

Projeto, Simulação e Implementação de um Sistema de Televisão Digital

Luciano L. Mendes, José M. C. Brito, Fabbryccio A. Cardoso, Carlos A. F. Rocha e Dalton S. Arantes

Abstract—In the year 2005, the Brazilian government supported many research Consortia in order to develop an advanced Digital Television System employing the most recent technologies for multimedia broadcasting. One of the proposals for the physical layer of this system was entitled Innovative Modulation for the Brazilian Digital TV System (MI-SBTVD). The MI-SBTVD Project has been based on Japanese DTV standard, denominated ISDB-T (Integrated Services of Digital Broadcasting - Terrestrial), but it also includes high performance error correcting codes and transmit spatial diversity. The aim of this paper is to present an overview of this Innovative Modulation System. The building blocks of the system, its characteristics and most relevant innovations are presented. The performance of the whole system under different channels is compared with the performance of the available Digital Television standards.

Index Terms—Digital Television, Channel Coding, OFDM Modulation, Spatial Diversity.

Resumo—Durante 2005, o Governo Brasileiro financiou diversos consórcios de pesquisa com o objetivo de desenvolver um Sistema de Televisão Digital inovador, que empregasse as inovações tecnológicas para radiodifusão de sinais multimídia. Uma das propostas para a camada física deste sistema foi denominada de Modulação Inovadora para o Sistema Brasileiro de Televisão Digital (MI-SBTVD). O projeto MI-SBTVD baseou-se no sistema japonês de TV Digital, denominado de ISDB-T (Integrated Services of Digital Broadcasting - Terrestrial), incluindo melhorias como códigos corretores de erro de alto desempenho e diversidade espaço-temporal na transmissão. O objetivo deste artigo é apresentar uma visão geral deste sistema de modulação inovador. Os diagramas de blocos do sistema, suas principais características e suas mais importantes inovações são apresentadas, juntamente com uma comparação de desempenho com os demais padrões de TV Digital.

Palavras chave—Televisão Digital, Codificação de Canal, Modulação OFDM, Diversidade Espacial, SBTVD.

I. INTRODUÇÃO

Os padrões de Televisão Digital disponíveis comercialmente foram concebidos com tecnologias desenvolvidas nos anos 60, 70 e 80. Desde então, diversas contribuições importantes para as comunicações digitais foram propostas para as novas gerações de sistemas de comunicação sem fio. A aplicação destas novas técnicas aos padrões atuais de TV Digital possibilita a concepção de um novo sistema, com maior capacidade

e maior robustez que os anteriores. Os pontos-chaves para se obter este sistema mais eficiente são a utilização de codificação de canal avançada, de modulação com diversidade espacial na transmissão e de técnicas de compressão de vídeo mais eficazes.

Este artigo apresenta uma proposta de um sistema de codificação de canal e modulação para um novo padrão de Televisão Digital com as inovações tecnológicas mais relevantes que foram empregadas na implementação deste sistema. O sistema é flexível e as diferentes configurações possíveis viabilizam a recepção com antena interna ou externa, além da recepção móvel. As inovações residem principalmente na utilização do código LDPC (*Low Density Parity Check*) e de codificação Espaço-Temporal (STC - *Space Time Code*), que viabiliza a diversidade de transmissão.

As principais premissas que guiaram o desenvolvimento do MI-SBTVD foram:

- O SBTVD deve apresentar características que viabilizem e facilitem a integração de novos serviços para a televisão, tais como e-mail e outros serviços digitais, com o objetivo de eliminar a exclusão digital.
- O sistema deve apresentar alta capacidade de transmissão de dados, permitindo a transmissão em HDTV (*High Definition Television* - Televisão em Alta Definição) ou múltipla programação em SDTV (*Standard Definition Television* - Televisão em Resolução Padrão).
- O sistema deve viabilizar a recepção em dispositivos móveis, através da transmissão dentro da mesma faixa de 6MHz. Este requisito é importante pois permite que as emissoras de televisão desenvolvam novos serviços.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II apresenta uma breve introdução aos padrões de TV Digital disponíveis comercialmente; a Seção III apresenta as características técnicas do MI-SBTVD; a Seção IV apresenta uma comparação de desempenho entre a proposta apresentada neste artigo com os demais padrões de TV Digital, considerando diferentes canais de comunicação; a Seção V faz algumas considerações com relação aos sistemas de transmissão empregando duas antenas; a Seção VI apresenta uma breve análise mercadológica do cenário da TV Digital, ressaltando a viabilidade econômica do sistema proposto neste artigo. Finalmente, a Seção VII apresenta as conclusões e as considerações finais deste trabalho.

II. OS ATUAIS PADRÕES DE TV DIGITAL

Nesta seção, os três padrões de TV Digital disponíveis comercialmente são apresentados e discutidos. São eles: ATSC

Manuscrito recebido em 16 de outubro de 2006; revisado em 01 de novembro de 2006.

Luciano L. Mendes (luciano@inatel.br) e José M. C. Brito (brito@inatel.br) pertencem ao Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel - Santa Rita do Sapucaí - MG - Brasil - 37540-000. Fabbryccio A. Cardoso (fabbryccio@yahoo.com.br) e Dalton S. Arantes (dalton@decom.fee.unicamp.br) pertencem a Universidade Estadual de Campinas - Unicamp - Campinas, SP. Carlos A. F. Rocha (aurelio@eel.ufsc.br) pertence a Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC - Florianópolis, SC.

(*Advanced Television System Committee*) desenvolvido nos EUA, DVB-T (*Digital Video Broadcasting - Terrestrial*) desenvolvido na Europa e o ISDB-T (*Integrated Serviced of Digital Broadcasting - Terrestrial*), desenvolvido no Japão. As principais características destes padrões são apresentadas nas subseções a seguir.

A. ATSC

O padrão ATSC foi desenvolvido por um grupo de empresas denominado de Grande Aliança. Este padrão foi adotado pelos EUA em 1994. A Tabela I apresenta as principais características deste padrão [1].

TABELA I
PRINCIPAIS PARÂMETROS DO PADRÃO ATSC.

Parâmetro	Valor
Modulação	8-VSB
Código Interno	Convolutacional com taxa 2/3
Código Externo	Reed Solomon (207, 187, 10)
Largura de Faixa	6MHz
Taxa de símbolo total	10,76 símbolos/s
Taxa de bits útil	19,28 Mbits/s

O ATSC não suporta transmissão hierárquica, que consiste na transmissão simultânea de dois ou mais feixes de dados independentes. Os outros dois padrões possuem essa funcionalidade. A relação portadora-ruído necessária para que a recepção apresente uma qualidade de imagem aceitável é de 15dB no canal AWGN. Nenhum outro padrão consegue atingir este desempenho em canal AWGN. Por outro lado, o desempenho do sistema em canais seletivos em frequência dinâmicos é pobre. Além disso, o ATSC não suporta recepção móvel.

B. DVB-T

O DVB-T foi desenvolvido na Europa para atender aos requisitos de todos os países europeus. Logo, flexibilidade foi um dos principais requisitos deste padrão. As principais características deste padrão são apresentadas na Tabela II [2].

