Dissertação de Mestrado

Inatel
Instituto Nacional de Telecomunicações

COMPARAÇÃO ENTRE ALGORITIMOS DE DECISÃO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO COM CODIFICAÇÃO COOPERATIVA

VINICIUS LOURENÇO DIAS FERRO

AGOSTO/ 2011

INSTITUTO NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES – INATEL

MESTRADO EM TELECOMUNICAÇÕES

COMPARAÇÃO ENTRE ALGORITIMOS DE DECISÃO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO COM CODIFICAÇÃO COOPERATIVA

VINICIUS LOURENÇO DIAS FERRO

Dissertação apresentada ao Mestrado em Telecomunicações do Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Telecomunicações.

ORIENTADOR: PROF. DR. GERALDO GIL RAMUNDO GOMES

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. LUCIANO LEONEL MENDES

SANTA RITA DO SAPUCAÍ – MG

2011

Ferro, Vinicius Lourenço Dias
F417c

Comparação entre Algoritmos de Decisão em Sistemas de Comunicação com Codificação Cooperativa / Vinicius Lourenço Dias Ferro. – Santa Rita do Sapucaí, 2011.
61p.

Orientadores: Dr. Geraldo Gil Ramundo Gomes; Dr. Luciano Leonel Mendes
Dissertação de Mestrado – Engenharia de Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.
Inclui bibliografia e anexo.

Comunicação Cooperativa 2. Codificação Cooperativa 3. Comunicações sem fio. I. Gomes, Geraldo Gil Ramundo. II. Mendes, Luciano Leonel. III. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. IV. Título.
CDU 621.39

VINICIUS LOURENÇO DIAS FERRO

COMPARAÇÃO ENTRE ALGORITIMOS DE DECISÃO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO COM CODIFICAÇÃO COOPERATIVA

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do título de Mestre em Telecomunicações do Instituto Nacional de Telecomunicações.

Santa Rita do Sapucaí, 25 de agosto de 2011

Membros da banca

_____

Prof. Dr. Geraldo Gil Ramundo Gomes
Orientador - (INATEL)

_____

Prof. Dr. Rausley Adriano Amaral de Souza
Examinador Interno - (INATEL)

_____

Prof. Dr. Renato Baldini Filho
Examinador Externo - (FEEC - UNICAMP)

_____

Prof. Dr. Luciano Leonel Mendes
Coordenador do Curso de Mestrado - (INATEL)

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais Newton e Cássia, pelo grande apoio, dedicação e paciência, para que este sonho pudesse ser realizado. Aos meus irmãos Patrícia e Ricardo e a toda minha família pela cooperação e incentivo.

Ao meu orientador Geraldo Gil Ramundo Gomes por todo apoio, dedicação, ajuda, paciência e colaboração no decorrer deste trabalho, principalmente nesta reta final, na qual disponibilizou seu tempo livre para me auxiliar. Ao meu co-orientador Luciano Leonel Mendes pela enorme força, assistência, contribuição e por sempre se colocar a disposição para me ajudar.

A minha namorada Débora pela paciência, carinho, apoio e compreensão por todas às vezes a qual tive que ficar ausente durante a realização deste trabalho.

Ao amigo Márcio Dias de Morais por sempre me ajudar.

Aos amigos que fiz no decorrer desta caminhada, especialmente ao Weldisson Ruas pelo auxilio e amizade e ao Tiago Reis Marins por sempre me ajudar, quando foi preciso e pelos grandes debates sobre o assunto que foram muito úteis para a conclusão do trabalho.

A Gisele Moreira dos Santos, secretária do Mestrado, por toda ajuda e colaboração sempre que foi necessário.

Ao Inatel pela oportunidade oferecida e pelo apoio financeiro.

O meu muito obrigado a todos!

Dedico este trabalho

aos meus pais,
minha namorada
e a toda minha família.

Sumário

LISTA DE FIGURAS . . . . . **Vi**

LISTA DE TABELAS . . . . . **viii**

LISTA DE ABREVIATURAS . . . . . **ix**

LISTA DE SÍMBOLOS . . . . . **x**

RESUMO . . . . . **xi**

ABSTRACT . . . . . **xii**

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO **1**

1.1 Conceitos Básicos. 1

1.2 Motivação 2

1.3 Objetivo. 3

1.4 Contribuição 4

1.5 Estrutura da Dissertação 4

CAPÍTULO 2 – PRINCÍPIOS DA COMUNICAÇÃO COOPERATIVA **5**

2.1 Comunicações Móveis sem Fios. 5

2.2 Comunicações Cooperativas. 8

2.2.1 Cooperação através da Detecção 11

2.2.2 Cooperação por meio da Amplificação e Retransmissão. 12

2.2.3 Codificação Cooperativa 13

2.2.3.1 Transmissão dos Usuários Através da Divisão no Tempo. 19

2.2.3.2 Taxa de Cooperação 24

2.2.3.3 Métodos de Decodificação que Podem ser Realizados pelo Destino 25

CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÕES DOS ALGORITMOS UTILIZADOS PARA CODIFICAÇÃO COOPERATIVA **26**

3.1 Modelo 1 – Algoritmo proposto por Hunter & Nosratinia [1]. 26

3.2 Modelo 2 – Algoritmo proposto por Stefanov & Erkip [5] 30

3.3 Modelo 3 – Algoritmo sugerido neste trabalho 36

CAPÍTULO 4 – COMPARAÇÃO DOS ALGORITMOS **40**

4.1 Descrição dos Elementos Utilizados para Elaboração das Comparações. 40

4.2 Abordagens Realizadas para Comparação dos Resultados. 46

4.3 Resultados dos Desempenhos das Simulações para cada Cenário Estudado 47

4.3.1 Cenário 1 47

4.3.2 Cenário 2 49

4.3.3 Cenário 3 50

4.3.4 Cenário 4 52

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO. **55**

5.1 Considerações Finais. 55

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros. 57

ANEXO A – ARTIGO PUBLICADO. **58**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS. **59**

