

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Departamento de Eletrônica e de Computação

**Comparação entre Tecnologias de Compressão e Modulação
para Transmissão de Sinais de Vídeo via Satélite.**

Autor:

Guilherme Castelo Branco

Orientador:

Prof. Gelson Vieira Mendonça, Ph.D.

Examinador:

Prof. Mauros Campello Queiroz, M. Sc.

Examinador:

Prof. José Gabriel Rodriguez Carneiro Gomes, Ph. D.

DEL

Agosto de 2010

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer o apoio dos meus familiares, dos meus amigos, da Phase Engenharia e dos funcionários do DEL que me ajudaram na realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo comparar diversas tecnologias utilizadas na transmissão de sinais de vídeo. As tecnologias H.264/AVC para compressão do vídeo e o DVB-S2 para modulação do sinal, proporcionam uma redução na quantidade de informação a ser transmitida, ou seja, possibilitam a transmissão de sinais de vídeo com maior qualidade e robustez ocupando a mesma banda no satélite utilizada hoje com as tecnologias MPEG-2 e DVB-S.

O H.264/AVC e o DVB-S2 são ferramentas essenciais para transmissão do sinal de TV em alta definição, mais conhecido como HDTV, pois a quantidade de informação de um sinal HDTV é aproximadamente seis vezes maior que o sinal padrão existente hoje, o SDTV.

O H.264/AVC é um algoritmo similar ao MPEG-2, porém com ferramentas adicionais tornando sua compressão extremamente mais eficiente. A grande desvantagem do H.264/AVC está no seu tempo de processamento, cerca de quatro segundos contra menos de um segundo do MPEG-2.

A mais significativa diferença entre o modo DVB-S e o DVB-S2 está no código corretor de erro (FEC). Os FECs utilizados pelo DVB-S2 são o BCH e o LDPC, cerca de 22% mais robustos que os FECs *Reed-Solomon* e *Convolucional* utilizados no DVB-S.

O sistema ISDB-S também será visto neste trabalho.

Alguns sistemas de *uplinks* serão mostrados e discutidos no final deste trabalho, pois são exemplos práticos já montados e em funcionamento em grandes emissoras de TV.

Palavras-Chave: vídeo, TV, H.264/AVC, MPEG, DVB-S2, uplink, SDTV, HDTV.

ABSTRACT

The intention of this work is to compare different technologies used for satellite transmissions of video signals. Technologies as H.264/AVC for video compression and DVB-S2 for RF modulation provide a reduction of information to be transmitted, which means it is possible to transmit video signals with better quality and robustness than those used with MPEG-2 and DVB-S, occupying the same bandwidth at the transponder.

The H.264/AVC and DVB-S2 are essential tools to transmit HDTV since the amount of information in a HDTV video signal is almost six times the same information in a SDTV video.

The H.264/AVC is an algorithm similar to MPEG-2 but with much more efficiency on video compression. One of the disadvantages of H.264/AVC is the time consuming for encoding video. It takes around four seconds against less than one second using MPEG-2.

The most significant difference between DVB-S and DVB-S2 is the Forward Error Corrector (FEC) implemented in each system. While DVB-S uses Reed-Solomon followed by Convolutional encoding, DVB-S2 uses BCH in conjunction with LDPC, these two giving around 22% more robustness than the first two in DVB-S.

The ISDB-S system will also be mentioned on this work.

Some uplink systems will be showed in the final part of this project. They are examples of working systems that are important part of important broadcasters in Brazil.

Key Words: *video, TV, H.264/AVC, MPEG, DVB-S2, uplink, SDTV, HDTV.*

SIGLAS

ACM - Adaptative Coding and Modulation

APSK - Amplitude and Phase-shift keying

ASI - Assynchronous Serial Interface

AVC - Advanced Video Coding

BCH - Bose-Chaudhuri-Hocquenghem

BER - Bit Error Rates

BPSK - Binary Phase-shift keying

CABAC - Context Based Arithmetic Coding

CAVLC - Context Adaptive Variable Length Codes

DTH - Direct to Home

DVB - Digital Video Broadcast

eIRA - extended Irregular Repeat-Accumulate

FEC - Forward Error Corrector

GOP - Group of Pictures

HDTV - High Definition Television

JVT - Joint Video Team

LDPC - Low Density Parity Check

MPEG - Motion Picture Expert Group

PSK -Phase-shift keying

PSNR - Peak Signal-to-Noise Ratio

QPSK - Quadrature Phase-shift keying

SDTV - Standard Television

SSPA - State Solid Power Amplifier

TC8PSK - Trellis Coded 8-Phase Phase Shift Keying

TMCC - Transmission and Multiplexing Configuration Control

TS - Transport Stream

TWT - Traveling Wave-Tube

VCM - Variable Coding and Modulation

Sumário

1	Introdução	1
1.1	- Tema	1
1.2	- Delimitação	1
1.3	- Justificativa	1
1.4	- Objetivos	2
1.5	- Metodologia	2
1.6	- Descrição	2
2	As Tecnologias H.264/AVC e DVB-S2	4
2.1	- O Algoritmo H.264/AVC	4
2.2	- A Modulação DVB-S2	5
3	MPEG-2 x H.264/AVC	12
3.1	- Diferenças Técnicas	12
3.2	- Testes Comparativos	17
..		
4	DVB-S DVB-S2 e ISDB-S	23
4.1	- Código Corretor de Erro	23
4.2	- Testes Comparativos	25
4.3	- Viabilidade Financeira do DVB-S2	26
4.4	- DVB-S2 VCM e DVB-S2 ACM	28
4.5	- O ISDB-S	30

5	Estudo de Casos	36
	5.1 - Aplicações de Distribuição	36
	5.2 - Aplicações de Contribuição.....	39
6	Conclusão	40
6	Bibliografia	41
6	Anexo A – Potência em um Enlace	43

Lista de Figuras

2.1 – Constelações usadas nas transmissões	6
2.2 – Formatação dos Pulso de Transmissão	7
2.3 – Frame de Transmissão.	7
2.4 – Cálculo da taxa de dados	8
2.5 – Frame do Exemplo 2.2.6.	8
2.6 – Slots do frame	9
2.7 – Largura de Banda	10
2.8 – Diagrama em Blocos de um Modulador DVB-S2	11
3.1 – Filtro de Deblocking: (a) e (c) antes da filtragem, (b) e (d) depois da filtragem	12
3.2 – Blocos MPEG-2.	13
3.3 – Possibilidade de Tamanhos de Blocos no H.264/AVC	13
3.4 – Blocos H.264/AVC.	13
3.5 – Macroblocos em um Quadro	14
3.6 – Estrutura de um GOP	14
3.7 – Diagrama de blocos do CABAC	15
3.8 – Eficiência do CABAC.	16
3.9 – Codificador H.264/AVC.	16
4.1 – BBFrame + FEC	23
4.2 – Grafo de Tanner para código de Hamming (7,4).	24
4.3 – Diagrama em Blocos DVB-S2 VCM.	28
4.4 – Exemplo DVB-S2 ACM	29
4.5 – Diagrama em Blocos DVB-S2 VCM.	29
4.6 – Diagrama ISDB-S	31

4.7 – <i>Slots</i> ISDB-S.	32
4.8 – <i>Interleaving</i> ISDB-S.	32
4.9 – Estrutura ISDB-S.	33
4.10 – <i>Slots Dummy</i> ISDB-S	34
5.1 – Sistema 18+2 em ASI.	37
5.2 – Sistema 7+1 em IP	37
5.3 – Sistema SDTV + HDTV.	38
5.4 – Sistema de Contribuição com Redundância	39
5.5 – Sistema de Contribuição sem Redundância.	39
A1 – Enlace via Satélite.	43
A2 – <i>Uplink</i>	43
A3 – <i>Downlink</i>	43
A4 – Atenuação no Espaço.	47

Lista de Tabelas

2.1 – Slots por Tipo de Modulação	9
3.1 – Teste 1 – Análise SDTV MPEG-2 – Conteúdo A	18
3.2 – Teste 2 – Análise SDTV MPEG-2 – Conteúdo B	18
3.3 – Total de pontos para cada taxa de bits SDTV MPEG-2 – Conteúdos A & B	18
3.4 – Teste 3 – Análise HDTV MPEG-2 – Conteúdo A	19
3.5 – Teste 4 – Análise HDTV MPEG-2 – Conteúdo B	19
3.6 – Total de pontos para cada taxa de bits HDTV MPEG-2 – Conteúdos A & B	19
3.7 – Teste 5 – Análise SDTV H.264/AVC – Conteúdo A	19
3.8 – Teste 6 – Análise SDTV H.264/AVC – Conteúdo B	20
3.9 – Total de pontos para cada taxa de bits SDTV H.264/AVC – Conteúdos A & B	20
3.10 – Teste 7 – Análise HDTV H.264/AVC – Conteúdo A	20
3.11 – Teste 8 – Análise HDTV H.264/AVC – Conteúdo B	20
3.12 – Total de pontos para cada taxa de bits HDTV H.264/AVC – Conteúdos A & B	21
3.13 – Teste 9 – SDTV MPEG-2 @ 14Mb/s x H.264/AVC @ 6Mb/s – Conteúdo A	21
3.14 – Teste 10 – SDTV MPEG-2 @ 14Mb/s x H.264/AVC @ 6Mb/s – Conteúdo B	21
3.15 – Teste 11 - HDTV MPEG-2 @ 25Mb/s x H.264/AVC @ 14Mb/s - Conteúdo A	22
3.16 – Teste 12 – HDTV MPEG-2 @ 25Mb/s x H.264/AVC @ 14Mb/s Conteúdo B	22
4.1 – Parâmetros de FEC para um quadro normal	23
4.2 – DVB-S versus DVB-S2	26
4.3 – Viabilidade Financeira 1	27

4.4 – Viabilidade Financeira 2	27
4.5 – Aplicações DVB-S2	30
4.6 – Características ISDB-S	31

Capítulo 1

Introdução

1.1 – Tema

O tema do trabalho é descrever um sistema de transmissão via satélite de sinais vídeo, utilizando compressão H.264/AVC e modulação DVB-S2 e compará-lo com as tecnologias MPEG-2 e DVB-S.

Todos os parâmetros necessários para se ter uma boa qualidade de vídeo na recepção do sinal serão mencionados.

1.2 – Delimitação

Este trabalho é voltado aos provedores de conteúdo de vídeo que desejam realizar a distribuição do seu sinal, principalmente o HDTV.

As mesmas técnicas podem ser empregadas para o sinal SDTV, porém o ganho na eficiência do H.264/AVC / DVB-S2 em relação ao MPEG-2 / DVB-S não é tão grande quanto para um sinal HDTV.

1.3 – Justificativa

A televisão é considerada por muitos como a principal atividade de lazer do brasileiro. Muitos fatores contribuíram para isso como o seu fácil acesso e a sua diversidade de conteúdo.

O momento atual da radiodifusão é considerado o mais revolucionário desde o surgimento da televisão a cores. A migração da TV analógica para a TV digital está causando certa turbulência não só nas grandes emissoras como também nas afiliadas, nas repetidoras e na casa do telespectador.

Para que a TV Digital entre no ar com alta qualidade de som e imagem, uma série de investimentos devem ser realizados, incluindo a distribuição do sinal por parte dos provedores de conteúdo.

Em virtude disso, este trabalho apresentará sugestões de projetos de transmissão que certamente serão utilizados por estes provedores.

1.4 – Objetivos

O objetivo geral é, então, descrever um sistema de transmissão via satélite de sinais de vídeo, utilizando compressão H.264/AVC e modulação DVB-S2. Este trabalho irá considerar diversos fatores que atingem desde a qualidade de compressão até a qualidade de sinal de radiofreqüência. Desta forma, têm-se como objetivos específicos: (1) apresentar uma introdução à tecnologia H.264/AVC; (2) apresentar uma introdução à tecnologia DVB-S2; (3) comparar as tecnologias H.264 e MPEG-2; (4) comparar as tecnologias DVB-S, DVB-S2 e ISDB-S; (5) apresentar diversos modelos de transmissão para aplicações distintas.

1.5 – Metodologia

Este trabalho se consistirá nas melhorias de desempenho apresentadas tanto pelo código H.264/AVC e quanto pela modulação DVB-S2.

Alguns sistemas já implementados serão mostrados, considerando os fatores positivos e negativos de cada um deles e a aplicação a que eles se destinam.

Codificadores MPEG-2 e H.264/AVC, moduladores DVB-S e DVB-S2 e Receptores Decodificadores Integrados foram utilizados como ferramentas de testes para o desenvolvimento deste trabalho.

O êxito deste trabalho está centrado na determinação de parâmetros que compõem uma transmissão de sinal de vídeo por satélite.

1.6 – Descrição

O Capítulo 2 apresentará uma introdução às tecnologias H.264/AVC e DVB-S2. Ressalta-se que estas tecnologias são bastante complexas, portanto esta introdução tratará o assunto de forma superficial.

No Capítulo 3 será mostrada a comparação entre as tecnologias H.264/AVC e MPEG-2.

O Capítulo 4 irá discutir as diferenças entre as tecnologias DVB-S, DVB-S2 e ISDB-S.

A apresentação de casos práticos estará presente no Capítulo 5 e a conclusão no Capítulo 6.

Capítulo 2

As Tecnologias H.264 e DVB-S2

2.1 – O Algoritmo H.264/AVC

O H.264 é um padrão para compressão de vídeo, baseado no H.264/AVC Part 10 ou AVC (*Advanced Video Coding*). O padrão foi desenvolvido pela ITU-T *Video Coding Experts Group* (VCEG) [1] em conjunto com a ISO/IEC MPEG [1] que formaram uma parceria conhecida por Joint Video Team (JVT) [1].

A intenção do projeto H.264/AVC era criar um padrão capaz de fornecer boa qualidade de vídeo com uma taxa de bits muito baixa em relação aos padrões já existentes (MPEG-2, H.263...) sem aumentar a complexidade do projeto, o que seria algo praticamente impossível de ser implementado.

Outra meta do projeto era fazer um padrão que fosse compatível a todas as necessidades, isto é, compatível com vídeos de baixa e alta taxa de bits ou com baixa e alta resolução. O padrão tem sete configurações diferentes, chamadas perfis. Cada configuração foi feita pensando em aplicações distintas:

- *Baseline Profile* (BP) - Indicada para sistemas com poucos recursos. É mais comum ser usado em videoconferências ou aplicações móveis, por causa da sua baixa taxa de bits. Este é o perfil adotado pelo sistema de TV Digital brasileiro para transmissão a aparelhos portáteis como celular e Mini-TV.
- *Main Profile* (MP) - Inicialmente desenvolvido para broadcast e armazenamento, foi aos poucos substituído pelo perfil *High Profile*.
- *Extended Profile* (XP) - Criado para *streaming media*, este perfil tem um alta taxa de compressão.