TABELA II
PRINCIPAIS PARÂMETROS DO PADRÃO DVB-T.

Parâmetro	Valor
Multiplexação	COFDM (2k e 8k)
Modulação	QPSK, 16-QAM ou 64-QAM
Código Interno	Convolutacional - 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 e 7/8
Código Externo	Reed Solomon (204, 188, 8)
Largura de Faixa	6MHz, 7MHz e 8MHz
Tempo de guarda	1/4, 1/8, 1/16 ou 1/32
Taxa de bits útil (6MHz)	Min: 3,73Mbits/s - Max: 23,7Mbits/s

A principal razão do uso da Multiplexação por Divisão em Frequências Ortogonais Codificada (COFDM - *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é a robustez deste esquema frente aos canais seletivos em frequência. Se o espalhamento temporal máximo do canal for menor do que o tempo de guarda empregado, o sinal recebido não irá sofrer interferência intersimbólica (IIS). A COFDM também é empregada em outros padrões de transmissão de dados a altas

taxas, tal como o Wi-MAX [3] e o Wi-Fi [4]. A robustez aos múltiplos percursos fornecida pela COFDM torna possível o uso do DVB-T em Redes de Frequência Única (SFN - *Single Frequency Network*).

O DVB-T permite a transmissão hierárquica de até dois feixes de dados, que podem ser empregados em diferentes aplicações. Essa flexibilidade oferece a possibilidade de desenvolver novos modelos de negócio para a TV Digital por parte das emissoras. Uma opção consiste em utilizar um feixe de dados para transmitir áudio e vídeo, enquanto o segundo feixe é empregado para transmitir dados vinculados com o vídeo. Essa transmissão simultânea possibilita a interatividade do usuário com a cena, serviço que representa uma demanda considerável. Outra aplicação consiste em utilizar um feixe para transmitir sinais de TV Digital no formato SDTV, enquanto o outro feixe transmite a camada necessária para se obter HDTV. Assim, os usuários que podem receber ambos os feixes podem assistir a programação em HDTV, enquanto os usuários que conseguem receber apenas o feixe contendo a informação no formato SDTV assistem a programação em definição padrão.

O DVB-T também apresenta alguns problemas que merecem ser destacados: o COFDM resulta em uma alta relação entre a potência de pico e a potência média (PAPR - *Peak to Average Power Ratio*). Isto significa que os amplificadores de alta potência devem operar com um *back-off* elevado, para evitar que o sinal seja ceifado. Esse *back-off* reduz a eficiência do amplificador de potência e aumenta o custo total do transmissor. Uma maneira de contornar este problema é utilizar a pré-distorção do sinal para evitar os picos de amplitude do sinal. Outro problema do DVB-T é o seu desempenho não satisfatório para a recepção móvel. Resultados apresentados até o momento indicam que não há uma configuração que viabilize a recepção móvel na presença de espalhamento Doppler elevado.

C. ISDB-T

O ISDB-T foi desenvolvido no Japão e foi adotado por este país em 1999. Este padrão foi baseado no DVB-T, mas algumas funcionalidades foram incluídas, visando principalmente aumentar a robustez do sistema para recepção móvel. A flexibilidade do ISDB-T também foi melhorada devido a um novo conceito de transmissão hierárquica. Neste caso, a largura de faixa de 6MHz foi dividida em 13 segmentos independentes que podem ser agrupados dinamicamente para transmitir até 3 feixes de dados distintos. A Tabela III apresenta os principais parâmetros do ISDB-T [5].

TABELA III
PRINCIPAIS PARÂMETROS DO PADRÃO ISDB-T.

Parâmetro	Valor
Multiplexação	COFDM (2k, 4k e 8k)
Modulação	DQPSK, QPSK, 16-QAM ou 64-QAM
Código Interno	Convolutacional - 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 e 7/8
Código Externo	Reed Solomon (204, 188, 8)
Largura de Faixa	6MHz
Tempo de guarda	1/4, 1/8, 1/16 ou 1/32
Taxa de bits por segmento	Min: 280,8kbits/s - Max: 1,79Mbits/s

III. CARACTERÍSTICAS DO MI-SBTVD

Esta seção apresenta as principais características da codificação de canal e do sistema de modulação proposto para o SBTVD. As principais inovações foram o emprego do código LDPC como código interno e da codificação espaço-temporal para permitir a diversidade de transmissão. Como o LDPC é um código corretor de alta eficiência, é possível obter desempenhos próximos do limite teórico imposto por Shannon [6]. A codificação espaço-temporal foi proposta em 1998 [7] e permite o uso de duas antenas de transmissão e múltiplas antenas de recepção para obter diversidade espaço-temporal. Este esquema é robusto frente ao espalhamento Doppler, o que o torna ideal para aplicações com recepção móvel.

A Figura 1 apresenta o dígrama de blocos do sistema de transmissão, enquanto a Figura 2 apresenta o diagrama de blocos do receptor.

As subseções a seguir apresentam, resumidamente, cada bloco que compõe o MI-SBTVD.

A. Código Externo: RS (204, 188, 8)

A principal função do código externo é eliminar o patamar de erro (*error-floor*) do código interno. Duas abordagens foram inicialmente consideradas. A primeira consistia em implementar um código de bloco Reed Solomon - RS (204, 188, 8) tal como implementado pelo DVB-T e ISDB-T. A segunda abordagem consistia em utilizar um código de bloco BCH, com capacidade de correção suficiente para eliminar o error floor do código interno.

Ambos os códigos, RS e BCH, possuem desempenho suficiente para eliminar o error floor do código interno. O critério de decisão baseou-se na grande facilidade de implementação do codificador e decodificador para o Reed-Solomon.

B. Código Interno: LDPC com taxa variável

O código interno é responsável por fornecer robustez ao sistema frente ao ruído e às interferências presentes no canal de comunicação. Duas propostas foram analisadas. A primeira proposta utilizava o código SPC-TPC (*Single Parity-Check Turbo Product Code*), enquanto a segunda proposta utilizava o código LDPC.

Os critérios de decisão envolveram diversos fatores distintos, como complexidade de implementação, latência, capacidade de correção e *error floor*. Decidiu-se pela adoção do LDPC com base no desempenho atingido em canais AWGN e Rayleigh e também pelo fato do LDPC ser bastante flexível com relação a taxa de codificação e comprimento da palavra código. Além disto, o código LDPC pode permitir que processamentos iterativos sejam implementados no receptor, envolvendo a decodificação de canal em conjunto com os outros processos de modulação. É importante ressaltar que, ao contrário dos códigos turbo, o uso do código LDPC não implica em pagamento de *Royalties*.

O comprimento da palavra código inicialmente especificada para o LDPC, era de 39168 bits, com as seguintes taxas de codificação: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 e 7/8. No entanto, em função da necessidade de se utilizar um entrelaçador entre os

codificadores LDPC e Reed-Solomon, na especificação final optou-se por definir um código com comprimento igual a 9792 bits, mantendo as taxas inicialmente especificadas. Deve-se ressaltar que estudos de simulação indicaram uma pequena perda, entre 0.1 e 0.5 dB, com a mudança do comprimento do código. Os valores de comprimento e taxa foram definidos em função da flexibilidade desejável para o sistema e também para viabilizar a segmentação de banda.