Lista de Figuras

Figura 2.1	Comunicação por múltiplos percursos	6
Figura 2.2	Comunicação utilizando um Terminal Retransmissor	10
Figura 2.3	Modos de transmissão: (a) Transmissão em *broadcast*; (b) Transmissão em canais de múltiplo acesso e também pode ser estendida para uma transmissão com diversidade espacial	10
Figura 2.4	Esquema geral da comunicação cooperativa entre dois usuários, destacando os caminhos com desvanecimento estatisticamente independentes entre os terminais e a ERB. . . .	11
Figura 2.5	Exemplo de puncionamento e montagem dos segmentos para um usuário.	15
Figura 2.6	Arquitetura do codificador cooperativo proposto por Hunter & Nosratinia [1], para o Usuário 1	16
Figura 2.7	Caracterização da cooperação e não-cooperação	17
Figura 2.8	Técnica da cooperação através da codificação de canal.	19
Figura 2.9	Caracterização da cooperação e não-cooperação por divisão do tempo (ponto de vista dos usuários).	21
Figura 2.10	Montagem dos quadros recebidos pela ERB para a realização da decodificação.	23
Figura 2.11	Quadro efetivo utilizado para fins da decodificação realizada por parte do usuário cooperador.	24
Figura 3.1	Exemplo de puncionamento usado no Modelo 1 (RCPC) [13] .	27
Figura 3.2	Exemplo de decodificação para RCPC da Figura 3.1	28
Figura 3.3	Formação dos segmentos para o esquema de cooperação do Modelo 1.	29
Figura 3.4	Fluxograma das características do algoritmo do Modelo 1	30

Figura 3.5 Esquema utilizado para o puncionamento do codificador convolucional do Modelo 2 32

Figura 3.6 Possibilidade que pode ocorrer com o algoritmo do Modelo 1 e não ocorre com o algoritmo do Modelo 2 34

Figura 3.7 Fluxograma das características do algoritmo do Modelo 2 35

Figura 3.8 Fluxograma das características do algoritmo do Modelo 3 38

Figura 4.1 Esquema de cooperação com a inserção do símbolo de sinalização aos quadros transmitidos 43

Figura 4.2 Estruturas das palavras códigos puncionadas que serão utilizadas nas comparações dos algoritmos: (a) código R-S (10, 3); (b) código R-S (11, 3); (c) código R-S (12, 3). 45

Figura 4.3 Gráfico das curvas de desempenho do Usuário 2, para os Modelos 1, 2 e 3 com taxa de cooperação de 31,25%; *uplink* (Usuário 1) E_b/N_0 = 20 dB (fixo) 47

Figura 4.4 Gráfico das curvas de desempenho do Usuário 2, para os Modelos 1, 2 e 3 com taxa de cooperação de 31,25%; *uplink* (Usuário 1) E_b/N_0 = *uplink* (Usuário 2) + 5 dB (variável) 49

Figura 4.5 Gráfico das curvas de desempenho do Usuário 2, para os Modelos 1, 2 e 3 com taxa de cooperação de 25%; *uplink* (Usuário 1) E_b/N_0 =20 dB (fixo). 51

Figura 4.6 Gráfico das curvas de desempenho do Usuário 2, para os Modelos 1, 2 e 3 com taxa de cooperação de 18,75%; *uplink* (Usuário 1) E_b/N_0 =20 dB (fixo). 53

Lista de Tabelas

Tabela 1	Características do codificador de canal RS (15,3).	41
Tabela 2	Características das palavras códigos com as diferentes taxas de cooperação utilizadas para comparação dos algoritmos	44

Lista de Abreviaturas

AWGN	*Additive White Gaussian Noise*
BER	*Bit Error Rate*
BPSK	*Binary Phase-Shift Keying*
CCP	Codificador Convolucional Puncionado
CDMA	*Code Division Multiple Access*
CVP	Codificador de Verificação de Paridade
DCVP	Decodificador do Código de Verificação de Paridade
DAV	Decodificador com Algoritmo de Viterbi
ERB	Estação Rádio Base
dB	Decibel
FER	*Frame Error Rate*
fdp	Função densidade de probabilidade
GF	Campo de *Galois*
P/S	Paralelo/Série
RCPC	*Rate-Compatible Punctured Convolutional*
RS	Codificador de canal *Reed-Solomon*
Tx	Transmissor
U1	Usuário 1
U2	Usuário 2
*U*x	Abreviatura que significa usuário indefinido