- *High Profile* (HiP) - Tal como o MP, este perfil foi criado para *broadcast* e armazenamento, em especial para alta definição. É o perfil adotado em discos HD DVD e Blu-Ray e pelo sistema brasileiro de TV Digital.
- *High 10 Profile* (Hi10P) - Está muito além das necessidades dos consumidores de hoje em dia. Este perfil é baseado no HiP, adicionando 10 bits por *frame* para melhor precisão na decodificação da imagem.
- *High 4:2:2 Profile* (Hi422P) - Desenvolvido pensando em vídeos entrelaçados, este perfil tem por base o Hi10P com o suporte ao formato 4:2:2. O Hi10P apresenta uma significativa melhora de qualidade na compressão comparado ao *High Profile* (4:2:0 - 8bits). No mercado profissional, já é possível encontrar codificadores e decodificadores com suporte a este formato.
- *High 4:4:4 Predictive Profile* (Hi444PP) - Baseado no perfil Hi422P, mas utiliza o formato 4:4:4 e tem um maior número de bits para a precisão na decodificação de imagem (14 bits). Este perfil ainda tem a característica de, no processo de compressão fazer o processo em três cores separadas.

É importante ressaltar que, independente do perfil adotado, o sinal comprimido em H.264 é montado sob um *transport stream* padrão MPEG-2, o que facilita a interoperabilidade entre dispositivos de um sistema.

No capítulo a seguir serão explicados detalhes que fazem do H.264 um algoritmo extremamente mais eficiente que o MPEG-2.

2.2 – A Modulação DVB-S2

O DVB-S2 [9] é a segunda geração de uma tecnologia desenvolvida pelo grupo europeu DVB para transmissão de sinais de áudio e vídeo por satélite. Este padrão foi rapidamente absorvido pelo mercado já que seu desenvolvimento coincidiu com a demanda por codificadores de vídeo em alta-definição.

Serão mencionadas a seguir algumas características técnicas do DVB-S2 [2], [3], [4]:

2.2.1 Constelações – As constelações presentes no DVB-S2 são QPSK, 8PSK, 16APSK e 32APSK, conforme mostrado na Figura 2.1. São elas que determinam o número de bits que será transmitido por símbolo. Os modos 16APSK e 32APSK não são utilizados geralmente para sinais de TV por serem mais sensíveis a distorções não lineares, requerendo uma grande atenuação na potência de saída (*back-off*) do sinal para as suas utilizações. Em configuração de mais de um canal por portadora (MCPC), estas constelações também sofrem maiores problemas com intermodulação.

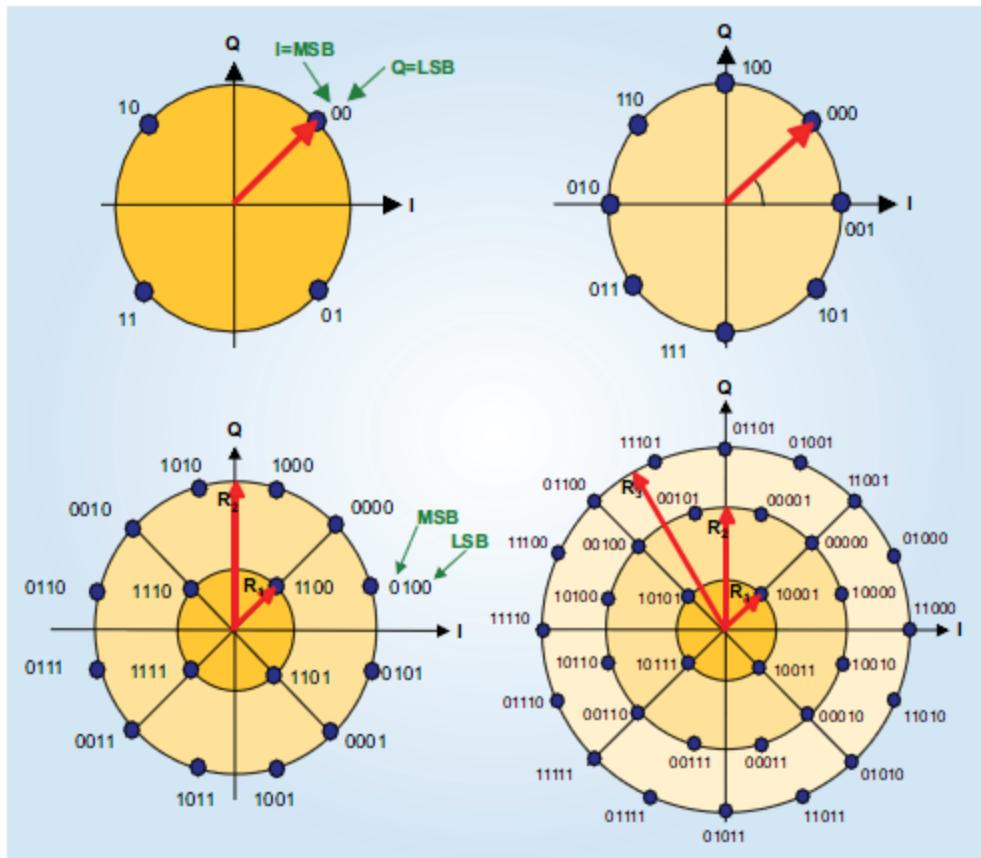


Figura 2.1 – Constelações usadas nas transmissões

2.2.2 Roll-Off – Trata-se de é um fator de decaimento que minimiza a interferência inter-simbólica entre canais. No modo DVB-S2, na formatação dos pulsos de transmissão, é possível configurar o parâmetro de decaimento para valores de 0,2, 0,25 e 0,35, conforme mostrado na Figura 2.2.

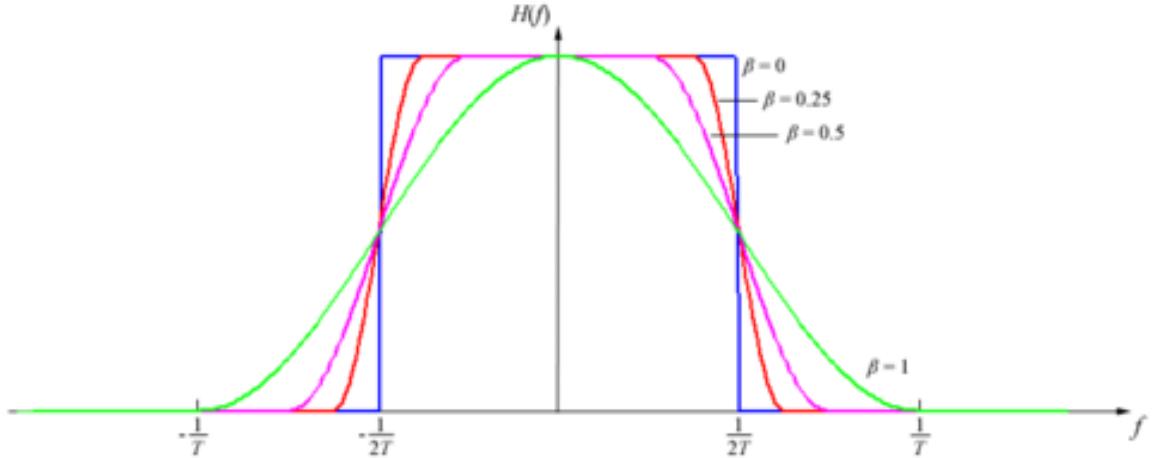


Figura 2.2 – Formatação dos Pulsos de Transmissão

2.2.3 Quadro (Frame) – Existem dois tipos de quadro no DVB-S2: Normal e *Short* conforme ilustrado na Figura 2.3. O mais utilizado para transmissões de TV é o quadro Normal.

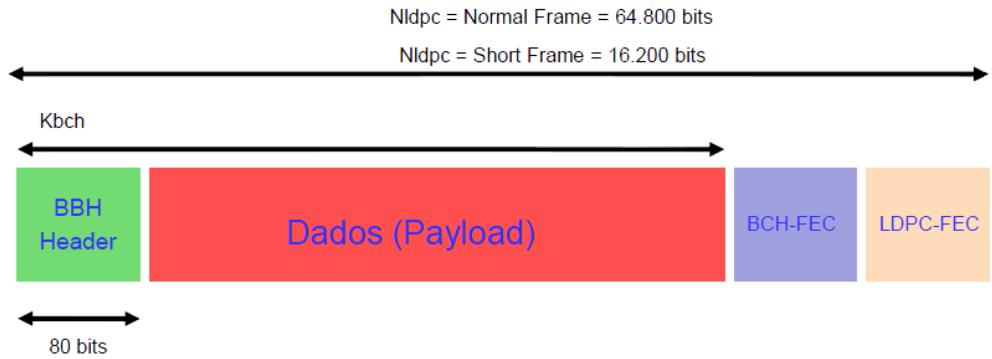


Figura 2.3 – Frame de Transmissão

2.2.4 Código Corretor de Erro (FEC) – Permite a detecção e correção de símbolos errados. O DVB-S2 utiliza um poderoso sistema de FEC baseado na concatenação de BCH (*Bose-Chaudhuri-Hocquenghem*) [4],[5] com a codificação interna LDPC (*Low Density Parity Check*) [5]. A escolha dos parâmetros de FEC depende dos requisitos do sistema. As taxas de FEC mais comuns são 1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 e 9/10.

2.2.5 Piloto – Bloco de 36 símbolos modulados em BPSK inseridos após cada 16 *slots* que permite a recuperação da portadora mesmo abaixo do nível de ruído.

2.2.6 Cálculo da Taxa de Dados – O cálculo da taxa de dados [7] é feito da seguinte forma, vide Figura 2.4.

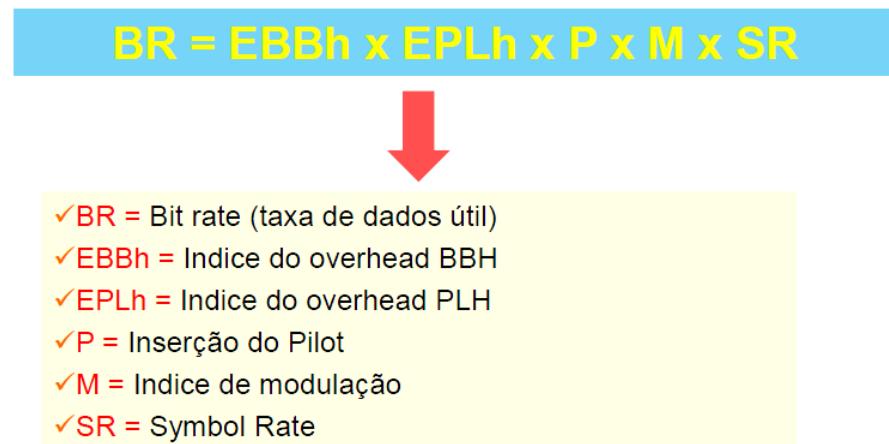


Figura 2.4 – Cálculo da taxa de dados

Suponha que a configuração desejada seja:

- Banda no satélite de 3MHz
- Modulação 8PSK
- FEC 2/3
- *Roll-Off* de 35%
- Quadro normal

2.2.7 Cálculo dos dados úteis e eficiência BBH

$$L_{dpc} = 64800 \text{ (para normal frame)}$$

$$K_{bch} = 43040 \text{ (da tabela anterior)}$$

$$\text{Dados} = 43040 - 80 = 42.960 \text{ bits}$$

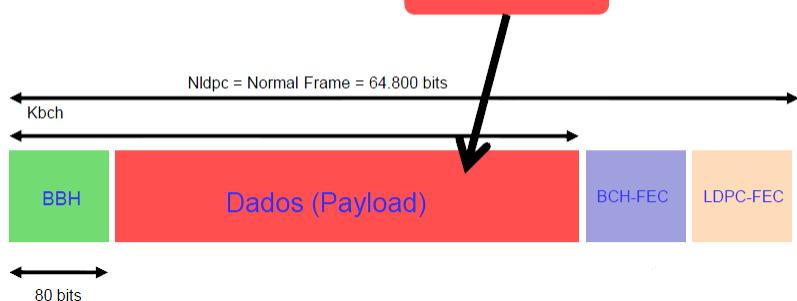


Figura 2.5 – Frame do Exemplo 2.2.6

$$EBBh = \frac{42.960}{64.800} = 0,6629$$

$$\frac{1}{0,6629} = 1,50$$

Pelas equações acima, conclui-se que para cada 1 bit de informação, 1,5 bits são transmitidos devido ao índice de *overhead BBH*, ou seja, a taxa de bits é 1,5 vezes maior que a taxa de dados.

2.2.8 Cálculo do índice de EPlh

Após a modulação, os símbolos são agrupados em “S” *slots* de 90 símbolos cada um. A quantidade de *slots* no quadro depende da modulação utilizada, conforme Figura 2.6.

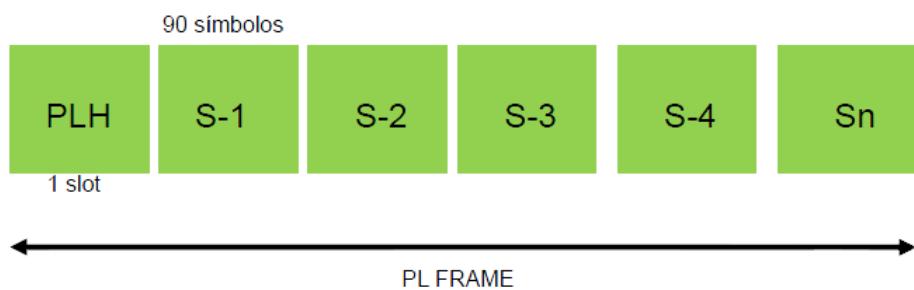


Figura 2.6 – Slots do frame

A quantidade de *slots* é dada da seguinte forma:

$$S = \frac{Nldpc}{M \times 90} = \frac{64.800}{3 \times 90} = 240 \text{ slots}$$

Tabela 2.1 – Slots por Tipo de Modulação

MODULAÇÃO		Normal	Short
Constelação	Bits/símbolo	Qde Slots	Qde Slots
QPSK	2	360	90
8PSK	3	240	60
16APSK	4	180	45
32 APSK	5	144	36

Se o número de *slots* que contêm dados úteis é “S”, então o *overhead* será “S+1”, pois o cabeçalho ocupa um *slot*.

$$EPLh = \frac{S}{S+1} = \frac{240}{241} = 0,9958$$

2.2.9 Inserção do Piloto

$$P = \frac{S \times 90}{90 + (S \times 90) + 36 \text{ int } [(S-1)/16]}$$

$$P = 0,9732$$

2.2.10 Cálculo da taxa de símbolos

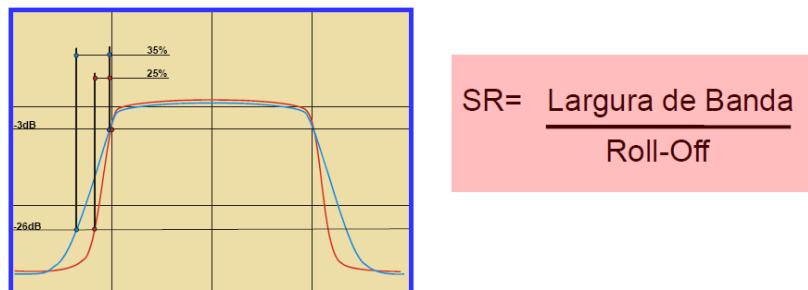


Figura 2.7 – Largura de Banda

$$SR = \frac{3 \text{ Mhz}}{1,35} = 2,22 \text{ MS/s}$$

2.2.11 Taxa de Dados

$$BR = EBBh \times EPLh \times P \times M \times SR$$

$$0,6629 \quad 0,9958 \quad 0,9732 \quad 3 \quad 2,22$$

$$BR = 4,3 \text{ Mbps}$$

Na Figura 2.8 está ilustrado um diagrama em blocos de um modulador DVB-S2.

