 1.

Dentro de cada quadro, os macro-blocos são organizados em fatias (*slices*), onde uma fatia é um grupo de macro-blocos numa determinada ordem de varrimento tipo *raster*. Uma fatia do tipo I pode conter somente macro-blocos do tipo I. Uma fatia do tipo P pode conter macro-blocos do tipo P e I e uma fatia do tipo *Bi-Predictive* (B) pode conter macro-blocos do tipo B e I.

Além das fatias tipo I, P e B, o padrão também permite a existência de outros dois tipos de

fatias: *Switching I* (SI) e *Switching P* (SP).

Um quadro do vídeo pode ser codificado em uma ou mais fatias, cada uma contendo um número inteiro de macro-blocos. O número de macro-blocos pode variar de um até o número total de macro-blocos do quadro [5].

Os macro-blocos do tipo I são codificados usando a codificação intra-quadro, a partir das amostras da fatia actual. A codificação pode acontecer sobre macro-blocos completos ou para cada bloco. Os macro-blocos do tipo I também podem ser codificados através do modo *Intra-frame Pulse Code Modulation* (I\_PCM), onde o codificador transmite os valores das amostras directamente, sem predição ou transformação. Nalguns casos anómalos, o modo I\_PCM pode ser mais eficiente do que os demais modos de codificação [5].

Os macro-blocos do tipo P são codificados usando a codificação inter-quadros, a partir de quadros de referência previamente codificados. Um macro-bloco codificado no modo inter-quadros pode ser dividido em partições de macro-blocos, isto é, em blocos de 16x16, 16x8, 8x16 ou 8x8. Se o tamanho de partição escolhido for o 8x8, então cada sub macro-bloco 8x8 pode ser dividido novamente em partições de sub macro-bloco de tamanho 8x8, 8x4, 4x8 ou 4x4. Cada partição de macro-bloco é codificada utilizando como referência um quadro da lista 0. Se existir uma partição de sub macro-bloco, então esta partição é codificada utilizando o mesmo quadro da lista 0 utilizado para codificar a partição de macro-bloco.

Os macro-blocos do tipo B também são codificados usando a codificação inter-quadros.

Cada partição de macro-bloco pode ser codificada utilizando um ou dois quadros de referência, um na lista 0 e outro na lista 1. Se existir uma partição em sub macro-bloco, cada sub macro-bloco é codificado a partir dos mesmos um ou dois quadros de referência utilizados na codificação da partição de macro-bloco.

### 2.2.3 Perfis e Níveis

O padrão H.264/AVC é dividido em diferentes perfis. Cada perfil suporta um grupo particular de funções de codificação e especifica o que é necessário para cada codificador e decodificador que seguem esse perfil.

A primeira versão do padrão H.264/AVC, de Maio de 2003, define um grupo de três perfis diferentes: ***Baseline***, ***Main*** e ***Extended***.

- O perfil ***Baseline*** é direccionado a aplicações como vídeotelefonia, videoconferência e vídeo sem fio. O perfil ***Baseline*** suporta codificação intra-quadro e inter-quadros

(usando somente fatias I e P) e uma codificação de entropia com códigos de comprimento de palavra variável adaptativos ao contexto (*Context-based Adaptive Variable Length Coding* (CAVLC)).

- O perfil **Main** é focado na transmissão de televisão e no armazenamento de vídeo. O perfil *Main* inclui o suporte para vídeo entrelaçado, o suporte à codificação interquadros utilizando fatias do tipo B e utilizando predição ponderada e o suporte à codificação de entropia utilizando codificação aritmética adaptativa ao contexto (*Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding* (CABAC)).
- O perfil **Extended** é mais voltado para aplicações em *streaming* de vídeo e não suporta vídeo entrelaçado ou o CABAC, mas agrega modos para habilitar uma troca eficiente entre *bitstreams* codificados (através de fatias do tipo SP e SI) e melhora a resiliência a erros (através da partição de dados).

Para os três perfis definidos na primeira versão do padrão, a relação entre os elementos de cores é fixa. Esta relação é de 4:2:0 para os elementos Y, Cb e Cr. Isso significa que os elementos de croma Cb e Cr possuem metade da resolução horizontal e vertical dos elementos de luminância. Isso implica que haja uma sub amostragem dos elementos de croma já no vídeo original. Cada macro-bloco, como já foi apresentado anteriormente, é formado por uma região de 16x16 pixels de um quadro do vídeo, incluindo as informações de luminância e croma.

Com a relação de 4:2:0, um macro-bloco é formado por uma matriz de 16x16 amostras de luminância e por duas matrizes 8x8 amostras de croma, uma para Cb e outra para Cr.

Os perfis *Baseline*, *Main* e *Extended* também possuem outra característica em comum, os três perfis usam 8 bits por amostra.

Estes três perfis inicialmente propostos pelo padrão H.264/AVC não incluíram suporte para vídeos com qualidade mais elevada, como as necessárias em ambientes profissionais. Para responder às exigências deste tipo de aplicação, uma continuação do projecto JVT foi realizada para adicionar novas extensões para as capacidades do padrão original. Estas extensões foram chamadas de extensões para alcance de fidelidade (*fidelity range extensions* (FRExt)). O FRExt produziu um grupo de quatro novos perfis chamados colectivamente de perfis **High**.

Os perfis **High** possuem algumas características comuns que são inovadoras em relação aos perfis originais: suportam um tamanho de bloco adaptativo para a transformada (4x4 ou 8x8), suportam matrizes de quantização baseadas em percepção e suportam uma representação sem perdas de regiões específicas do conteúdo do vídeo.

As matrizes de quantização baseadas em percepção foram usadas anteriormente no padrão MPEG-2. Com esta ferramenta, o codificador pode especificar, para cada tamanho de bloco da transformada e separadamente para codificação intra-quadro e inter-quadros, um factor de escala específico. Isso permite um ajuste da fidelidade da quantização de acordo com o modelo de sensibilidade do sistema visual humano para diferentes tipos de erros. Tipicamente, esta ferramenta não melhora a fidelidade objectiva (*PSNR*), mas melhora a fidelidade subjectiva, que é o critério realmente mais importante.

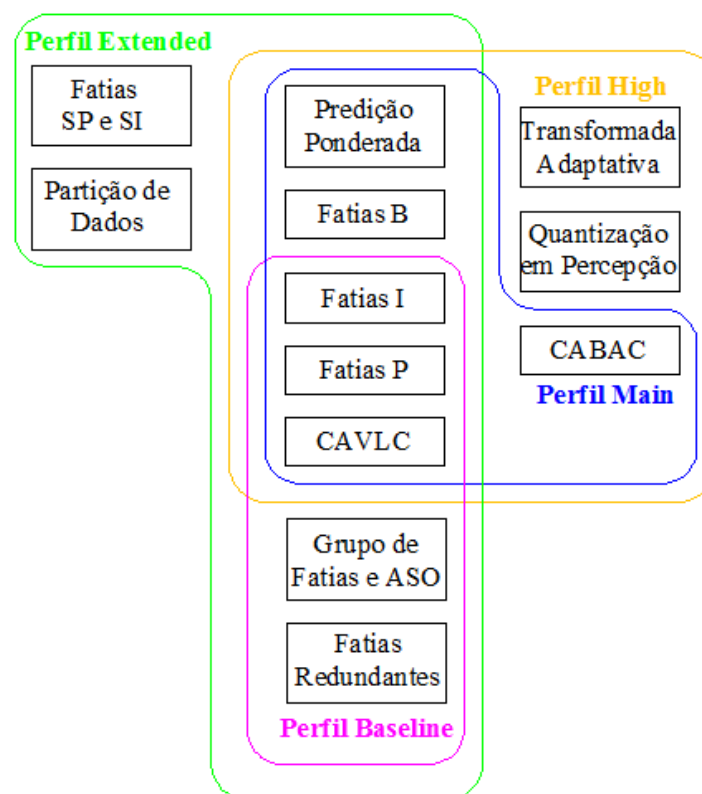
O *High Profile* (HP) inclui vídeo com 8 bits por amostra e com relação de cor 4:2:0.

O *High Profile 10* (Hi10P) suporta vídeo a 10 bits por amostra, também com uma relação de cor 4:2:0.

O *High Profile 4:2:2* (H422P) inclui suporte à relação de cor 4:2:2 e vídeos a 10 bits por amostra.

Finalmente, o *High Profile 4:4:4* (H444P) dá suporte à relação de cor 4:4:4 (ou seja, sem nenhuma sub amostragem), suporte a vídeo com até 12 bits por amostra e, adicionalmente, suporta a codificação sem perdas em regiões do vídeo.

A Figura 2.4 apresenta, resumidamente, a relação entre os perfis *Baseline*, *Main*, *Extended* e *High* do padrão H.264/AVC.



**Figura 2.4** - Perfis *Baseline*, *Main*, *Extended* e *High* do padrão H.264/AVC

Além da divisão em diversos perfis, o padrão H.264/AVC também define 16 diferentes níveis em função da taxa de processamento e da quantidade de memória necessária para cada implementação. Com a definição do nível utilizado, é possível deduzir o número máximo de quadros de referência e a máxima taxa de bits que podem ser utilizados.

#### 2.2.4 Formato de Dados Codificados

Uma inovação interessante do padrão H.264/AVC consiste na clara distinção entre a organização do vídeo codificado e da sua transmissão via rede. O padrão classifica a informação do vídeo em dois níveis diferentes de abstracção, chamados de camada de vídeo codificado (*Video Coding Layer* (VCL)) e camada de abstracção de rede (*Network Abstraction Layer* (NAL)) [5].

Os dados de saída do processo de codificação estão na camada VCL, sendo formados por uma sequência de bits que representam os dados do vídeo codificado. Estes dados são mapeados para unidades NAL antes da transmissão ou armazenamento.

Uma sequência de vídeo codificado é representada por uma sequência de unidades NAL que podem ser transmitidas sobre uma rede baseada em pacotes, podem ser transmitidas via um link de transmissão de bitstream ou ainda, podem ser armazenados num arquivo.

O objectivo de especificar separadamente a VCL e a NAL é diferenciar características específicas da codificação (na VCL) daquelas características específicas do transporte (na NAL).

#### 2.2.5 Núcleo do Codec H.264/AVC

Esta secção do texto irá apresentar os principais módulos de um codificador e de um decodificador H.264/AVC.

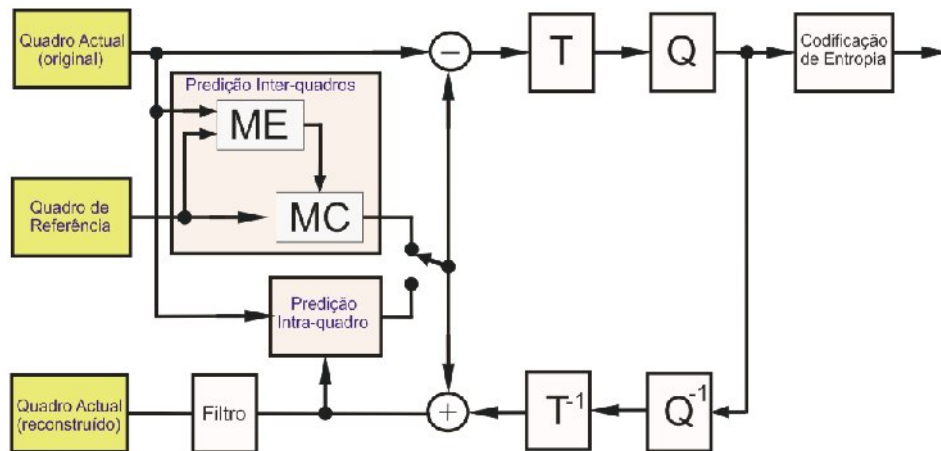
O diagrama de blocos do codificador H.264/AVC está apresentado na Figura 2.5. É possível perceber que a Figura 2.5 é muito parecida com a apresentada na secção 2.1.3.

O módulo de predição inter-quadros na Figura 2.5 é formado pela estimação de movimento (*Motion Estimation* (ME)) e pela compensação de movimento (*Motion Compensation* (MC)). Este módulo desempenha função similar à do módulo de codificação inter-quadros da Figura 2.2, mas, para desempenhar esta função, o padrão H.264/AVC agrega operações de grande complexidade computacional a este módulo.

O módulo de predição intra-quadro, os módulos das *T* e *inverse Transform* ( $T^{-1}$ ), os módulos



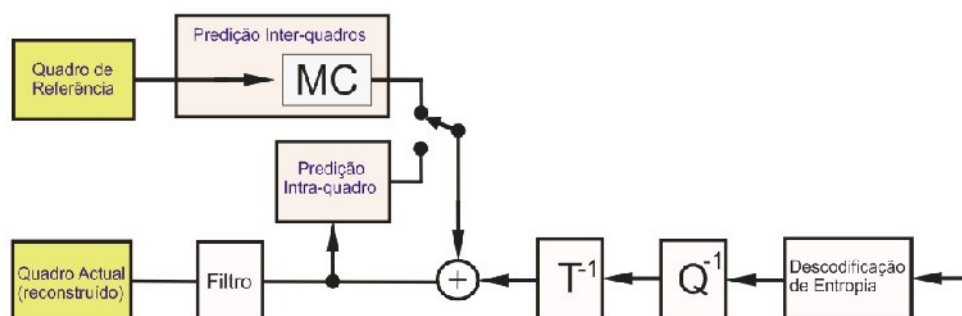
da *direct Quantization* (Q) e *inverse Quantization* ( $Q^{-1}$ ) e o módulo da codificação de entropia na Figura 2.5 possuem a mesma função dos módulos com os mesmos nomes na Figura 2.2.



**Figura 2.5** - Diagrama de blocos de um codificador H.264/AVC

A diferença mais significativa entre a Figura 2.5 e a Figura 2.2 está no módulo chamado de filtro na Figura 2.5, que não está presente na Figura 2.2. Este módulo foi inserido no padrão H.264/AVC e é requisito obrigatório. Nos demais padrões de compressão de vídeo este filtro não é obrigatório, mas um filtro similar é usado na prática por várias implementações seguindo outros padrões. Este filtro, também chamado de filtro redutor do efeito de bloco ou filtro de *loop*, é usado para minimizar o efeito de bloco.

A Figura 2.6 apresenta o diagrama em blocos de um decodificador H.264/AVC. Novamente, esta Figura é muito parecida com a Figura 2.3, apresentada na secção 2.1.3. Também no decodificador H.264/AVC está presente o filtro, que não está originalmente apresentado na Figura 2.3.



**Figura 2.6** - Diagrama de blocos de um decodificador H.264/AVC

Nas etapas de estimação e compensação de movimento do padrão H.264/AVC (bloco ME na Figura 2.5 e módulo MC nas Figuras 2.5 e 2.6) é onde se encontram a maior parte das

inovações e dos ganhos obtidos pelo H.264/AVC sobre os demais padrões. Uma inovação importante é o uso de blocos de tamanho variável, onde se pode usar uma partição do macro-bloco em blocos de tamanho 16x16, 16x8, 8x16, 8x8, 4x8, 8x4 ou 4x4 para realizar a ME e a MC.

O H.264/AVC também prevê o uso de múltiplos quadros de referência, que não precisam ser somente os quadros I ou P imediatamente anteriores ou posteriores. Também é uma inovação o uso de novas opções para a bi-predição, como a predição ponderada e directa para as fatias do tipo B.

Para além disso, os vectores de movimento podem apontar para fora da borda do quadro. Por fim, a predição de vectores de movimento com base nos vectores vizinhos também é uma novidade [5].

A etapa de predição intra-quadro (Figuras 2.5 e 2.6) é outra inovação introduzida pelo padrão H.264/AVC, pois é realizada no domínio espacial. Assim, mesmo nos macro-blocos do tipo I é realizada uma predição antes da aplicação da transformada. Esta predição leva em conta as amostras já codificadas da fatia actual.

No que diz respeito às transformadas directa e inversa (blocos T e  $T^{-1}$  nas Figuras 2.5 e 2.6), o H.264/AVC introduziu algumas inovações.

A primeira delas é que as dimensões da transformada foram inicialmente definidas em 4x4 (ao invés do tradicional 8x8). Com a inserção dos perfis *High*, as transformadas passaram a ter dimensões variáveis de 4x4 ou 8x8 amostras.

Outra inovação é relativa ao uso de uma aproximação inteira da transformada *Discrete Cosine Transform* (DCT) directa e inversa, de modo a facilitar a sua implementação em hardware de ponto fixo e evitar erros de casamento entre o codificador e o decodificador. Além disso, uma segunda transformada é aplicada sobre os elementos *Direct Current* (DC) resultantes da DCT para todos os blocos de cromaticidade (Hadamard 2x2) e para os macro-blocos em que é feita a predição intra-quadro 16x16 (Hadamard 4x4) [5].

A quantização no padrão H.264/AVC (blocos Q e  $Q^{-1}$  nas Figuras 2.5 e 2.6) é uma quantização escalar [5]. O factor de quantização é função de um *Parameter Quantization* (QP) de entrada, que é usado no codificador para controlar a qualidade da compressão e o *bit rate* de saída.

O padrão H.264/AVC normativa a utilização de um filtro redutor do efeito de bloco (módulo Filtro nas Figuras 2.5 e 2.6). Este filtro era opcional na maioria dos demais padrões de compressão de vídeo, mas passou a ser obrigatório no H.264/AVC.

Uma inovação importante do filtro definido no padrão H.264/AVC é que ele é adaptativo,

conseguindo distinguir entre uma aresta real da imagem de um artefacto gerado por um elevado passo de quantização.

Na codificação de entropia (Figuras 2.5 e 2.6) o H.264/AVC também introduz ferramentas que aumentam bastante a eficiência de codificação deste módulo. Há, basicamente, dois tipos de codificação: a codificação de comprimento variável adaptativa ao contexto (CAVLC) e a codificação aritmética binária adaptativa ao contexto (CABAC).

A principal inovação é o uso de codificação adaptativa baseada em contextos. Nesta codificação, a maneira com que os diversos elementos sintácticos são codificados depende do elemento a ser codificado, da fase em que se encontra o algoritmo de codificação e dos elementos sintácticos que já foram codificados.

Uma característica interessante do padrão H.264/AVC é que apenas o descodificador é normalizado. Então vários graus de liberdade podem ser explorados na implementação do codificador.

O codificador deve gerar um *bitstream* compatível com as exigências do padrão, mas a forma como este *bitstream* é gerado não é normalizada. Então várias opções de implementação podem ser realizadas no codificador que vão desde a inserção de algoritmos mais eficientes ou mais fáceis de serem implementados em hardware, até à simples eliminação de algumas possibilidades de codificação previstas pelo padrão. É claro que estas modificações podem gerar impactos na relação sinal/ruído, na taxa de compressão, na velocidade de processamento e/ou na utilização de recursos de hardware pelo codificador e estes impactos devem ser criteriosamente avaliados para tomar qualquer decisão nesta direcção.

### 2.2.6 Principais Desafios

O padrão H.264/AVC é muito extenso e complexo, deste modo, implementar um codificador ou descodificador H.264/AVC não é uma tarefa trivial, mesmo que esta implementação seja realizada em software. O problema passa a ser muito mais crítico se a implementação tiver por objectivo atingir tempo real para resoluções mais elevadas, como *Standard Definition Television* (SDTV) ou HDTV.

É possível identificar o módulo da estimação/compensação de movimento como sendo um “filtro” para o bom desempenho do codificador. Do mesmo modo, temos os módulos do filtro redutor e da compensação de movimento como sendo os responsáveis pelo bom desempenho do descodificador.

A estimação de movimento, que é o módulo de maior complexidade computacional do

codificador, quando baseada no algoritmo de busca exaustiva (*full search*), é um exemplo de módulo que pode ser implementado de uma maneira massivamente paralela, pois as dependências de dados são pequenas. Deste modo, tratando o problema da estimação de movimento com múltiplas unidades trabalhando em paralelo, é possível aumentar a taxa de processamento deste módulo e fazer com que os requisitos da aplicação sejam atingidos. É interessante notar que praticamente todos os trabalhos da literatura que visam minimizar a complexidade da estimação de movimento, consideram apenas a redução da complexidade quando um código fonte tipicamente serial é executado num processador convencional. Algumas destas soluções aumentam a dependência de dados com o objectivo de reduzir o número de instruções executadas sequencialmente. O efeito colateral desta solução é que a exploração do paralelismo fica mais restrita. Assim, é possível que um algoritmo que reduz a complexidade da estimação de movimento (considerando um processador de propósito geral) acabe por atingir uma taxa de processamento inferior aos algoritmos não otimizados, quando ambos forem implementados em hardware. Isso pode ocorrer porque a exploração do paralelismo será dificultada com o algoritmo otimizado, se a optimização implicar um aumento na dependência de dados.

Ainda assim, os resultados da secção anterior espelham os maiores desafios para os projectistas de codecs H.264/AVC em software ou em hardware, quais sejam: encontrar uma solução para a questão da complexidade dos módulos da estimação de movimento, da compensação de movimento, da predição intra-quadro, do filtro de bloqueio, etc.

O alvo dos projectistas de hardware está na exploração do paralelismo com o objectivo de atingir tempo real para qualquer resolução de vídeo. Em função da complexidade e extensão do padrão, não existe nenhum módulo simples de ser implementado em hardware para atingir os requisitos da aplicação alvo, pois em cada módulo do codificador ou do decodificador residem desafios de difícil solução.

O projecto de um codificador ou decodificador de vídeo em hardware envolve uma série de compromissos relacionando requisitos, por vezes, contraditórios. Alguns destes compromissos são comuns para os projectistas de software e hardware, mas outros são específicos para os projectistas de hardware.

O projecto de um codec de vídeo em hardware deve estar focado, entre outros, nos seguintes requisitos:

- **Taxa de compressão:** o codificador deve ser capaz de gerar um *bitstream* codificado eficientemente, respeitando as exigências de armazenamento e/ou transmissão e/ou display da aplicação.