Lista de Símbolos

α^i	Elementos de um campo finito
$a(1)$	Matriz de puncionamento
c_i	Sequência de bits gerados pelo codificador convolucional, que formam a palavra código
E_b	Energia média por bit
g_i	Sequências geradoras dos códigos do codificador convolucional
$g(X)$	Polinômio gerador do código *Reed-Solomon*
$GF(q^m)$	*Campo de Galois* extendido de grau *m*
k	Comprimento do bloco de bits ou símbolos de informação que serão codificados
m_i	Bits de mensagem
m	Número inteiro positivo
N	Comprimento do bloco em símbolos transmitidos no método da codificação cooperativa
n	Comprimento da palavra código
N_0	Densidade espectral de potência unilateral do ruído
N_1	Sequência da palavra código destinada ao primeiro segmento, na técnica da codificação cooperativa
N_2	Sequência da palavra código puncionada, que é destinada ao segundo segmento, na técnica da codificação cooperativa
P	Período de puncionamento
$p(X)$	Polinômio primitivo gerador do campo finito $GF(2^m)$
R	Taxa de codificação do codificador utilizado
R_1	Taxa de codificação da sequência da palavra código destinada ao primeiro segmento (N_1), na técnica da codificação cooperativa
R_{co}	Taxa de cooperação, na técnica da codificação cooperativa

Resumo

O objetivo desta dissertação é comparar o desempenho de dois algoritmos de decisão para codificação cooperativa, ou seja, de sistemas de comunicação cooperativa que realiza cooperação entre usuários fazendo uso de codificadores de canal. O primeiro desses algoritmos é apresentado em [1]-[4] e o outro é apresentado em [5], denominados aqui, de Modelo 1 e Modelo 2, respectivamente. Os modelos escolhidos para serem comparados, possuiam algumas diferenças significativas nas estruturas dos seus sistemas, além de diferenças no mecanismo de cooperação e nos resultados de desempenhos apresentados, não permitindo uma comparação justa entre eles, o que motivou a realização deste trabalho. Como contribuição adicional, é proposto um terceiro algoritmo, chamado de Modelo 3, que funciona basicamente como uma combinação dos Modelos 1 e 2. Para realizar uma comparação justa entre os três algoritmos da codificação cooperativa foram utilizados um esquema de codificação de canal *Reed-Solomon* (RS), modulação BPSK (*binary phase-shift keying*) e um canal caracterizado com desvanecimento Rayleigh plano. Os resultados de desempenhos dos três algoritmos são apresentados na forma de curvas da taxa de erro de bit (BER - *bit error rate*) em função da razão da energia média por bit e a densidade espectral de potência unilateral do ruído (E_b/N_0), obtidos por simulações computacionais ambientadas na ferramenta de simulação Simulink® integrada ao programa MATLAB®.

Palavras-Chave: Comunicação Cooperativa, Codificação Cooperativa, Comunicações sem fio.

Abstract

The purpose of this dissertation is to compare the performance of two decision algorithms for cooperative coding, i.e., the cooperative communication systems that performs cooperation between users by making use of channel encoder. The first of these algorithms is presented in [1]-[4] and the other is presented in [5], called here, Model 1 and Model 2, respectively. The models chosen for comparison, has some significant differences in the structures of their systems used, in addition to differences in the mechanism of cooperation and presentation of performance results, do not allowing a fair comparison between them, which motivated this work.. As an additional contribution, we propose a third algorithm, called the Model 3, which basically works as a combination of Models 1 and 2. In order to perform a fair comparison among the three cooperative coding algorithms, a scheme of channel coding Reed-Solomon (RS), modulation BPSK (binary phase-shift keying) and a flat Rayleigh fading channel were used. The performance results of the three algorithms are presented as curves of bit error rate (BER) as a function of the ratio of average energy per bit and the one-sided noise power spectral density (E_b/N_0), obtained by computer simulations done using the Simulink® simulation tool integrated with MATLAB®.

Keywords: Cooperative Comunication, Coded Cooperation, Wireless Comunication.

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Conceitos Básicos

A introdução de novas aplicações aos sistemas de comunicações móveis vem proporcionando ao usuário além da comunicação de voz, comunicações de dados, que incluem mensagens, imagens, vídeos e outras informações agrupadas denominadas de *comunicações multimídia*. Assim, alta qualidade/confiabilidade, como também taxas de transmissão cada vez mais elevadas são exigidas. Os sistemas de comunicações móveis constituem um ambiente de propagação que apresentam degradações severas ao sinal, devido ao transmissor e/ou receptor terem a capacidade de estar em movimento relativo em um cenário em que outros agentes, tais como edificações e veículos constituem obstáculos e superfícies refletoras que contribuem fortemente para a degradação do sinal. Isso pode ocasionar um sinal de baixa qualidade e até a perda completa do sinal.

Para manter um sistema de comunicação com taxa de transmissão adequada e qualidade de serviços aceitável, em um ambiente de propagação hostil, é necessário, na maioria das vezes, um aumento na robustez do sinal transmitido e/ou adoção de contramedidas eficazes e capazes de combater as degradações introduzidas pelo canal.

Uma das maneiras adequadas para isto é a utilização de técnicas de diversidade espacial, temporal e/ou de frequência, porém, no caso dos sistemas de comunicações que utilizam terminais nóveis portáteis, a adoção da diversidade espacial é impraticável devido às restrições inerentes à portabilidade.

A comunicação cooperativa vem sendo estudada como uma forma alternativa de se obter os benefícios da diversidade nos casos onde existem restrições para o uso da diversidade espacial.

A comunicação cooperativa tem como princípio básico de funcionamento a utilização da ajuda de outro dispositivo de usuário para transmitir seu sinal ao destino. Dessa forma, os usuários envolvidos na cooperação irão tanto transmitir o seu sinal, como também irão retransmitir de alguma maneira o sinal do outro usuário para o destino, sem alterar os parâmetros dos sinais dos usuários, independentemente de estar havendo ou não a cooperação.