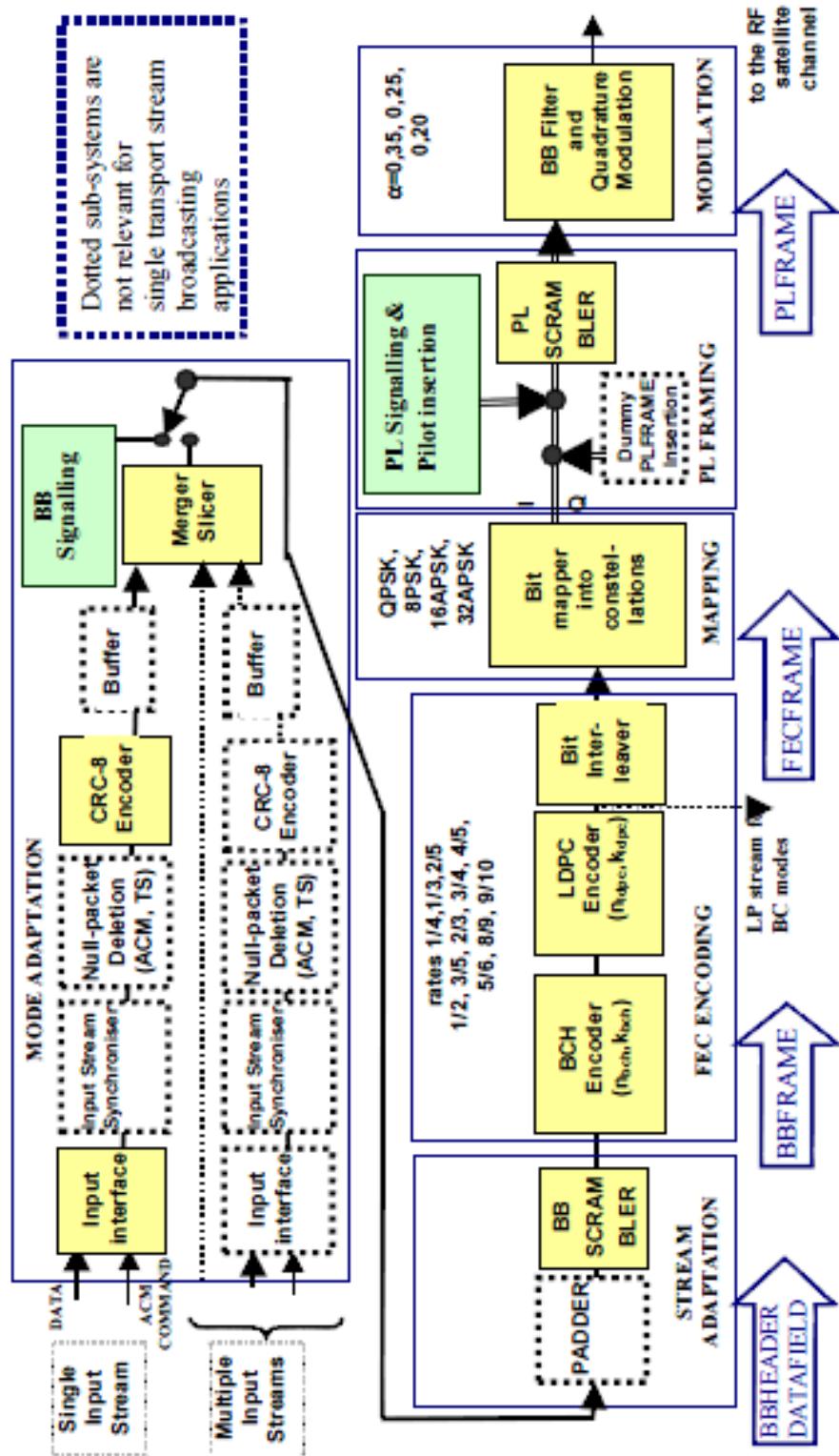


Figura 2.8 – Diagrama em Blocos de um Modulador DVB-S2

No capítulo a seguir serão demonstrados os testes que comprovam a eficiência do DVB-S2 comparado ao DVB-S.

Capítulo 3

MPEG-2 x H.264/AVC

3.1 – Diferenças Técnicas

Conforme foi mencionado anteriormente, o H.264 tem em seu algoritmo elementos funcionais básicos já existentes no MPEG-2 como predição, transformação, quantização e codificação entrópica. O que muda na verdade é a forma que cada bloco funcional é implementado. Além disso, o H.264 possui um filtro *Deblocking* voltado para sinais que já sofreram algum tipo de codificação/decodificação anteriormente. O objetivo deste filtro é eliminar artefatos presentes no vídeo evitando assim sua propagação pela cadeia de transmissão.

Um exemplo da atuação do filtro *Deblocking* é mostrado na Figura 3.1:

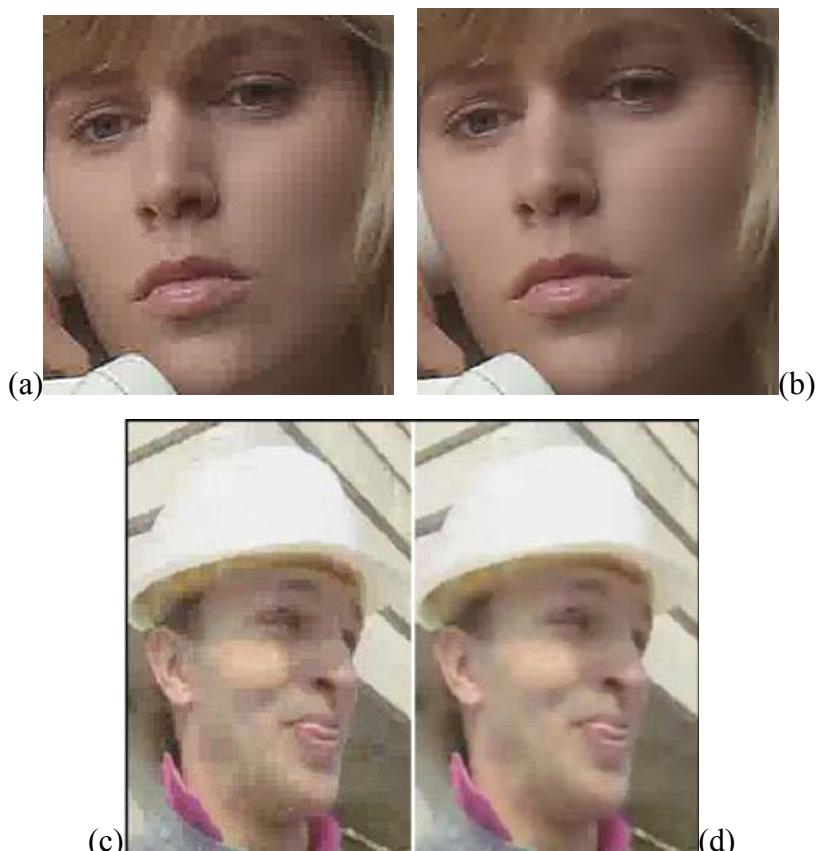


Figura 3.1 – Filtro de Deblocking: (a) e (c) antes da filtragem, (b) e (d) depois da filtragem

Para realizar a codificação *intra-frame* (quadro I), ou seja, buscar informações redundantes dentro do mesmo quadro, o MPEG-2 utiliza blocos com tamanho 8x8 contra blocos 8x8 e 4x4 do H.264.

Com relação à codificação *inter-frame* (quadros P e B), o H.264 analisa não somente um quadro anterior ou posterior como acontece no MPEG-2, e sim múltiplos quadros permitindo uma maior capacidade de compressão.

Uma ferramenta existente nos quadros P do H.264 é a estimativa de movimento [8]. O H.264 tem a capacidade de trabalhar com blocos de até oito tamanhos diferentes contra dois tamanhos do MPEG-2. Vide Figuras 3.2, 3.3 e 3.4:

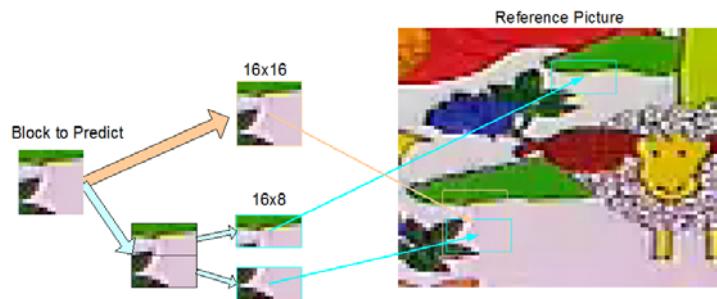


Figura 3.2 – Blocos MPEG-2

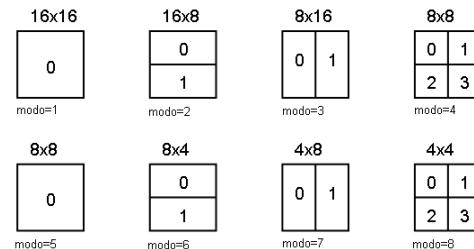


Figura 3.3 – Possibilidade de Tamanhos de Blocos no H.264/AVC

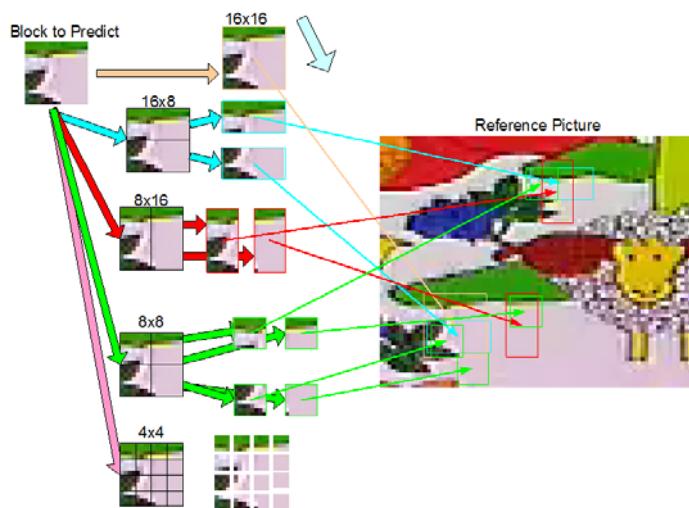


Figura 3.4 – Blocos H.264/AVC

Além disso, cada macrobloco pode ter até 32 vetores de movimento com precisão de $\frac{1}{4}$ de pixel e até 16 imagens de referência. A Figura 3.5 mostra em detalhe a aplicação desses macroblcos em um quadro:

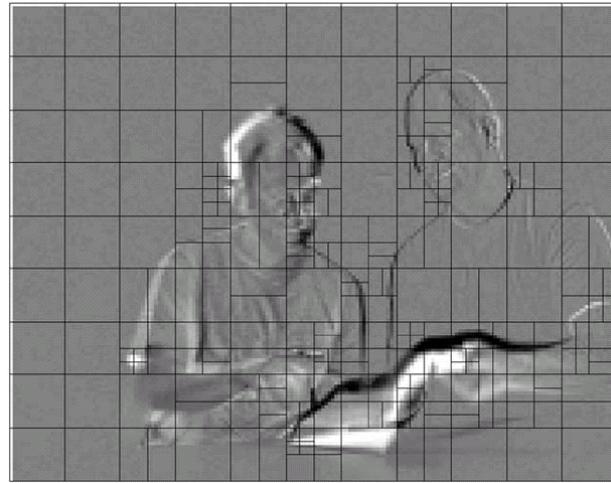


Figura 3.5 – Macroblcos em um Quadro

Um dos principais parâmetros de um codificador é a estrutura de seu GOP [9]. O GOP é abreviação de *Group of Pictures* e determina como é montada a seqüência de *frames* I, B e P de um *stream* MPEG. Em um codificador, existem dois parâmetros que precisam ser configurados:

- m, que representa a distância entre dois *frames* I
- n, que representa a distância entre dois *frames* I e P.

O GOP sempre começa com um *frame* I, pois este não necessita de *frames* de referência para ser construído. Em seguida, geralmente aparecem os *frames* B e, em seguida, os *frames* P, conforme mostrado na figura 3.6.

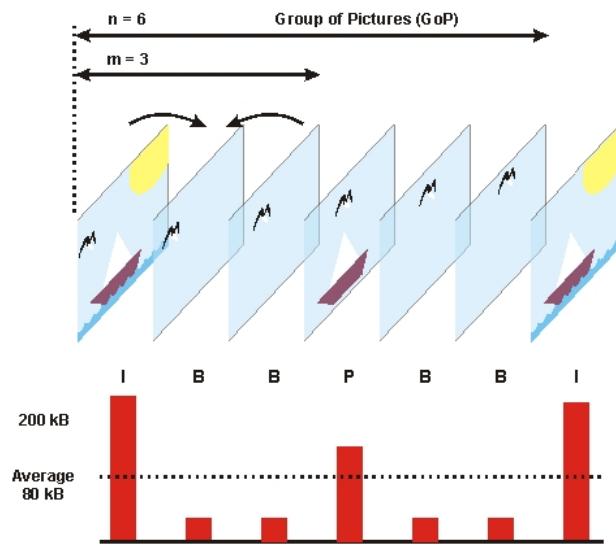


Figura 3.6 – Estrutura de um GOP

Como o algoritmo H.264/AVC possui ferramentas eficientes de predição, é possível configurar a estrutura de um GOP com mais *frames* B comparado ao MPEG-2.

Para codificação de vídeo em uma transmissão via satélite onde a qualidade é prioridade geralmente, os parâmetros de GOP mais utilizados no MPEG-2 são $m=12$ e $n=3$, já no H.264/AVC são $m=16$ e $n=4$.

Em sistemas digitais de transmissão terrestre de jornalismo, onde o tempo de codificação é importante e o conteúdo de vídeo é um conteúdo simples para o codificador, é possível encontrar estruturas de GOP formadas apenas por *frames* I e P.