- **Qualidade do vídeo:** o codificador, mesmo gerando perdas de informação no processo de codificação, deve ser capaz de gerar um *stream* de bits que, ao ser decodificado, apresente uma qualidade objectiva e subjectiva da imagem que esteja de acordo com as exigências da aplicação alvo.
- **Largura de banda para transmissão:** o codificador deve ser capaz de utilizar apenas a largura de banda exigida pela aplicação quando o vídeo comprimido for transmitido. Este requisito está directamente relacionado com a taxa de compressão e com a qualidade do vídeo.
- **Taxa de processamento:** o codificador ou decodificador deve ser capaz de processar o vídeo de entrada na taxa de amostras por segundo exigida pela aplicação. A exploração do paralelismo através de implementações em hardware contribui para o atendimento deste requisito, mas amplia a utilização de recursos de hardware.
- **Quantidade de recursos de hardware utilizados:** a implementação do codificador ou decodificador deve respeitar as restrições de utilização de recursos de hardware impostas pela aplicação ou pelo custo de fabricação. Deste modo, o projecto deve, respeitar as exigências da taxa de processamento e utilizar a menor quantidade de hardware possível.
- **Largura de banda de memória:** o projecto do codificador e do decodificador deve considerar que um dos maiores “filtros” deste tipo de sistema está na comunicação com a memória. Assim, o projecto deve minimizar os acessos à memória, para respeitar as restrições de largura de banda disponível para a comunicação com a memória.

Em projectos completamente dedicados, podem ser implementadas memórias específicas e hierarquizadas para viabilizar uma comunicação mais efectiva com a memória.

Neste caso, a quantidade de recursos de hardware utilizada irá crescer.

- **Energia consumida:** muitas aplicações que utilizam codecs de vídeo são sistemas portáteis, onde a minimização na energia consumida é um requisito fundamental. Neste caso, o projecto do codec pode aplicar algumas técnicas para minimizar o consumo de energia. Contribuem para atender este requisito, a minimização dos acessos à memória, a redução na utilização de recursos de hardware, entre outros.

O projecto de um codec de vídeo deve estar focado nestes requisitos e, dependendo da aplicação alvo, deve ser tomada a decisão de quais requisitos serão prioritários, em detrimento dos demais.

No projecto de um codec H.264/AVC esta relação contraditória de requisitos é ainda mais problemática, pois este é o padrão mais complexo desenvolvido até então. Atingir desempenhos satisfatórios (qualidade de vídeo, taxa de compressão, etc.) para resoluções

elevadas, como HDTV, por exemplo, é mesmo uma tarefa árdua e, por vezes, inatingível, dependendo das restrições da aplicação alvo.

Em função do estudo do padrão que conduziu a este texto é possível concluir que existem diversos desafios na implementação de um codec H.264/AVC. Os desafios residentes na implementação dos principais módulos de um codec H.264/AVC estão descritos abaixo:

- **Estimação de movimento (codificador):** este é o módulo que possui a maior complexidade computacional no codificador, exigindo o maior número de operações aritméticas para realizar os seus cálculos, além de exigir o maior número de acessos à memória. Existem vários algoritmos menos óptimos que podem ser aplicados visando reduzir a complexidade e o número de acessos à memória, mas o uso destes algoritmos conduz a uma redução na eficiência da codificação. Para alguns destes algoritmos a dependência de dados tende a ser reduzida, permitindo um elevado paralelismo das operações, elevando a taxa de processamento. Outra solução é, deliberadamente, optar por não implementar todos os diferentes modos de predição permitidos, uma vez que o padrão permite este tipo de decisão. Neste caso, a taxa ou a qualidade de compressão irão cair.

- **Predição Intra-quadro (codificador):** este módulo possui uma complexidade muito inferior à complexidade da estimação de movimento no codificador, mas ainda assim, por possibilitar até treze diferentes tipos de codificação, este módulo possui uma complexidade capaz de tornar o seu projecto de hardware numa tarefa desafiadora. Um dos maiores problemas é que as amostras utilizadas para realizar a predição intra-quadro são as amostras reconstruídas para o quadro actual. Isso significa que os blocos preditos devem ser processados pelos módulos  $T$ ,  $Q$ ,  $Q^{-1}$  e  $T^{-1}$  antes de serem utilizados como referência para processar os próximos blocos do quadro actual. Isso implica que a predição intra-quadro deve ficar “à espera” para que os dados sejam reconstruídos. Uma possível solução para este problema é desenvolver soluções completamente paralelas para os módulos  $T$ ,  $Q$ ,  $Q^{-1}$  e  $T^{-1}$ , reduzindo o tempo de espera. Outra solução, é não implementar os treze modos de compressão previstos para a predição intra-quadro. Novamente, a qualidade ou a taxa de compressão irão diminuir.

- **Controlo (codificador):** o controlo do codificador é responsável por tomar as decisões sobre a codificação. Para tanto, todos os modos possíveis de codificação devem ser testados e os seus custos devem ser avaliados em função da relação entre a taxa/distorção. As decisões em si não são tarefas complexas, mas elas são tomadas sobre dados que precisam de ser gerados para todas as possibilidades de codificação disponibilizadas.

- **Transformadas e quantização (codificador):** estes módulos ( $T$ ,  $T^{-1}$ ,  $Q$  e  $Q^{-1}$ ), mesmo tendo

uma complexidade computacional reduzida se comparado aos outros módulos de um codec H.264/AVC, estão no caminho crítico da predição intra-quadro. Deste modo, quanto maior for o desempenho destes módulos menor será o tempo em que a predição intra-quadro deverá ficar parada. Além disso, os módulos das transformadas e quantização directas e inversas são muito importantes para o controlo do codificador, pois as decisões relativas ao melhor tamanho de bloco utilizado são realizadas a partir de comparações sobre a imagem reconstruída. A reconstrução da imagem passa pelos quatro módulos das transformadas e quantização e, deste modo, estão no caminho crítico deste módulo e do codificador como um todo.

- **CABAC (codificador e decodificador):** o CABAC, presente no codificador e no decodificador não possui uma complexidade computacional muito elevada. O maior problema é que ele opera sobre símbolos binários, isto é, sobre ‘0’ e ‘1’. Deste modo, para ser processada uma amostra representada em oito bits, por exemplo, são necessárias oito saídas temporalmente distintas do CABAC. Como o CABAC é adaptativo ao contexto, a exploração do paralelismo fica dificultada, uma vez que a codificação do dado futuro depende do dado actual.

- **Filtro redutor de efeito de bloco (codificador e decodificador):** O filtro redutor de efeito de bloco, como o CABAC, é adaptativo ao contexto, por isso, possui algumas dependências de dados que dificultam a exploração máxima do paralelismo.

Além disso, o filtro precisa aceder à memória para gravar os blocos reconstruídos, gerando uma dificuldade a mais na sua implementação, pois o filtro deverá disputar o acesso à memória com o estimador/compensador de movimento e com a predição intra-quadro.

- **Compensação de movimento (decodificador):** A compensação de movimento é um dos módulos mais complexos do decodificador, envolvendo muitas operações aritméticas e muitos acessos à memória. O maior desafio no projecto deste módulo reside no facto de que ele deve estar apto a tratar qualquer tipo de informação gerada pela estimação de movimento do codificador. Novamente, a dependência de dados é pequena e, então, o paralelismo pode ser explorado.

- **Predição intra-quadro (decodificador):** A predição intra-quadro no decodificador não apresenta os mesmos desafios da predição intra-quadro do codificador, uma vez que a dependência de dados relativa à reconstrução do bloco actual existe, mas não é dependente das operações T e Q, que não existem no decodificador. Ainda assim, este módulo é um dos módulos mais complexos do decodificador e demanda um projecto dedicado com algum grau de paralelismo, especialmente para aplicações com resoluções elevadas.

## Capítulo 3 - Modulação

### 3.1 Técnicas Básicas de Modulação em DVB

A modulação constitui a técnica empregue para modificar um sinal com a possibilidade de facilitar o transporte de informação pelo canal de comunicação pretendido e recuperar o sinal, na sua forma original, na outra extremidade [8].

Na escolha de uma modulação a ser empregue num sinal, temos de ter em atenção alguns factores, tais como [1]:

- Características do sinal;
- Eficiência do espectro;
- Resistência a distorções no canal;
- Tolerância nas imperfeições do emissor e receptor;
- Minimização dos requisitos da protecção de interferências.

Algumas técnicas básicas de modulação digital:

- Modulação em *Amplitude Shift Keying* (ASK), Figura 3.1;
- Modulação em *frequency Shift Keying* (FSK);
- Modulação em *Phase Shift Keying* (PSK), Figura 3.2;
- Mistura de amplitude e fase, *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), Figuras 3.3 e 3.4.

Na modulação QAM o sinal digital é decomposto em duas componentes multi-nível, estas componentes designam-se por portadoras **I** e **Q**, a informação transmitida está contida na amplitude e fase do sinal [1].

Com a utilização de modulações multi-nível consegue-se atingir uma boa eficiência espectral, de no mínimo 16 estados, correspondente a 4 bits (16 QAM) [8].

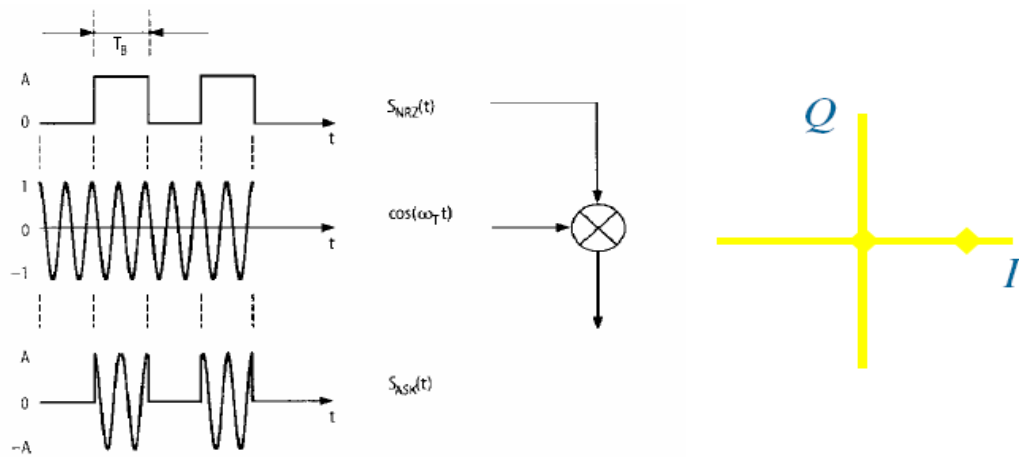
O “**número de estados** =  $2^{\text{número de bits}}$ ”, pelo que obtemos:

- A modulação 16 QAM transmite 4 bits de informação ( $2^4 = 16$ );
- A modulação 64 QAM transmite 6 bits de informação ( $2^6 = 64$ );
- A modulação 128 QAM transmite 7 bits de informação ( $2^7 = 128$ );
- A modulação 256 QAM transmite 8 bits de informação ( $2^8 = 256$ );

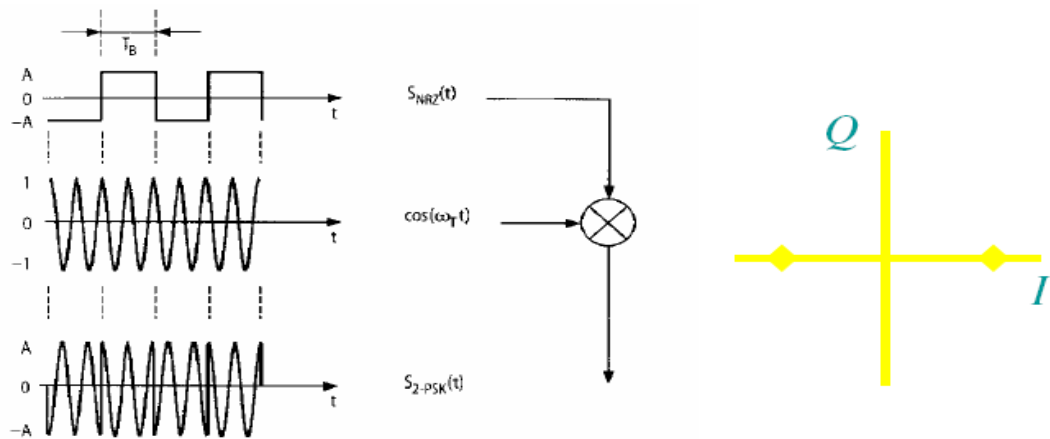
Na modulação em amplitude a informação transmitida está contida na envolvente do sinal.

Na modulação de fase a informação transmitida está contida na fase do sinal.

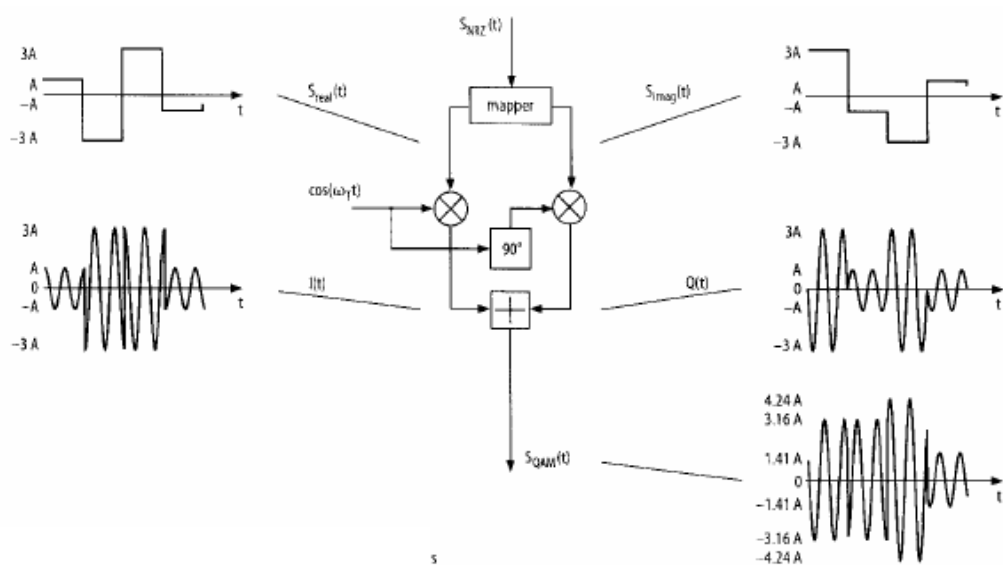




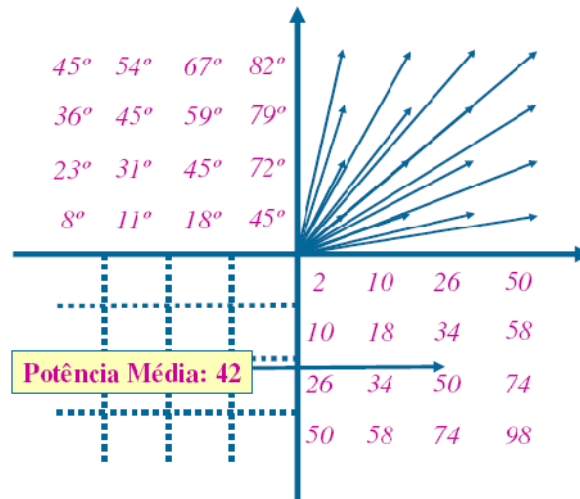
**Figura 3.1** - Modulação em amplitude (ASK) (extraído de [1])



**Figura 3.2** - Modulação de fase (PSK) (extraído de [1])

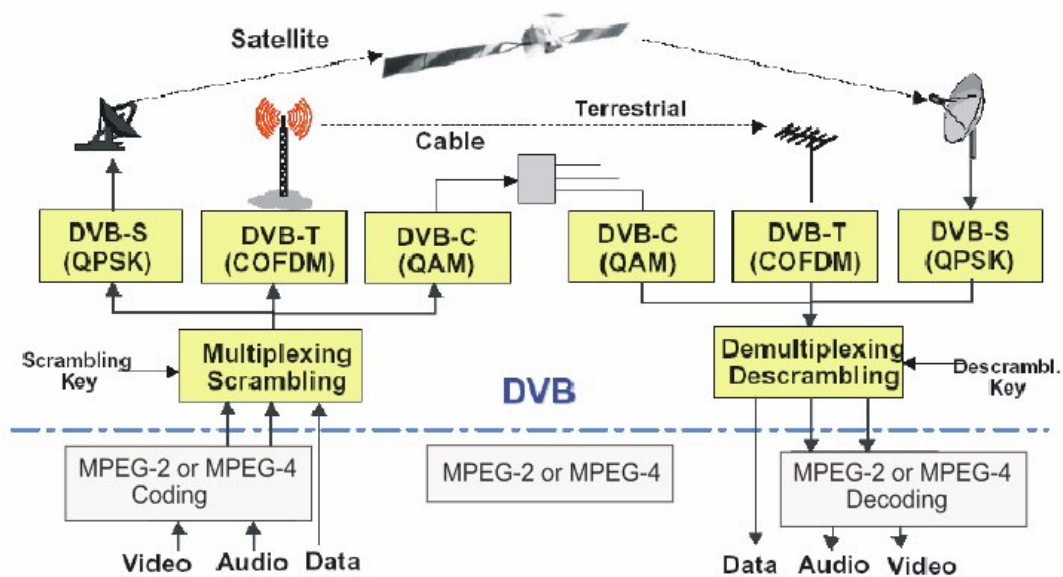


**Figura 3.3** - Modulação em quadratura e amplitude (QAM) (extraído de [1])



**Figura 3.4** - Constelação 64 – QAM (extraído de [1])

Os sistemas DVB empregam vários tipos de modulação, como mostra a Figura 3.5.



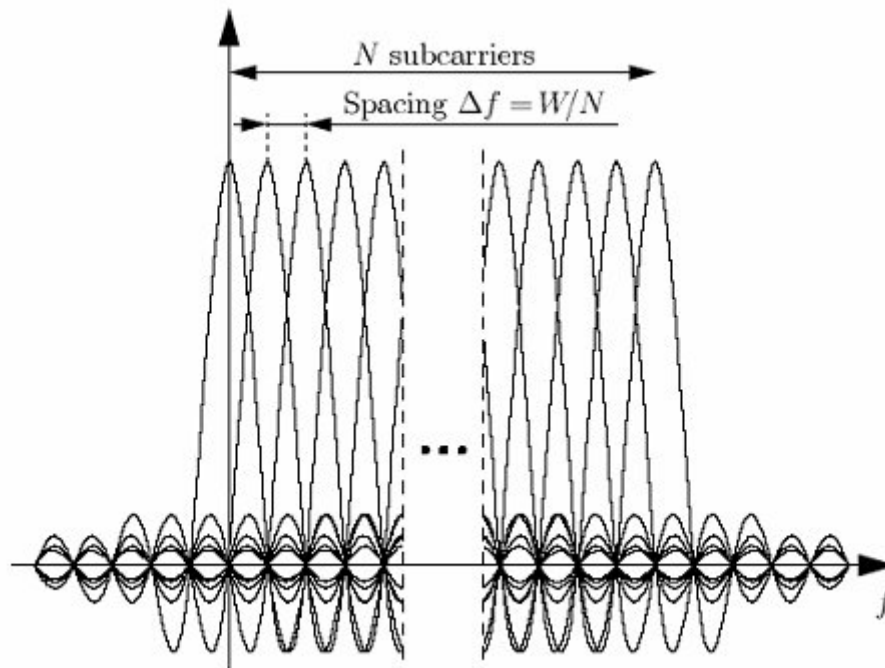
**Figura 3.5** - Sistemas DVB (extraído e adaptado de [1])

### 3.2 Modulação *Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)*

A OFDM pode ser vista como uma técnica de modulação ou de multiplexagem, é um tipo particular de transmissão multi-portadora, a ideia básica é dividir a informação a transmitir por várias portadoras de banda estreita em paralelo, as portadoras terão de ser ortogonais [9], isso acontece se a sua frequência for múltipla de  $1/T$ , como mostra a Figura 3.6.

Quando é feita uma codificação de canal antes da modulação OFDM, como é o caso do DVB-

T, essa modulação é conhecida como *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex* (COFDM).



**Figura 3.6** - Ortogonalidade das portadoras (extraído de [9])

Para o projecto de um sistema OFDM normalmente há três requisitos à partida:

- Largura de banda;
- Ritmo de transmissão;
- Atraso.

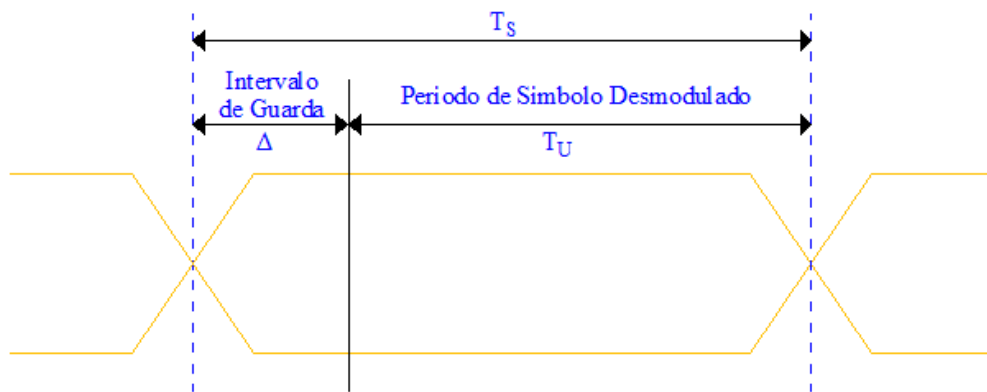
O atraso é causado pelo multipercurso, como tal e para se garantir um *Inter-symbol Interference* (ISI) e *Inter-Carrier Interference* (ICI) nulas, impõe-se um intervalo de guarda, este, resulta normalmente numa perda de *Signal to Noise Ratio* (SNR), uma vez que não transporta informação, geralmente o intervalo de guarda deverá ser duas a quatro vezes a média quadrática dos atrasos. O intervalo de guarda é ciclicamente estendido para evitar ICI. Para minimizar a perda de SNR devido ao intervalo de guarda, a duração de símbolo deverá ser muito superior ao intervalo de guarda, normalmente utiliza-se um valor de pelo menos cinco vezes o tempo do intervalo de guarda [9].