Com a utilização da ajuda de outro(s) usuário(s) para uma retransmissão do sinal o sistema cria um arranjo virtual de antenas, podendo deste modo se beneficiar das técnicas de diversidade espacial.

A maneira como os usuários irão atuar no sinal recebido do outro usuário, para retransmiti-lo ao destino, são definidas pelas técnicas da comunicação cooperativa.

As técnicas de comunicações cooperativas mais conhecidas e abordadas neste trabalho são: cooperação através da detecção, cooperação por meio da amplificação e retransmissão e cooperação através da codificação de canal ou simplesmente codificação cooperativa, que serão descritos com mais detalhes nos próximos capítulos.

1.2 Motivação

Estudos mostram que a técnica da codificação cooperativa apresenta um desempenho melhor quando comparado com outras técnicas da comunicação cooperativa, como é o caso da comparação com a técnica da cooperação por meio da amplificação e retransmissão, que podem ser vistas em [3] e [5]. Para a comparação dos desempenhos entre as técnicas da codificação cooperativa com a técnica da cooperação por meio da amplificação e retransmissão, tanto em [3] como em [5], foram utilizados esquemas de modulação BPSK (*binary phase-shift keying*) e

codificação convolucional de taxa $R = 1/4$, para que a comparação entre as técnicas fosse justa.

Entretanto, os algoritmos de decisão para a técnica da codificação cooperativa utilizados em [3] e [5] possuem diferenças significativas nas estruturas dos seus sistemas, além também de possuírem diferenças em seus mecanismos de cooperação e nos resultados de desempenho apresentados em seus trabalhos, não sendo possível fazer uma comparação justa entre eles. Um desses algoritmos foi o primeiro algoritmo proposto para a utilização da técnica da codificação cooperativa, e é apresentado em [1]-[4], e chamado aqui de Modelo 1. O outro algoritmo é apresentado em [5], e chamado aqui de Modelo 2.

Desta forma, em função das diferentes abordagens utilizadas nos dois trabalhos, e não havendo possibilidade de uma comparação justa entre eles, resta a questão de qual dos dois algoritmos apresenta o melhor desempenho. Esta foi o principal fator de motivação para a execução deste trabalho. Os dois algoritmos em questão são descritos detalhadamente no **Capítulo 3**.

1.3 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é realizar a compararação dos desempenhos dos modelos de codificação cooperativa apresentados em [1]-[4] e [5] de uma forma justa. Para isso foi necessário estabelecer as mesmas condições para verificação de desempenho dos modelos envolvidos, que serão exibidas no **Capítulo 4**.

As curvas de desempenho da comparação dos modelos, apresentadas neste trabalho, foram obtidas por meio de simulações computacionais ambientadas no Simulink® integrado ao programa MATLAB®.

A fim de simplificar os trabalhos de simulação computacional, foi utilizado um único código corretor de erros e estabeleceu-se como medida de desempenho as curvas da taxa de erro de bit (BER – *bit error rate*) em função da relação entre a energia média por bit e a densidade espectral de potência unilateral do ruído unilateral (E_b/N_0) em canais com desvanecimento Rayleigh plano.

1.4 Contribuição

Como contribuição adicional, esta dissertação apresenta ainda um novo algoritmo de cooperação, que funciona como uma combinação dos outros dois algoritmos. Este terceiro algoritmo também será comparado com os outros dois algoritmos utilizando as mesmas abordagens utilizadas para a verificação do desempenho dos outros dois algoritmos, de forma a permitir uma comparação justa dos seus resultados.

1.5 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada da seguinte maneira:

- O **Capítulo 2** aborda as características básicas de um sistema de comunicação móvel no qual a comunicação cooperativa se insere. São descritas as técnicas de comunicação cooperativa e, em especial, a codificação cooperativa, que é apresentada com maiores detalhes.
- O **Capítulo 3** descreve detalhadamente os métodos e mecanismos de funcionamento da cooperação feita pelos três algoritmos da codificação cooperativa, que serão comparados, no qual são compostos pelo Modelo 1, Modelo 2 e o modelo proposto neste trabalho.
- No **Capítulo 4** são descritos os métodos utilizados e suas características para elaboração das comparações feitas por meio de simulações computacionais, como: codificação de canal, método de puncionamento, modulação, modelo de canal e os cenários em que foram realizadas as comparações dos algoritmos. Neste capítulo são apresentadas também as curvas de desempenho obtidas para os três algoritmos propostos.
- O **Capítulo 5** apresenta as conclusões sobre os resultados de desempenhos obtidos, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Princípios da Comunicação Cooperativa

Neste capítulo serão abordadas as técnicas de comunicação cooperativa. Será dada ênfase, porém, à comunicação cooperativa através da codificação de canal ou codificação cooperativa. Apesar de existirem outros esquemas nos quais a comunicação cooperativa pode ser empregada, o modelo que será tratado neste trabalho, é o de um sistema de comunicações móveis, constituídos por terminais de usuários (terminais móveis e a estação rádio base - ERB). Este modelo geralmente não pode se beneficiar das técnicas tradicionais de diversidade, quando o terminal móvel está transmitindo seu sinal para a estação rádio base, devido a algumas restrições práticas, por isso é um candidato ao uso de alguma técnica da comunicação cooperativa.