Outra diferença entre o MPEG-2 e o H.264 está na codificação entrópica (sem perda) adotada. Enquanto o MPEG-2 utiliza o código de Huffman, o H.264 utiliza os algoritmos CAVLC e CABAC [8], [10], [11], este segundo aproximadamente 15% mais eficiente que o primeiro e presente nos principais perfis como o *Main* e *High*. A causa desta melhora de eficiência está na combinação de técnicas de aritmética binária adaptativa com técnicas de modelagem de contexto.

Conforme ilustrado na Figura 3.7, o CABAC é composto por três etapas principais [10], [11]: binarização, modelagem de contexto e codificação aritmética binária.

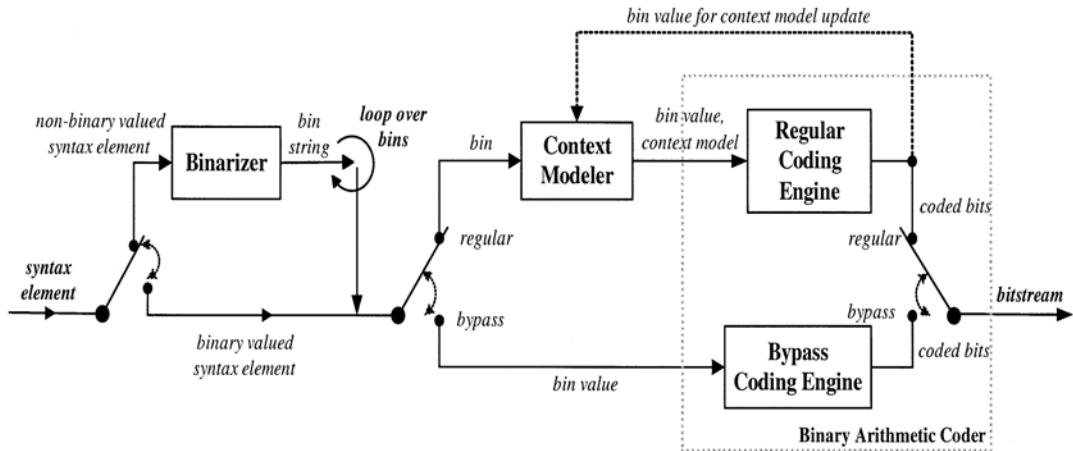


Figura 3.7 – Diagrama de blocos do CABAC

A binarização é responsável em mapear através de bits um elemento de valor não binário. Caso este elemento já seja binário, esta etapa é desconsiderada pelo algoritmo. A sequência de bits gerada por esta etapa é chamada de *Bin String*.

Depois de formada a *Bin String*, os dados passam por uma etapa de modelagem. Esta modelagem tem a capacidade de aplicar diversos modelos probabilísticos, dependendo da sintaxe de entrada.

Por último, a informação é codificada aritmeticamente. Note pelo diagrama acima que também existe a possibilidade de não realizar as etapas 2 e 3, permitindo maior agilidade nos processos de codificação e decodificação.

Como podemos ver no gráfico da Figura 3.8, o CABAC tem a capacidade de reduzir a taxa de bits em até 14%, mantendo o PSNR entre 30 e 38dB dependendo do conteúdo de vídeo.

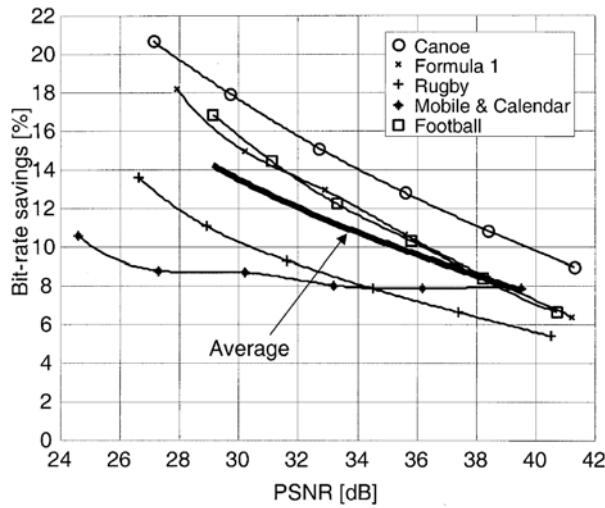


Figura 3.8 – Eficiência do CABAC

É importante ressaltar que não existe uma única inovação que possibilita o ganho em compressão no H.264/AVC e sim um conjunto de melhorias que geram pequenos ganhos individuais, possibilitando um significante aumento em sua eficiência.

Segue na Figura 3.9 um diagrama em blocos de um codificador H.264.

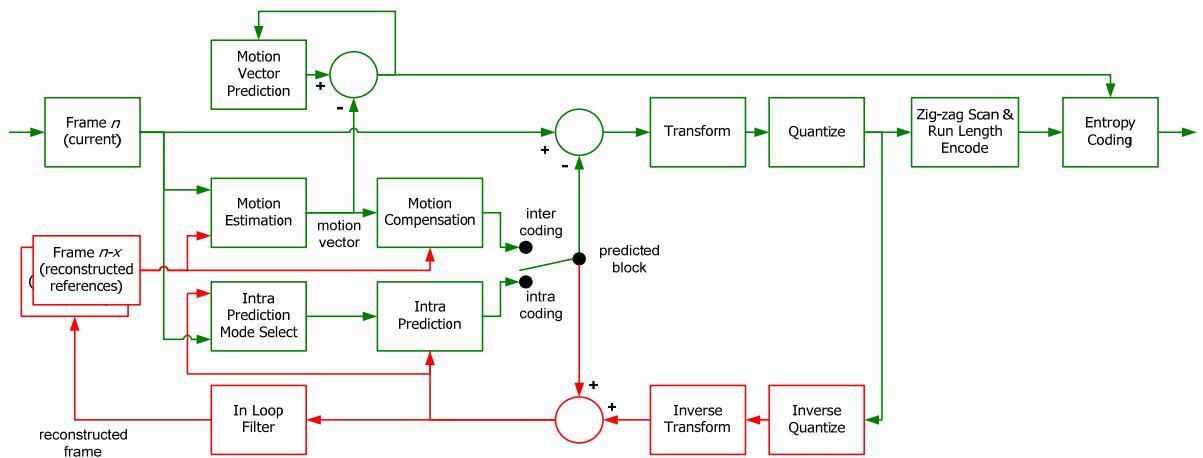


Figura 3.9 – Codificador H.264

3.2 – Testes Comparativos

Existem duas formas de se analisar a qualidade de um vídeo: a forma subjetiva e a forma objetiva.

A análise subjetiva se baseia na avaliação de diversas pessoas comparando imagens lado a lado. Este tipo de análise é a mais utilizada e considerada pelos provedores de conteúdo para escolha de um determinado codificador ou de uma determinada configuração. Será esta análise que será utilizada neste trabalho para comparar o algoritmo MPEG-2 com o H.264.

A análise objetiva é feita utilizando instrumentos capazes de processar cada quadro de um vídeo comprimido e comparar com sua amostra original. Geralmente este método é extremamente detalhista e preciso, porém não podemos esquecer que o telespectador é uma pessoa e não um instrumento. Nesse caso, usa-se a medida de PSNR, que mede a relação sinal ruído da imagem após sua compressão.

Foram realizados testes comparativos da seguinte forma: Um grupo de seis pessoas deu notas comparando lado a lado em televisores idênticos um vídeo sem compressão no seu formato original e o mesmo vídeo após sua compressão em diferentes taxas. Isto foi feito utilizando quatro amostras de vídeo distintas sendo duas SDTV e duas HDTV. Cada amostra possuía 1 minuto de duração com conteúdo esportivo, considerado um dos mais complexos para os algoritmos de codificação.

Para evitar possíveis falhas devido ao cansaço do avaliador, os testes HDTV foram realizados um dia após os testes em SDTV.

O primeiro teste, dentro do âmbito MPEG-2, serviu para determinar a partir de qual taxa o telespectador passa a não perceber mais diferença de qualidade tanto em SDTV quanto em HDTV. O mesmo foi feito no âmbito H.264.

Para evitar notas tendenciosas, os avaliadores não tiveram conhecimento da taxa de bits que estava sendo exibida.

Em seguida, após determinar a taxa de bit ideal para dada conteúdo em cada modo de compressão, foi realizado um teste comparativo de qualidade entre o *stream* MPEG-2 e o *stream* H.264.

Os equipamentos utilizados no cenário de teste foram:

- Receptor marca Ericsson modelo RX1290
- Codificador MPEG-2 marca Ericsson modelo E5720

- Codificador H.264 marca Ericsson modelo EN8090.

Seguem os resultados na Tabelas 3.1 a 3.16:

Obs: Quanto mais similar o conteúdo comprimido com sua fonte, mais próximo de 5 deverá ser a nota, caso contrário a nota será mais próximo de 1.

Table 3.1: Teste 1 – Análise SDTV MPEG-2 – Conteúdo A

	7 Mb/s	11 Mb/s	14 Mb/s	17 Mb/s	20 Mb/s
Avaliador #1	3	3	4	4	4
Avaliador #2	4	5	5	5	5
Avaliador #3	3	4	3	4	5
Avaliador #4	4	3	5	5	5
Avaliador #5	4	5	5	5	5
Avaliador #6	4	5	4	5	4

Tabela 3.2: Teste 2 – Análise SDTV MPEG-2 – Conteúdo B

	7 Mb/s	11 Mb/s	14 Mb/s	17 Mb/s	20 Mb/s
Avaliador #1	3	4	4	4	5
Avaliador #2	4	3	5	5	4
Avaliador #3	4	4	4	4	4
Avaliador #4	3	4	5	4	5
Avaliador #5	4	3	5	5	5
Avaliador #6	3	5	5	5	4

Tabela 3.2 – Teste 2

Tabela 3.3: Total de pontos para cada taxa de bits SDTV MPEG-2 – Conteúdos

A & B

7 Mb/s	11 Mb/s	14 Mb/s	17 Mb/s	20 Mb/s
43	48	54	55	55

Note que para o padrão de vídeo SDTV, não há uma melhora significativa na qualidade de vídeo para o telespectador após a taxa de 14 Mb/s utilizando-se MPEG-2.

Tabela 3.4: Teste 3 – Análise HDTV MPEG-2 – Conteúdo A

	12 Mb/s	17 Mb/s	21 Mb/s	25 Mb/s	30 Mb/s
Avaliador #1	3	3	3	4	4
Avaliador #2	4	4	4	5	5
Avaliador #3	3	3	5	5	5
Avaliador #4	3	4	5	4	5
Avaliador #5	3	3	3	4	5
Avaliador #6	3	3	4	4	4

Tabela 3.5: Teste 4 – Análise HDTV MPEG-2 – Conteúdo B

	12 Mb/s	17 Mb/s	21 Mb/s	25 Mb/s	30 Mb/s
Avaliador #1	4	3	4	5	5
Avaliador #2	3	4	5	5	5
Avaliador #3	3	3	3	4	4
Avaliador #4	4	4	4	5	5
Avaliador #5	2	3	3	3	4
Avaliador #6	3	4	4	5	4

Tabela 3.6: Total de pontos para cada taxa de bits HDTV MPEG-2–Cont. A & B

12 Mb/s	17 Mb/s	21 Mb/s	25 Mb/s	30 Mb/s
38	41	47	53	55

Note que para o padrão de vídeo HDTV, não há uma melhora significativa na qualidade de vídeo para o telespectador após a taxa de 25 Mb/s utilizando MPEG-2.

Tabela 3.7: Teste 5 – Análise SDTV H.264/AVC – Conteúdo A

	2 Mb/s	4 Mb/s	6 Mb/s	8 Mb/s
Avaliador #1	3	4	4	5
Avaliador #2	3	3	4	5
Avaliador #3	2	4	5	5
Avaliador #4	3	5	5	5
Avaliador #5	3	4	4	4
Avaliador #6	2	3	5	5

Tabela 3.8: Teste 6 – Análise SDTV H.264/AVC – Conteúdo B

	2 Mb/s	4 Mb/s	6 Mb/s	8 Mb/s
Avaliador #1	4	4	4	4
Avaliador #2	3	3	5	5
Avaliador #3	2	2	3	4
Avaliador #4	3	4	5	4
Avaliador #5	4	3	4	5
Avaliador #6	3	3	4	4

Tabela 3.9: Total de pontos para cada taxa de bits SDTV H.264/AVC – Conteúdos A & B

2 Mb/s	4 Mb/s	6 Mb/s	8 Mb/s
35	42	52	55

Note que para o padrão de vídeo SDTV, não há uma melhora significativa na qualidade de vídeo para o telespectador após a taxa de 6 Mb/s utilizando H.264/AVC.

Tabela 3.10: Teste 7 – Análise HDTV H.264/AVC – Conteúdo A

	8 Mb/s	10 Mb/s	12 Mb/s	14 Mb/s	16 Mb/s
Avaliador #1	3	4	4	5	5
Avaliador #2	4	3	5	5	5
Avaliador #3	4	5	5	5	5
Avaliador #4	4	4	5	4	4
Avaliador #5	3	3	4	4	5
Avaliador #6	4	4	4	4	4

Tabela 3.11: Teste 8 – Análise HDTV H.264/AVC – Conteúdo B

	8 Mb/s	10 Mb/s	12 Mb/s	14 Mb/s	16 Mb/s
Avaliador #1	4	4	5	5	4
Avaliador #2	3	3	3	4	4
Avaliador #3	3	4	3	4	5
Avaliador #4	4	5	5	5	5
Avaliador #5	4	4	3	4	4
Avaliador #6	3	4	5	5	5

Tabela 3.12: Total de pontos para cada taxa de bits HDTV H.264/AVC –
Conteúdos A & B

8 Mb/s	10 Mb/s	12 Mb/s	14 Mb/s	16 Mb/s
43	47	51	54	55

Note que para o padrão de vídeo HDTV, não há uma melhora significativa na qualidade de vídeo para o telespectador após a taxa de 14 Mb/s utilizando H.264/AVC.

Tabela 3.13: Teste 9 – SDTV MPEG-2 @ 14 Mb/s x H.264/AVC @ 6 Mb/s –
Conteúdo A

	MPEG-2	H.264/AVC
Avaliador #1	X	
Avaliador #2		X
Avaliador #3		X
Avaliador #4	X	
Avaliador #5		X
Avaliador #6		X

Tabela 3.14: Teste 10 – SDTV MPEG-2 @ 14 Mb/s x H.264/AVC @ 6 Mb/s –
Conteúdo B

	MPEG-2	H.264/AVC
Avaliador #1	X	
Avaliador #2	X	
Avaliador #3		X
Avaliador #4		X
Avaliador #5		X
Avaliador #6	X	

Tabela 3.15: Teste 11 - HDTV MPEG-2 @ 25 Mb/s x H.264/AVC @ 14 Mb/s -
Conteúdo A

	MPEG-2	H.264/AVC
Avaliador #1		X
Avaliador #2	X	
Avaliador #3		X
Avaliador #4		X
Avaliador #5		X
Avaliador #6	X	

Tabela 3.16: Teste 12 – HDTV MPEG-2 @ 25 Mb/s x H.264/AVC @ 14 Mb/s
Conteúdo B

	MPEG-2	H.264/AVC
Avaliador #1	X	
Avaliador #2	X	
Avaliador #3		X
Avaliador #4	X	
Avaliador #5	X	
Avaliador #6		X

Podemos concluir observando os resultados acima que a economia de banda utilizando o algoritmo H.264 é bastante significativa.