O DVB-T define duas variantes para a transmissão dos dados (em canais de 8 MHz):

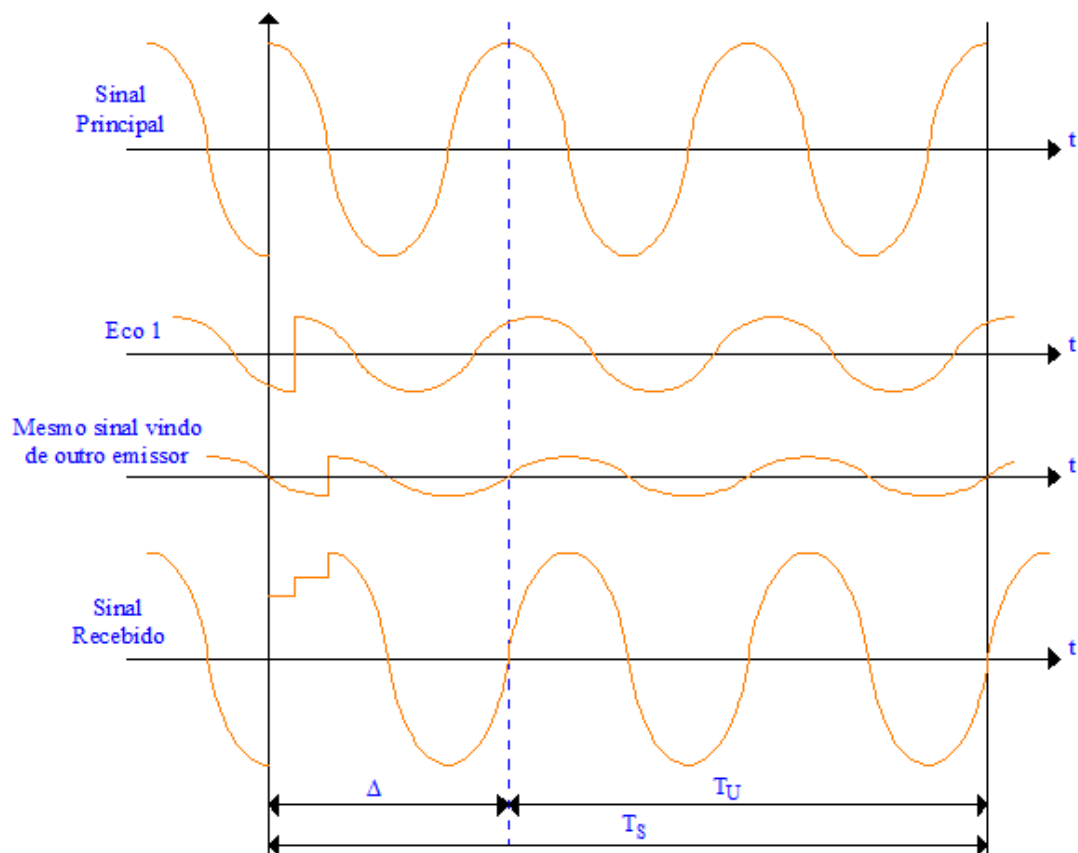
- **Variante 2K** (cada símbolo OFDM é constituído por 1512 subportadoras de sinal e 193 de sincronização), esta variante é indicada para cobertura de áreas pequenas; menos resistente a interferências, menos complexa; 224μs/símbolo; espaço entre subportadoras de 4464 Hz.

- **Variante 8K** (cada símbolo OFDM é constituído por 6048 subportadoras de sinal e 769 de sincronização), esta variante é indicada para cobertura de áreas grandes; mais resistente a interferências, mais complexa;  $896\mu\text{s/símbolo}$ ; espaço entre subportadoras de 1116 Hz.

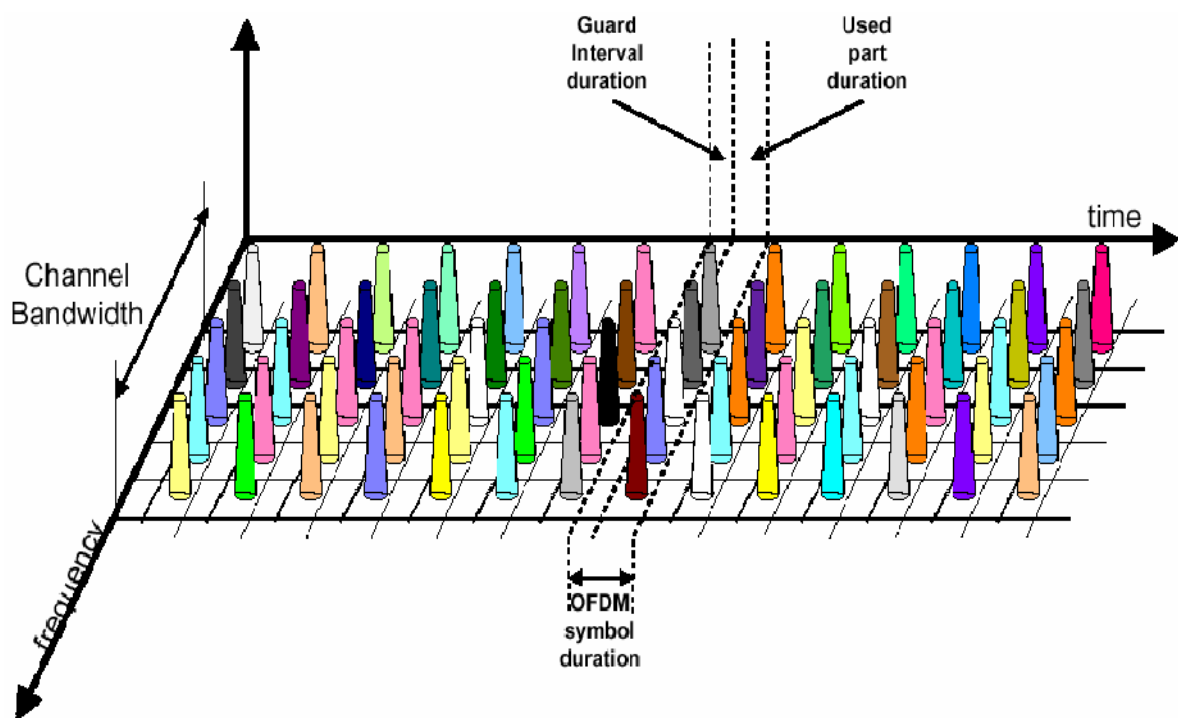
A modulação de cada subportadora pode ser feita com QPSK (2 bits), 16-QAM (4 bits) ou 64-QAM (6 bits) [1].



**Figura 3.7** - Intervalo de guarda



**Figura 3.8** - Intervalo de guarda (exemplo)



**Figura 3.9** - Intervalo de guarda e subportadoras em OFDM (extraído de [10])

Na estrutura da trama OFDM o sinal transmitido é organizado em tramas, cada trama tem a duração  $T_F$  e consiste em 68 símbolos OFDM, quatro tramas constituem uma super-trama. Cada símbolo é constituído por um conjunto de  $K = 6817$  portadoras no modo 8K e  $K = 1705$  portadoras no modo 2K e são transmitidas com a duração  $T_S$ ; O símbolo é composto em duas partes, uma parte com informação útil e de duração  $T_U$  e outra parte sem informação a que se chama intervalo de guarda com uma duração  $\Delta$  [11].

Os símbolos da trama OFDM são numerados de 0 a 67. Todos os símbolos contêm dados e informação de referência.

Cada símbolo é dividido em células, cada uma correspondendo à modulação transportada numa portadora durante um símbolo.

Para além dos dados a trama OFDM contém:

- *Scattered Pilot cells* (SPS);
- *Continual Pilot Carriers* (CPC);
- *Transmission Parameter Signaling* (TPS).

Os pilotos são usados para sincronização da trama, frequência, tempo estimação de canal, identificação do modo de transmissão e também podem ser usados para seguir o ruído de fase.

As portadoras são indexadas por  $k \in [K_{\min}; K_{\max}]$  e determina-se que  $K_{\min} = 0$  e  $K_{\max} = 1704$  e

6816 para o modo 2K e 8K respectivamente. O espaçamento entre portadoras adjacentes é de  $1/T_U$  enquanto que o espaçamento entre portadoras  $K_{\min}$  e  $K_{\max}$  é determinado por  $(K-1)/T_U$ . Para um canal de 8 Mhz de *Largura de Banda* (LB), a frequência elementar de relógio é de 64/7 MHz em que temos:

$$T_u = \frac{A}{\left(\frac{64}{7} \times \frac{LB}{8}\right)} \quad (3.1)$$

$A = 2048$  ou  $8192$  para 2K e 8K respectivamente

**Tabela 3.1** – Valores numéricos dos parâmetros OFDM para o modo 2K e 8K para um canal de LB de 8 MHz

Parâmetro	Modo 8K	Modo 2K
Número de portadora K	6 817	1 705
Valor do número de portadora $K_{\min}$	0	0
Valor do número de portadora $K_{\max}$	6 816	1 704
Duração $T_U$	896 $\mu$ s	224 $\mu$ s
Espaçamento da portadora $1/T_U$	<i>1 116 Hz</i>	<i>4 464 Hz</i>
Espaçamento entre portadoras $K_{\min}$ e $K_{\max}$ $(K-1)/T_U$	<i>7,61 MHz</i>	<i>7,61 MHz</i>
Os valores em <i>itálico</i> são valores aproximados		

**Tabela 3.2** – Duração da parte do símbolo conforme o intervalo de guarda para o modo 2K e 8K para um canal de LB de 8 MHz

Modo	Modo 8K				Modo 2K			
Intervalo de guarda $\Delta/T_U$	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Duração do símbolo parte $T_U$	8 192 x T (nota) 896 $\mu$ s				2 048 x T (nota) 224 $\mu$ s			
Duração do intervalo de guarda $\Delta$	2 048 x T 224 $\mu$ s	1 024 x T 112 $\mu$ s	512 x T 56 $\mu$ s	512 x T 56 $\mu$ s	512 x T 56 $\mu$ s	256 x T 28 $\mu$ s	128 x T 14 $\mu$ s	64 x T 7 $\mu$ s
Duração do símbolo $T_S = \Delta + T_U$	10 240 x T 1 120 $\mu$ s	9 216 x T 1 008 $\mu$ s	8 704 x T 952 $\mu$ s	8 704 x T 952 $\mu$ s	2 560 x T 280 $\mu$ s	2 304 x T 252 $\mu$ s	2 176 x T 238 $\mu$ s	2 112 x T 231 $\mu$ s
Nota: T = (7/64E6) para canais de 8 MHz								

Em cada símbolo OFDM é enviada informação de referência nas SPS, como ilustra a Figura 3.10.

Para além das SPS, são ainda enviadas 177 ou 45 pilotos contínuos (8K ou 2K) inseridos nos

As portadoras TPS transportam informação sobre:

- Modulação;
- Hierarquia;
- Intervalo de guarda;
- Taxa de código interna;
- Modo de transmissão (8K ou 2K)
- Número de trama numa super-trama;
- Identificação de célula.

$K_{\min} = 0$ 
 $K_{\max} = 1\,704$  if 2K
  $K_{\max} = 6\,816$  if 8K

TPS pilots and continual pilots between  $K_{\min}$  and  $K_{\max}$  are not indicated

● boosted pilot  
 ○ data

**Figura 3.10** – Padrão de inserção das SPS (extraído de [9])

**Tabela 3.3 – Índice de inserção das portadoras TPS**

Modo 2K	Modo 8K
34 50 209 346 413 569 595 688 790 901 1073 1219 1262 1286 1469 1594 1687	34 50 209 346 413 569 595 688 790 901 1073 1219 1262 1286 1469 1594 1687 1738 1754 1913 2050 2117 2273 2299 2392 2494 2605 2777 2923 2966 2990 3173 3298 3391 3442 3458 3617 3754 3821 3977 4003 4096 4198 4309 4481 4627 4670 4694 4877 5002 5095 5146 5162 5321 5458 5525 5681 5707 5800 5902 6013 6185 6331 6374 6398 6581 6706 6799

**Tabela 3.4 – Índices de inserção das portadoras CPC**

Modo 2K	Modo 8K
0 48 54 87 141 156 192 201 255 279 282 333 432 450	0 48 54 87 141 156 192 201 255 279 282 333 432 450
483 525 531 618 636 714 759 765 780 804 873 888 918	483 525 531 618 636 714 759 765 780 804 873 888
939 942 969 984 1050 1101 1107 1110 1137 1140 1146	918 939 942 969 984 1050 1101 1107 1110 1137 1140
1206 1269 1323 1377 1491 1683 1704	1146 1206 1269 1323 1377 1491 1683 1704 1752 1758
	1791 1845 1860 1896 1905 1959 1983 1986 2037 2136
	2154 2187 2229 2235 2322 2340 2418 2463 2469 2484
	2508 2577 2592 2622 2643 2646 2673 2688 274 2805
	2811 2814 2841 2844 2850 2910 2973 3027 3081 3195
	3387 3408 3456 3462 3495 3549 3564 3600 3609 3663
	3687 3690 3741 3840 3858 3891 3933 3939 4026 4044
	4122 4167 4173 4188 4212 4281 4296 4326 4347 4350
	4377 4392 4458 4509 4515 4518 4545 4548 4554 4614
	4677 4731 4785 4899 5091 5112 5160 5166 5199 5253
	5268 5304 5313 5367 5391 5394 5445 5544 5562 5595
	5637 5643 5730 5748 5826 5871 5877 5892 5916 5985
	6000 6030 6051 6054 6081 6096 6162 6213 6219 6222
	6249 6252 6258 6318 6381 6235 6489 6603 6795 6816

**Tabela 3.5 – Débito binário (Mbit/s) versus modulação para canal com LB de 8 MHz**

Modulação	Taxa de código	Intervalo de guarda			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	4,98	5,53	5,85	6,03
	2/3	6,64	7,37	7,81	8,04
	3/4	7,46	8,29	8,78	9,05
	5/6	8,29	9,22	9,76	10,05
	7/8	8,71	9,68	10,25	10,56
16 – QAM	1/2	9,95	11,06	11,71	12,06
	2/3	13,27	14,75	15,61	16,09
	3/4	14,93	16,59	17,56	18,10
	5/6	16,59	18,43	19,52	20,11
	7/8	17,42	19,35	20,49	21,11
64 - QAM	1/2	14,93	16,59	17,56	18,10
	2/3	19,91	22,12	23,42	24,13
	3/4	22,39	24,88	26,35	27,14
	5/6	24,88	27,65	29,27	30,16
	7/8	26,13	29,03	30,74	31,67



## Capítulo 4 - Planeamento

### 4.1 Parametrização

A realização prática da nova filosofia de planeamento, do ponto de vista da eficiência espectral, deve ser feita com base em redes de emissores sincronizados, designadas por “redes de frequência única” (também conhecidas pela sigla anglo-saxónica "SFN"), por forma a obter-se a máxima eficiência em termos da gestão de espectro radioeléctrico.

No que se refere propriamente ao planeamento e tendo em atenção ao tipo de cobertura que está associado ao sistema DVB-T (caracterizado por uma transição muito rápida entre uma recepção quase perfeita e nenhuma recepção), as percentagens adequadas dos locais a cobrir situam-se usualmente em 95% (cobertura "boa") ou 70% (cobertura "aceitável"); em termos de protecção contra interferências num dado local de recepção, é desejável definir uma percentagem de 99% do tempo em que o sinal útil não sofre degradações, devido ao ruído e a eventuais interferências [2].

Por outro lado, o planeamento deste serviço, em resultado do tipo de tecnologia digital característico do sistema DVB-T, deverá também contemplar, de um modo geral, outros três aspectos importantes: modo de funcionamento, robustez e qualidade de imagem dos programas a transmitir.

Seguidamente, consideram-se estes três aspectos:

- **Modo de funcionamento:** pode determinar o tamanho máximo das redes com emissores sincronizados, sendo possíveis os dois seguintes modos:
  - Modo 2K (com 1705 portadoras activas) - aplicável a redes de âmbito local e, eventualmente, de âmbito local mais alargado;
  - Modo 8K (com 6817 portadoras activas) - aplicável a redes de âmbito nacional, mas também a redes de âmbito mais restrito (nomeadamente, regional e local "alargado");
- **Robustez dos programas:** pode ser definida em função do tipo de modulação, do intervalo de guarda entre dois símbolos do sinal DVB-T e da redundância ou taxa de código, sendo capaz de influenciar os seguintes parâmetros:
  - Alcance de uma cobertura - que aumentará com a robustez, para a mesma potência de emissão e qualidade de recepção;
  - Capacidade disponível - que diminuirá com o aumento da robustez (refira-se

que a capacidade disponível de um canal de radiofrequências poderá exprimir-se pelo débito efectivo máximo desse canal);

- Tipo de recepção - esta poderá ser fixa, portátil e, posteriormente, móvel; poderá afirmar-se que no quadro da recepção portátil ou móvel, em condições menos favoráveis, os programas terão necessidade de maior robustez do que no caso da recepção fixa.

→ **Qualidade de imagem dos programas:** pode ser definida por um dado débito binário, que é função do grau de definição das imagens a transmitir; por sua vez, ao grau de definição faz-se corresponder uma dada qualidade de imagem analógica conhecida; os programas, em termos de qualidade de imagem, poder-se-ão caracterizar tipicamente da seguinte forma:

- 2 a 2,2 Mbit/s – SDTV;
- 5 a 6 Mbit/s – HDTV.

Refira-se, a este propósito, que, num canal de radiofrequências de 8 MHz haverá lugar para um débito efectivo máximo, variando entre valores muito distintos (teoricamente, a máxima capacidade disponível de informação útil por canal de radiofrequências pode variar grosso modo entre 5 e 31 Mbit/s), ver Tabela 3.5.

No contexto do planeamento do serviço DVB-T para recepção fixa, prevê-se a possibilidade de transmitir, simultaneamente num único canal de radiofrequências, 5 programas SDTV com boa qualidade de imagem.

Nesta situação, correspondente a um planeamento para recepção fixa de 5 programas SDTV por canal de radiofrequências, a possibilidade de recepção portátil ficaria necessariamente restringida a um alcance de cobertura inferior ao da cobertura para recepção fixa. Esta constatação decorre de considerações técnicas relacionadas com o tipo de robustez dos programas em causa, suficiente para garantir uma boa qualidade de serviço na recepção fixa. Se o planeamento do sistema DVB-T for, no entanto, pensado em termos de recepção portátil, ou móvel, torna-se necessário conferir um determinado nível de protecção aos programas a transmitir, a fim de torná-los suficientemente robustos para o efeito (uma maior robustez será necessária no caso da recepção móvel), garantindo-se, assim, uma boa qualidade de serviço neste tipo de recepção.

Nestes casos, a robustez necessária será conseguida à custa de débito binário, o que terá como consequência uma redução do débito efectivo máximo; por sua vez, este facto significaria uma redução da capacidade total por canal de radiofrequências, isto é, do número máximo de

programas e serviços a transmitir conjuntamente no sinal DVB-T [2].

O ETSI elaborou a norma ETSI EN 300 744 V1.5.1 (2004-11) que constitui o documento de suporte à implementação da rede de distribuição DVB-T. A norma especifica a codificação e modulação de canais para a difusão de múltiplos programas no formato digital *Limited Definition TeleVision* (LDTV) / SDTV / *Enhanced Definition TeleVision* (EDTV) / HDTV.

A norma define soluções SFN ou MFN, assim como especifica diversos parâmetros, nomeadamente:

- Os canais a utilizar em *Ultra-High Frequency* (UHF) ou *Very-High Frequency* (VHF);
- Modulação utilizada (OFDM - QPSK, 16 QAM e 64 QAM);
- Número de portadoras OFDM (2k ou 8k);
- Taxa de código (1/2, 2/3, 3/4, 5/6 e 7/8);
- Intervalo de guarda (1/4, 1/8, 1/16 e 1/32).

Estes parâmetros são essenciais para garantir o melhor compromisso entre a qualidade do sinal recebido pelo utilizador final, cobertura pretendida, número de emissores, definição SDTV ou HDTV e número de programas.

## 4.2 Planeamento de Uma Rede SFN Regional

No ano de 2012 o sistema de teledifusão analógico em Portugal será desligado “Switch-off”, contudo e até essa data o DVB-T já estará em funcionamento. Após o “Switch-off” haverá um espectro radioelétrico disponível que até então era ocupado pelo sistema de teledifusão analógico, este espectro já foi redistribuído na *Regional Radiocommunication Conference-2006* (RRC-06), Genebra, a Figura 4.1 dá-nos as frequências disponíveis para cobertura DVB-T de âmbito distrital após o “Switch-off”.

Neste trabalho o planeamento da rede em causa é de âmbito distrital a que se dá o nome de “DVB-T Beira Interior” e utiliza o Canal 64 [814-822 MHz] atribuído a uma parte do distrito de Castelo Branco após o “Switch-off”.

A rede tem a configuração de multiplexer, uma vez que se pretende transmitir, simultaneamente num único canal de radiofrequências, vários programas SDTV ou HDTV e canais de difusão de dados. A este multiplexer atribui-se o nome de BI.



**Figura 4.1** - Cobertura DVB-T de âmbito distrital disponível após o “Switch-off” (extraído de [12])

## 4.2.1 Configuração da Rede

### 4.2.1.1 Modulação

As características particulares da difusão terrestre, multi-percurso resultante de reflexões em edifícios ou obstáculos naturais, exige que a modulação e a codificação utilizadas sejam robustas, tendo, por isso, a escolha recaído na modulação OFDM que utiliza um elevado número de portadoras, cada uma transportando uma pequena parte da informação total codificada, de espaçamento cuidadosamente escolhido para assegurar ortogonalidade e, consequentemente, um reduzido nível de interferência entre portadoras. O baixo débito por portadora, só por si, reduz a susceptibilidade à interferência multi-percurso, uma vez que o período do símbolo é bastante mais longo se comparado com o atraso típico do eco.

De entre as modulações disponíveis para DVB-T: QPSK, 16 QAM e 64 QAM. É, assim, possível associar a cada símbolo um conjunto de dois, quatro ou seis bits respectivamente.