2.1 Comunicações móveis sem fio

As comunicações móveis são caracterizadas quando ao menos uma das partes envolvidas está em movimento em relação à outra. Nas comunicações móveis pode-se ter uma variedade de obstáculos que interferem e alteram a propagação do sinal transmitido. Essas obstruções podem causar reflexões, dispersões e espalhamento do sinal transmitido, produzindo atenuações na amplitude, alterações na fase e atrasos. Como há movimento relativo entre uma das partes envolvidas na comunicação, também pode-se ter deslocamento na frequência do sinal, conhecido como deslocamento Doppler.

Como existe grande quantidade de obstruções entre o transmissor e o receptor, geralmente não se tem uma visada direta na comunicação e, mesmo quando ela existe, ainda podem ocorrer múltiplos percursos devido às reflexões nos obstáculos que o circundam. As propagações por múltiplos percursos, que ocorrem tipicamente em ambientes urbanos, são mostradas na Figura 2.1.

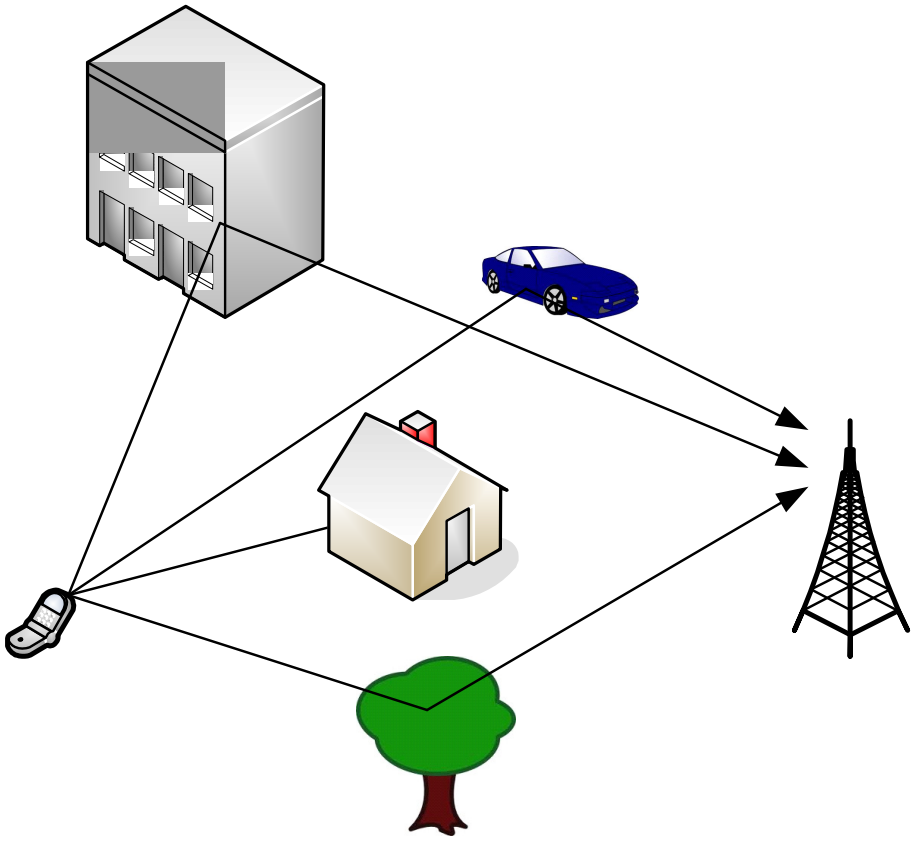


Figura 2.1 - *Comunicação por múltiplos percursos.*

Devido à aleatoriedade de como o sinal transmitido é afetado pelos múltiplos percursos, as variações de amplitude e fase são tratadas estatisticamente. Como consequência, admite-se que a amplitude e a fase do sinal recebido variam aleatoriamente segundo alguma função densidade de probabilidade (fdp).

No modelo abordado aqui, no qual o sinal transmitido do terminal móvel ao destino, geralmente o enlace não possui uma linha em visada direta, admitindo-se

que a amplitude do sinal varie conforme uma distribuição de probabilidade de Rayleigh, enquanto sua fase é uniformemente distribuída em um intervalo de 0 a 2π. Maiores detalhes a respeito deste modelo de comportamento do sinal podem ser encontrados em [6]-[8].

As diferentes cópias do sinal transmitido que chegam ao receptor pelos diferentes caminhos são combinadas vetorialmente, resultando em um sinal cuja magnitude pode variar entre um valor mínimo e máximo, dependendo das fases e amplitudes com os quais as réplicas do sinal alcançam a antena receptora.

Como se trata de uma comunicação móvel o sinal pode passar de um valor máximo para um mínimo rapidamente, dependendo do local e da velocidade com os quais o móvel está se deslocando. Além disso, pode haver lugares de sombreamento. Neste caso, se o sinal resultante na entrada do receptor permanecer por algum tempo com um valor menor que o mínimo exigido para uma comunicação estável e sem perda de informação, ocorrerá perda na qualidade do sinal e a interrupção da comunicação. Tal situação afeta de sobremaneira as comunicações que necessitam de alta qualidade no sinal, tornando imperiosa a adoção de alguma técnica que aumente a robustez do sinal de forma a manter a qualidade e a confiabilidade da informação recebida.

O canal de comunicação móvel pelo qual o sinal transmitido se propaga sofre desvanecimento por múltiplos percursos. Esse desvanecimento pode ser definido pela maneira como ele afeta as características do sinal transmitido, em termos da dispersividade no tempo e da dispersividade na frequência.