Um vídeo SDTV comprimido a 14 Mb/s em MPEG-2 possui a mesma qualidade que um vídeo comprimido a 6 Mb/s em H.264.

Para o vídeo HDTV o resultado foi idêntico ao anterior, isto é, um vídeo comprimido a 25 Mb/s em MPEG-2 possui a mesma qualidade que um vídeo comprimido a 14 Mb/s em H.264.

É importante ressaltar que uma grande desvantagem do algoritmo H.264 é o seu tempo de processamento, geralmente 4 segundos mais longo que o MPEG-2. Caso a aplicação tenha como o tempo de retorno algo imprescindível, a tecnologia H.264 não se aplica. Um exemplo seria uma conversa ao vivo entre duas pessoas, em locais diferentes, onde a conexão entre elas esteja sendo feira através de um sistema de *uplink*.

Capítulo 4

DVB-S, DVB-S2 e o ISDB-S

4.1 – Código Corretor de Erro (FEC)

Uma das principais ferramentas responsável pela significativa eficiência do DVB-S2 com relação ao DVB-S encontra-se no código corretor de erro adotado.

Enquanto a tecnologia DVB-S trabalha com FECs convolucional (*Outer*) e *Reed-Solomon* (*Inner*), o DVB-S2 utiliza o código BCH (*Outer*) em cascata com o código LDPC (*Inner*).

No DVB-S2, o código BCH [4], [5], [6] é o primeiro a atuar agindo no quadro de banda base (*BBFrame*). Em seguida, aparece o código LDPC [4], [6], [12] atuando não apenas nos bits do *BBFrame* como também nos bits alocados pelo algoritmo BCH conforme ilustrado no gráfico da Figura 4.1 e Tabela 4.1:

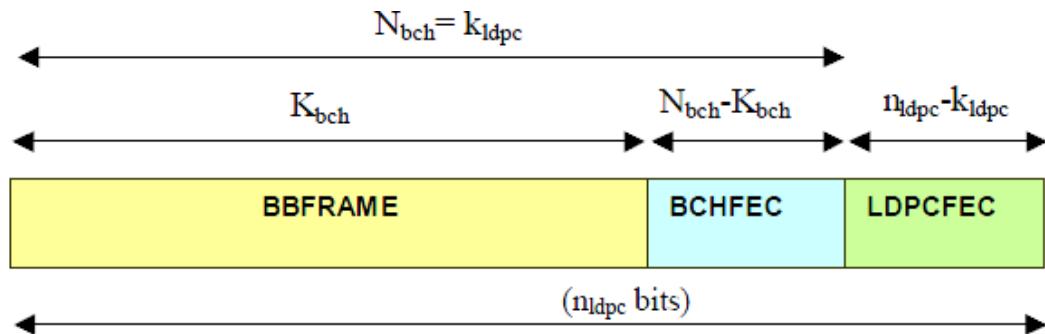


Figura 4.1 – BBFrame + FEC

Tabela 4.1: Parâmetros de FEC para um quadro normal

LDPC code	BCH Uncoded Block K_{bch}	BCH coded block N_{bch} LDPC Uncoded Block k_{ldpc}	BCH t-terror correction	LDPC Coded Block n_{ldpc}
1/4	16 008	16 200	12	64 800
1/3	21 408	21 600	12	64 800
2/5	25 728	25 920	12	64 800
1/2	32 208	32 400	12	64 800
3/5	38 688	38 880	12	64 800
2/3	43 040	43 200	10	64 800
3/4	48 408	48 600	12	64 800
4/5	51 648	51 840	12	64 800
5/6	53 840	54 000	10	64 800
8/9	57 472	57 600	8	64 800
9/10	58 192	58 320	8	64 800

O código BCH foi introduzido ao DVB-S2 para eliminar erros em baixos níveis de BER (*Bit Error Rates*).

Já o LDPC, apresenta desempenho próximo ao limite de Shannon e sua complexidade de codificação e decodificação foi amenizada após a introdução de estruturas matriciais de paridade como é o caso dos códigos eIRA (*extended Irregular Repeat-Accumulate*).

Códigos LDPC ($n; k$) são códigos de bloco lineares e binários. Desta forma, estes códigos podem ser vistos como um conjunto de vetores binários “ c ” que satisfazem $cH^T = 0$, onde H é uma matriz binária $(n-k) \times n$ chamada matriz de paridade e as operações de soma e produto são binárias. A característica que define os códigos LDPC é o fato de que sua matriz de paridade é esparsa, ou seja, o número de valores iguais a 1 é muito menor que o número de zeros na matriz H .

A decodificação de códigos LDPC é descrita em termos de seus grafos de Tanner [12]. Um grafo de Tanner é um grafo bipartido que contém dois tipos de nó: nós de *check* e nós de variável. Qualquer código de bloco linear Bin tem um grafo de Tanner correspondente, o qual é construído a partir de sua matriz de paridade H . Cada bit na palavra-código corresponde a um nó de variável, e cada equação de paridade corresponde a um nó de *check*. Um nó de variável é conectado a um nó de *check* no grafo de Tanner se, e somente se, o correspondente bit da palavra-código faz parte da correspondente equação de paridade. A Figura 4.2 mostra o grafo de Tanner associado ao código de Hamming (7; 4), cuja matriz de paridade é dada por:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

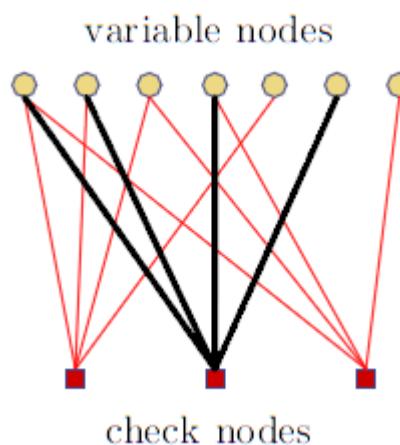


Figura 4.2 - Grafo de Tanner para o código de Hamming (7; 4)

Note que as linhas mais grossas correspondem à segunda linha de H .

O desempenho de códigos LDPC é determinado pela chamada distribuição de densidades, que são polinômios que provém uma descrição da estrutura do grafo de Tanner. De fato, define-se o grau de um nó como o número de ramos conectados a ele. Assim, o grau de um nó de variável é o número de equações de paridade do qual o bit correspondente faz parte, enquanto que o grau de um nó de *check* é o número de bits envolvidos na correspondente equação de paridade.

Seja $\lambda_i(\rho_i)$ a fração de ramos conectados a nós de variável (nós de cheque) de grau i . Então, a distribuição de graus dos nós de variável é dada pela seguinte equação:

$$\lambda(x) = \sum_i \lambda_i x^{i-1}$$

E distribuição de graus dos nós de variável é dada por:

$$\rho(x) = \sum_i \rho_i x^{i-1}$$

Um algoritmo é responsável em determinar a distribuição ótima, já que estes polinômios são determinantes no desempenho de um código LDPC.

4.2 – Testes Comparativos

Para comprovar a eficiência da modulação DVB-S2 em relação ao DVB-S, foi utilizada um codificador de áudio e vídeo gerando um *transport stream* modulado das duas formas. Os parâmetros considerados foram:

- Aumento da taxa de bits mantendo a mesma banda ocupada
- Economia da banda ocupada mantendo a mesma taxa de bits
- Relação sinal-ruído medida no receptor

Os equipamentos utilizados no cenário de teste foram:

- Modulador DVB-S/DVB-S2 marca Ericsson modelo SM6620
- Receptor marca Ericsson modelo RX1290
- Codificador H.264 Ericsson modelo EN8090.
- Analisador de espectro marca HP

Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – DVB-S versus DVB-S2

Item	Ganho de Taxa		Ganho de Banda	Ganho de Margem	
	DVB-S QPSK	DVB-S2 8PSK	DVB-S2 8PSK	DVB-S QPSK	DVB-S2 QPSK
Banda	6.75 Mhz	6.75 Mhz	4.71 Mhz	6.75 Mhz	6.75 Mhz
SR	5	5	5	5	5
FEC	3/4	2/3	2/3	3/4	3/4
Co/No	6.31 dB	7.0 dB	7.0 dB	6.31 dB	4.30 dB
BR	6.91	9.67	6.91	6.91	7.26
BR %	0%	+40%	0%	0%	5%
Roll-Off	35%	35%	35%	35%	35%
Banda %	0%	0%	-31%	0%	0%
Margem	0 dB	0dB	0 dB	0 dB	2 dB

Podemos perceber que o DVB-S2 proporciona um ganho acima de 40% na taxa de informação a ser transmitida considerando a mesma banda no *transponder* comparado ao DVB-S2. Caso não se deseje aumentar a taxa de informação, o DVB-S2 é capaz de reduzir a banda no transponder em mais de 30%.

Se nenhuns dos dois fatores acima forem relevantes, o DVB-S2 é capaz de manter as características anteriores e adicionar 2dB à margem de recepção.

4.3 – Viabilidade Financeira do DVB-S2

Neste tópico será mostrado um estudo sobre a viabilidade financeira da implantação do sistema DVB-S2, tanto para montagem de um sistema de *uplink* novo quanto para substituição de um sistema DVB-S existente.

4.3.1 - Implantação de um sistema novo

Na Tabela 4.3 [7] constam os custos aproximados de um novo sistema de *uplink* DVB-S e um novo sistema de *uplink* DVB-S2.

Tabela 4.3 – Viabilidade Financeira 1

	DVB-S	DVB-S2	Diferenças
Banda (Mhz)	6 Mhz	4,2 Mhz	
Modulação	QPSK	8PSK	
FEC	3/4	2/3	
Custo do Mhz	\$3,000	\$3,000	
Total Custo Mhz	\$18,000	\$12,600	(\$5,400)
Qde Receptores	50	50	
Custo do Receptor	\$1,600	\$2,400	
Custo Uplink	\$50,000	\$75,000	\$25,000
Custo Total	\$130,000	\$195,000	\$65,000
Pay-Back (Meses)	(\$65,000/\$5,400) ~ 12 meses		

Note que o custo do sistema DVB-S2 é \$65.000 mais oneroso que um sistema DVB-S, porém como a banda alugada mensalmente no transponder é menor, esta diferença financeira é compensada em apenas um ano.

Considerando um contrato com a operadora de satélite de 5 anos, a economia no final do contrato será de **\$5,400 x (60-12) = \$259,200**

4.3.2 - Substituição de um sistema DVB-S por um DVB-S2 8PSK

Na Tabela 4.4 [7] constam os custos aproximados da manutenção de um sistema de uplink DVB-S existente e um novo sistema de uplink DVB-S2.

Tabela 4.4 – Viabilidade Financeira 2

	DVB-S	DVB-S2	Diferenças
Banda (Mhz)	6 Mhz	4,2 Mhz	
Modulação	QPSK	8PSK	
FEC	3/4	2/3	
Custo do Mhz	\$3,000	\$3,000	
Total Custo Mhz	\$18,000	\$12,600	(\$5,400)
Qde Receptores	50	50	
Custo do Receptor	0	\$2,400	120,000
Custo do Uplink	0	\$75,000	\$75,000
Custo Total		\$195,000	\$195,000
Pay-Back (Meses)	(\$195,000/\$5,400) ~36 meses		

Note que o custo de um novo sistema DVB-S2 é de \$195.000, porém como a banda alugada mensalmente no transponder é menor, esta diferença financeira é compensada em aproximadamente três anos.

Considerando um contrato com a operadora de satélite de 5 anos, a economia no final do contrato será de **\$5,400 x (60-36) = \$129,600**.

4.4 – DVB-S2 VCM e DVB-S2 ACM

Existem duas ferramentas utilizadas no DVB-S2 que não são muito empregadas para sinais de áudio e vídeo, porém são de grande importância para transmissão de dados que são o VCM (*Variable Coding and Modulation*) [4], [13] e o ACM (*Adaptive Coding and Modulation*) [4], [13].

O DVB-S2 VCM consiste em transmitir serviços com modulações diferentes dentro de uma mesma portadora. Esta ferramenta é válida quando os serviços não necessitam do mesmo nível de robustez, ou seja, um serviço pode ser interrompido no caso de incidência de chuva e o outro não, ou quando diferentes serviços são transmitidos para pontos distintos com condições de recepção distintas.

Vide a Figura 4.3 o diagrama em blocos de um sistema DVB-S2 VCM.

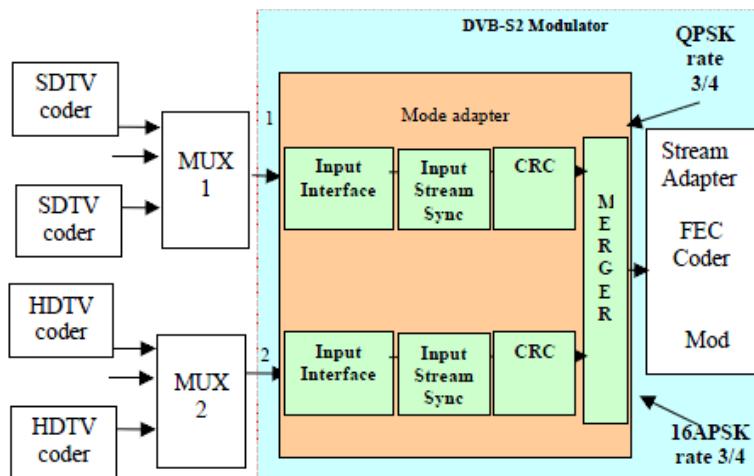


Figura 4.3 – Diagrama em Blocos DVB-S2 VCM

O DVB-S2 ACM é uma melhoria do VCM, porém com a capacidade de alterar a configuração de modulação de um determinado serviço de forma dinâmica, ou seja, o receptor informa ao modulador as suas condições de recepção através de um canal de retorno e o modulador, por sua vez, altera os parâmetros de modulação até o receptor

atingir sua condição marginal de recepção. Isto faz com que os parâmetros de modulação só sejam modificados se necessários.

A Figura 4.4 ilustra um claro exemplo de como funciona a tecnologia ACM.