A maximização do número de bits mapeados por símbolo, tendo em conta o limite superior de seis para a modulação 64-QAM, conduzirá uma maior eficiência espectral, bem como, à possibilidade de transmitir um maior número de programas.

Por outro lado, quanto maior a eficiência espectral menor será a área coberta por um emissor uma vez que é necessário garantir uma margem superior da relação sinal ruído, a fim de ser garantida uma determinada disponibilidade do serviço. Esta relação implica também um período simbólico maior e, consequentemente, o aumento da distância entre emissores da rede SFN.

Tendo em conta que não se sabe qual a capacidade a reservar no Multiplexer BI, uma vez que ainda não foi a concurso, opta-se por reservar 18 Mbit/s.

Nesta reserva já está contemplado capacidade suplementar para informação prevista na norma ETSI EN 300 744 V1.5.1.

Tendo em consideração as possibilidades de modulação e taxa de código especificados na norma ETSI EN 300 744 V1.5.1, para o intervalo de guarda de 1/4, conjugado com número de portadoras 8k e o requisito de uma capacidade mínima útil de 18 Mbit/s o sistema de modulação a escolher é a 64QAM e a taxa de código terá que ser igual ou superior a 2/3.

#### **4.2.1.2 Taxa de Código**

A difusão terrestre é de um dos canais de comunicação mais agressivos no que se refere a erros de transmissão. Os aspectos relativos a interferências e multi-percursos, não existentes em meios de transmissão guiada, exigem uma codificação de canal mais exigente por forma a proteger os bits de informação.

Neste sentido, e complementando à robustez que a modulação OFDM confere na plataforma DVB-T, são implementados sistemas correctores de erros. Um dos processos usados baseia-se na introdução de informação redundante, para o efeito a norma apresenta diversos rácios face à informação útil, tais como,  $1/2$ ,  $2/3$ ,  $3/4$ ,  $5/6$  ou  $7/8$ .

A relação da taxa de código afecta o equilíbrio entre o débito útil alcançado e a qualidade da ligação, no limite isenta de erros. A escolha do número de bits de redundância a inserir foi ponderada em função de uma análise técnica e da estratégia de débito pretendido.

Para garantir um débito útil que possibilite uma oferta mais alargada, permitindo aos utilizadores da rede uma capacidade para serviços em quantidade e/ou qualidade, a taxa de código a seleccionar deve ser igual ou superior a  $2/3$  para a modulação de 64QAM.

As taxas de código  $5/6$  e  $7/8$  não são adequadas uma vez que se prevê, nas zonas a cobrir a identificação de áreas de difícil cobertura, baixa intensidade de campo e consequente ocorrência de erros.

Para uma análise final estiveram em concorrência duas taxas de código:  $2/3$  e  $3/4$ .

Considerando o serviço que se pretende fornecer em zonas de difícil cobertura, pretender-se cobertura portátil interior na cidade da Covilhã, e à necessidade de controlar custos, leva a optar pela taxa de  $2/3$  em detrimento de  $3/4$ .

#### **4.2.1.3 Intervalo de Guarda**

O intervalo de guarda pode ser seleccionado entre os valores de  $1/4$ ,  $1/8$ ,  $1/16$  e  $1/32$  do tempo útil do símbolo das sub-portadoras OFDM que relacionam os intervalos de tempo em que não há transmissão com os intervalos de tempo em que há transmissão de sinal útil. A opção vai depender do tipo de rede implementada, ser SFN ou MFN, área total a cobrir, orografia e localização das infra-estruturas.

Para grandes extensões com cobertura SFN como é o caso da cobertura na Beira Interior é recomenda a opção pelo intervalo de  $1/4$  e por um número de portadoras 8K.

Esta opção irá facilitar e racionalizar o investimento mediante aproveitamento de infra-estruturas existentes por permitir um espaçamento entre emissores próximo de 60Km.

Para implementar a rede SFN na Beira Interior e dado os constrangimentos associados, nomeadamente, grande probabilidade de interferências mútuas entre emissores, dificuldade de utilização das infra-estruturas existentes em locais de cotas muito elevadas e rápida implementação da rede, optou-se pelo intervalo de guarda de 1/4.

#### 4.2.1.4 Modo de Funcionamento / Número de Portadoras

As redes DVB-T podem funcionar em modo de frequência única (SFN) ou modo multifrequência (MFN). A Tabela 4.1, indica os parâmetros utilizados no planeamento da rede SFN da BI.

**Tabela 4.1** - Resumo dos parâmetros técnicos a utilizar de acordo com a norma: ETSI EN 300 744 V1.5.1 (2004-11)

Parâmetro	Opção Seleccionada
Largura de banda de canal RF	8 MHz
Modo de Portadoras	8 K
Número de Portadoras	6817
$T_U$ (Inverso do espaçamento entre portadoras)	896 $\mu$ s
Espaçamento entre $K_{min}$ e $K_{máx}$	7,61 MHz
Intervalo de Guarda	1/4
Duração do Intervalo de Guarda $\Delta$	224 $\mu$ s
Código Redundante	2/3
Modulação	64 QAM
Débito Mux	19,91 Mbit/s

Uma das vantagens dos sistemas DVB-T reside na modulação OFDM, caracterizada pelo elevado número de sub-portadoras, com débito inversamente proporcional e período de símbolo directamente proporcional ao seu número.

As sub-portadoras são ortogonais anulando as interferências entre si. Para condições anómalas de propagação, como nas situações de multi-percurso, a estabilidade da ortogonalidade deteriora-se com consequente aparecimento de erros nas recebidas, podendo causar perturbações na imagem e no som e, no limite, levar à inviabilidade do sinal recebido por

determinados períodos de tempo.

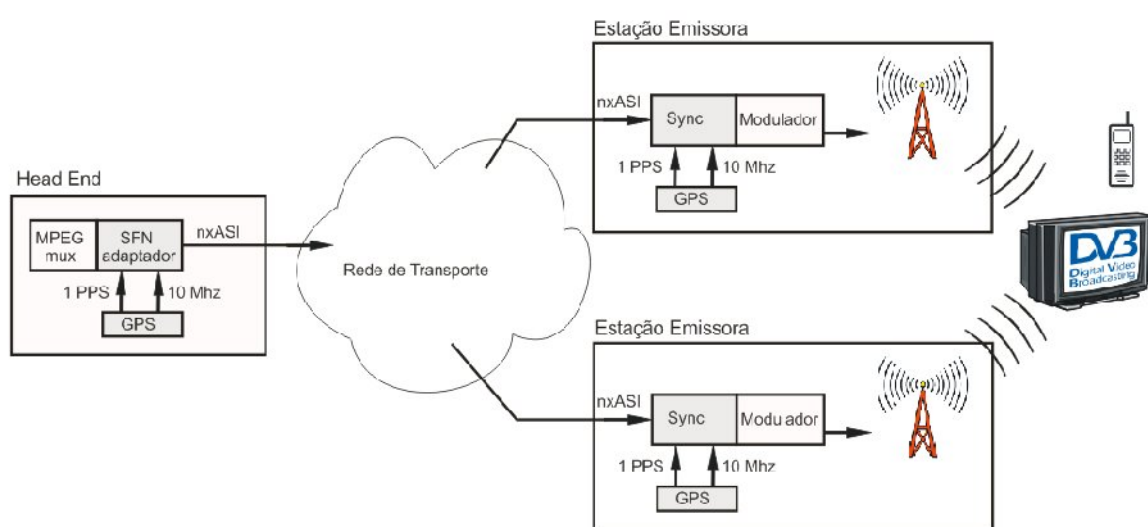
De acordo com a norma DVB-T (ETSI EN 300 744 V1.5.1) estão definidas duas opções para o modo de funcionamento: 2K e 8K.

Tendo em consideração que o modo 2K é adequado para redes SFN de pequena dimensão ou distâncias entre emissores muito limitadas, optou-se pelo modo 8K, que é o mais adequado para a construção da rede em causa, permitindo:

- Aumentar o tempo útil de símbolo e maior imunidade a interferências destrutivas;
- Aumentar a eficiência espectral (bit/Hz);
- Diminuir a largura de banda versus débito fornecido.

#### 4.2.1.5 Modo de Sincronismo Entre as Estações de Difusão

A operação de uma rede SFN impõe que se garanta o sincronismo entre os adaptadores SFN, localizados no Centro de Difusão Digital, e os Centros de Emissão, de acordo com a Figura 4.2.



**Figura 4.2** – Sincronismo da rede SFN

Os sinais difundidos por todos os emissores devem ser sincronizados no tempo, em frequência e conteúdo. No presente caso este requisito será essencialmente garantido através da inserção de um adaptador de rede SFN no *Centro de Difusão Digital* (CDD) e de um sistema de adaptação de SFN em cada um dos emissores.



#### 4.2.1.5.1 Sincronização de Tempo

O adaptador SFN localizado no CDD insere, periodicamente, informações específicas para o transporte de *streams* fornecidos pelo *head-end*.

A informação específica, designada por *Megaframe Identification Packet* (MIP), é utilizada para sincronizar os vários emissores. O adaptador SFN do CCD obtém também a informação do tempo através de um receptor GPS (igualmente redundante) e insere a informação em cada MIP transmitido, de forma a transferir para cada Centro de Emissão o instante correcto de arranque de cada *Megaframe*, bem como os *timings* da informação. Cada emissor recolhe estas informações e utiliza-as para realizar a sincronização do tempo e bit.

#### 4.2.1.5.2 Sincronização de Frequência

Todos os osciladores locais nos Centros de Emissão (moduladores, *upconverters*, etc) terão a fase e frequência bloqueadas a uma referência comum de elevada estabilidade. A frequência de referência comum será gerada por um *Sistema de Posicionamento Global* (GPS), em cada emissor, com redundância local.

A sincronização SFN utilizará duas referências standard:

- Frequência de referência de 10 MHz;
- Tempo de referência de 1 impulso por segundo (PPS).

As referências são fornecidas pelo sistema de GPS.

Esta solução pressupõe que todos os *Voltage Controlled Oscillators* (VCO) no modulador e emissor de cada Centro de Emissão estão bloqueados ao sinal de referência de 10 MHz. O sinal de 1 PPS do GPS é usado como referência para calcular o atraso relativo ao MIP e o instante apropriado para a emissão de cada *Megaframe*.

#### 4.2.1.5.3 Sincronização de Conteúdo

A sincronização de conteúdo exige que o mesmo símbolo seja transmitido no mesmo instante em todos os emissores. Assim, todas as portadoras de sinais nos moduladores dos emissores da rede têm que ser modulados identicamente, o que significa que, os mesmos bits devem modular a mesma portadora K no sistema base multi-portadora OFDM.

## 4.2.2 Cobertura Radioelétrica

Todas as ferramentas de software para cálculo da cobertura radioelétrica, antenas de emissão, dados relativos a cartografia e densidade populacional são propriedade da PT Comunicações. No entanto foi facultado o acesso para fins académicos, apresentando-se neste trabalho os dados a elas associados assim como as suas características técnicas .

### **Cartografia**

Os modelos digitais de terreno têm varias resoluções, foi utilizada para o planeamento a resolução de 100m e 500m para as coordenadas XYZ. A base da informação é uma matriz regular de pontos com valores de elevação do terreno, com a resolução máxima de 8 metros, com base na informação vectorial das cartas geográficas série 1/25.000. A partir da informação da matriz referida o organismo detentor destas cartas produziu por interpolação uma matriz regular para a resolução de 100 metros utilizada no planeamento.

As cartas deste organismo utilizam a projecção Universal Transversa de Mercator sendo o DATUMs para o continente Português o Datum Lisboa.

A informação morfológica tem uma resolução de 100m x 100m obtida a partir de imagens do satélite Ladsat com resolução de 100m e precisão XY= 100m.

As classes morfológicas escolhidas têm em conta as características geográficas de Portugal e a escolha do algoritmo de propagação utilizado, tendo sido obtidos mapas de utilização do terreno com cinco caracterizações [12]:

- Água
- Terreno aberto
- Urbano denso
- Suburbano
- Floresta.

Estas classes são utilizadas pelo software de propagação para o cálculo de valores de intensidade de campo conferindo aos resultados uma maior precisão.

Para efeitos de apresentação da informação de coberturas são utilizados mapas, em formato *raster*, de Portugal com a escala 1:500 000

### **População**

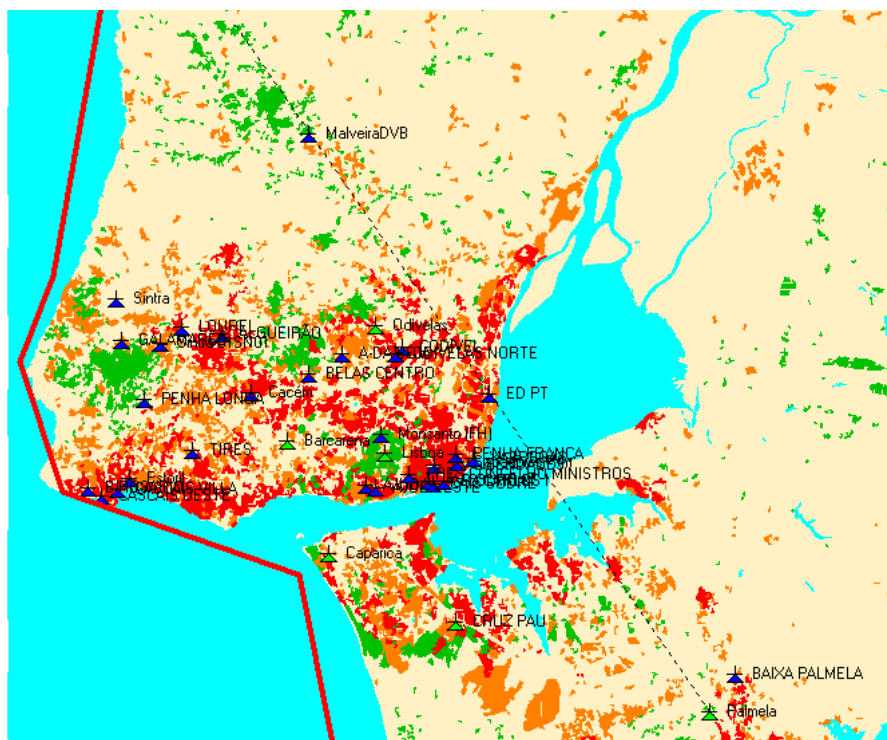
Para efeitos do planeamento de cobertura de população, adoptou-se a informação constante do Censos 2001 (com dados de população desagregada ao nível de Freguesia) actualizada pelo Instituto Nacional de Estatística em 2006. Atendendo a que a actualização de 2006 apenas

contém desagregação de população ao nível de Concelho [12].

A distribuição populacional foi realizada distribuindo a população em cada “pequena área” de 100 m por 100 m, com base na informação morfológica e na informação da população a nível de Freguesia.

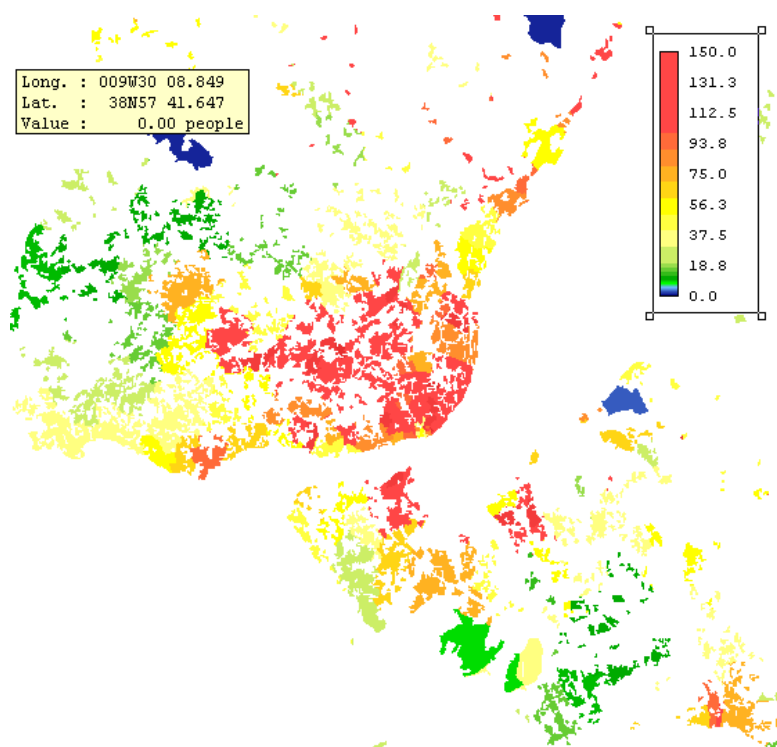
A Figura 4.3 é o exemplo da classificação morfológica georreferenciada para a área da grande Lisboa, com o seguinte significado das cores:

- Verde – floresta;
- Azul – água;
- Salmão claro – campo aberto;
- Laranja – suburbano;
- Vermelho – urbano denso;

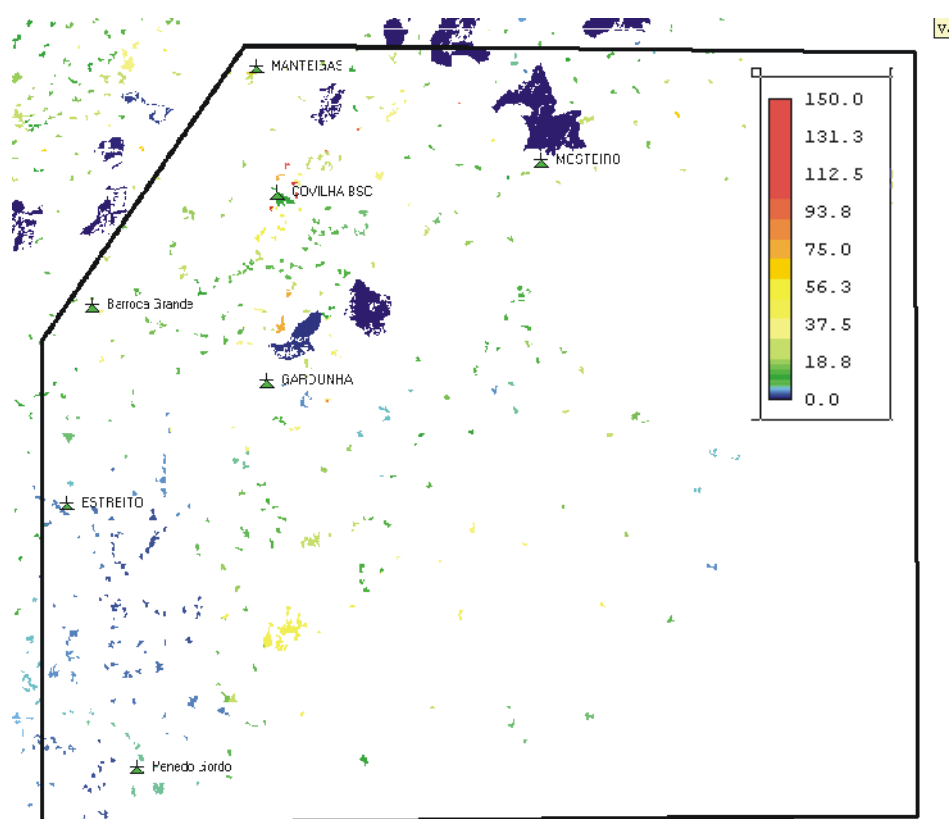


**Figura 4.3** - Classificação morfológica na área da grande Lisboa (extraído de [12])

Cruzada a informação morfológica com a informação da população a nível de Freguesia obtém-se a densidade populacional em cada “pequena área” de 100 m por 100 m, Figuras 4.4 e 4.5



**Figura 4.4** - Densidade populacional na área da grande Lisboa “pequenas áreas” (extraído de [12])



**Figura 4.5** - Densidade populacional na área da Beira Interior “pequenas áreas”

### Recepção de sinal radioelétrico

O planeamento da rede DVB-T da Beira Interior é feito de forma a atingir um objectivo de cobertura para recepção fixa de pelo menos 87% da população.

Para além deste objectivo foi fixado outro, de disponibilizar cobertura portátil interior na cidade da Covilhã como sendo considerado um centro histórico.

De acordo com as novas regras definidas em RRC-06, uma determinada área elementar admite-se coberta para recepção fixa se nela for imposta um campo de 51,0 dB $\mu$ V/m com probabilidade de localização de 70% (dita cobertura aceitável) para as áreas rurais e, um campo de 57,1 dB $\mu$ V/m com probabilidade de localização de 95% (dita cobertura boa) para as áreas urbanas [12].

Os valores medianos de intensidade mínima de campo eléctrico utilizados para o planeamento de acordo com os parâmetros da tabela 4.1, são os indicados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2** – Valores medianos de intensidade mínima de campo eléctrico do canal 64 [814-822 MHz]

Probabilidade de recepção	Campo eléctrico
Recepção fixa para 70%	51,0 dB $\mu$ V/m
Recepção fixa para 95%	57,1 dB $\mu$ V/m
Recepção portátil interior para 85%	89,1 dB $\mu$ V/m

Os valores de  $C/N$  utilizados para efeitos de planeamento para os parâmetros indicados na Tabela 4.2 foram:

- Recepção fixa – 20 dB;
- Recepção portátil interior – 23 dB.

Comparando estes valores com os de  $C/N$  estimados para um canal de transmissão perfeito:

- Recepção fixa, canal de Rice – 17,1 dB;
- Recepção portátil interior, canal de Rayleigh – 19,3 dB.

Os rácios de protecção utilizados para efeitos de planeamento foram os utilizados na RRC-06 e indicados na Recomendação UIT-R BT.1368-6.