A dispersividade no tempo pode causar ao sinal um desvanecimento plano ou seletivo em frequência, já a dispersividade na frequência pode causar ao sinal um desvanecimento lento ou rápido. As definições de como o desvanecimento causado pelo canal de comunicação móvel afeta o sinal transmitido podem ser encontradas com maiores detalhes em [6]-[8].

Uma das maneiras utilizadas para tentar evitar o desvanecimento por múltiplos percursos seria por meio da utilização de técnicas de diversidade, as quais se baseiam no fato de que a transmissão do mesmo sinal possa ser recebida através de canais com desvanecimentos estatisticamente independentes, o que diminui as chances dos sinais transmitidos sofrerem desvanecimentos profundos. As técnicas de

diversidade mais conhecidas e utilizadas são: diversidade em frequência, diversidade no tempo e diversidade espacial, porém neste trabalho será descrita apenas a técnica da diversidade espacial, por ser a técnica de diversidade mais adequada a ser aplicada ao modelo de comunicação abordado. As demais técnicas podem ser encontradas com mais detalhes em [6] e [7].

A diversidade espacial consiste em utilizar mais de uma antena geograficamente espaçada para transmitir o mesmo sinal, a fim de que os sinais transmitidos pelas diferentes antenas possam percorrer caminhos diferentes com o objetivo de se propagarem em canais com desvanecimentos estatisticamente independentes. Este tipo de benefício na comunicação gera uma maneira adicional de se manter boa qualidade na transmissão do sinal, a fim de se evitar perda de informação na recepção.

O modelo de comunicação tratado aqui não pode, entretanto, se beneficiar das técnicas de diversidade espacial quando o terminal móvel está transmitindo para a estação rádio base, ou seja, no caso do *uplink*, pois algumas restrições de ordem prática inviabilizam o uso da diversidade espacial. Basicamente, a principal restrição está relacionada à portabilidade do terminal, isso porque, para a obtenção de uma diversidade espacial eficaz, as antenas precisam ficar espaçadas por uma distância adequada, o que no caso do terminal móvel, torna-se inviável devido ao seu tamanho físico limitado.

Para se evitar o problema do desvanecimento por múltiplos percursos, a comunicação cooperativa tem sido proposta como uma alternativa às técnicas de diversidade tradicionais.

2.2 Comunicações Cooperativas

A técnica de comunicação cooperativa foi apresentada inicialmente no trabalho de Cover & El Gamal [9] em 1979, no qual se utilizou um terceiro terminal como retransmissor em um sistema de comunicação sem fio. Esta proposta pode ser vista na Figura 2.2 onde os elementos do sistema são compostos por um terminal principal (transmissor), um terminal secundário (retransmissor) e o destino

(receptor). O retransmissor não possui informações próprias para transmitir e apenas opera para retransmitir a informação estimada do terminal principal. Ainda nesta proposta [9] admitiu-se que o retransmissor tanto recebe o sinal do terminal principal quanto retransmite o sinal recebido para o destino na mesma faixa de frequências.

A ideia básica por traz desta comunicação está no fato de que o sinal enviado pelo transmissor pode ser recebido tanto pelo retransmissor quanto pelo destino (*broadcast*), e cada um recebe uma cópia deste sinal contaminado por ruído que diferem estatisticamente de um canal para o outro, ou seja, são independentes. A partir disso, o retransmissor, através do uso de alguma técnica de detecção, estima o sinal recebido, para minimizar a influência do ruído que foi adicionado ao sinal, ao se propagar pelo canal entre os terminais, e retransmite a estimativa do sinal recebido para o destino.

A proposta principal em [9] foi estudar os limites inferior e superior da capacidade do canal com a adição do canal retransmissor em uma comunicação utilizando canais com ruído branco gaussiano aditivo (AWGN - *Aditive White Gaussian Noise*) estatisticamente independentes, ou seja, o sinal que é recebido pelo destino através do retransmissor é corrompido pelo ruído de modo diferente em relação aquele sinal que é recebido pelo destino através do transmissor, isto é, os canais não são correlacionados.

A partir da ideia apresentada na Figura 2.2, é possível definir dois modos de transmissão, o primeiro, apresentado na Figura 2.3(a), mostra a transmissão da informação do transmissor que pode ser recebida pelo retransmissor e pelo destino simultaneamente (*broadcast*) e o segundo, apresentado na Figura 2.3(b), mostra tanto a retransmissão da informação assim como a transmissão da informação de onde foi originada, ambas para o mesmo destino, em canais de múltiplo acesso. Entretanto, a Figura 2.3(b) também pode ser estendida para uma transmissão em diversidade espacial, no qual o transmissor pode se beneficiar da técnica de diversidade espacial ao transmitir seu sinal por dois locais diferentes, que irá experimentar dois caminhos distintos.