C. Segmentação de Banda: 13 segmentos em até 3 camadas

A versatilidade da segmentação de banda do padrão ISDB-T fez deste esquema um candidato imediato para o MI-SBTVD. Outra opção analisada foi o esquema de hierarquia utilizado pelo DVB-T. No entanto, o fato da segmentação de banda permitir uma maior flexibilidade para as operadoras resultou na decisão por este esquema, com pequenas modificações. A Tabela IV apresenta os principais parâmetros da segmentação de banda adotada.

TABELA IV
PARÂMETROS DA SEGMENTAÇÃO DE BANDA DO MI-SBTVD.

Parâmetro	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Número de segmentos	13	13	13
Portadoras de dados por seg.	96	192	394
Portadoras pilotos por seg.	9	18	36
Portadoras de controle por seg.	1	2	4
Portadoras auxiliares	2	4	8

D. Modulações Digitais: QPSK, 16-QAM e 64-QAM

As modulações digitais incorporadas ao MI-SBTVD são as mesmas empregadas nos padrões DVB-T e ISDB-T. O uso de modulações com diferentes número de bits por símbolo oferece diferentes soluções de compromisso entre robustez às interferências introduzidas pelo canal e vazão de dados. Desta forma, a emissora possui maior controle sobre a relação de compromisso entre estes requisitos.

E. Entrelaçamento

Numa primeira versão do sistema MI-SBTVD, na qual o código LDPC tinha comprimento de 39168 bits, concebeu-se um entrelaçador após a codificação LDPC, objetivando reduzir o efeito da memória do canal e com isso aumentar a imunidade do sistema ao ruído impulsivo. Em princípio não foi previsto nenhum entrelaçador entre o codificador RS (Reed Solomon) e o codificador LDPC, posto que o primeiro foi inserido no sistema com o único objetivo de eliminar o comportamento de saturação da taxa de erro de bit (*error-floor*) do LDPC.

Conforme previsto no Plano de Simulação do MI-SBTVD, uma série de ensaios foi realizada com o intuito de se determinar a profundidade do entrelaçamento de tal forma que a imunidade do sistema ao ruído impulsivo fosse adequada. Com estes ensaios, determinou-se que tal profundidade deveria ser correspondente a, no mínimo, quatro blocos LDPC. Dois tipos de entrelaçadores foram testados, levando a desempenhos similares: o Helicoidal e o do tipo Linha-Coluna (matricial).

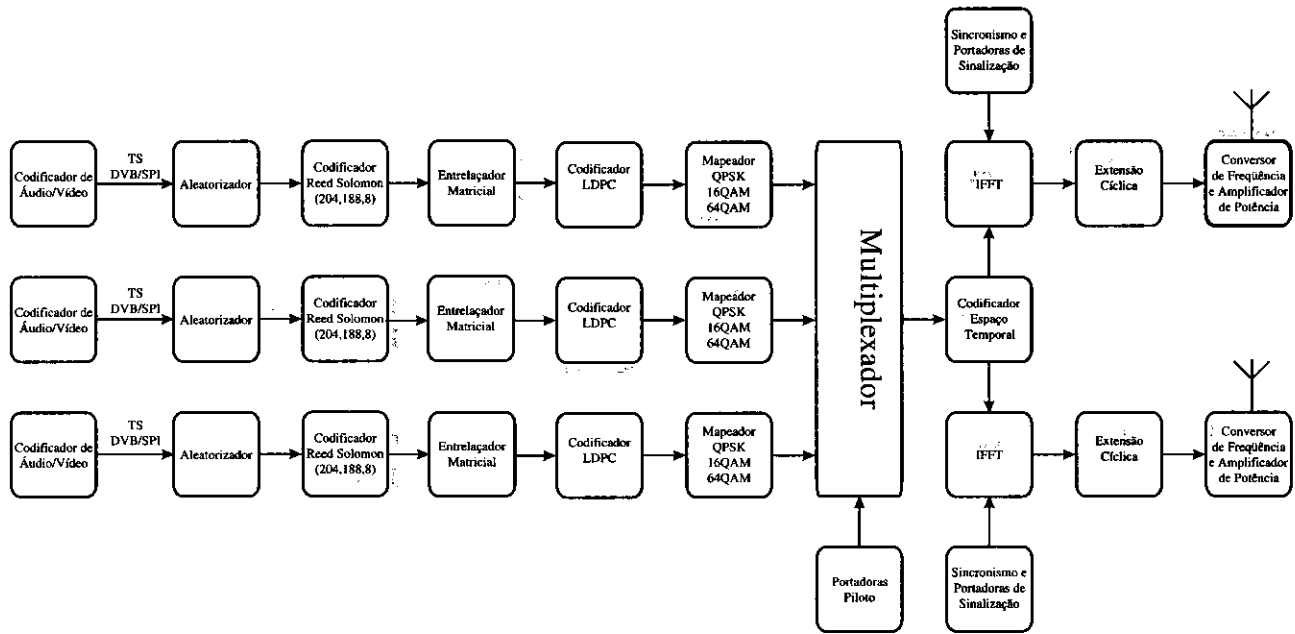


Fig. 1. Diagrama de blocos do sistema de transmissão da Modulação Inovadora do Sistema Brasileiro de Televisão Digital, empregando três camadas para a transmissão hierárquica.

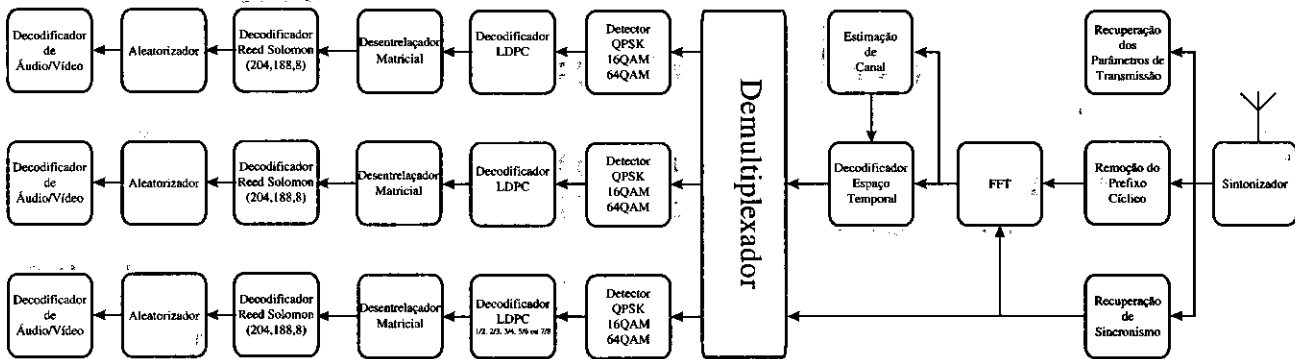


Fig. 2. Diagrama de blocos do sistema de recepção da Modulação Inovadora do Sistema Brasileiro de Televisão Digital, empregando três camadas para a transmissão hierárquica.