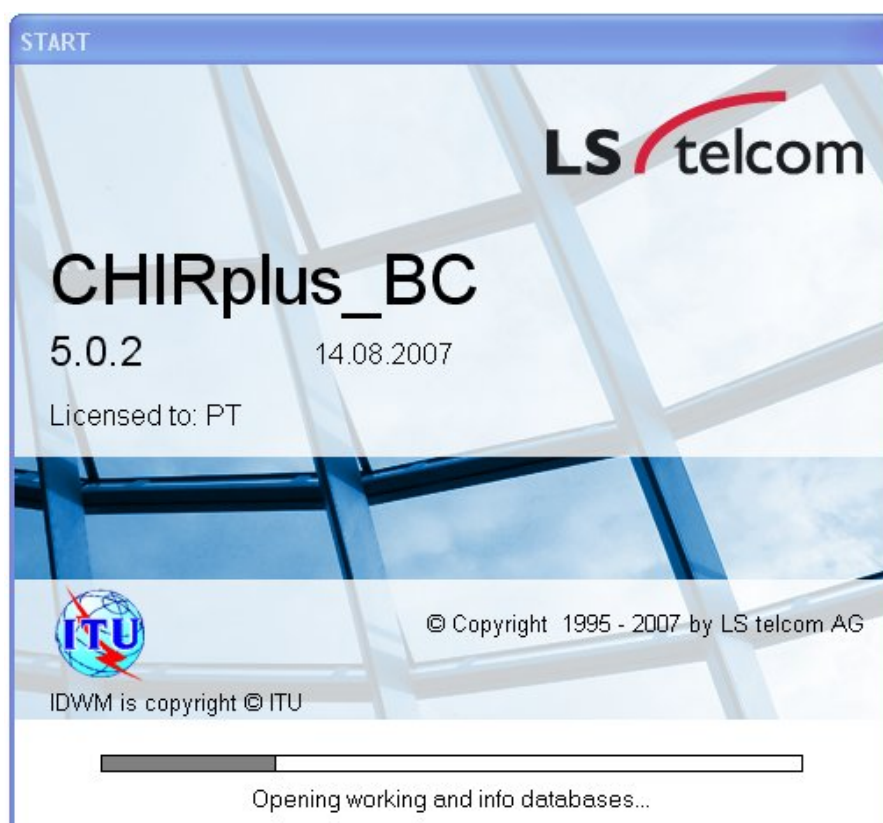
### 4.2.3 Ferramenta de Planeamento

O software de planeamento utilizado para a rede DVB-T Beira Interior é o CHIRplus\_BC da

LS Telecom AG, Figura 4.6. Este software foi originalmente adquirido em 2001 e actualizado em final de 2007 com o objectivo de incorporar os mais recentes desenvolvimentos ocorridos em RRC-06.

O modelo digital do terreno e a cartografia digital de Portugal Continental e ilhas assim como os restantes dados georreferenciados do *World Geodetic System 1984* (WGS84), incluindo os de população, foram integrados no software.

O Modelo de propagação Okumura-Hata estendido foi utilizado para prever a intensidade de campo mediana, na área a cobrir pelos sinais desejados, assim como para prever a intensidade de campo, com 1% de probabilidade de ser atingida na área a cobrir pelos sinais interferentes.



**Figura 4.6** - Software de planeamento utilizado para a rede DVB-T Beira Interior

Os modelos de propagação são essenciais para a determinação de coberturas, determinação de interferências e verificação de conformidade com acordos internacionais. Existem variadíssimos modelos de propagação, a escolha do modelo a utilizar é responsabilidade do planeador. Esta escolha depende do objectivo para o qual o resultado vai ser utilizado.

Para os cálculos de cobertura a escolha do modelo a utilizar deve ter em conta a disponibilidade de modelo digital do terreno, de classes morfológicas e de população georreferenciada. Para utilização destes dados é conveniente que o modelo de propagação

inclua a contribuição da difracção.

A recomendação UIT-R P.526 descreve como ter em conta o efeito da difracção quando se calculam intensidades de campo, no entanto a aplicação isolada do modelo descrito na UIT-R P.526 leva a não considerar todos os aspectos que contribuem para a propagação à distância tal como a propagação troposférica e portanto subestima o nível de interferência provocada pelos emissores distantes, também na zona próxima o modelo descrito na UIT-R P.526 não utiliza a informação morfológica, a não ser como mais um obstáculo a ter em conta, sem considerar o efeito de atenuação do sinal, e portanto sobrestima a intensidade de campo nas zonas próximas do emissor.

Uma vez que na difusão de televisão digital terrestre, contrariamente ao que acontece na televisão analógica terrestre, a transição entre qualidade de recepção boa e a não recepção ocorre com uma variação do sinal da ordem dos 1 dB, logo é necessário não sobrestimar a intensidade de campo nas zonas próximas dos emissores e em particular nas redes SFN, não subestimar a interferência provocada pelos emissores distantes [12].

Assim sendo, considera-se inadequado apresentar os resultados de planificação com recurso ao modelo de difracção descrito na UIT-R P.526, uma vez que, este é optimista no calculo de coberturas DVB-T para as mesmas condições de difracção.

O software utilizado na dissertação, tem incluído, o modelo de propagação Okumura-Hata, que, sendo um modelo empírico de propagação, incorpora todos os aspectos que contribuem para a propagação à distância. A implementação no software inclui extensões que permitem ter em conta o efeito da difracção e utiliza a informação morfológica tanto para efeito dos cálculos de difracção como, de atenuação. Consequentemente para os cálculos efectuados para gerar as previsões de cobertura, optou-se pela utilização do modelo de propagação Okumura-Hata extendido (inclusão das recomendações UIT-R P.526 para difracção) implementado no software [12].

O modelo de propagação Okumura-Hata baseia-se nas seguintes publicações [12]:

- *Y. Okumura, et al, "Field strength and its variability in UHF and VHF land-mobile radio services", Review of the Electrical Communication Laboratory, Vol. 16, pp 825-873, 1968;*
- *M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land-mobile radio services", IEEE Transactions in vehicular technology, Vol. VT-29,3 pp. 317-325, August 1980.*

O modelo baseia-se na equação empírica estabelecida por Hata, baseada nas curvas de previsão da atenuação de propagação em redes de rádio.

$$L_P [dB] = 69.55 + 26.16 \cdot \log_{10}(f_c) - 13.82 \cdot \log_{10}(h_{eff, Base}) - a(f_c, h_{Mobile}) + \left[ 44.9 - 6.55 \cdot \log_{10}(h_{eff, Base}) \right] \cdot \log_{10}(d), \quad (4.1)$$

Onde  $L_P [dB]$  é a atenuação prevista,  $f_c$  é a frequência da portadora

$h_{eff, Base}$  é a altura efectiva da antena da estação emissora,  $h_{Mobile}$  é a altura da antena de recepção e  $d$  é a distancia entre a antena de emissão e a antena de recepção.

Esta equação pode ser simplificada para:

$$L_P [dB] = A + B \log_{10}(d), \quad (4.2)$$

por combinação dos diferentes termos. Pode-se assim calcular a intensidade do campo electromagnético induzido,  $E$ , na zona em que está localizado o receptor, por um emissor com uma potência aparente radiada padrão de 32,2 dBW (equivalente à potência aparente radiada na direcção de maior ganho por um emissor com 1kW de potência à entrada de uma antena de meio comprimento de onda), em função da distância  $d$  utilizando a seguinte fórmula empírica:

$$E [dB\mu V / m] = \gamma + \beta \cdot 10 \cdot \log_{10}(d). \quad (4.3)$$

A potência recebida por uma antena isotrópica,  $P_r$ , quando mergulhada num campo electromagnético de intensidade  $E$  dado por:

$$P_r [dBm] = E [dB\mu V / m] - 10 \cdot \log_{10}(120\pi) - 90 + 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right), \quad (4.4)$$

onde  $\frac{\lambda^2}{4\pi}$  é a área efectiva da antena isotrópica sendo  $\lambda$  o comprimento de onda da portadora.

Combinando as diferentes equações obtêm-se as seguintes relações [12]:

$$A = 178 - 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right) - \gamma + a(h_{Mobile}) \quad (4.5)$$

$$B = -\beta$$

Recorrendo às curvas de previsão de Okumura é então possível determinar A e B em função da altura em que está colocada a antena de recepção  $h_{Mobile}$ , da frequência, da classificação morfológica do terreno (urbano e campo aberto).

O software CHIRplus\_BC da LS Telcom AG, tem implementado para além do modelo de propagação de Okumura-Hata standard, parâmetros adicionais que permitem:



- Diferentes opções na forma como a altura efectiva da antena de emissão é interpretada;
- Incluir como parâmetro a “inclinação do terreno”;
- Adicionar à equação um termo relativo à difracção;
- Subdividir a classificação morfológica do terreno em 16 categorias diferentes.

O software permite ao utilizador alterar os parâmetros da implementação standard do modelo, assim como os parâmetros adicionais.

O software implementa a extensão modificando a fórmula original de Hata, introduzindo os parâmetros  $a_0$  a  $a_4$  mais um termo  $L_{diff}$  correspondente à difracção com o parâmetro  $a_5$  que permite ajustar este último termo em que  $a_5$  pode variar de 0 a 1. A equação de Hata passa a ter o seguinte aspecto:

$$L_{ext}[dB] = a_0 + \left. \begin{array}{l} + a_1 \cdot \log_{10}(d) \\ - a_2 \log_{10}(h_{eff,Base}) \\ - a_3 \log_{10}(h_{eff,Base}) \log_{10}(d) \\ + a_4 \cdot \log_{10}(f_c) \\ - a(f_c, h_{Mobile}) \end{array} \right\} L_1 + \left. \begin{array}{l} + L_{Morpho} \end{array} \right\} L_2 - a_5 \cdot L_{diff} \left. \begin{array}{l} \end{array} \right\} L_3 \quad (4.6)$$

O termo  $L_1$  corresponde à fórmula original (4.1), o termo  $L_2$  às correcções morfológicas implementadas como um valor ajustável  $L_{Morpho}$ , classificados neste caso em 5 categorias morfológicas. O termo  $L_3$  corresponde ao efeito da difracção. Às categorias morfológicas estão associadas alturas que se adicionam à do nível do terreno para efeitos de cálculo da difracção.

Os valores dos parâmetros por defeito são:

- $a_0 = 69,55$
- $a_1 = 44,9$
- $a_2 = 13,82$
- $a_3 = 6,55$
- $a_4 = 26,16$
- $a_5 = 1,0$

Utiliza-se associada a cada categoria morfológica os seguintes valores:

- Água – altura = 0 m / ganho 29 dB
- Suburbano - altura = 10 m / ganho 10 dB
- Floresta - altura = 10 m / ganho 10 dB
- Campo aberto - altura = 0 m / ganho 25 dB
- Urbano denso - altura = 30 m / ganho 3 dB

Para que o planeamento seja o mais real possível, foi utilizado o programa ALDENa, Figura 4.7, para o dimensionamento das antenas emissoras.



**Figura 4.7** - Software de cálculo das antenas emissoras para a rede DVB-T Beira Interior

#### 4.2.4 Estações de Emissão

A rede DVB-T Beira Interior a implementar é uma rede de frequência única (SFN) de média dimensão (existem distâncias entre emissores superiores aos  $224\mu\text{s}$  – luz). Esta configuração limita a escolha da localização dos emissores, excluindo localizações que eram óptimas para as redes MFN analógicas por assegurarem pela sua localização em altura, a cobertura em analógico de grandes áreas geográficas. Consequentemente apenas um número limitado de estações da rede de difusão de televisão analógica hertziana terrestre podem ser utilizadas para esta rede.

Por outro lado, a implementação de uma rede SFN utilizando a modulação 64-QAM

escolhida, obriga a reduzir a distância entre emissores mesmo para recepção fixa, restrição ainda maior, na recepção portátil interior. Como consequência desta realidade, e por forma a racionalizar as infra-estruturas existentes no País opta-se por escolher estações emissoras reais de TV analógica e operador móvel de telecomunicações, Tabela 4.3, Figura 4.8.

**Tabela 4.3** – Estações emissoras utilizadas no planeamento

Nome da estação emissora	Longitude	Latitude	Cota na base da torre [m]	Altura da torre [m]
Barroca Grande	007W45 25.561	40N09 49.269	939	45
Covilhã	007W30 12.000	40N16 49.000	673	30
Estreito	007W47 31.000	39N57 21.000	771	40
Gardunha	007W31 11.578	40N04 59.265	1137	46
Manteigas	007W31 52.000	40N24 46.000	929	40
Mosteiro	007W08 33.583	40N18 42.239	934	55
Penedo Gordo	007W41 59.271	39N40 47.664	559	40

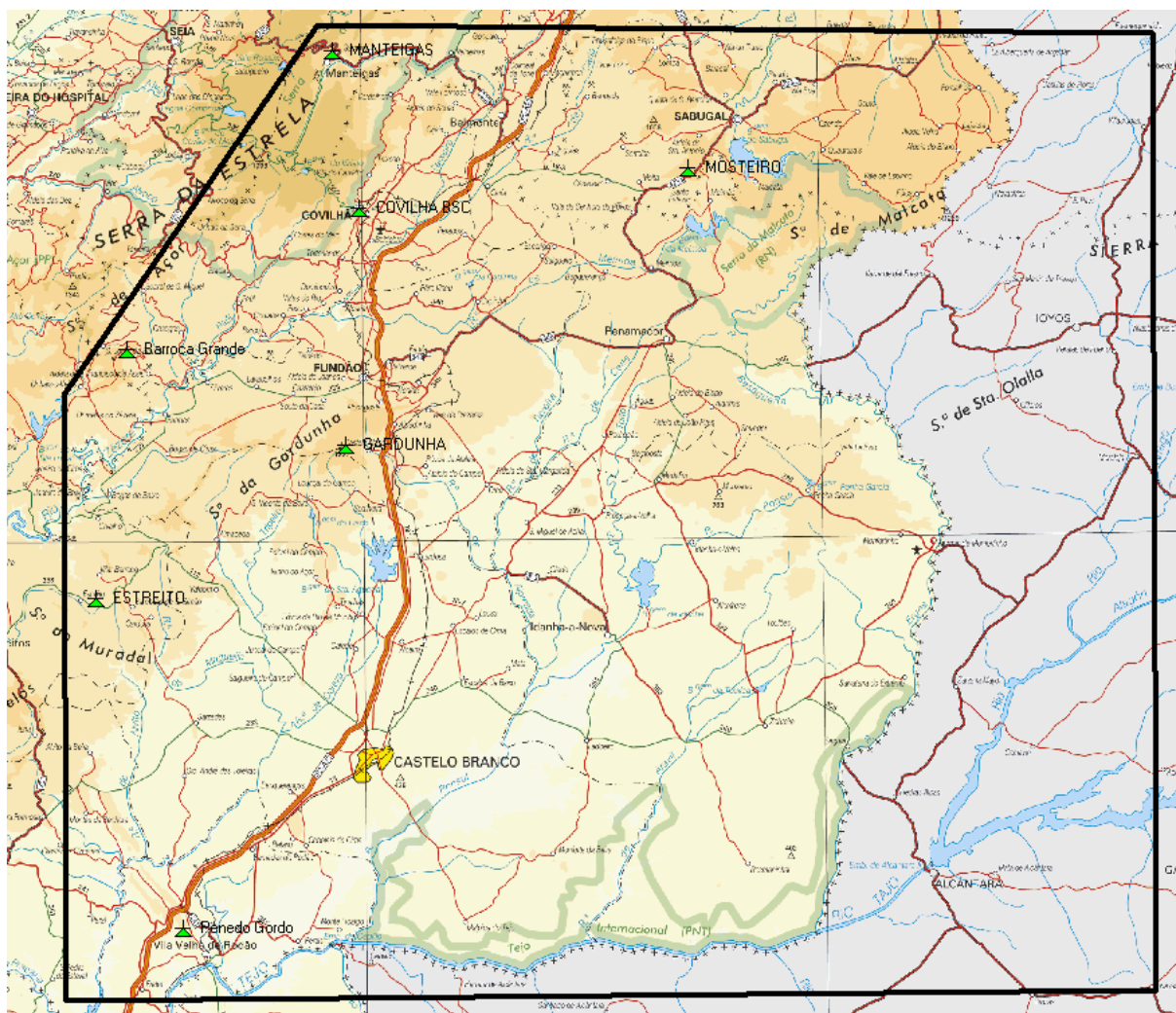
No caso vertente de uma rede SFN a instalação de retransmissores (internacionalmente chamados de *Gap-fillers*) está limitada a estações com uma *Potência Aparente Radiada* (PAR) baixa, pelo facto de, numa rede SFN, o sinal à entrada e saída do *Gap-filler* terem de ter a mesma frequência, o que torna o requisito de isolamento entre entrada e saída directamente proporcional à PAR.

Esta realidade, relega a cobertura por retransmissão, apenas para situações de cobertura de pequenas zonas de sombra. A utilização de *Gap-fillers*, não foi considerada neste trabalho.

### 4.3 Resultados de Cobertura da Rede DVB-T Beira Interior

Como já foi referido anteriormente o planeamento da rede DVB-T da Beira Interior é feito de forma a atingir um objectivo de cobertura para recepção fixa de pelo menos 87% da população.

Para além deste objectivo foi fixado outro, de disponibilizar cobertura portátil interior na cidade da Covilhã como sendo considerado um centro histórico.

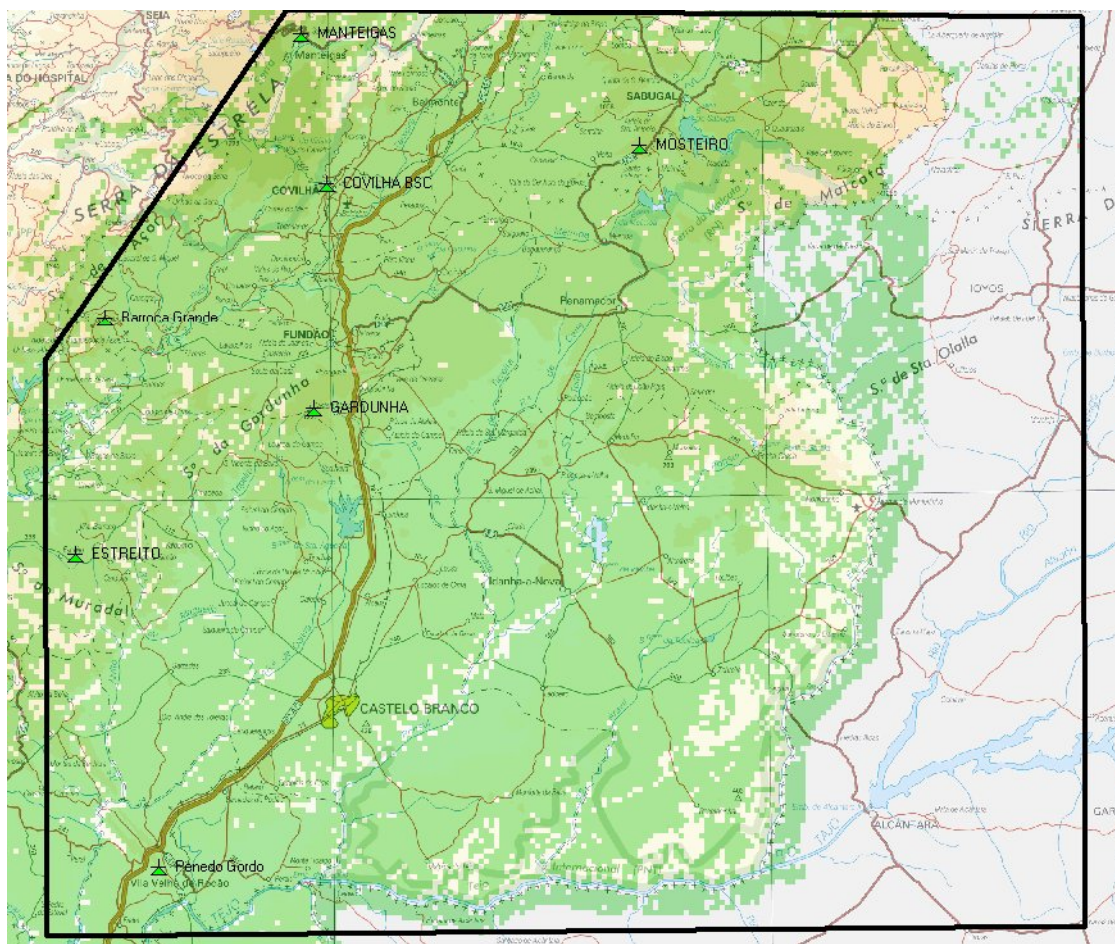


**Figura 4.8** – Mapa da Beira interior 1:500 000 com a identificação dos emissores

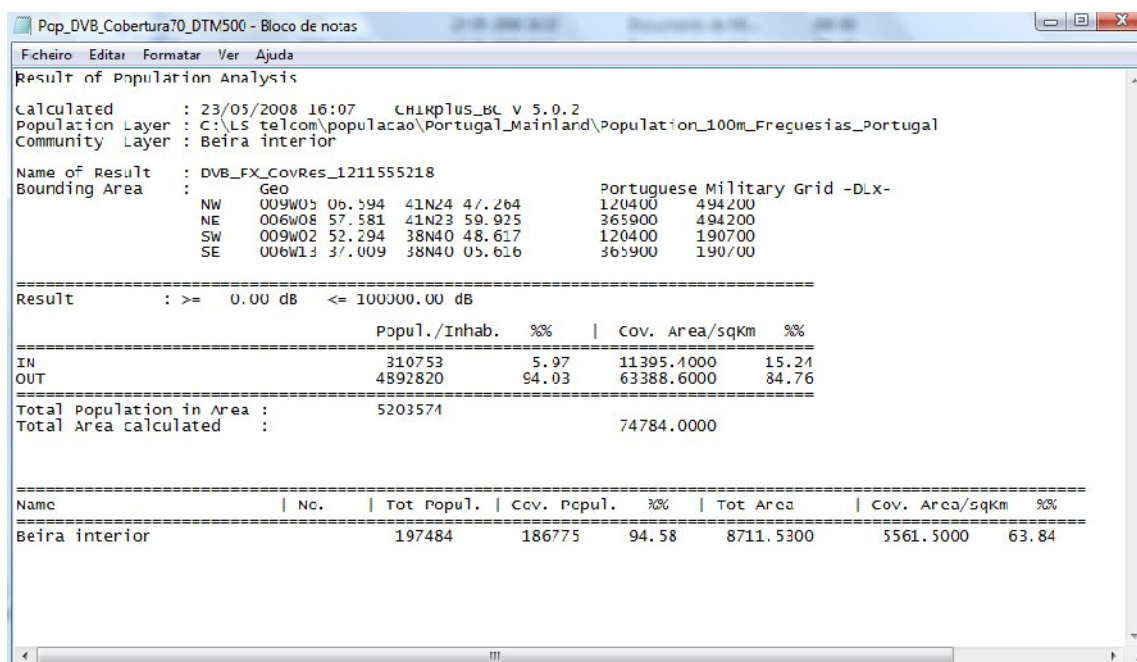
De acordo com as novas regras definidas em RRC-06, uma determinada área elementar admite-se coberta para recepção fixa se nela for imposta um campo de 51,0 dBμV/m com probabilidade de localização de 70% (dita cobertura aceitável) para as áreas rurais e, um campo de 57,1 dBμV/m com probabilidade de localização de 95% (dita cobertura boa) para as áreas urbanas [13]. Um dos parâmetros também a ter em consideração é a resolução *Digital Terrain Model* (DTM) 500 metros por pixel ou 100 metros por pixel. Deste modo obtemos para cobertura aceitável a DTM 500 as Figuras 4.9 e 4.10. A Figura 4.11 ilustra esta cobertura sobre o mapa da população da BI para melhor percepção da cobertura versus população. A Figura 4.12 apresentada o contributo de cada emissor para a cobertura da BI.