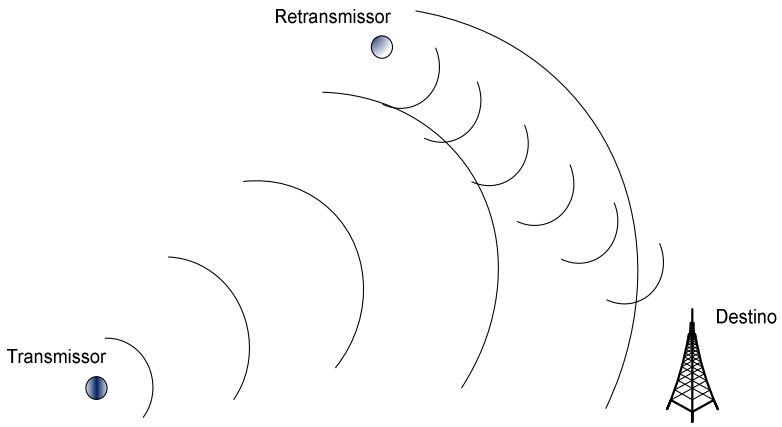


Figura 2.2 - *Comunicação utilizando um Terminal Retransmissor.*

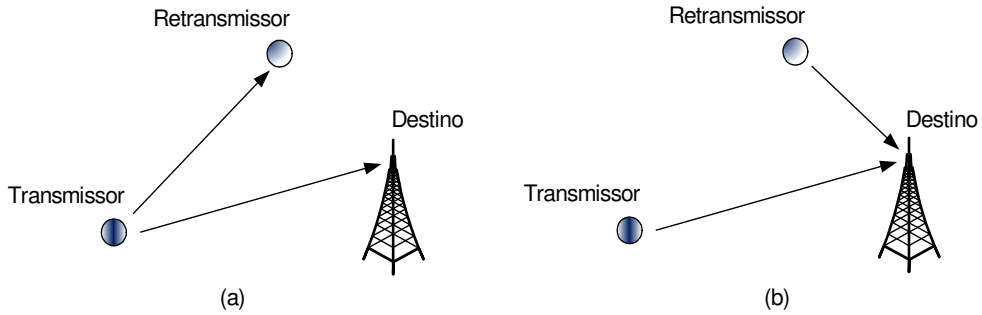


Figura 2.3- *Modos de transmissão: (a) Transmissão em broadcast; (b) Transmissão em canais de múltiplo acesso e também pode ser estendida para uma transmissão em diversidade espacial.*

O estudo da Comunicação Cooperativa apresenta relativos avanços desde o trabalho de Cover & El Gamal [9] em 1979, se estendendo a vários terminais de usuários que além de transmitirem seu próprio sinal, também retransmitem através de uma estimativa o sinal de outro usuário. Apesar de existirem outros esquemas, no qual a comunicação cooperativa pode ser empregada, o modelo empregado aqui é o de um sistema de comunicações móveis, e com isso os canais são modelados com desvanecimento Rayleigh e não apenas com AWGN.

A comunicação cooperativa tem como objetivo principal obter as vantagens da diversidade para o sinal transmitido através da ajuda de outro(s) usuário(s),

formando assim um arranjo virtual de antenas com o uso conjunto das mesmas, como se pode ver na Figura 2.4. Na comunicação cooperativa, os usuários envolvidos na comunicação trabalham tanto como transmissores como retransmissores.

Algumas das principais técnicas serão descritas neste trabalho, como a Cooperação através da Detecção, a Cooperação por meio da Amplificação e Retransmissão e, com mais abrangência a Codificação Cooperativa.

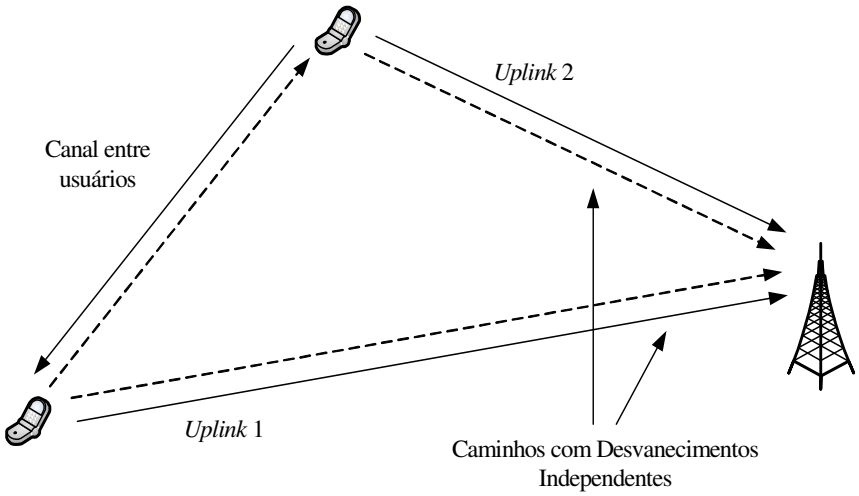


Figura 2.4 - *Esquema geral da comunicação cooperativa entre dois usuários, destacando o os caminhos com desvanecimento estatisticamente independentes entre os terminais e a ERB.*

2.2.1 Cooperação através da Detecção

O método de cooperação através da detecção foi proposto primeiramente por Sendonaris *et al.* [10] e [11] e sua funcionalidade tem muitas semelhanças com o modelo de Cover & El Gamal [9], porém, ao invés de utilizar um terminal apenas como retransmissor, os terminais são usuários que trabalham tanto como transmissores, quanto retransmissores, pois têm informação própria para ser transmitida, e também retransmitem a informação de outro usuário. Quando um usuário recebe a informação do outro usuário envolvido na comunicação, ele utiliza alguma técnica de detecção para estimar a informação recebida, a fim de minimizar a influência do ruído, que foi adicionado ao sinal, ao passar através do canal entre

usuários, e em seguida retransmite uma parte da informação estimada do outro usuário juntamente com uma parte da sua própria informação.