Ainda durante a primeira fase de testes do sistema, constatou-se que, de fato, a taxa de erro de bit na saída do decodificador RS era praticamente igual àquela proporcionada pelo decodificador LDPC, inclusive no início do comportamento de patamar de erro do LDPC. A justificativa para este fenômeno é que as estatísticas de erro na saída do decodificador LDPC mostraram que os erros ocorriam de forma bastante dispersa dentro da palavra decodificada, o que fazia com que o decodificador RS tivesse seu desempenho comprometido, dado que sua melhor atuação ocorre quando os erros lhe são apresentados em rajada. Para resolver o problema, ainda mantendo o RS como código componente do sistema, dever-se-ia fazer com que o número médio de bits em erro por bloco RS se mantivesse dentro de sua capacidade de correção (até 8 bytes em erro). Entretanto, para que se conseguisse este intento, o entrelaçador deveria operar com símbolos RS provenientes de várias palavras-código LDPC:

Já havia sido constatado que a profundidade adequada

do entrelaçador, do ponto de vista de imunidade ao ruído impulsivo, deveria ser de quatro blocos LDPC. Entretanto, verificou-se que, com o comprimento original do bloco LDPC, não seria possível realizar o entrelaçamento dentro de cada um dos segmentos de frequência, dentre os treze especificados para o sistema.

Em função do exposto, as seguintes alterações foram realizadas nas especificações do MI-SBTVD:

- Redução no comprimento do bloco LDPC de 39168 bits para 9792 bits, com o intuito de viabilizar a implementação do entrelaçamento dentro de um único segmento de frequência, como já descrito acima.
- Mudança de localização do entrelaçador, que agora se situa entre o codificador RS e o codificador LDPC, permitindo que sejam entrelaçados símbolos RS provenientes de quatro palavras-código LDPC, para modulação QPSK, oito palavras-código LDPC para modulação 16-QAM e doze palavras-código LDPC, para modulação 64-QAM. O

entrelaçador escolhido foi o tipo matricial (linha-coluna).

F. Diversidade de Transmissão: Codificação Espaço-Temporal

O uso da diversidade de transmissão permite que o sistema apresente melhor desempenho em ambientes onde existe mobilidade entre o transmissor e o receptor, ou quando existir mobilidade nos obstáculos que refletem ou refratam o sinal transmitido. Este mesmo ganho também pode ser obtido utilizando diversidade de recepção. No entanto, em sistemas de radiodifusão é mais interessante onerar o transmissor em vez de onerar os receptores.

No âmbito do MI-SBTVD, duas técnicas foram consideradas: a técnica proposta por S. Alamouti, denominada de STBC (*Space Time Block Code*) e a técnica RSM (*Random Signal Mapping*). Ambas as técnicas possuem desempenho semelhante em canais planos com distribuição Rayleigh, quando se utiliza apenas uma portadora e a estimação do canal é perfeita. No caso de estimação imperfeita do canal, a técnica RSM apresenta um desempenho superior a técnica de Alamouti. No entanto, o RSM ainda não foi suficientemente explorado e seu desempenho combinado com o OFDM ainda não é conhecido.

Em função do curto prazo de execução do projeto, decidiu-se por empregar o STBC proposto por S. Alamouti, uma vez que a combinação desta técnica de diversidade de transmissão com o OFDM foi bastante explorada e os resultados são conhecidos.

G. Estimação de Canal: Portadoras Pilotos

A estimação de canal possui duas funções principais. A primeira é estimar a resposta em frequência do canal para que o esquema de combinação do receptor possa resultar na diversidade desejada. A segunda é estimar a potência do ruído presente no receptor, pois esta informação é importante para o algoritmo de decodificação de canal.

Dois técnicas foram analisadas neste projeto. A primeira consiste em transmitir símbolos pilotos para estimação do canal. Esta técnica apresenta maior resolução no domínio da frequência, mas é necessário que o tempo de coerência do canal seja elevado para que a vazão do sistema não seja prejudicada. No caso de TV Digital, o canal de comunicação pode apresentar um tempo de coerência de alguns milissegundos, ou seja, o tempo de coerência pode ser da ordem de grandeza de alguns símbolos OFDM, dependendo do modo de transmissão. Isto inviabiliza o uso de símbolos piloto para estimação de canal.

A segunda técnica estudada consiste em utilizar portadoras pilotos em todos os símbolos OFDM transmitidos. Estas portadoras pilotos sofrem a codificação proposta por S. Alamouti e, como o receptor conhece o valor da amplitude, fase e frequência destas portadoras, torna-se possível estimar a atenuação e a rotação de fase introduzidas em cada portadora. A estimativa da resposta em frequência para as portadoras de dados pode ser obtida através da interpolação das estimativas obtidas nas frequências das portadoras piloto. Obviamente, esta técnica possui uma resolução no domínio da frequência menor do que a técnica apresentada anteriormente. Entretanto,

como as portadoras pilotos são enviadas em todos os símbolos OFDM, a resolução temporal da estimativa torna-se muito maior do que aquela obtida na técnica anterior.

A decisão sobre qual técnica deveria ser adotada pelo MI-SBTVD baseou-se em resultados de simulação, onde as características típicas do canal de comunicação para TV Digital foram consideradas.

Devido ao fato da possível mobilidade dos receptores, decidiu-se pelo uso da técnica de estimação de canal utilizando portadoras piloto em todos os símbolos OFDM. O tempo de coerência da ordem de grandeza do tempo de símbolo OFDM foi o fator principal que motivou esta decisão.

H. OFDM e Codificação Espaço-Temporal

Inicialmente, a técnica de diversidade de transmissão utilizando STBC foi proposta para canais planos. Esta técnica não apresenta o desempenho esperado quando o canal apresenta seletividade em frequência. Uma solução para minimizar este problema é combinar a técnica de diversidade de transmissão com o OFDM.

No âmbito do MI-SBTVD, duas maneiras de integração foram analisadas. A primeira consiste em utilizar uma codificação espaço-frequência associada ao OFDM. Neste caso, a matriz de transmissão proposta por Alamouti é montada utilizando duas portadoras adjacentes em vez de utilizar dois instantes de tempo. Este esquema é denominado de SFC-OFDM (*Space-Frequency Code - OFDM*). A segunda maneira de combinar o código espaço temporal com o OFDM consiste em montar a matriz proposta por Alamouti em dois símbolos OFDM adjacentes. Este esquema recebe o nome de STC-OFDM (*Space Time Code - OFDM*).

No SFC-OFDM é necessário que a resposta em frequência do canal seja a mesma para as duas portadoras adjacentes, sobre as quais montou-se a matriz de transmissão. Desta forma, pode-se concluir que a banda de coerência do canal deve ser maior do que a separação em frequência de duas portadoras adjacentes. Assim, duas portadoras pilotos devem ser transmitidas lado a lado para estimar a resposta em frequência que é válida para ambas. Logo, a resolução em frequência da estimativa do canal neste esquema é duas vezes menor do que a resolução obtida em um sistema OFDM convencional.