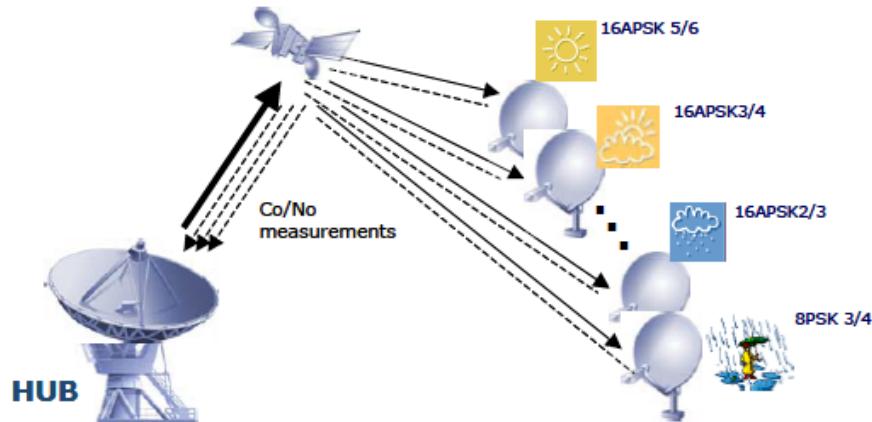


Figura 4.4 – Exemplo DVB-S2 ACM

Quatro serviços são transmitidos para quatro pontos distintos. O ponto de recepção que está com boas condições metereológicas, sem nuvens, recebe um sinal modulado em 16APSK com FEC 5/6, já o ponto de recepção que está com excesso de nuvens, recebe sinal modulado em 16APSK com FEC 3/4. A modulação 16APSK 2/3 é utilizada para o local com chuva de pouca intensidade enquanto que a modulação mais robusta dentre os sites, 8PSK 3/4, é empregada para o ponto de recepção em que chove mais forte.

Vide na Figura 4.5 o diagrama em blocos de um sistema DVB-S2 ACM.

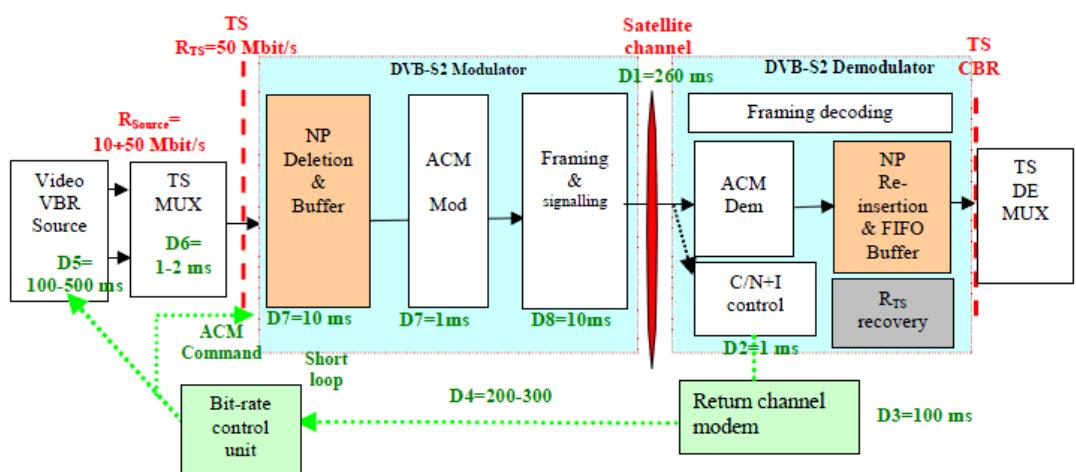


Figura 4.5 – Diagrama em Blocos DVB-S2 ACM

Segue a Tabela 4.5 explicitando as ferramentas do DVB-S2 e suas aplicações. Conforme mencionei anteriormente, este trabalho tem como foco os serviços de radiodifusão, mencionados na tabela como *Broadcast Services*.

Tabela 4.5 – Aplicações DVB-S2

System configurations		Broadcast services	Interactive services	DSNG	Professional services
QPSK	1/4, 1/3, 2/5	O	N	N	N
	1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10	N	N	N	N
8PSK	3/5, 2/3, 3/4, 5/6, 8/9, 9/10	N	N	N	N
16APSK	2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10	O	N	N	N
32APSK	3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10	O	N	N	N
CCM		N	N	N	N
VCM		O	O	O	O
ACM		NA	N	O	O
FECFRAME (normal)	64 800 (bits)	N	N	N	N
FECFRAME (short)	16 200 (bits)	NA	N	O	N
Single Transport Stream		N	N	N	N
Multiple Transport Streams		O	O	O	O
Single Generic Stream		NA	O	NA	O
Multiple Generic Streams		NA	O	NA	O
Roll-off 0,35, 0,25 and 0,20		N	N	N	N
Input Stream Synchronizer		NA except	O	O	O
Null Packet Deletion		NA	O	O	O
Dummy Frame insertion		NA	N	N	N

N = normative, O = optional, NA = not applicable.

4.5 – O ISDB-S

Outro padrão de modulação existente é o ISDB-S [1], [14]. Esta tecnologia foi desenvolvida no Japão no final da década de 90 para substituir o DVB-S, que não atendia a demanda de sinais HDTV das emissoras japonesas, principalmente a NHK.

As características deste sistema são similares às do DVB-S, porém com uma maior eficiência. Além da camada de transporte também ser baseada em *streams* MPEG-2, os códigos corretores de erro são os mesmos, assim como as taxas de FEC e a formatação *Roll-Off*.

As modulações utilizadas no ISDB-S são BPSK, QPSK e o TC8PSK. Esta última utiliza o código Trellis como FEC *Inner*. A Tabela 4.6 mostra as principais características deste sistema.

Tabela 4.6 – Características ISDB-S

Modulation scheme	TC8PSK/QPSK/BPSK
Raised cosine roll-off factor	0.35(square root)
Transmission symbol rate	28.86 Mbaud
Video coding	MPEG-2 MP@HL for 1080i,720p MP@ML for 480i MP@H14 for 480p
Audio coding	MPEG-2 AAC
FEC(Outer code)	Reed-Solomon(204,188)
FEC(Inner code)	Convolutional(constraint length k=7)
Inner code ratio	1/2 for BPSK 1/2,2/3,3/4,5/6,7/8 for QPSK 2/3 for TC8PSK
Transport Layer	MPEG-2 systems
Packet size	188 bytes

Note que a taxa de símbolos é fixa em 28,86Msymb/s, o que necessita de 34,5MHz de banda no satélite, ou seja, um *transponder* inteiro.

O ISDB-S é formado por três componentes: o *transport stream* MPEG-2, o canal de controle TMCC (*Transmission and Multiplexing Configuration Control*) e o *Burst*.

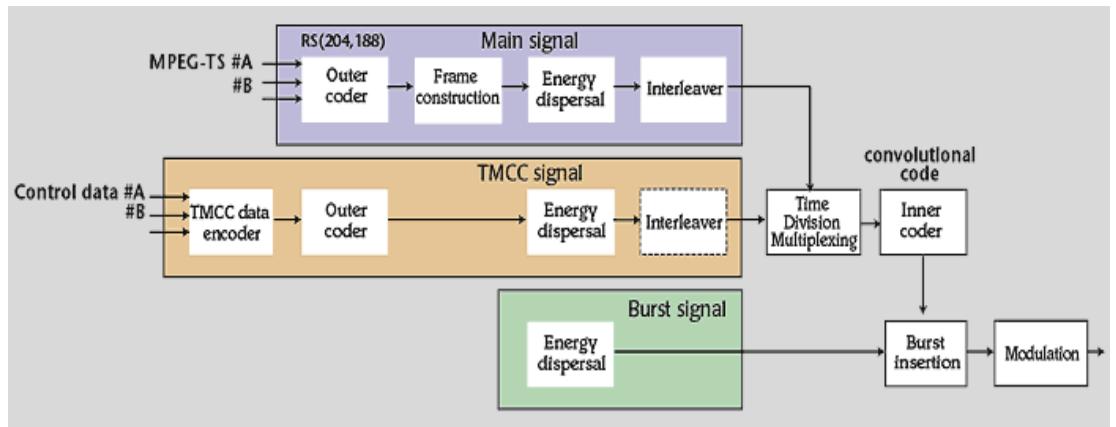


Figura 4.6 – Diagrama ISDB-S

Um dos principais recursos do ISDB-S é a capacidade de utilizar mais de uma modulação para o mesmo sinal. Para que isto seja possível, é necessária a formação de uma estrutura de quadros no canal principal (TS MPEG-2) da seguinte forma: Pacotes

de 204 bytes são alocados em *slots* dentro de um frame de dados (*data frame*) e cada frame é formado por 48 *slots* conforme mostrado na Figura 4.7.

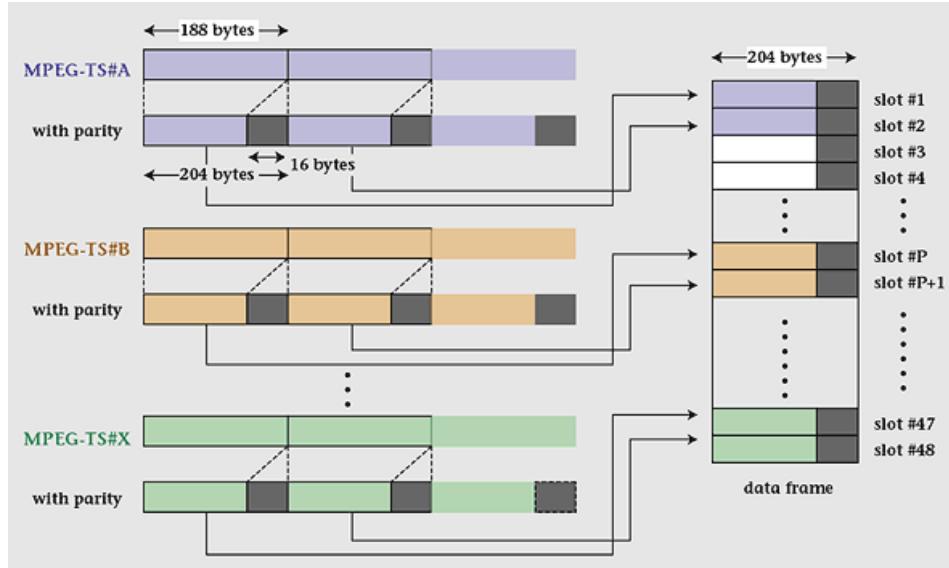


Figura 4.7 – Slots ISDB-S

Cada *slot* pode ser modulado independentemente e até quatro diferentes configurações de modulação podem ser utilizadas dentro de um mesmo frame.

Este tipo de flexibilidade é um problema para o *Interleaving*, portanto para resolver esta questão, foi criada uma estrutura chamada Super-Frame. O *Interleaving* ocorre somente dentro de cada Super-Frame que é composto por oito frames configurados identicamente conforme ilustrado na Figura 4.8.

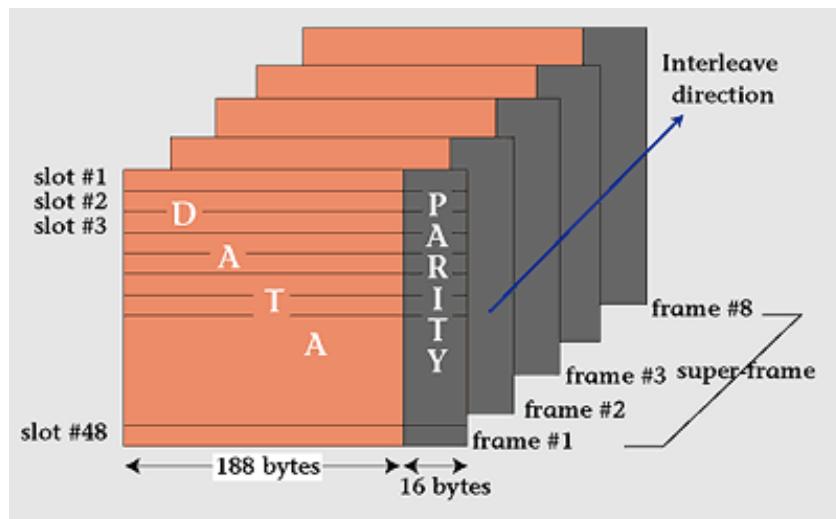


Figura 4.8 – Interleaving ISDB-S

Os identificadores do *transport stream* (MPEG-2 TS ID) e as informações de modulação de cada *slot* são transmitidos pelo TMCC. Ele é formado por 384 bits e faz com que o receptor entenda a forma que cada *frame* e que cada *Super-frame* está configurado e sincronizado. Devido à sua importância para demodulação do sinal principal, o TMCC é transmitido em BPSK com codificação Reed-Solomon 1/2, isso faz com que o receptor seja capaz de ler sua informação mesmo com relação sinal-ruído de 0dB.

Com o objetivo de dar maior robustez ao sistema ISDB-S, foi inserido um sinal de *burst* modulado BPSK para que o receptor recupere a portadora mesmo com sinais ruidosos.

Um diagrama ilustrando a linha de transmissão de um sistema ISDB-S pode ser encontrado na Figura 4.9.