De modo a obtermos uma cobertura mais rigorosa, foi feito uma simulação de cobertura aceitável em DTM 100, Figura 4.13

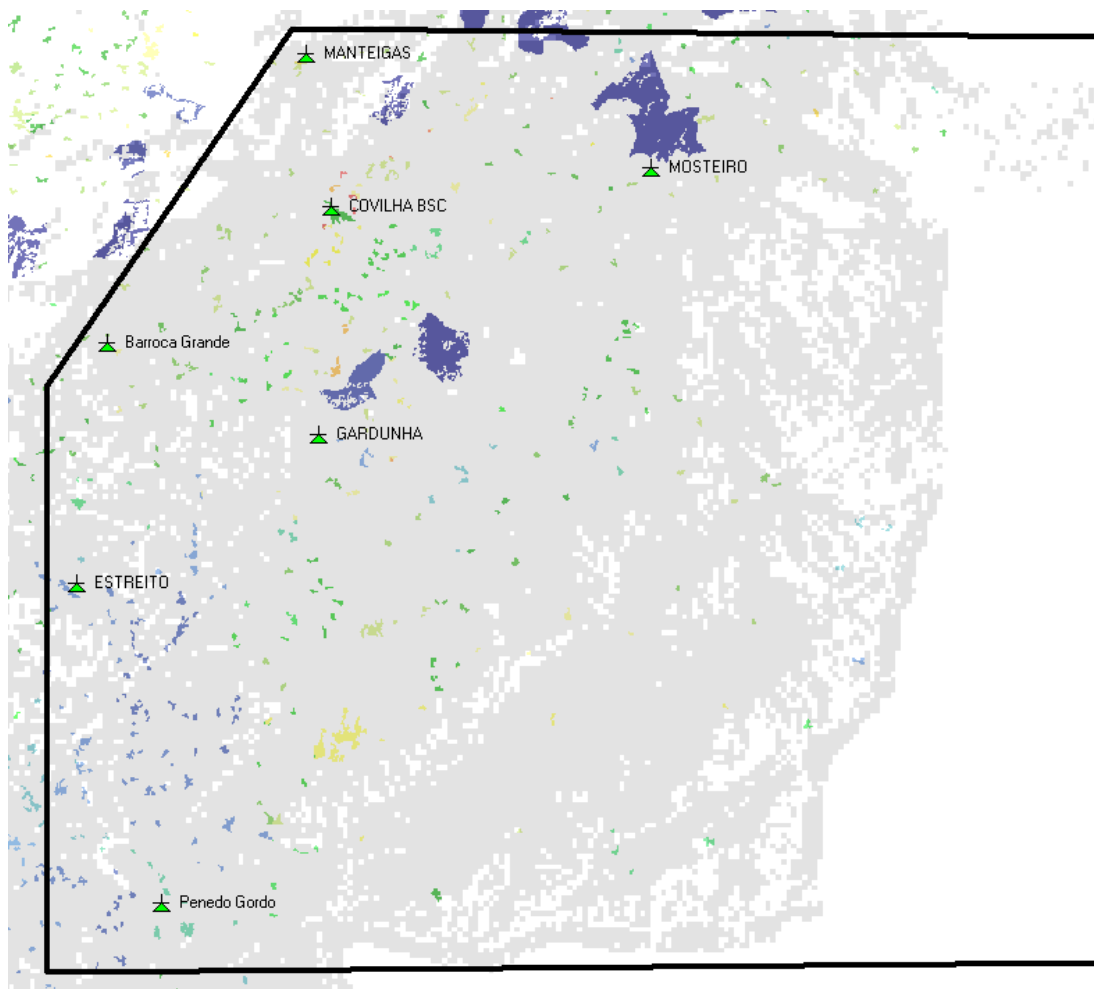




**Figura 4.9** – Mapa de cobertura para resolução de DTM 500 metros por pixel, com probabilidade de 70% de localização, antena de recepção exterior.



**Figura 4.10** – Dados da população com cobertura para resolução de DTM 500 metros por pixel, com probabilidade de 70% de localização, antena de recepção exterior.



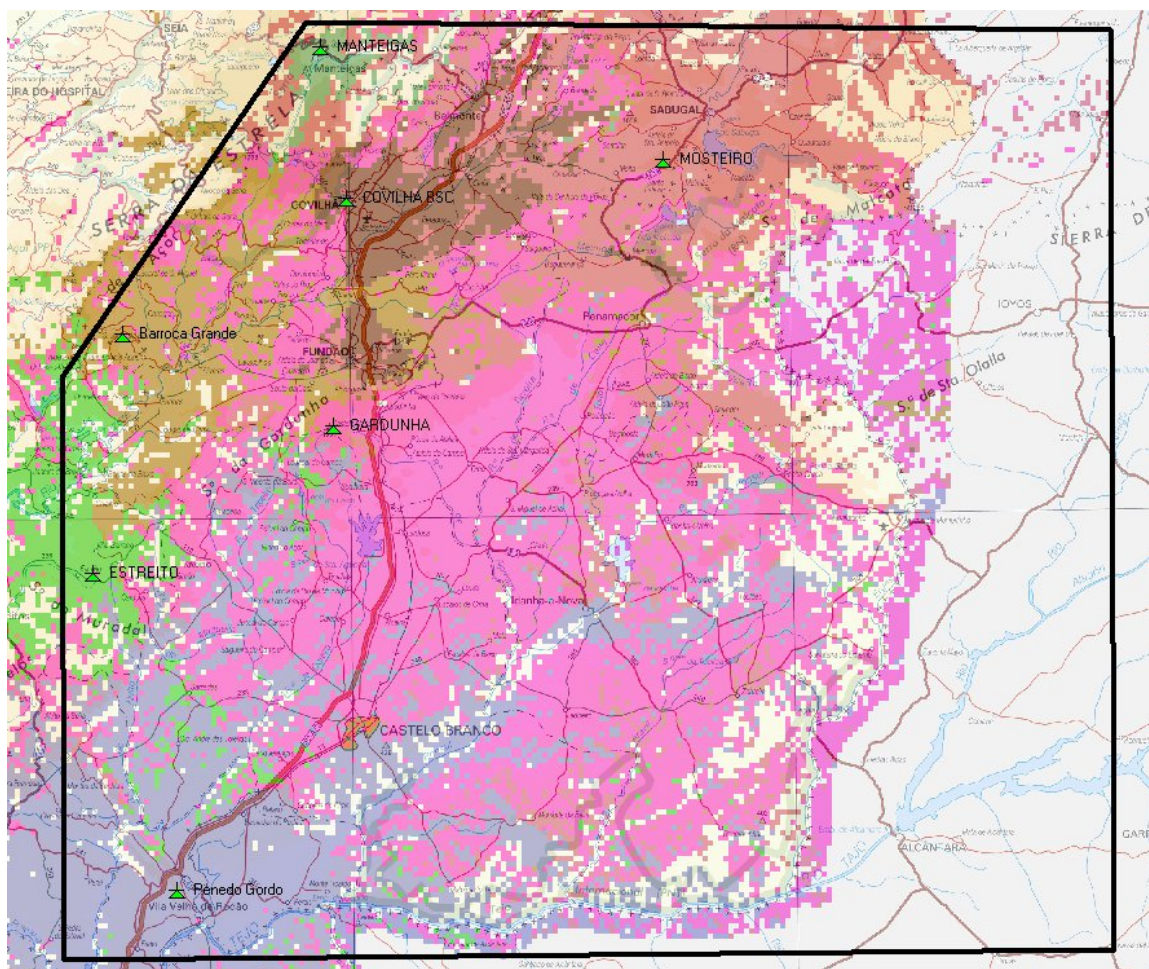
**Figura 4.11** – Mapa de cobertura sobre o mapa de distribuição da população para resolução de DTM 500 metros por pixel, com probabilidade de 70% de localização, antena de recepção exterior.

Na figura 4.11 a cobertura está representada na cor cinzenta.

Admitindo a BI como zona urbana, foi feita simulação de cobertura boa (57,1 dB $\mu$ V/m com probabilidade de localização de 95%), com DTM 100, Figuras 4.14 e 4.15, assim como a DTM 500, Figura 4.16.

Considerando a cidade da Covilhã como centro histórico, foi feita simulação de cobertura para recepção portátil interior (89,1 dB $\mu$ V/m com probabilidade de localização de 85%) a DTM 100, Figuras 4.17 e 4.18. A Figura 4.19 evidencia em pormenor esta cobertura para a cidade da Covilhã.



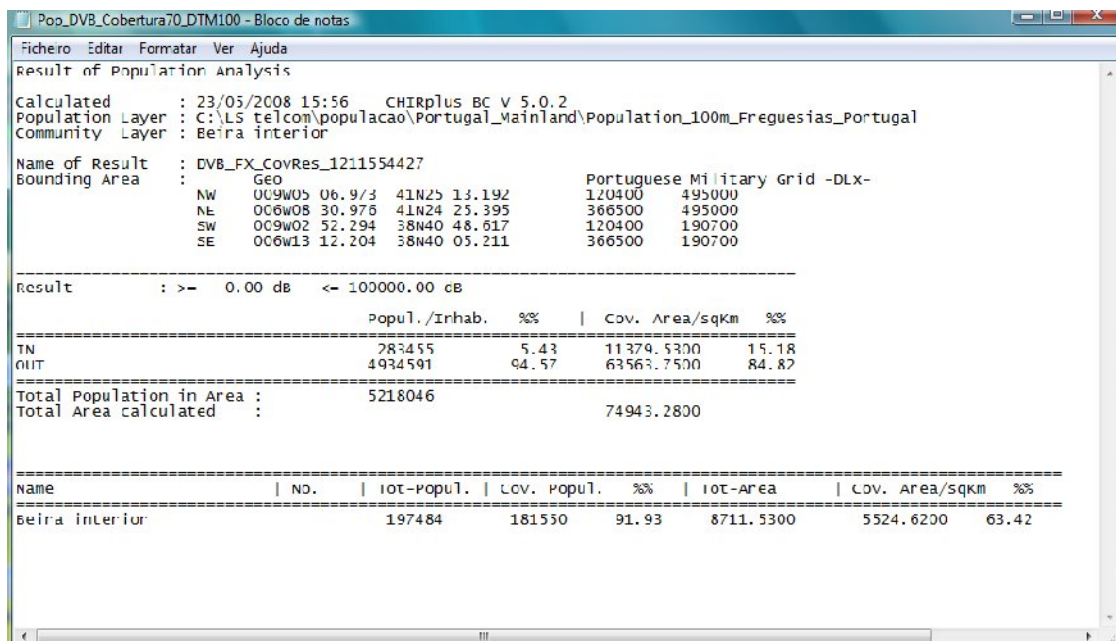


Legenda:

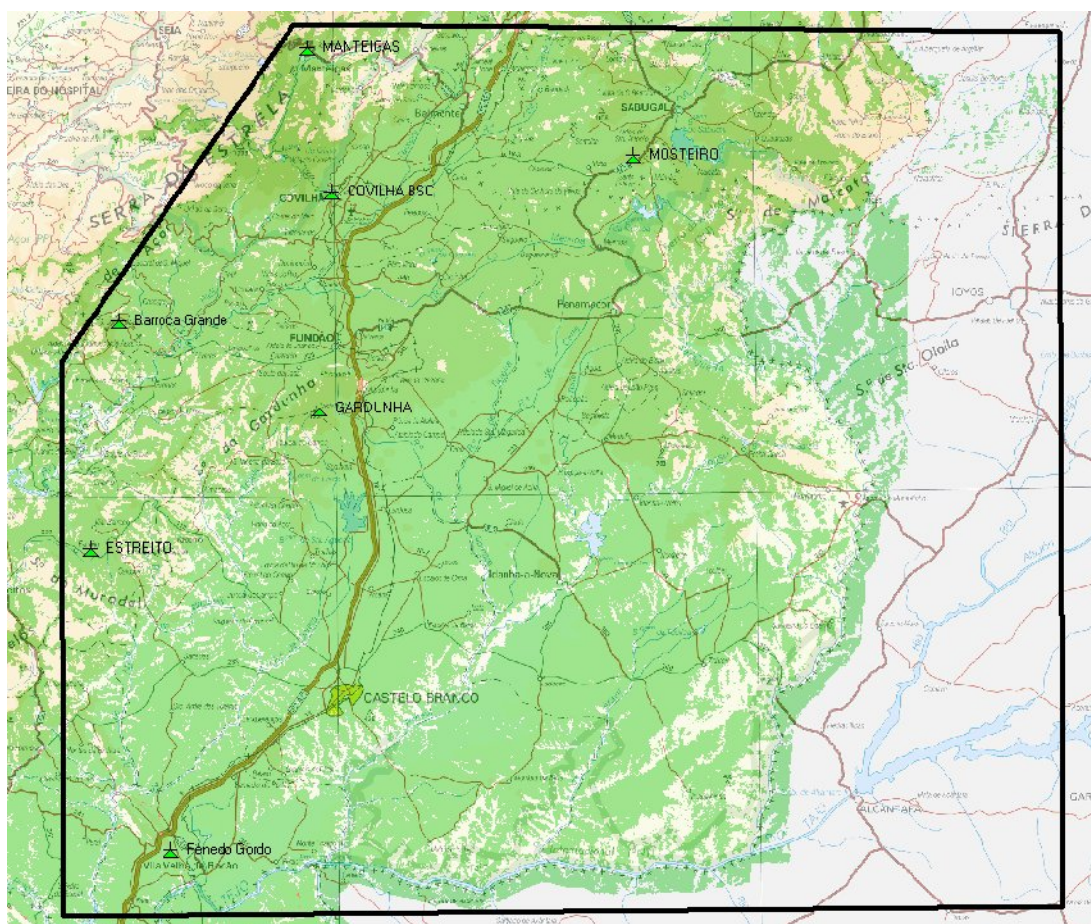
- Barroca Grande
- Covilhã
- Estreito
- Gardunha
- Manteigas
- Mosteiro
- Penedo Gordo

**Figura 4.12** – Mapa de cobertura com a área de influência de cada emissor, para resolução de DTM 500 metros por pixel, com probabilidade de 70% de localização, antena de recepção exterior.





**Figura 4.13** - Dados da população com cobertura para resolução de DTM 100 metros por pixel, com probabilidade de 70% de localização, antena de recepção exterior.



**Figura 4.14** – Mapa de cobertura para resolução de DTM 100 metros por pixel, com probabilidade de 95% de localização, antena de recepção exterior.

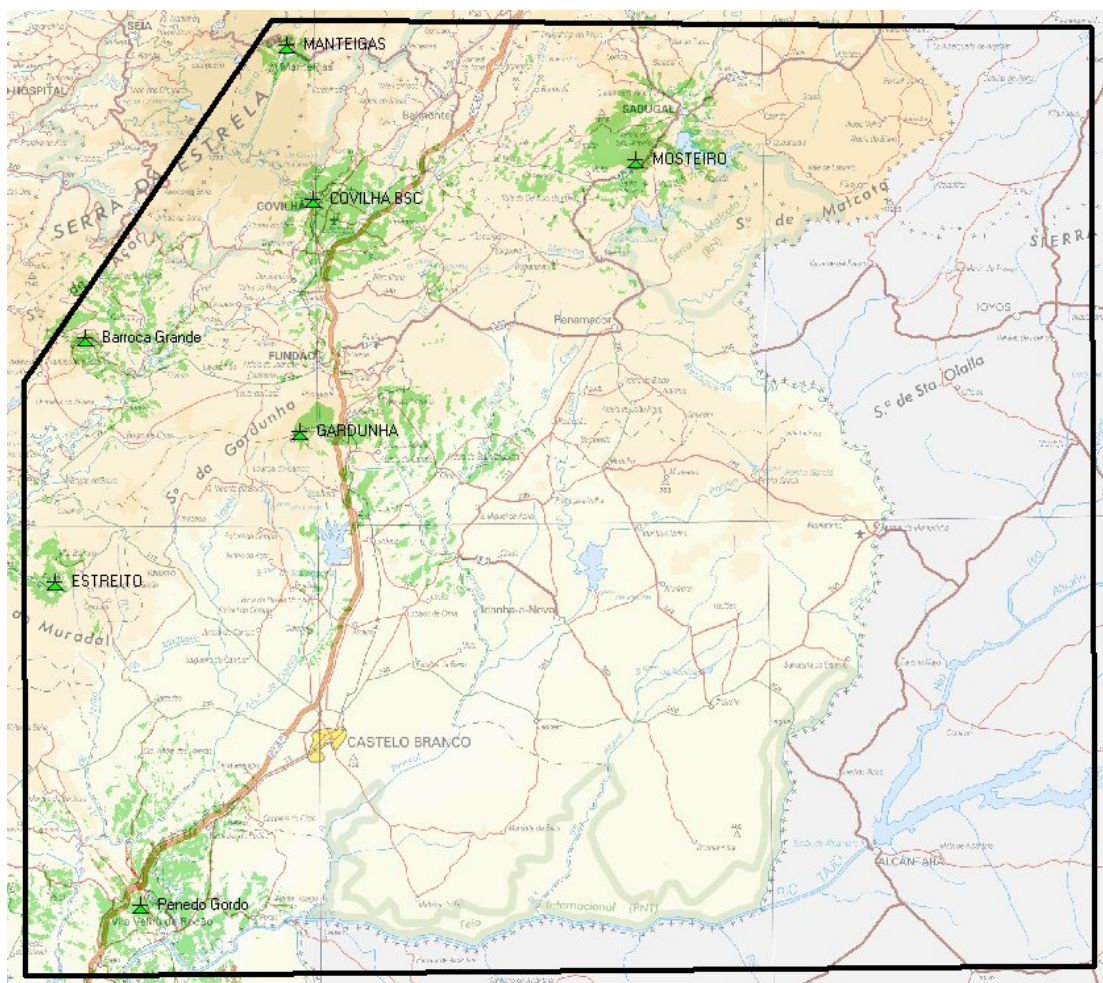


Pop_DVB_Cobertura95_DTM100 - Bloco de notas									
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda									
Result of Population Analysis									
Calculated	:	23/05/2008 16:00	CHIRplus_BC V 5.0.2						
Population Layer	:	C:\LS telcom\populacao\Portugal_Mainland\Population_100m_Freguesias_Portugal							
Community Layer	:	Beira interior							
Name of Result	:	DVB_FX_CovRes_1211554729							
Bounding Area	:	Geo	Portuguese Military Grid -DLx-						
		NW	009w05	06.973	41N25	13.192	120400	495000	
		NE	006w08	30.976	41N24	25.395	366500	495000	
		SW	009w02	52.294	38N40	48.617	120400	190700	
		SE	006w13	12.204	38N40	05.211	366500	190700	
Result : >= 0.00 dB <= 100000.00 dB									
			Popul./Inhab.	%%		Cov. Area/sqkm	%%		
IN			232264	4.45		9155.6300	12.22		
OUT			4985782	95.55		65787.6500	87.78		
Total Population in Area	:	5218046							
Total Area calculated	:	74943.2800							
Name   No.   Tot-Popul.   Cov. Popul.   %   Tot-Area   Cov. Area/sqKm   %									
Beira interior   197484   172024   87.11   8711.5300   5045.8500   57.92									

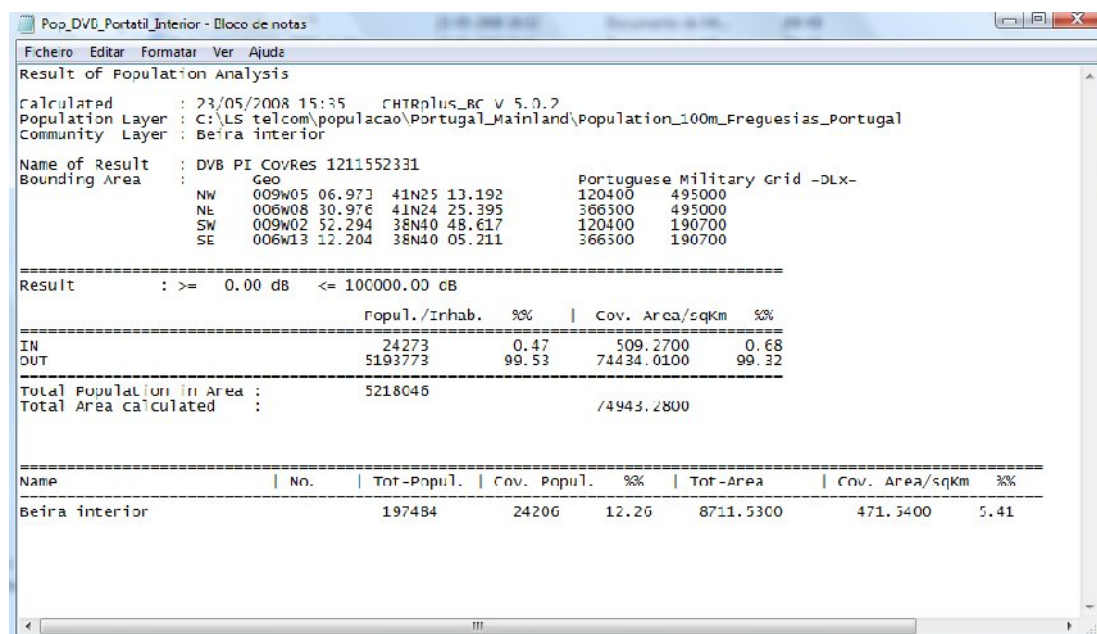
**Figura 4.15** - Dados da população com cobertura para resolução de DTM 100 metros por pixel, com probabilidade de 95% de localização, antena de recepção exterior.