No STC-OFDM não há necessidade das portadoras pilotos serem adjacentes. Portanto, a resolução em frequência da estimativa do canal neste esquema é igual a resolução obtida em um esquema OFDM convencional. No entanto, este esquema requer que a resposta do canal se mantenha inalterada por um intervalo de dois símbolos OFDM. Se o tempo de coerência do canal for menor do que a duração de dois símbolos OFDM, então esta técnica não poderá ser empregada.

A decisão sobre qual técnica deve ser adotada foi baseada nas características do canal. Na condição mais adversa, a banda de coerência do canal requer que o espaçamento entre os pares pilotos do esquema SFC-OFDM seja pequeno, o que reduz a vazão do sistema a níveis inaceitáveis. No entanto, nesta mesma condição, o tempo de coerência do canal é da ordem de grandeza da duração de 10 símbolos OFDM. Logo,

o uso do STC-OFDM resultaria no uso da metade do número de pilotos para a mesma resolução no domínio da frequência, sem perda de desempenho. Estas situações foram simuladas, comprovando que o esquema STC-OFDM apresenta melhor desempenho em situações adversas.

Outra vantagem importante do STC-OFDM é que o fato de não haver necessidade de montar a matriz de Alamouti em duas portadoras adjacentes facilita a construção da segmentação de banda da forma proposta.

I. Quadro OFDM

Os dados e os símbolos OFDM devem ser estruturados em quadros para facilitar o processo de sincronização por parte do receptor. Um símbolo OFDM pode ser visto como um quadro de dados e o conjunto de 204 símbolos OFDM pode ser visto como um super-quadro.

O número de portadoras em um símbolo OFDM depende do modo de operação, conforme pode ser visto na Tabela IV. A estrutura do quadro OFDM permite que o receptor conheça a posição das portadoras piloto contínuas das portadoras de controle de sinalização, o que facilita o processo de sincronização. A estrutura de super-quadro permite que o receptor conheça a posição das portadoras piloto espalhadas, que são as portadoras piloto que mudam de posição no espectro, dependendo da sua posição no super-quadro. Além disso, o fato do STC-OFDM ser empregado requer que o receptor conheça quais símbolos OFDM formam um par. A princípio, decidiu-se em numerar os símbolos como 1 ou 2. Se o primeiro símbolo recebido for o número 2, então o receptor sabe que o primeiro símbolo deste par foi perdido e que o próximo símbolo 1 deve ser aguardado. Esta identificação dos símbolos ímpares e pares é feita utilizando uma das portadoras auxiliares especificadas para o sistema.

J. Técnicas de Sincronização

Para o correto funcionamento do demodulador OFDM, a janela da Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*) deve ser posicionada em relação ao bloco de sinal recebido de tal forma que o resultado da convolução do canal com o sinal transmitido seja visto como uma convolução circular. Assim, não há interferência intersimbólica. O não cumprimento desta condição conduz a uma adição sensível de interferência no processo de demodulação, além de causar interferência entre as sub-portadoras, conhecida como ICI (*InterCarrier Interference*), o que acaba por reduzir o desempenho do sistema.

Além disso, é possível que exista um desvio de frequência no processo de demodulação. Tal desvio pode ser gerado por causa de eventuais variações dos osciladores locais no transmissor e no receptor e/ou devido à presença de desvio Doppler. Este desvio de frequência também gera interferência entre as sub-portadoras do sistema OFDM, podendo degradar consideravelmente o desempenho. Desta maneira, operações de sincronismo de símbolo e sincronismo de desvio de frequência devem ser realizadas no receptor para permitir o correto recebimento do sinal.

A técnica adotada na implementação do protótipo do MI-SBTVD para realizar estas operações consiste em utilizar o prefixo cíclico.

É importante ressaltar que o método de sincronismo na recepção não precisa ser normatizado, ou seja, cada fabricante pode adotar a técnica que achar adequada para recuperar estas informações. No entanto, é necessário estudar e implementar uma técnica de sincronismo para provar que a estrutura de quadro proposta neste sistema permite a estimação destes dados.

O Anexo 1 apresenta todos os possíveis parâmetros de configuração do MI-SBTVD.

IV. ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE TV DIGITAL

O desempenho do sistema foi analisado para diferentes modelos de canal, incluindo o canal AWGN e os canais Brazil A-E [8]. Esses canais representam diferentes condições de recepção, como por exemplo, recepção com antena interna e com antena externa.

A Figura 3 apresenta o desempenho do sistema no canal AWGN para diferentes combinações de modulação e taxa de código.

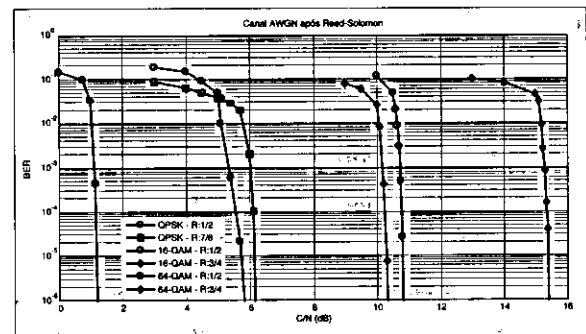


Fig. 3. Desempenho do sistema MI-SBTVD em canal AWGN para diferentes combinações de taxa de código e modulação.

Observando a Figura 3, é possível concluir que o sistema é capaz de operar com relação portadora-ruído igual a 15,4dB para a modulação 64-QAM e taxa de código de 3/4. Nesta configuração, a vazão do sistema é superior a 19Mbits/s, o que é suficiente para suportar HDTV quando utiliza-se MPEG-2. Com a modulação QPSK e taxa de código 1/2 é possível transmitir sinais SDTV com relação portadora ruído igual a apenas 1,3dB. Note ainda que a configuração QPSK com código de taxa 7/8 não é interessante para canais AWGN, uma vez que a modulação 16-QAM com código de taxa 1/2 apresenta maior vazão e melhor desempenho.

A Figura 4 apresenta uma comparação entre o sistema proposto com o padrão ATSC, onde utilizou-se duas soluções implementadas em *chip* para o receptor ATSC.

Note que ambos os sistemas apresentam praticamente o mesmo desempenho. No entanto, os resultados apresentados para o ATSC foram medidos, enquanto que os resultados para o MI-SBTVD foram obtidos através de simulação computacional.

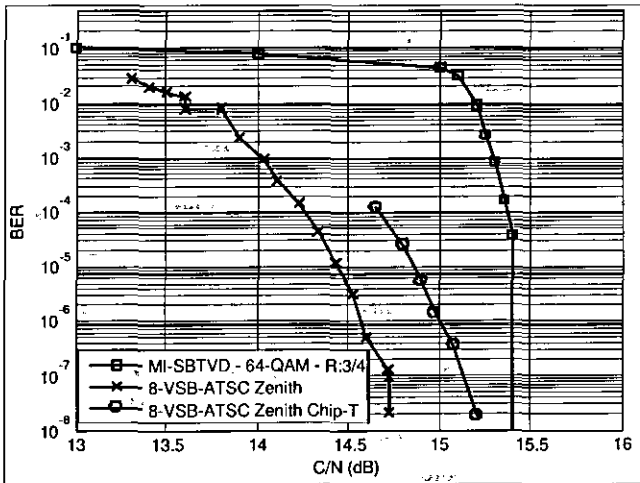


Fig. 4. Comparação entre o MI-SBTVD e o ATSC em canal AWGN.