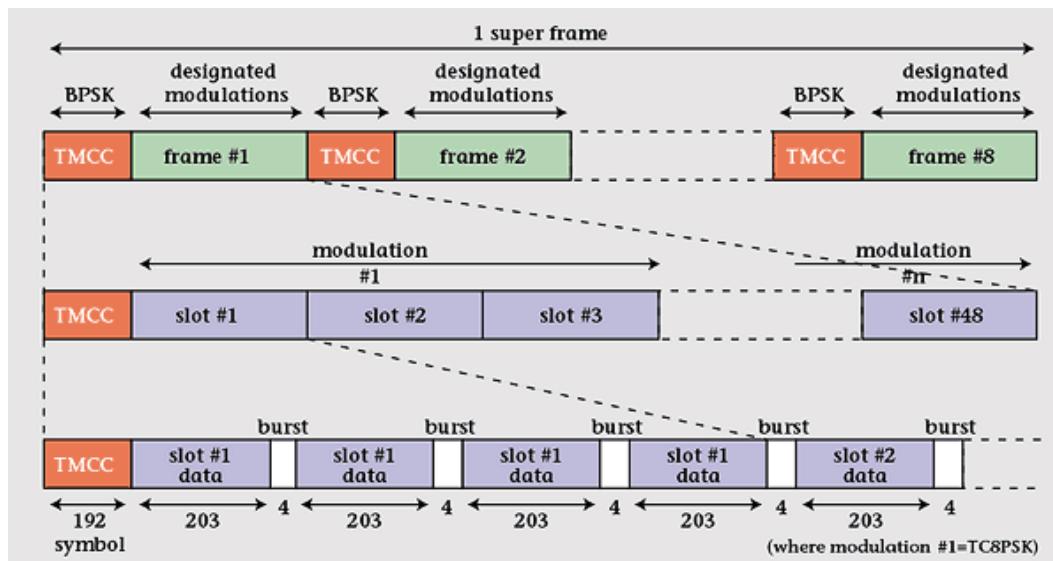


Figura 4.9 – Estrutura ISDB-S

Outra dificuldade causada pelo recurso de utilizar mais de um tipo de modulação está no tempo de bits dentro de um frame (48 *slots*). Por exemplo, o tempo de transmissão gasto na modulação QPSK é o dobro do tempo gasto na modulação TC8PSK. Para manter este tempo sempre constante, *slots dummy* são inseridos nos frames caso constelações que não sejam TC8PSK sejam utilizadas conforme ilustrado na Figura 4.10:

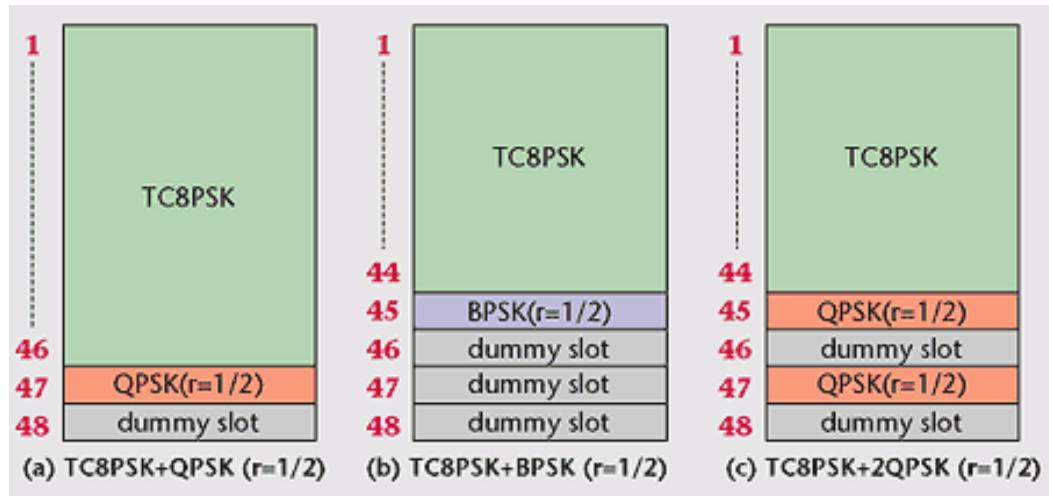


Figura 4.10 – Slots Dummy ISDB-S

A taxa total de transmissão de um sistema ISDB-S caso uma única modulação seja aplicada é dada pela seguinte equação:

$$TB = SR \times SE \times CR \times \frac{188}{208}$$

Onde:

SR=Symbol Rate \Rightarrow 28,86

SE=Eficiência de Espectro (3 para TC8PSK, 2 para QPSK e 1 para BPSK)

CR=Taxa de FEC

Quando mais de uma modulação é aplicada, a taxa total de transmissão é dada por:

$$CTB = \sum_i TB_i \times \frac{N_i}{48} \text{ and } \sum_i N_i = 48$$

Onde:

TB_i =Bits transmissíveis para cada modulação conforme equação anterior

N_i =Número de *slots* para cada modulação Os valores de N_i seguem na Tabela 4.7 a fim de manter o tempo de duração constante.

Tabela 4.7 – Valores N_i

TC- 8PSK	QPSK					BPSK
	$r=7/8$	$r=5/6$	$r=3/4$	$r=2/3$	$r=1/2$	
N $n \leq 48$	$8n$ $n \leq 6$	$6n$ $n \leq 8$	$4n$ $n \leq 12$	$3n$ $n \leq 16$	$2n$ $n \leq 24$	$4n$ $n \leq 12$

Ressalta-se aqui que o ISDB-S não é um sistema bastante utilizado principalmente devido à sua taxa de símbolos constante. O fato de ser utilizado somente no Japão também faz com que os equipamentos sejam mais onerosos que equipamentos DVB-S ou DVB-S2.

Capítulo 5

Estudo de Casos

5.1 – Aplicações para Distribuição

Os sistemas de *uplink* de distribuição são de grande importância para o provedor por serem extremamente rentáveis. Por isso, seus projetos têm bastante ênfase à robustez do sistema (através de equipamentos redundantes e automáticos) e ao acesso condicional (criptografia e controle dos receptores).

Os dois exemplos abaixo são sistemas instalados em uma grande operadora de TV por assinatura (DTH). Os sistemas para DTH utilizam uma tecnologia chamada Multiplexador Estatístico, ou seja, a taxa de vídeo de cada serviço varia conforme sua complexidade. Isto faz com que bits que seriam destinados para conteúdos sem necessidade sejam alocados para conteúdos mais desafiadores.

Outra característica do DTH é a alta freqüência (Banda-Ku – faixa de 12GHz a 18GHz) utilizada para transmissão do seu sinal. A Banda-Ku possui a chuva como sua maior adversária, porém ela se faz necessária para este tipo de aplicação já que possibilita a utilização de antenas de recepção bem menores que as utilizadas em Banda-C.

O primeiro exemplo é um sistema SDTV com a seguinte configuração, conforme Figura 5.1:

- 18+2 Codificadores
- Taxa de bits total de 41Mb/s
- Modulação DVB-S QPSK
- FEC 3/4
- Taxa de símbolos de 30MSymb/s
- Banda-Ku
- Sistema de gerência
- Sistema de acesso condicional

Note que a interligação entre os codificadores e os multiplexadores é através de interfaces ASI. Estas interfaces são *streams* de 270Mb/s (incluindo bits de preenchimento) que carregam os sinais de áudio e vídeo comprimidos.

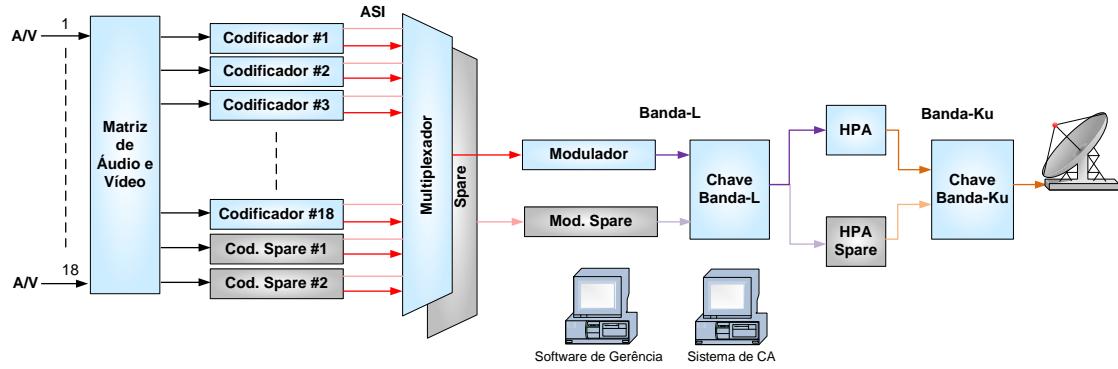


Figura 5.1 – Sistema 18+2 em ASI

O segundo é um sistema HDTV com a seguinte configuração, conforme Figura 5.2:

- 7+1 Codificadores
- Taxa de bits total de 52Mb/s
- Modulação DVB-S2 8PSK
- FEC 3/5
- Taxa de símbolos de 30Msymb/s
- Banda-Ku
- Sistema de gerência
- Sistema de acesso condicional

Note que a interligação entre os codificadores e os multiplexadores é através de interfaces Ethernet. Estas interfaces são os *streams* ASI encapsulados em IP. A grande vantagem desta tecnologia está na simplicidade de sua instalação e em sua versatilidade, pois a tendência atual é a convergência para IP.

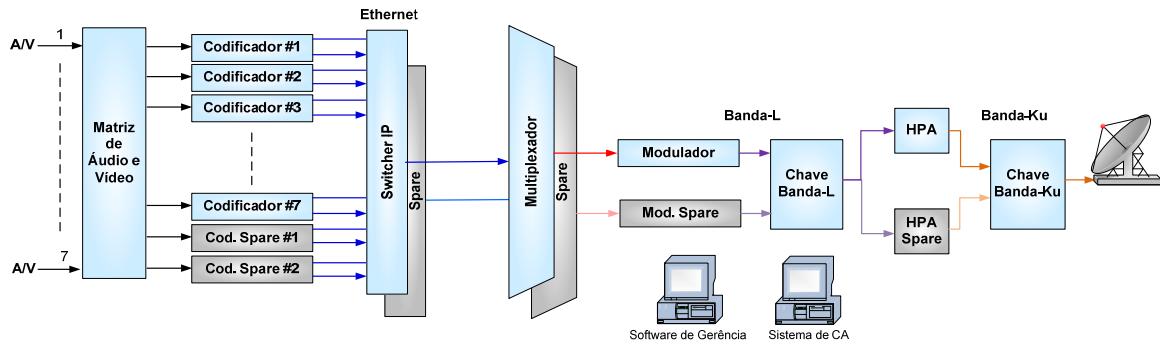


Figura 5.2 – Sistema 7+1 em IP

O exemplo a seguir é um sistema de distribuição de uma das maiores emissoras do país. Ele está configurado da seguinte forma, conforme Figura 5.3:

- 3+1 Codificadores SDTV
- 1+1 Codificadores HDTV
- Taxa de bits total de 52Mb/s
- Modulação DVB-S2 8PSK
- FEC 3/4
- Taxa de símbolos de 30MSymb/s
- Banda-C
- Sistema de gerência
- Sistema de acesso condicional

Ao contrário do DTH, o sistema de distribuição de uma emissora de TV não possui tantos serviços, logo a tecnologia de Multiplexador Estatístico não é aplicada. Cada serviço é configurado com uma taxa fixa de bits para o vídeo.

Note que a interligação entre os codificadores e os multiplexadores é através de interfaces ASI, já que o IP ainda não é uma tecnologia de total confiança no mercado de radiodifusão.

Note também que não há problemas em mesclar sinais SDTV e HDTV em um mesmo sistema.

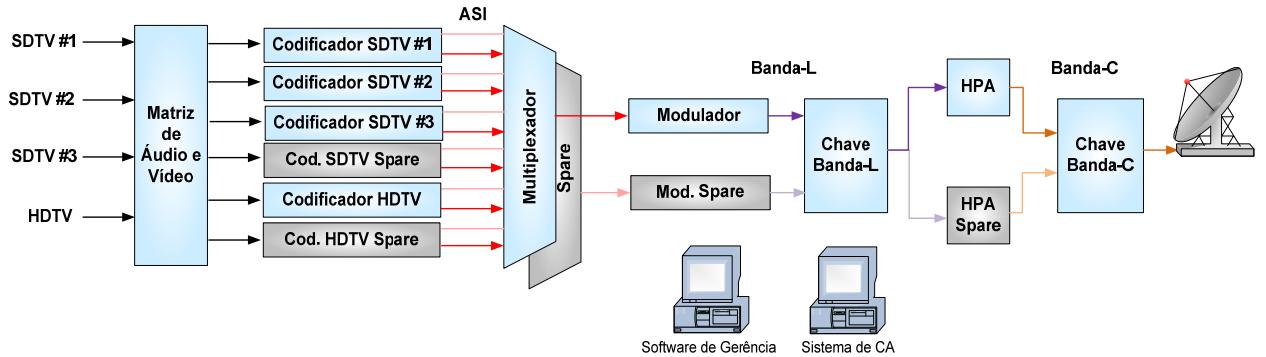


Figura 5.3 – Sistema SDTV + HDTV

5.2 – Aplicações para Contribuição

As aplicações para contribuição são geralmente bem simples já que não estão em operação cem por cento do tempo.

Chamamos de contribuição os sistemas utilizados para transmissão de um evento, de uma matéria jornalística, de sinais entre emissoras, etc.

Seguem dois exemplos conforme mostrado nas Figuras 5.4 e 5.5, um com redundância e outro sem. Usualmente a redundância é aplicada para transmissões ao vivo como partidas de futebol, shows de música e outros.

Note que sistemas de gerência e acesso condicional não são utilizados. Quando a criptografia se faz necessária, os modos BISS e RAS são os mais comuns e são funcionalidades embutidas nos codificadores.

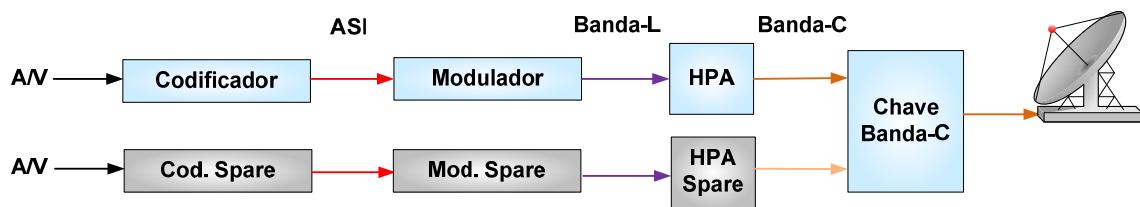


Figura 5.4 – Sistema de Contribuição com Redundância

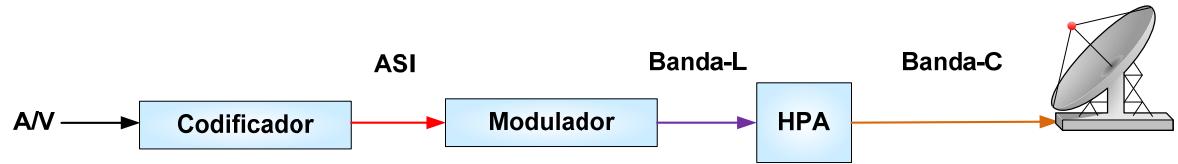


Figura 5.5 – Sistema de Contribuição sem Redundância

Capítulo 6

Conclusão

Acredita-se que este trabalho cumpriu sua meta, apresentando de forma clara, objetiva e prática as principais tecnologias utilizadas para uma transmissão de vídeo via satélite.

Notou-se que algoritmo H.264/AVC proporciona uma redução significativa na taxa de bits comparada ao MPEG-2. As ferramentas desenvolvidas e aperfeiçoadas fazem do H.264/AVC o código ideal para compressão de vídeo SDTV e HDTV.

A flexibilidade e robustez da modulação DVB-S2 discutidas neste trabalho, caracterizam este sistema como o mais eficiente comparado ao DVB-S e ao ISDB-S também apresentados aqui.

É correto afirmar que uma novidade tecnológica só é alavancada caso exista para ela uma determinada demanda, e isto ocorreu tanto com o H.264/AVC quanto com o DVB-S2 com surgimento do HDTV. Acredita-se que não seja arriscado prever que estas tecnologias estarão ultrapassadas daqui alguns anos, pois desde que a engenharia presente dentro de uma emissora de televisão se digitalizou, a velocidade de seu desenvolvimento tem sido impressionante visto que diversos formatos de vídeo superiores ao HDTV já surgiram como o vídeo 3D, o vídeo 3G (1080 linhas progressivas a 3Gb/s) e o vídeo Ultra-HD ainda em fase de estudo.