Pop_DVB_Cobertura95DTM500 - Bloco de notas									
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda									
Result of Population Analysis									
Calculated	:	23/05/2008 16:05	CHIRplus_BC V 5.0.2						
Population Layer	:	C:\LS telcom\populacao\Portugal_Mainland\Population_100m_Freguesias_Portugal							
Community Layer	:	Beira interior							
Name of Result	:	DVB_FX_CovRes_1211555102							
Bounding Area	:	Geo	Portuguese Military Grid -DLx-						
		NW	009w05	06.594	41N24	47.264	120400	494200	
		NE	006w08	57.581	41N23	59.925	365900	494200	
		SW	009w02	52.294	38N40	48.617	120400	190700	
		SE	006w13	37.009	38N40	05.616	365900	190700	
Result : >= 0.00 dB <= 100000.00 dB									
			Popul./Inhab.	%%		Cov. Area/sqkm	%%		
IN			251554	4.83		9171.1000	12.26		
OUT			4952020	95.17		65612.9000	87.74		
Total Population in Area	:	5203574							
Total Area calculated	:	74784.0000							
Name   No.   Tot-Popul.   Cov. Popul.   %   Tot-Area   Cov. Area/sqKm   %									
Beira interior   197484   176388   89.32   8711.5300   5067.1200   58.17									

**Figura 4.16** - Dados da população com cobertura para resolução de DTM 500 metros por pixel, com probabilidade de 95% de localização, antena de recepção exterior.

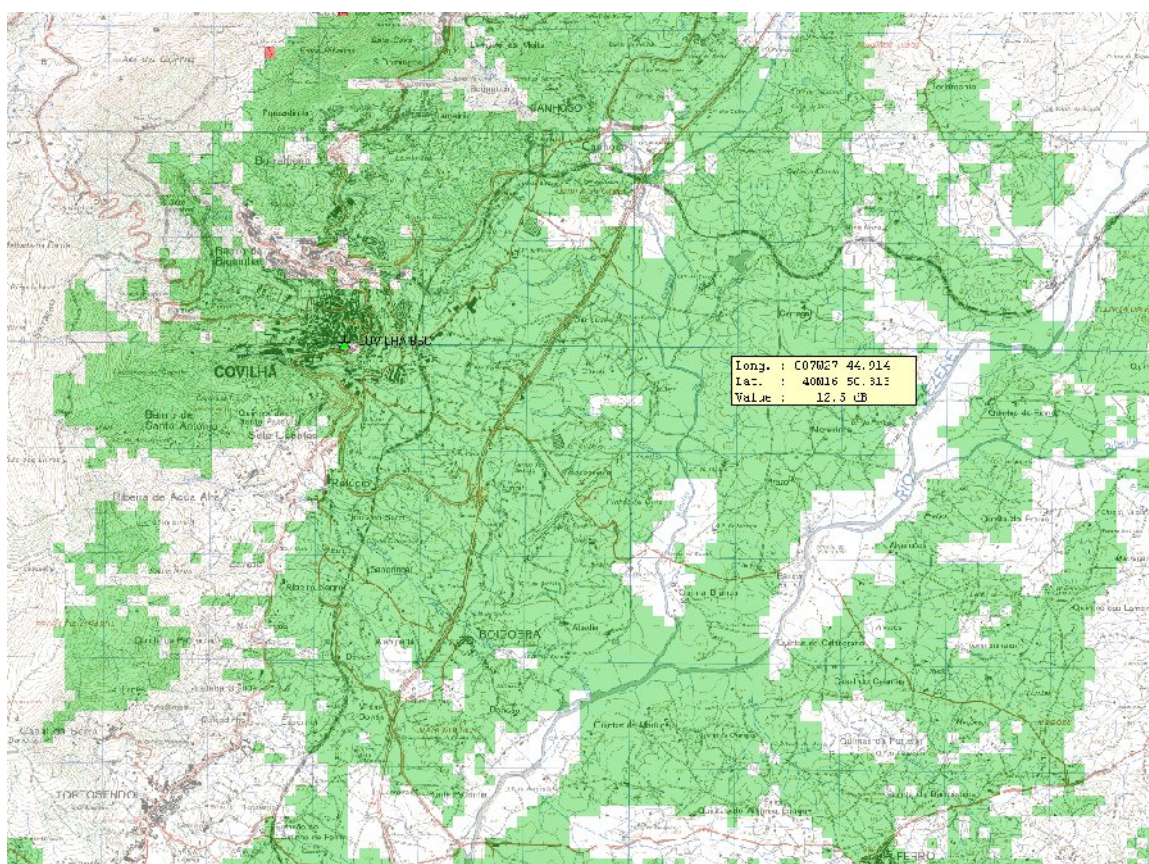


**Figura 4.17** – Mapa de cobertura para resolução de DTM 100 metros por pixel, com probabilidade de 85% de localização, antena portátil interior.



**Figura 4.18** - Dados da população com cobertura para resolução de DTM 100 metros por pixel, com probabilidade de 85% de localização, antena portátil interior.





**Figura 4.19** – Mapa de cobertura da cidade da Covilhã para resolução de DTM 100 metros por pixel, com probabilidade de 85% de localização, antena portátil interior.

A Tabela 4.4 apresenta os dados relativos à população coberta, obtidos nas várias simulações.

**Tabela 4.4** – Cobertura terrestre da Beira Interior para o Mux BI

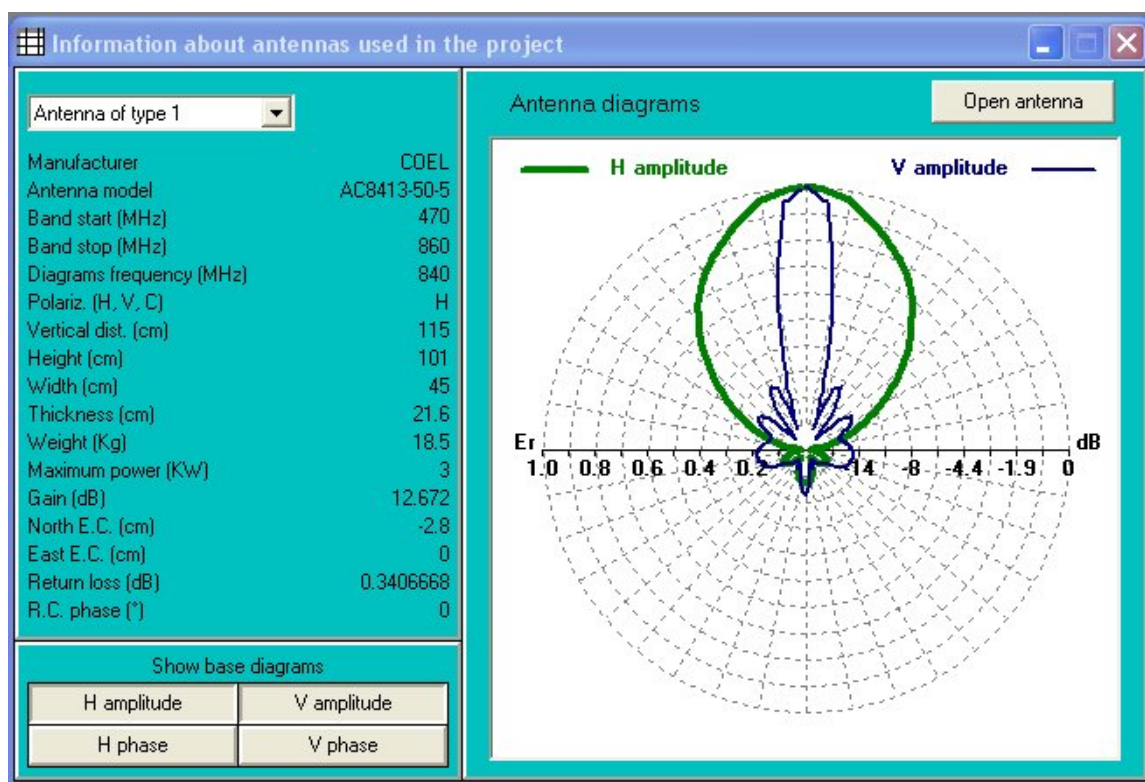
Modo de recepção	População total	População com cobertura	População com cobertura [%]
Fixo com cobertura aceitável com DTM 500	197484	186775	94,58
Fixo com cobertura aceitável com DTM 100	197484	181550	91,93
Fixo com cobertura boa com DTM 500	197484	176388	89,32
Fixo com cobertura boa com DTM 100	197484	172024	87,11
Portátil interior para com DTM 100	197484	24206	12,26

Para tornar a cobertura o mais real possível e exequível, foi feita simulação com o programa

ALDENA, Figura 4.7, para o dimensionamento das antenas emissoras. Foram feitas várias combinações de potências nos emissores e vários locais, utilizando dados de antenas reais, Figuras 4.20 e 4.21.

Parameter	Value
TX station	Gardunha
Site name	Todo o País
Site longitude (+ddd°pp'ss'')	
Site latitude (+dd°pp'ss'')	
Ground level a.s.l. (m)	0
Antenna system height a.g.l. (m)	20.0
Transmitter power (Watt)	600.0
Carrier wave frequency (MHz)	818.00
Antenna system central frequency (MHz)	818.00
Filename of antenna base diagrams type 1	CO_NC841.ANT
Filename of antenna base diagrams type 2	
Antenna system polarization (H, V, C)	H
Transmitting cable attenuation (dB)	1.2
Additional attenuations (dB)	0.1
Base diagrams sectors (A = all, F = front)	A
Velocity factor of cables to antennas (0÷1)	0.93
Coordinate system (C = cartesian, P = polar)	P
Mast side/diameter (cm)	60.0
Mast cross section (Triangular, Square, Circular)	C
Mast rotation w.r.t. North (°)	0
Project picture filename (*.bmp)	

**Figura 4.20** – Dados gerais da antena da Gardunha



**Figura 4.21** – Diagrama de cada painel elementar da antena da Gardunha



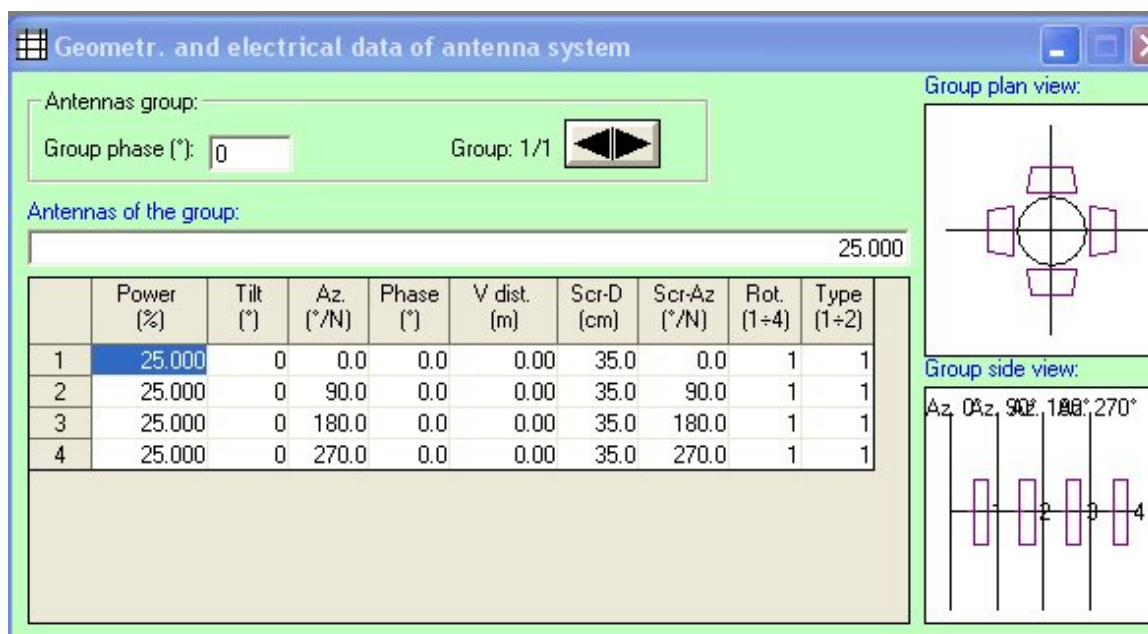


Figura 4.22 – Dados do sistema radiante da Gardunha

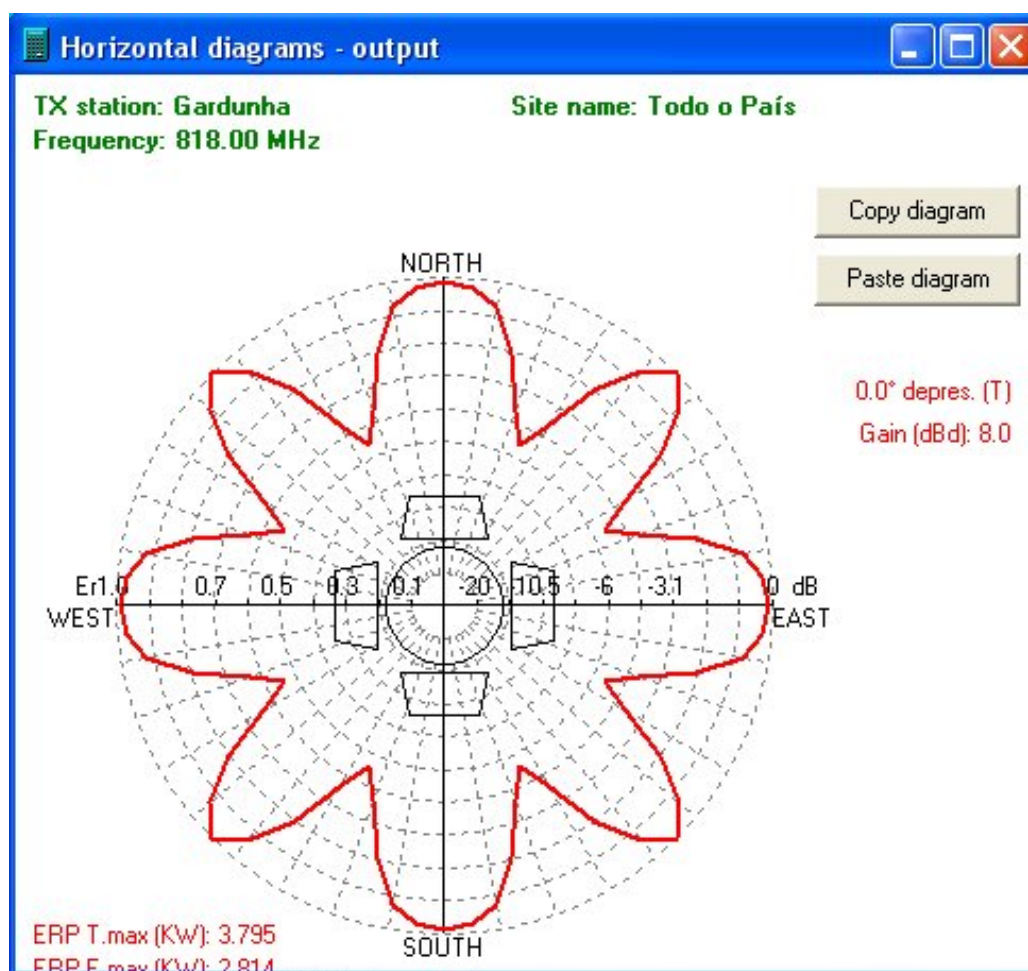


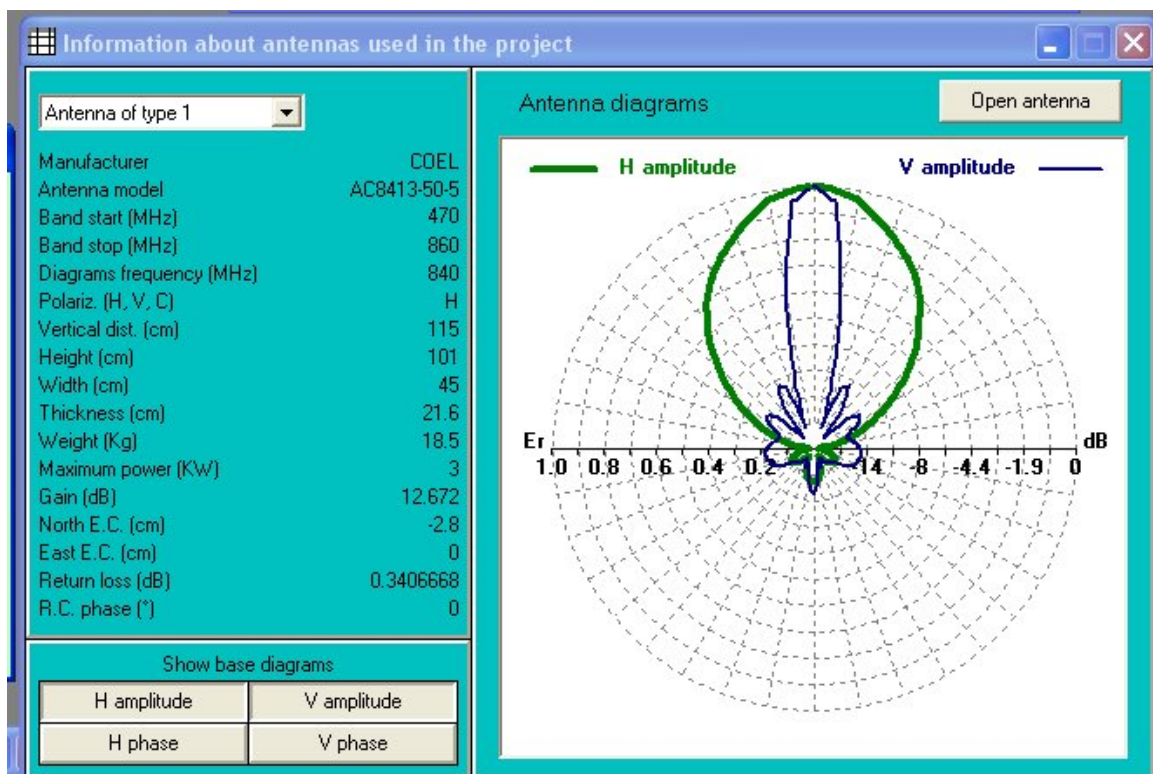
Figura 4.23 – Diagrama horizontal do sistema radiante da Gardunha

**General data of antenna system - TMN.prj**

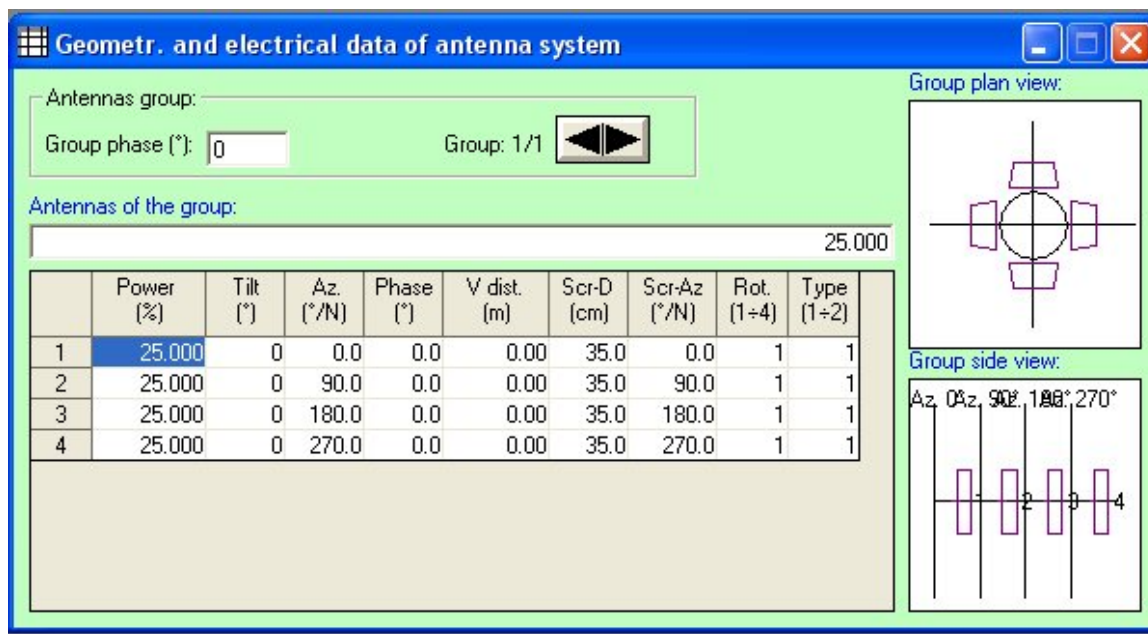
TX station	Barroca Grande
Site name	Todo o País
Site longitude (+ddd°pp'ss'')	
Site latitude (+dd°pp'ss'')	
Ground level a.s.l. (m)	0
Antenna system height a.g.l. (m)	20.0
Transmitter power (Watt)	250.0
Carrier wave frequency (MHz)	818.00
Antenna system central frequency (MHz)	818.00
Filename of antenna base diagrams type 1	CQ_NC841.ANT
Filename of antenna base diagrams type 2	
Antenna system polarization (H, V, C)	H
Transmitting cable attenuation (dB)	1.2
Additional attenuations (dB)	0.1
Base diagrams sectors (A = all, F = front)	A
Velocity factor of cables to antennas (0+1)	0.93
Coordinate system (C = cartesian, P = polar)	P
Mast side/diameter (cm):	60.0
Mast cross section (Triangular, Square, Circular)	C
Mast rotation w.r.t. North (°)	0
Project picture filename (*.bmp)	