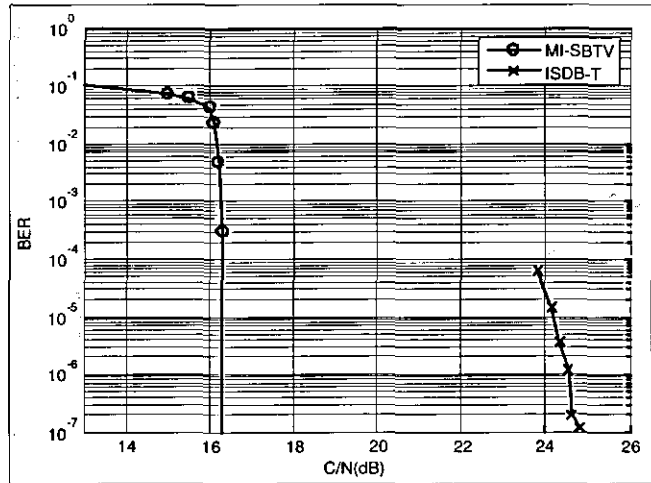


Fig. 6. Comparação entre o MI-SBTVD e o ISDB-T no canal Brazil-B.

A Figura 5 apresenta uma comparação entre o MI-SBTVD e o ISDB-T no canal Brazil-A.

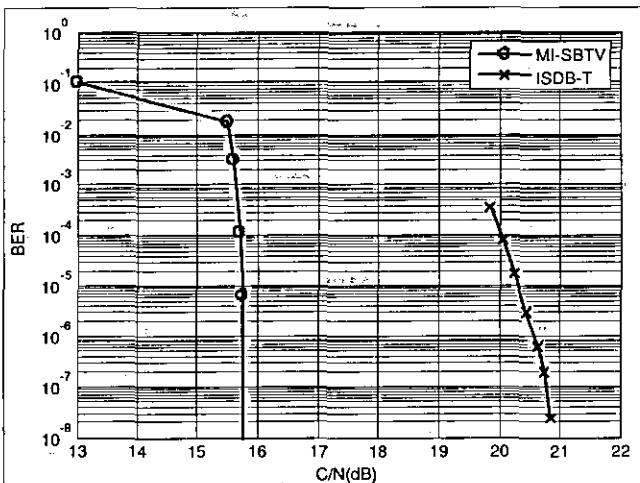


Fig. 5. Comparação entre o MI-SBTVD e o ISDB-T no canal Brazil-A.

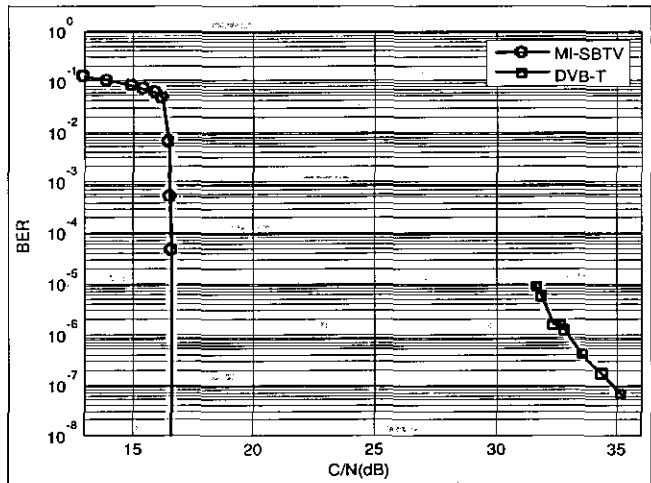


Fig. 7. Comparação entre o MI-SBTVD e o DVB-T no canal Brazil-E.

Observando a Figura 5, é possível concluir que o desempenho do MI-SBTVD é de 4dB a 6dB superior ao desempenho do ISDB-T, dependendo da taxa de erro de bit (BER - *Bit Error Rate*) desejada. Para BER da ordem de 10^{-8} , o MI-SBTVD requer 6dB a menos que o ISDB-T, o significa em uma economia de potência de quatro vezes para a mesma qualidade de vídeo. Esse ganho de desempenho se deve, basicamente, a ação conjunta do código LDPC com o STC-OFDM.

Esse ganho de desempenho fica mais evidente a medida em que as adversidades do canal de comunicação aumentam. Isso pode ser comprovado observando os resultados apresentados nas Figuras 6 e 7, onde o MI-SBTVD é comparado com o ISDB-T no canal Brazil-B e com o DVB-T no canal Brazil-E, respectivamente.

Observando a Figura 6 é possível concluir que o MI-SBTVD apresenta um ganho de aproximadamente 8dB com relação ao ISDB-T no canal Brazil-B. Já a Figura 7 mostra que o MI-

SBTVD apresenta um ganho de até 19dB sobre o DVB-T no canal Brazil-E.

V. CONSIDERAÇÕES SOBRE O SISTEMA DE TRANSMISSÃO.

A proposta apresentada neste projeto prevê o uso de duas antenas de transmissão para se obter a diversidade espaço-temporal. Isso não significa, no entanto, que o sistema necessita de dois transmissores. O diagrama de blocos da Figura 8 mostra a configuração de um transmissor convencional com quatro módulos de potência. Na Figura 9 tem-se o diagrama de blocos de um transmissor com configuração modificada para operação com duas antenas, conforme prevê o MI-SBTVD (RFP-18/2004).

Comparando as Figuras em questão percebe-se que, de fato, não são necessários dois transmissores se são utilizadas duas antenas de transmissão. O que é necessário é que a configuração do transmissor convencional seja modificada para se adequar à diversidade de transmissão proporcionada pelo MI-SBTVD. Desta forma, o transmissor para o MI-SBTVD

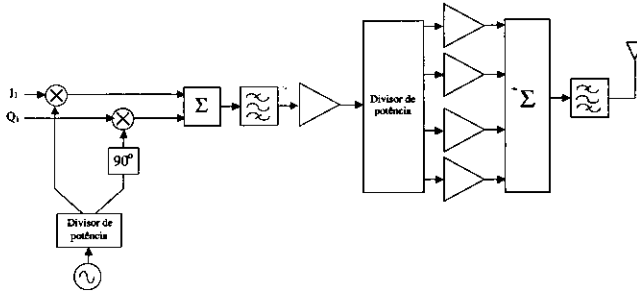


Fig. 8. Diagrama em blocos de um transmissor convencional.