Como proposta para um trabalho futuro, menciona-se os sistemas de acesso condicional utilizados para criptografia e controle dos serviços transmitidos em um *uplink* e os sistemas adotados para transmissão de vídeo terrestre como o ATSC, DVB-T, DVB-T2 e o ISDB-T, este último adotado por Japão, Brasil e outros países da América Latina como padrão para a TV Digital da radiodifusão.

Bibliografia

- [1] <http://en.wikipedia.org> (Acesso em 18 de Junho de 2010)
- [2] GUY LESTHÉVENT, ALBAN DUVERDIER, *DVB-S2 standard with normal and short frame*, CNES R&D - França – 20 de Outubro de 2003
- [3] ALBERTO MORELLO, VITTORIA MIGNONE, *DVB-S2— ready for lift off*, EBU Technical Review – Outubro 2004
- [4] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE, *Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications*, ETSI EN 302 307 V1.1.1, 2004
- [5] YUNGHSIANG S. HAN, *Decoding BCH/RS Codes*, Graduate Institute of Communication Engineering, National Taipei University, Taiwan - 2005
- [6] MATTHEW C. VALENTI, SHI CHENG, ROHIT IYER SESHADRI, *Digital Video Broadcasting*, West Virginia University, Morgantown, WV - 2007
- [7] www.scopus.net (Acesso em 30 de Abril de 2010)
- [8] DIEGO FELIZ DE SOUZA, *Codificação de Vídeo Via Casamento de Padrões Usando Estimação de Movimento*. Dissertação de Mestrado COPPE -UFRJ, Maio de 2010
- [9] http://www.iptvdictionary.com/iptv_dictionary_MPEG_GOP_definition.html (Acesso em 29 de Abril de 2010)
- [10] DETLEV MARPE, HEIKO SCHWARZ, THOMAZ WIEGAND, *Context-Based Adaptive Binary Arithmetic Coding in the H.264/AVC Video Compression Standard*, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video technology, Vol 13, nº 7, Julho de 2003
- [11] IAIN E. G. RICHARDSON, *H.264 / MPEG-4 Part 10 : Introduction to CABAC*, www.vxcodex.com, (Acesso em 10 de Junho de 2010)
- [12] TARCIANO F. PEGORARO, FÁBIO A. L. GOMES, FÁBIO LUMERTZ, RENATO R. LOPES, FABRÍCIO A. OLIVEIRA, ROBERTO GALLO, MARCELO C. PAIVA, JOSÉ S. G. PANARO, *Codificação LDPC em Sistemas de Televisão Digital*, Revista Telecomunicações INATEL – Julho de 2007
- [13] DIRK BREYNAERT, MAXIMILIEN d'OREYE DE LANTREMANGE, NEWTECH, *Analysis of the bandwidth efficiency of DVB-S2 in a typical data distribution network*, CCBN2005, Beijing, March 21-23 2005

[14] <http://www.nhk.or.jp/strl/publica/bt/en/pa0005.html> (Acesso em 21 de Junho de 2010)

[15] <http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/acessoConteudo.php?nrseqoco=14650>
(Acesso em 15 de Maio de 2010)

Anexo A

Potência em um Enlace

Os componentes básicos de um enlace satélite podem ser apresentados da seguinte forma:

- Subida do sinal pela Estação Terrena;
- Caminho de subida até o satélite;
- Caminho de descida até a Estação Terrena;
- Descida do sinal na Estação Remota

As Figuras A1, A2 e A3 ilustram cada etapa de um sistema de *uplink*:



Figura A1 – Enlace via Satélite

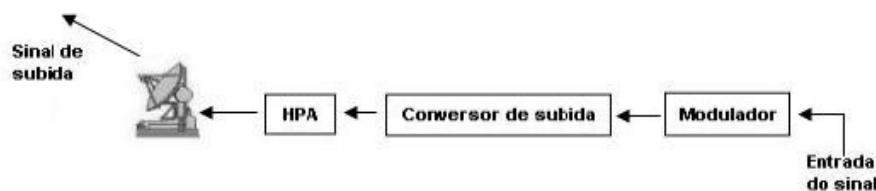


Figura A2 – Uplink

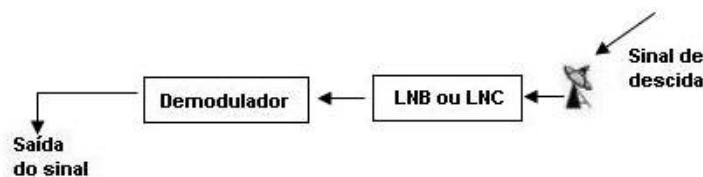


Figura A3 – Downlink

A potência de subida do sinal está diretamente relacionada à potência do amplificador e ao ganho da antena.

No ambiente da radiodifusão, apenas dois tipos de amplificadores são encontrados e se diferenciam pela sua curva de linearidade: os amplificadores a válvula (TWT) e os amplificadores em estado sólido (SSPA). Geralmente os amplificadores TWT necessitam de 3dB de atenuação.

Este capítulo dará enfoque a três parâmetros fundamentais para cálculos dos enlaces via satélite [15]: Densidade de Fluxo de Potência (PFD), Potência Efetiva Isotropicamente Irradiada (EIRP) e Fator de Mérito (G/Te).

Densidade de Fluxo de Potência

É uma grandeza que representa a densidade superficial de potência num determinado ponto, expressa em dB relativo a 1 w/m². Também é bastante utilizada para limitação de interferências geradas por satélites na superfície da Terra. Em satélites que utilizam *transponder* tipo de repetição (“bent pipe”) em que não ocorrem outros processamentos além de ganho de potência, filtragem e conversão de freqüência e aplicáveis tanto para transmissões digitais quanto analógicas, ocorre um processo de saturação de potência. Tal saturação implica que a potência de transmissão do satélite, correspondente ao *transponder* em questão, atinge um valor máximo possível. Ocorre quando a densidade de fluxo de potência na antena receptora devida a todas as portadoras que se destinam ao *transponder* excede o valor de saturação (PFDS). O seu valor é fundamental para o cálculo dos “*back-offs*”, definidos a seguir.

Potência Efetiva Isotropicamente Irradiada

Trata-se de um parâmetro de transmissão aplicado à estação transmissora para o enlace de subida e ao satélite para o enlace de descida, definida por:

$$EIRP(dBw) = P_T(dBw) + G_T(dBi) - A_{L/T}$$

Onde:

PT: Potência de transmissão (antes do alimentador)

GT: Ganho da antena transmissora

AL/T: Atenuação do alimentador da antena transmissora

No caso do satélite, a EIRP de saturação (EIRPS) e a PFD de saturação (PFDS) são fornecidas pelo seu fabricante na forma de mapas de cobertura (*footprints*).

Em decorrência do processo de saturação de um transponder de repetição, foi definido o parâmetro *back-off* de entrada (BOi) de acordo com:

$$BOi \text{ (dB)} = PFDS \text{ (dB w/m}^2\text{)} - PFD_{total} \text{ (dB w/m}^2\text{)}$$

Onde PFD_{total} é a densidade de fluxo de potência agregada das portadoras que se destinam ao *transponder*. Associado ao BOi define-se como *backoff* de saída a seguinte diferença:

$$BOo \text{ (dB)} = EIRPS \text{ (dBw)} - EIRP \text{ (dBw)}$$

Dependendo da característica entrada versus saída do amplificador de alta potência do *transponder*, há uma relação entre BOo e BOi e que tem sido modelada com o seguinte tipo de função:

$$BO_o = aBO_i + b$$

Onde a e b são constantes do **transponder**.

Um modelo proposto é:

$$BO_o = 0,82BO_i - 3,7; \quad BO_i \geq 4,5 \text{ dB}$$

$$BO_o = 0; \quad BO_i < 4,5 \text{ dB}$$

A EIRP com que o satélite transmite determinada portadora no enlace de descida pode ser calculada a partir de sua densidade de potência no satélite (PFDc), do BOi e da PFDS de acordo com:

$$EIRP_c = EIRPS - (PFDS + (1 - a)BO_i + b + PFD_c)$$

O PFDc pode ser avaliada através da fórmula:

$$PFD_c = EIRP_{tx} \text{ (dBw)} - A_0 - A_g - A_{ch} - A_n + 20 \log f_s \text{ (GHz)} + 21,45$$

Onde:

EIRP_{tx}: EIRP da estação terrena transmissora para a portadora de subida

A₀: Atenuação de espaço livre

$$A_0 = 20 \log d_s \text{ (Km)} + 20 \log f_s \text{ (GHz)} + 92,4 \text{ dB}$$

d_s: distância estação transmissora > satélite

f_s: freqüência de subida

Fator de Mérito (G/Te)

Trata-se de um parâmetro de recepção aplicável ao satélite para o enlace de subida e à estação receptora para o enlace de descida, definido por:

$$G/T_e (dB / K) = G_R (dB_i) - 10 \log(T_e (K)) - A_{L/R}$$

Onde:

GR: Ganho da antena receptora (dB_i)

Te: Temperatura efetiva de ruído do sistema de recepção, em graus Kelvin

AL/R: Atenuação do alimentador da antena receptora (dB)

No caso do satélite este parâmetro também é fornecido pelo seu fabricante através dos mapas de cobertura.

Fatores de Atenuação

Gostaria de ressaltar três fatores que influenciam na atenuação da subida e descida do sinal de um enlace via satélite. São eles:

- Atenuação causada pelo espaço livre
- Atenuação causada pela chuva
- Atenuação causada por irradiação solar

Uma vez emitido por meio da antena de transmissão, o sinal inicia sua caminhada através da atmosfera e o espaço. Até sua chegada ao satélite, normalmente posicionado a 36.000km de distância da superfície terrestre em uma órbita geoestacionária, dependendo é claro da localização da estação transmissora (se logo abaixo da linha do satélite ou em um extremo de cobertura do mesmo) a onda propagada sofrerá diversas intempéries. A primeira delas é a que estará presente em qualquer condição de propagação, que é a chamada “perda de espaço livre”. A mesma diz respeito à perda associada inversamente ao quadrado da distância percorrida por uma onda eletromagnética em um meio como o espaço livre e diretamente à sua frequência de operação.

Este valor é encontrado a partir da seguinte fórmula:

$$A_0 = 92,44 + 20 \log D (\text{km}) + 20 \log f (\text{GHz})$$

Além desta perda, existem outras que estarão presentes neste tipo de meio como a perda atmosférica. Esta é proveniente das características de composição do meio atmosférico, ou ar. Sabe-se de antemão que o ar é composto por gases diversos, névoa, poluição, vapor d'água e chuva. Estes componentes atenuam o sinal que por eles atravessa, absorvendo sua energia.

Para freqüências acima de 10GHz são significantes as perdas relacionadas à atenuação por chuvas e à absorção por oxigênio e vapor d'água, pois o comprimento de onda para estas freqüências passa a ser tão pequeno quanto o tamanho das partículas destes gases e passam portanto, a absorver energia. Os sistemas e comunicação via satélite que operam com freqüências na faixa compreendida pela banda Ku, Ka e outras mais altas, consideram estes efeitos em seus cálculos de enlace. A Figura A4 mostra a atenuação específica (dB/Km) associada a estas perdas. A curva que representa o nevoeiro considera uma concentração de 0,1g/m³. Também é apresentada a absorção por gases (oxigênio e vapor d'água).

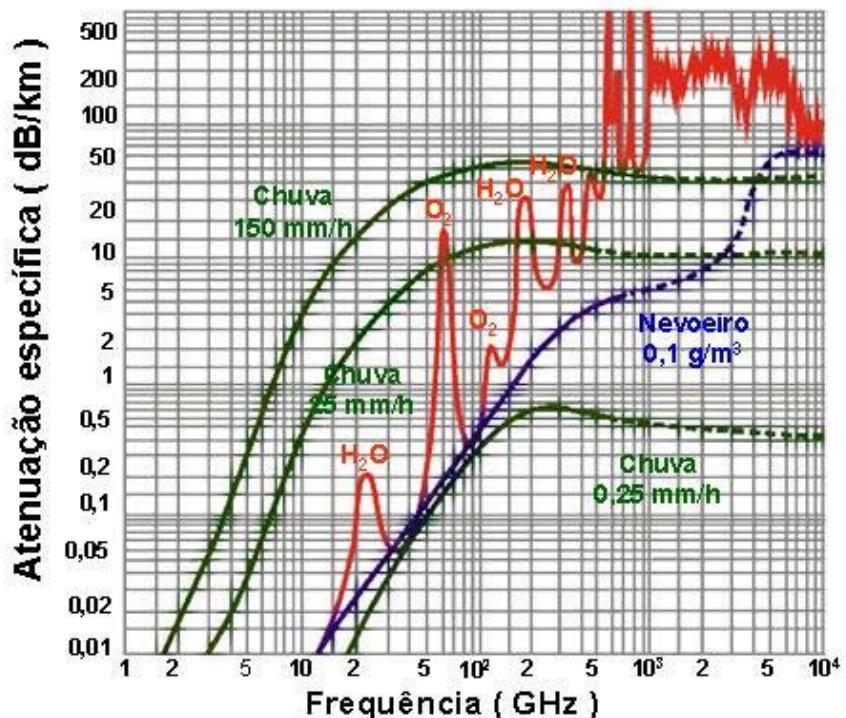


Figura A4 – Atenuação no Espaço

Os efeitos provocados pelas chuvas são ainda mais graves como pode ser visto no mesmo gráfico. Em comparação com a atenuação provocada pelos gases, em dB elas podem ser até 1.000 vezes mais agressivas, dependendo é claro de sua intensidade. A figura acima mostra três níveis de curva representando o efeito das chuvas, para

precipitações de 0,25mm/h, 25mm/h e 150mm/h. Porém, o regime de chuvas varia de região para região em torno do planeta e também, obviamente com a época do ano. Para que seja possível realizar um estudo de enlace em uma determinada localidade, é muito importante conhecer o seu regime de chuvas. Diversos modelos são encontrados na literatura e nos órgãos de telecomunicações como a UIT, mas estes são baseados em informações bastante genéricas que por muitas vezes não refletem a verdadeira realidade. Não é objeto deste trabalho realizar um estudo destes modelos, mas sim contribuir com informações que possam auxiliar na obtenção de resultados o mais próximos da realidade.

Quem mais sofre com o fator chuva são as operadoras de DTH. Quando ela se concentra no local de transmissão do sinal, é possível compensar aumentando sua potência de subida, porém quando a chuva ocorre no local do cliente, nada se pode fazer.

Outro fator prejudicial às transmissões via satélite são as interferências solares. Elas não causam atenuação somente como interrupção do sinal transmitido. Infelizmente não há como evitá-las ou compensá-las. Hoje é possível apenas prevê-las.