Project picture

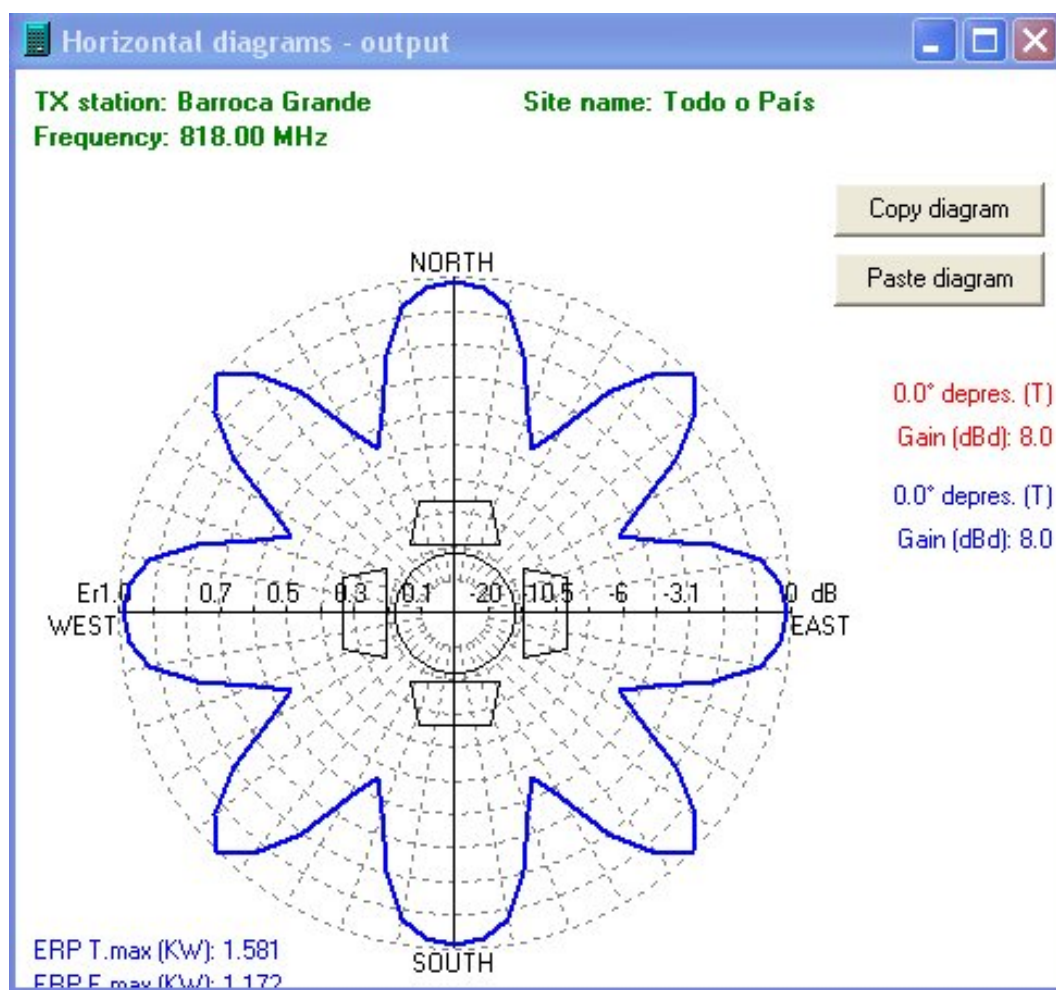
**Figura 4.24** – Dados gerais da antena da Barroca Grande



**Figura 4.25** – Diagrama de cada painel elementar da antena da Barroca grande



**Figura 4.26** – Dados do sistema radiante da Barroca Grande



**Figura 4.27** – Diagrama horizontal do sistema radiante da Barroca Grande



General data of antenna system - TMN.prj

TX station	Mosteiro
Site name	Todo o País
Site longitude (+ddd°pp'ss")	
Site latitude (+dd°pp'ss")	
Ground level a.s.l. (m)	0
Antenna system height a.g.l. (m)	20.0
Transmitter power (Watt)	200.0
Carrier wave frequency (MHz)	818.00
Antenna system central frequency (MHz)	818.00
Filename of antenna base diagrams type 1	CO_NC841.ANT
Filename of antenna base diagrams type 2	
Antenna system polarization (H, V, C)	H
Transmitting cable attenuation (dB)	1.2
Additional attenuations (dB)	0.1
Base diagrams sectors (A = all, F = front)	A
Velocity factor of cables to antennas (0+1)	0.93
Coordinate system (C = cartesian, P = polar)	P
Mast side/diameter (cm)	60.0
Mast cross section (Triangular, Square, Circular)	C
Mast rotation w.r.t. North (°)	0
Project picture filename (*.bmp)	

Project picture

4.28 – Dados gerais da antenna do Mosteiro

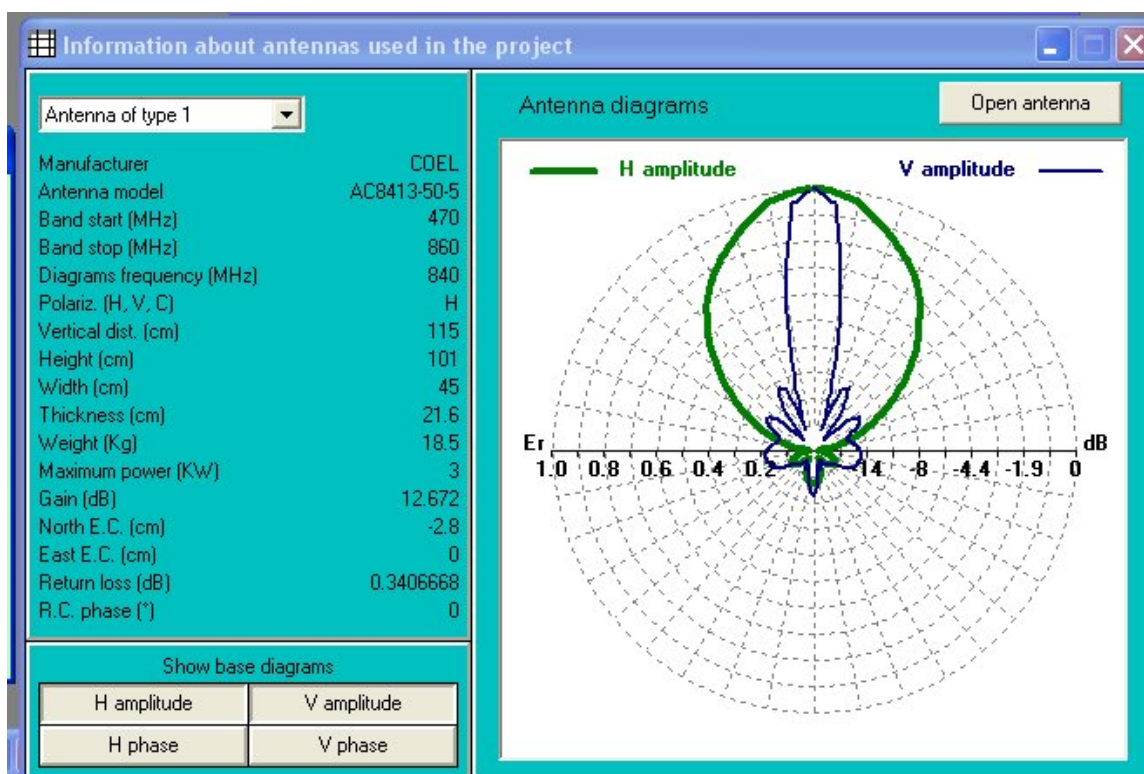


Figura 4.29 – Diagrama de cada painel elementar da antenna do Mosteiro



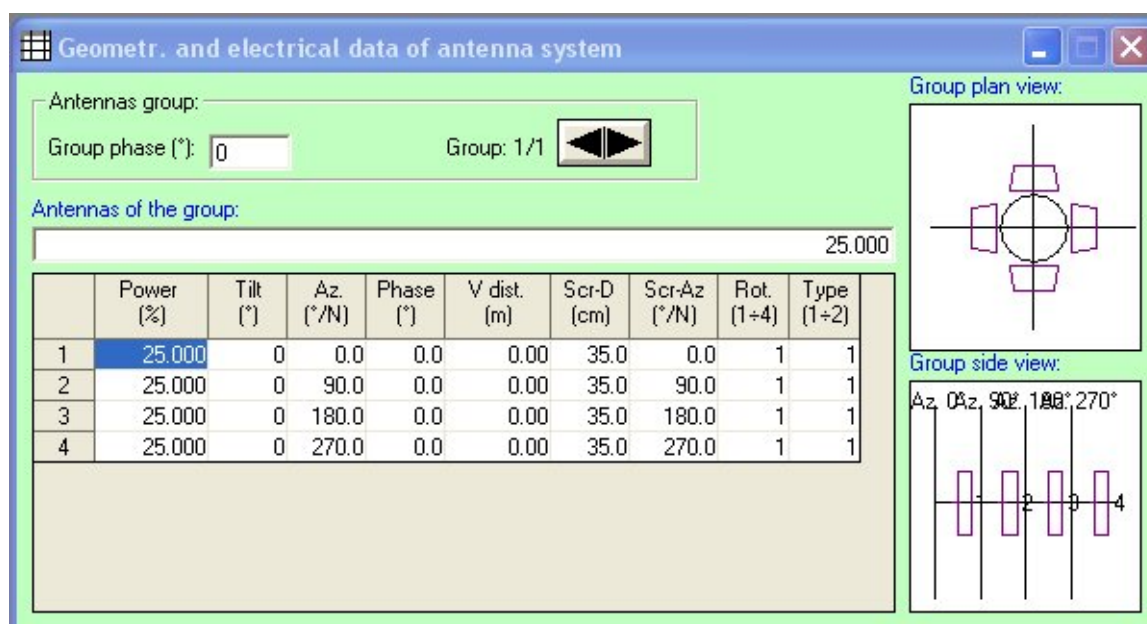


Figura 4.30 – Dados do sistema radiante do Mosteiro

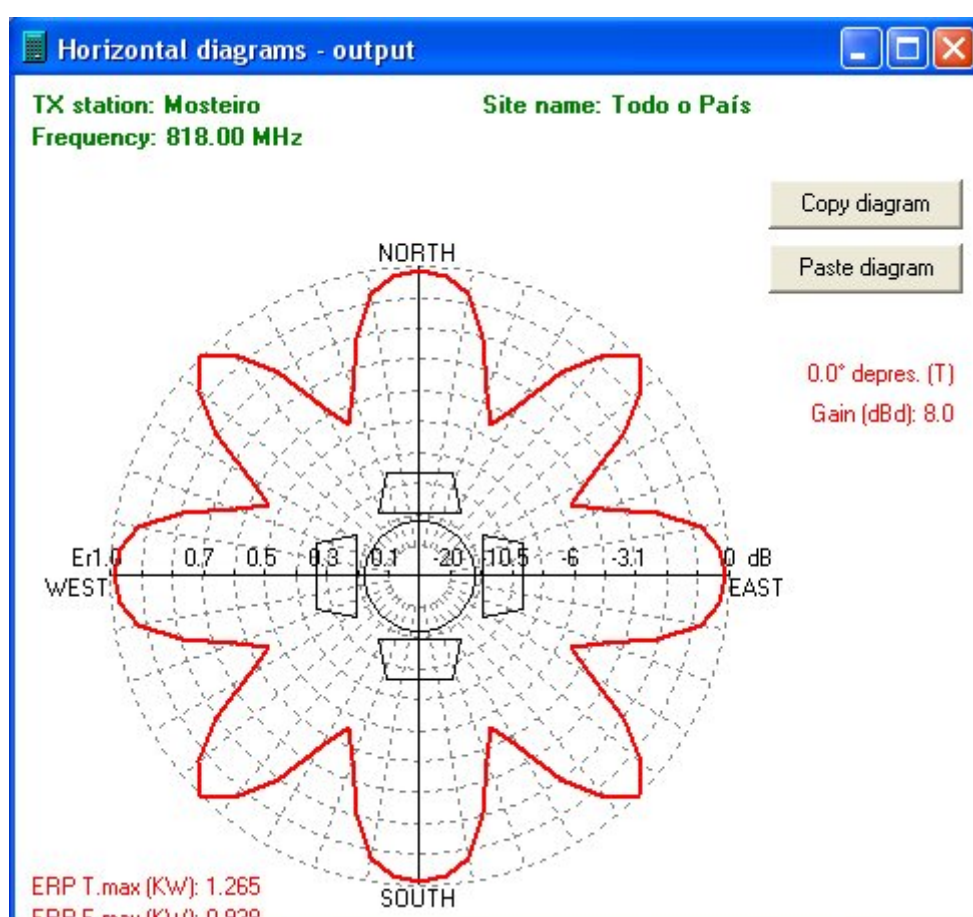


Figura 4.31 – Diagrama horizontal do sistema radiante do Mosteiro

As estações emissoras da Covilhã, Estreito, Manteigas e Penedo Gordo têm um sistema radiante idêntico ao do Mosteiro como mostra a Tabela 4.5, pelo que se tornava repetitivo a

apresentação das suas figuras.

**Tabela 4.5** – Potência das estações emissoras

Nome da estação emissora	Canal	Frequência central [MHz]	Potência do emissor [W]	<i>Potência aparente radiada (PAR) [W]</i>
Barroca Grande	64	818,000	250	1000
Covilhã	64	818,000	200	841
Estreito	64	818,000	200	841
Gardunha	64	818,000	600	2500
Manteigas	64	818,000	200	841
Mosteiro	64	818,000	200	841
Penedo Gordo	64	818,000	200	841

Analisando os dados obtidos na cobertura DVB-T Beira Interior, podemos concluir que para além da cobertura portátil interior, em termos numéricos, o pior cenário de cobertura é de 87% da população, mas é de salientar que é no modo cobertura “boa” e DTM 100. Esta cobertura de população em 87% é de excelente qualidade.

Para os restantes dados obtidos em termos de cobertura de população, podemos afirmar que a cobertura chega aos 94,58% da população no modo cobertura aceitável em DTM 500, o que é um cenário muito bom tendo em atenção a distribuição da população de um modo muito disperso e pouco concentrado, num território de relevo acentuado, e um pequeno número de emissores de um modo geral de potência relativamente baixa.

## Capítulo 5 - Conclusões

A gestão do espectro radioelétrico é uma tarefa árdua tendo em atenção os seus condicionalismos de ordem técnica e os serviços públicos e privados que usufruem dele.

A introdução da TDT em Portugal e o “switch-off” da emissão da TV analógica trás como vantagem adicional a libertação de espectro radioelétrico; a gestão deste espectro em Portugal é da responsabilidade da ANACOM e de acordo com normas Europeias e Internacionais.

A tecnologia DVB dá um grande contributo para que no futuro se ocupe uma largura de banda inferior no espectro radioelétrico com mais e melhores serviços que os prestados actualmente com tecnologia analógica. Tal contributo só é possível graças ao desenvolvimento de algoritmos complexos para compressão de vídeo e áudio a transmitir.

Para uma boa gestão de espectro radioelétrico está sempre associado o grau de compressão dos dados ou informação a transmitir e o sistema de modulação empregue.

O padrão H.264/AVC é uma boa ferramenta de compressão de vídeo, é graças a esta ferramenta conjugada com uma modulação adequada que se consegue o transporte de grande informação numa largura de banda pequena. Consegue-se deste modo num canal de 19,91 Mbit/s com largura de banda 8 MHz e COFDM com 64-QAM no modo 8k, multiplexar e transmitir na mesma rede DVB-T em SFN, 8 canais SDTV ou 3 em HDTV.

No planeamento de uma rede DVB-T é necessário ponderar vários factores de ordem técnica e/ou financeiros, de modo a obter uma boa cobertura de rede a baixo custo.

No planeamento da rede DVB-T Beira Interior chegou-se à conclusão que o número de emissores e potências utilizadas são menores, comparando com o sistema analógico actual, conseguindo-se uma cobertura boa de 87% da população e cobertura aceitável de 95% da população, contra os actuais 99,5% no sistema analógico que em vários locais é de baixa qualidade.

No sistema analógico que está em funcionamento actualmente, a cobertura é próxima dos 99,5%, mas a qualidade em muitos locais é baixa, enquanto no DVB-T temos a garantia de 95% de cobertura aceitável.

A utilização de dados actualizados referentes à população, cartografia e morfologia do terreno, permitem que o planeamento executado se focalize com total precisão na cobertura de zonas onde existe efectivamente população, conseguindo-se deste modo que 87% da população esteja coberta com boa qualidade, com apenas uma cobertura de uma área total correspondente a 58% do território, figura 4.14, onde essa população reside. A não utilização

destes dados e estratégia de cobertura, indo de imediato para uma simples cobertura de terreno, leva-nos de certeza a pelo menos uma duplicação do número de emissores, e consequentemente duplicação do custo do investimento a realizar para a instalação da rede.

A cobertura para recepção portátil interior é impossível no sistema analógico, torna-se agora uma realidade no DVB-T, esta possibilidade é de extrema importância para cobertura de centros históricos, evitando assim as antenas fixas exteriores que tanto ferem a paisagem.

A rede DVB-T Beira Interior planeada nesta dissertação pode num futuro próximo (após “Switch-off”) ser implementada por uma entidade credenciada para o efeito, pois o seu estudo não é meramente teórico; as torres de emissão existem actualmente para TV analógica ou servindo operadores móveis. Foram utilizados software credenciado e dados actualizados referentes à população, cartografia e morfologia. Também os sistemas radiantes utilizados são sistemas calculados e realistas, utilizando dados do fabricante dos painéis da antena.

## Referências

- [1] Fernando Pereira, *Disciplina de Comunicação de Áudio e Vídeo*, Instituto Superior Técnico (<http://www.img.lx.it.pt/~fp/car/com.htm>).
- [2] ANACOM (<http://www.anacom.pt>).
- [3] R. Gonzalez, R. Woods, *Processamento de imagens digitais*, São Paulo, E. Blucher, 2003.
- [4] Iain E. G. Richardson, *Video Codec Design-Developing Image and Video Compression Systems*, Chichester, John Wiley and Sons, 2002.
- [5] Iain E. G. Richardson, *H.264/AVC and MPEG-4 Video Compression-Video Coding for Next-Generating Multimedia*, Chichester, John Wiley and Sons, 2003.
- [6] M. Gambari, *Standart Codec-Image Compression to Advanced Video Coding*, United Kingdom, The Institution of Electrical Engineers, 2003.
- [7] K. F. Ibrahim, *Newnes Guide to Television and Video Technology*, Hoxford UK, Newnes of Elsevier, 2007.
- [8] Edson Mitsugo Miyoshi, Carlos Alberto Sanches, *Projecto de Sistemas Rádio*, São Paulo, Erica, 2002.
- [9] José M. Proença Cameira, *Sistemas de Teledifusão*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, (<http://www.deetc.isel.pt/sistemastele/STd/>).
- [10] António Navarro, *Coding and Modulation in DVB-T/H*, Universidade de Aveiro-Instituto de Telecomunicações, ([http://www.av.it.pt/navarro/DTV\\_DET\\_ch6.pdf](http://www.av.it.pt/navarro/DTV_DET_ch6.pdf)).
- [11] European Telecommunications Standard Institute (Telecommunications series) ETSI 300744 V1.5.1 (2004-11).
- [12] Documentação Interna da PT Comunicações, Portugal, 2008.
- [13] International Telecommunications Union, *Regional Radiocommunication Conference – 2006, (RRC-06)*, Genebra.

## Bibliografia

Ahmad R. S. Bahai and Burton R. Saltzberg, *Multi-Carrier Digital Communications – Theory and Applications of OFDM*, California, Kluwer Academic Publishers, 2002.

Despacho nº 19 973-B/2007, *Projecto de regulamento do concurso publico para a atribuição de direitos de utilização de frequências de âmbito nacional e parcial para o serviço de radiodifusão televisiva digital terrestre e de licenciamento de operador de distribuição*, Diário da República – 2ª série – Nº168 – 31 de Agosto de 2007.

European Broadcasting Union, *Terrestrial Television Planning and Implementation Considerations*, BPN 005, Second Issue, Julho 1997.

ITU – T Telecommunication Standardization Sector of ITU, *Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services – ITU Recommendation H.264*, (03/2005).

Lars-Ingemar Lundström, *Understanding Digital Television – An Introduction to DVB Systems with Satellite, Cable, Broadband, and Terrestrial TV Distribution*, Hoxford UK, Elsevier, 2006.

Lei nº5/2004 de 10 de Fevereiro, *Lei das Comunicações Electrónicas*, Diário da República – I Série A, Nº34 – 10 de Fevereiro de 2004

Lei nº27/2007 de 30 de julho, *Lei da Televisão, que regula o acesso à actividade de televisão e o seu exercício*, Diário da República – 1ª série – Nº145 – 30 de Julho de 2007.

Paul Dambacher, *Digital Terrestrial Television Broadcasting – Designs, Systems and Operation*, Springer-Verlag, 1997.

Philip J. Cianci, *HDTV and the Transition to Digital Broadcasting – Understanding New Television Technologies*, Oxford UK, Elsevier, 2007.

Portaria nº207-A/2008, *Procede à abertura do concurso para a atribuição de cinco direitos de utilização de frequências para o serviço de radiodifusão televisiva digital terrestre e para o licenciamento de operador de distribuição e aprova o respectivo regulamento do concurso*, Diário da República – 1ª série – Nº39 – 25 de Fevereiro de 2008

Regulamento nº 95-A/2008, *Aprova o Regulamento do Concurso Público para a Atribuição de Um Direito de Utilização de Frequências de Âmbito Nacional para o Serviço de Radiodifusão Televisiva Terrestre*, Diário da República, 2ª série – Nº39 – 25 de Fevereiro de 2008.

Roland Beutler, *Frequency Assignment and Network Planning for Digital Terrestrial Broadcasting Systems*, Massachusetts, USA, Kluwer Academic Publishers, 2004.

Ye (Geoffrey)li, Gordon L. Stuber, *Signals and Communication Technology-Orthogonal Frequency Division Multiplexing for WEireless Communications*, Atlanta, USA, Springer, 2006