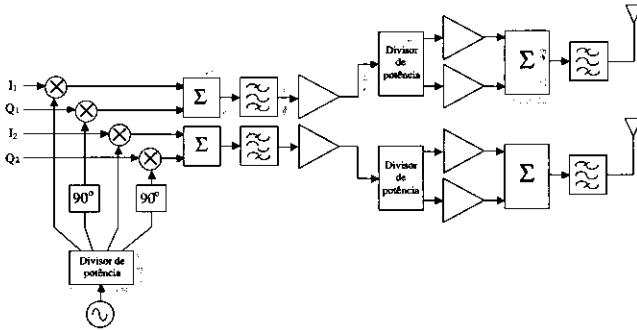


Fig. 9. Diagrama em blocos de um transmissor com duas antenas.

possui as seguintes diferenças em relação a um transmissor convencional:

- Dois estágios de pré-amplificação em vez de um. O impacto desta modificação se refere a um potencial aumento de custo pela duplicação de tais estágios, o que pode ser compensado devido ao fato de que cada um destes estágios, na nova configuração, fornecerá metade da potência em relação a configuração convencional.
- Rearranjo dos módulos de potência. Para uma mesma potência de transmissão em relação ao caso convencional, o número de módulos de potência não se altera. Entretanto, tais módulos são agrupados de maneira distinta da convencional, a fim de alimentar duas antenas.
- Duplicação dos combinadores de potência. Suponha que no transmissor convencional tem-se apenas um combinador com um número de entradas igual ao número de módulos de potência. Neste caso, o transmissor do MI-SBTVD terá dois combinadores, cada um com um número de entradas igual a metade do número de entradas do combinador do transmissor convencional. Isto pode representar um aumento de custo deste estágio.
- Duplicação dos filtros de saída em RF. Observando as Figuras 1 e 2, percebe-se nitidamente que, no transmissor do MI-SBTVD, há necessidade de um filtro de saída para cada antena transmissora. O impacto dessa modificação se situa num potencial aumento de custo deste estágio do transmissor. É importante ressaltar que, na configuração do MI-SBTVD, cada filtro de saída operará com metade da potência em relação ao transmissor convencional.
- Duplicação do sistema irradiante. Tendo duas antenas de transmissão, o MI-SBTVD necessita de duplicação

das antenas e do cabeamento associado. Ressalta-se que, por operar com metade da potência de transmissão em relação à configuração convencional, o custo do sistema irradiante (cabos mais antenas) não necessariamente será duplicado. Operando-se na parte alta de VHF ou na faixa de UHF, a separação entre as antenas de transmissão pode ser tal que ambas as antenas estejam situadas na mesma torre, disposta horizontal ou verticalmente. A separação recomendada, objetivando maximizar o desempenho da diversidade de transmissão, depende do ambiente de propagação. Quanto mais rico em obstáculos ao redor do receptor, menor poderá ser essa separação.

Os possíveis pequenos incrementos de custo identificados nos itens acima são, de longe, compensados pela possibilidade de diminuição da potência de transmissão em função do desempenho do sistema proposto, quando comparado com os padrões existentes. Ressalta-se que a diminuição do custo não é devida apenas ao custo de aquisição do equipamento, mas também ao custo de energia elétrica economizada ao longo do tempo de vida útil do mesmo.

Vale lembrar que não há nenhum impedimento técnico em se instalar o transmissor do MI-SBTVD para operação com apenas uma antena de transmissão. Basta empregar o transmissor numa configuração correspondente a convencional. Neste caso deixar-se-á de obter o ganho de diversidade proporcionado pelo uso de duas antenas.

Ressalta-se ainda que o uso da diversidade de transmissão do MI-SBTVD não oferece nenhuma restrição à implementação de redes de frequência única (SFN).

VI. ANÁLISE MERCADOLÓGICA

A primeira visão sobre a análise do mercado se refere à grande novidade tecnológica e social que a televisão digital deverá provocar nas radiodifusoras e nos telespectadores. Uma pesquisa apontou que o Brasil possui perto de 45 milhões de domicílios. Destes, aproximadamente 85% contam com pelo menos um televisor. Esses dados permitem vislumbrar um universo de 38 milhões de lares com pelo menos um aparelho de televisão. É um mercado que não pode ser desprezado e deve se expandir pelos diferenciais que o padrão digital proporcionará. No mínimo, perto de 50 milhões de unidades deverão ser comercializadas. Se for considerado um período de 10 anos para a substituição do sistema analógico para o digital, significará uma produção de 5 milhões de unidades por ano. Considerando um valor médio de 500 reais por unidade, isto representará um mercado de 2,5 bilhões de reais. Em 2004 foram vendidos no Brasil 3 milhões de unidade de DVD. Esse fato mostra que o consumidor brasileiro também está interessado na melhor qualidade de vídeo e áudio proporcionada pela tecnologia digital.

Dos diversos componentes de uma estação transmissora de TV digital, o transmissor de potência é o que possui o maior custo individual. Os resultados de desempenho obtidos para o sistema aqui proposto indicam a possibilidade de redução significativa na potência de transmissão, mantendo o nível de qualidade, com conseqüente redução significativa do custo da estação. Além disso, há que se considerar que a utilização

de equipamentos de menor potência resultará em redução no consumo de energia elétrica ao longo do tempo.

Olhando pelo ponto de vista do receptor, o incremento de custo resultante da adoção do sistema aqui proposto não é significativo. O custo de implementação de um equipamento está diretamente relacionado com o tipo de tecnologia utilizada. Os equipamentos elaborados com DSP (*Digital Signal Processing*) e FPGA (*Field Programmable Gate Array*) são destinados quase que exclusivamente ao projeto e avaliação dos algoritmos das várias funções necessárias à implementação. Enquanto o desenvolvimento é realizado empregando um DSP ou FPGA, o produto final é obtido produzindo um ASIC incorporando os algoritmos já testados. O ASIC (*Application-specific Integrated Circuit*) permite a otimização das conexões internas e consumo de potência. Por isso, pode-se concluir que o receptor deverá ser elaborado com base em um ASIC. No mercado mundial, a STMicroelectronics, uma das líderes no mercado de Set-Top-Box, comercializa ASIC para o sistema DVB-T ao custo de US\$ 20,00. Esses ASICs recebem o sinal de um Front-End em FI (ou no formato digital do Transport Stream- TS) e fornecem como saída o sinal em alta definição ou em RGB, vídeo composto no sistema PAL-M ou NTSC. O Front-End, que incorpora um amplificador de RF, misturadores, sincronizadores e demoduladores, pode ser adquirido por menos de US\$ 12,00. A estimativa é que esses valores sejam reduzidos quando a escala de produção for realmente aumentada pela implementação da DTV em escala mundial.

Apesar da grande complexidade encontrada em um receptor de televisão digital, a tecnologia atual já consegue incorporar em apenas uma pastilha todo o processamento necessário ao seu funcionamento. As implementações convencionais de Set-Top-Box já empregam apenas dois ou três componentes principais. A evolução do receptor deverá advir mais das técnicas matemáticas aplicadas à recepção, tais como na equalização, demodulação e decodificação, do que na eletrônica propriamente dita.

VII. CONCLUSÕES

O sistema proposto neste artigo, como parte do projeto SBTVD, apresentou desempenho superior aos demais padrões de TV Digital atualmente disponíveis. Os ganhos obtidos com o MI-SBTVD variam entre 4dB e 19dB, dependendo do canal de comunicação empregado. O uso do LDPC e do STC-OFDM provou ser uma combinação eficiente para atingir altas taxas de bit com baixa relação portadora-ruído, sem um aumento significativo do custo total do receptor.

REFERÊNCIAS

- [1] ATSC Document A-54, "Guide to the Use of the ATSC Digital Television Standard", 1995.
- [2] European Telecommunication Standard ETS 300 744, "Digital Video Broadcasting (DVB): Framing structure, channel coding and modulation for digital Terrestrial television (DVB-T)", ETSI, 1997.
- [3] H. Córdova, P. Boets, L. Van Biesen, "Insight Analysis into WI-MAX Standard and its trends", WWAN2005, 2005.
- [4] Amundsen, "IEEE 802.11 Wireless LAN - Draft Standard", 2nd IEEE Workshop on Wireless LANs, Oct. 1996.

- [5] ARIB, "Terrestrial Integrated Services Digital Broadcasting (ISDB-T). Specification of Channel Coding, Framing Structure and Modulation" September, 1998.
- [6] S. Benedetto and E. Biglieri, Principles of Digital Transmission: With Wireless Applications, Plenum Pub Corp, pag. 232, 1999.
- [7] Alamouti, S. "A simple transmit diversity technique for wireless communications", IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [8] ABERT/SET, "Digital Television Systems Brazilian Tests Final Report", May, 2000.

Luciano L. Mendes nasceu em São José dos Campos, SP, em 29 de agosto de 1977. Possui os títulos: Técnico em Eletrônica (EETEP, 1994), Engenheiro Eletricista (Inatel, 2001) e Mestre em Engenharia Elétrica (INATEL, 2003). Atualmente está em fase de doutoramento pela UNICAMP.

Desde 2001 atua no Grupo de Pesquisa em Comunicações Sem Fio do INATEL, tendo como resultado diversos artigos publicados em congressos nacionais e internacionais. Atualmente participa dos projetos de TV Digital do INATEL e trabalha na equipe de definição do Sistema Brasileiro de Televisão Digital. Suas principais áreas de atuação são: Comunicação Digital, Codificação de Canal e Sistemas de Transmissão Sem Fio.

José M. C. Brito é engenheiro de Telecomunicações, formado pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) em 1986, e Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Atua como professor do Inatel desde 1986, sendo atualmente professor titular, onde também ocupou vários cargos administrativos no Inatel, dentre os quais destacam-se os cargos de Vice-Diretor e Pró-Diretor de Pós-Graduação e Pesquisa. Foi fundador e editor da Revista Telecomunicações. Possui mais de 30 artigos publicados em congressos, nacionais e internacionais, e revistas. Suas principais áreas de atuação são: Redes de Telecomunicações e Sistemas de Comunicação Digital.

Fabbryccio A. Cardoso formou-se em 1995 como primeiro aluno da turma de engenharia elétrica, com ênfase em telecomunicações, pela Universidade de Brasília (UnB). Recebeu os títulos de mestre e doutor em engenharia elétrica em 1998 e 2004, respectivamente, pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). No período de 2002 a 2004, atuou ainda como gerente de pesquisa e desenvolvimento da TCP Telecom, empresa de desenvolvimento de projetos de engenharia de telecomunicações, da qual foi sócio fundador. Atuou em vários projetos através da Unicamp, em parceria com CPQd-Telebrás e Ericsson. Atualmente é pesquisador colaborador na Unicamp em projetos de TV Digital (sistemas de modulação) e TV sobre IP.

Carlo A. F. Rocha é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (UFPA) (1980), possui o título de mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (1985) e obteve o título de doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) (1996). Desde 1983 é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC, sendo atualmente professor Adjunto IV. Foi pesquisador visitante no Laboratoire des Signaux et Systèmes et GDR Traitement du Signal et Images (SUPELEC, França) de 02/1993 a 01/1994. Suas principais áreas de interesse são: Processamento Digital de Sinais, Sistemas MIMO-OFDM, Processamento Largamente Linear, Equalização e TV Digital.

Dalton S. Arantes graduou-se em Engenharia Eletrônica em 1969 pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela UNICAMP em 1972 e o título de PhD em Engenharia Elétrica pela Cornell University, Ithaca, NY, USA, em 1976. No período de 1993 a 1995 realizou um programa de Pós-Doutorado na University of New Mexico, Albuquerque, NM, USA. Atuou como Pesquisador Auxiliar na Comissão Nacional de Atividades Espaciais (atual INPE) em 1970/1971. Posteriormente desempenhou várias atividades de ensino, pesquisa e administração na UNICAMP, tendo sido Coordenador dos Cursos de Graduação e de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Chefe do Departamento de Comunicações da FEEC-UNICAMP. Desde 1976 coordenou diversos grupos de pesquisa e desenvolvimento na FEEC-UNICAMP, em parceria com diversas instituições e empresas, tais como a Fundação CPqD, a Ericsson Research, a FAPESP e, mais recentemente, com o INATEL, a UFSC e o CEFET-PR, no Projeto de Modulação Inovadora - RFP18 para o Sistema Brasileiro de Televisão Digital - SBTVD, financiado pela FINEP. Atualmente suas áreas de atuação compreendem comunicações digitais, TV digital, sistemas avançados para comunicações sem fio e WebLabs para telecomunicações.

Anexo 1 - Parâmetros de Configuração do MI-SBTVD

Modo		Modo 1	Modo 2	Modo 3
Largura de faixa, B_s		6000/14 = 428.571... kHz		
Número de portadoras	Total, N_{ps}	108	216	432
	Dados, N_{pds}	96	192	384
	Piloto, N_{pps}	9	18	36
	Controle, N_{pcs}	1	2	4
	Auxiliares, N_{pas}	2	4	8
Esquemas de modulação		QPSK 16-QAM 64-QAM	QPSK 16-QAM 64-QAM	QPSK 16-QAM 64-QAM
Espaçamento entre portadoras, $f = B_s/N_{ps}$		3.968...kHz		
Símbolos por quadro, N_q		204		
Intervalo de símbolo efetivo, T_e		252 s	504 s	1008 s
Intervalo de guarda, T_g		63 s (1/4) 31,5 s (1/8) 15,75 s (1/16) 7,875 s (1/32)	126 s (1/4) 63 s (1/8) 31,5 s (1/16) 15,75 s (1/32)	252 s (1/4) 126 s (1/8) 63 s (1/16) 31,5 s (1/32)
Intervalo de quadro, T_q $= N_q (T_e + T_g)$		64,26 ms (1/4) 57,384 ms (1/8) 54,621 ms (1/16) 53,0145 ms (1/32)	128,52 ms (1/4) 115,668 ms (1/8) 109,242 ms (1/16) 106,029 ms (1/32)	257,04 ms (1/4) 231,336 ms (1/8) 218,484 ms (1/16) 212,058 ms (1/32)
Frequência de amostragem da IFFT, f_a		512/63 = 8,12698... MHz		
Código interno		LDPC ($n = 9792$; $r = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$)		
Código externo		Reed-Solomon ($n = 204, k = 188$)		
Entrelaçador		4 palavras-código LDPC para QPSK, 8 palavras LDPC para 16-QAM e 12 palavras LDPC para 64-QAM		