O destino recebe para cada usuário a informação que é transmitida pelo próprio usuário, e também a informação estimada que está sendo retransmitida por outro usuário, podendo dessa forma alcançar a diversidade espacial na transmissão dos terminais móveis para a estação rádio base.

O trabalho de Sendonaris *et al.* [10] e [11] propõe um método de cooperação através da detecção em um sistema utilizando a técnica de múltiplo acesso CDMA (*code-division multiple access*) com modulação BPSK.

As estruturas dos sinais transmitidos pelos usuários, com relação aos sistemas com e sem cooperação, devem ser mantidas as mesmas, para que dessa maneira, possa ser realizada uma comparação justa entre os sistemas, sem que existam diferenças.

Com o envio dos sinais por dois caminhos com desvanecimentos estatisticamente independentes, os sinais transmitidos experimentam canais com relações sinal-ruído diferentes até o destino, podendo assim obter um desempenho melhor do que aquele obtido ao se transmitir o sinal por um único caminho. Por isso, pode ser mais vantajosa a utilização do sistema com cooperação em relação ao sistema sem cooperação.

A técnica de cooperação através da detecção pode ser muito eficiente e alcançar bons desempenhos, conforme pode ser visto em [10] e [11].

2.2.2 Cooperação por meio da Amplificação e Retransmissão

A cooperação por meio da amplificação e retransmissão é a técnica de cooperação mais simples de se realizar, por se tratar de uma técnica onde o sinal recebido não necessita de nenhum esquema de tratamento muito complexo, apenas uma amplificação.

Esta técnica de cooperação foi proposta por Laneman *et al.* [12] e funciona basicamente amplificando o sinal recebido pelo outro usuário, porém a amplificação feita ao sinal recebido estará com a adição de ruído e, portanto, o sinal amplificado não só amplificará a informação do outro usuário, mas também amplificará o ruído

contido na informação. A utilização desta técnica é mais interessante quando a relação sinal-ruído do canal entre usuários é alta, de modo que o sinal possa continuar sendo útil mesmo após passar através de dois canais, até ser recebido pelo destino, como pode ser visto no esquema geral de cooperação mostrado na Figura 2.4.

O sinal transmitido para a ERB de ambos os usuários é composto pela transmissão da sua própria informação e da retransmissão amplificada do sinal do outro usuário e desta maneira podendo alcançar a diversidade espacial na transmissão do terminal móvel para a estação rádio base.

Esta técnica, por ser simples de executar, pode ser aplicada a sistemas onde não se necessita de algo muito complexo no tratamento do sinal. Se a relação sinal-ruído do canal entre usuários for alta, a técnica de cooperação por meio da amplificação e retransmissão pode ser realizada sem muitos problemas.

Para fazer uma comparação justa em relação aos sistemas com e sem cooperação, as estruturas dos sinais devem ser iguais, como em outras técnicas de cooperação.

2.2.3 Codificação Cooperativa

A técnica da codificação cooperativa foi primeiramente proposta por Hunter & Nosratinia no ano de 2002 [1], no qual a cooperação é feita através da codificação de canal. A idéia principal da codificação cooperativa é a de se obter diversidade por meio da transmissão de redundância incremental de um usuário pelo outro, sem que a taxa de codificação seja alterada, independentemente de estar havendo ou não a cooperação.

A codificação de canal consiste em utilizar redundância controlada para proteger a informação enviada pela fonte. O codificador de canal aumenta a largura de faixa do sinal transmitido por meio do aumento da quantidade de símbolos ou bits que são adicionados à informação. A razão entre o número de bits ou símbolos de informação e o número total de bits ou símbolos de uma palavra código é definida como *taxa de codificação*, para um mesmo alfabeto da saída da fonte e do

codificador. Assim, quanto maior for a quantidade de redundância adicionada à informação menor será a taxa de codificação. De um modo geral, quanto menor for a taxa de codificação maior será a capacidade de correção de erros do código. Logo, o aumento da capacidade de correção está diretamente relacionado com a quantidade de redundância acrescentada à informação.

A codificação cooperativa consiste na transmissão do quadro, que é formado pela palavra código dos usuários, dividido em dois segmentos. No trabalho de Hunter & Nosratinia [1], foi utilizada a técnica de puncionamento do codificador de canal para fazer a divisão da palavra código, no qual é um dos principais objetivos desta proposta para a realização da cooperação. A técnica de puncionamento tem como princípio de funcionamento eliminar de alguma maneira alguns bits ou símbolos na saída do codificador de canal, e desta forma alcançar outras taxas de codificação, sem que seja necessário alterar a estrutura do codificador de canal utilizado no sistema. A técnica de puncionamento utilizada por [1] foi proposta por Hagenauer em 1988 [13], que se baseia na utilização de uma matriz de puncionamento para eliminar os bits ou símbolos na saída do codificador de canal. A técnica de puncionamento feita desta maneira é explicada com mais detalhes no **Capítulo 3**. No entanto, o princípio básico de funcionamento da técnica de puncionamento do codificador de canal e como é realizada a divisão do quadro, pode ser entendido por meio do exemplo apresentado na Figura 2.5. Como pode ser observado, o primeiro segmento do quadro é composto pela palavra código que passou pelo processo de puncionamento, e apesar desta palavra código estar enfraquecida, ela pode ser decodificada. O segundo segmento é composto pela parte da palavra código puncionada, ou seja a parte que foi eliminada, no qual é o segmento utilizado para fazer a cooperação entre os usuários.

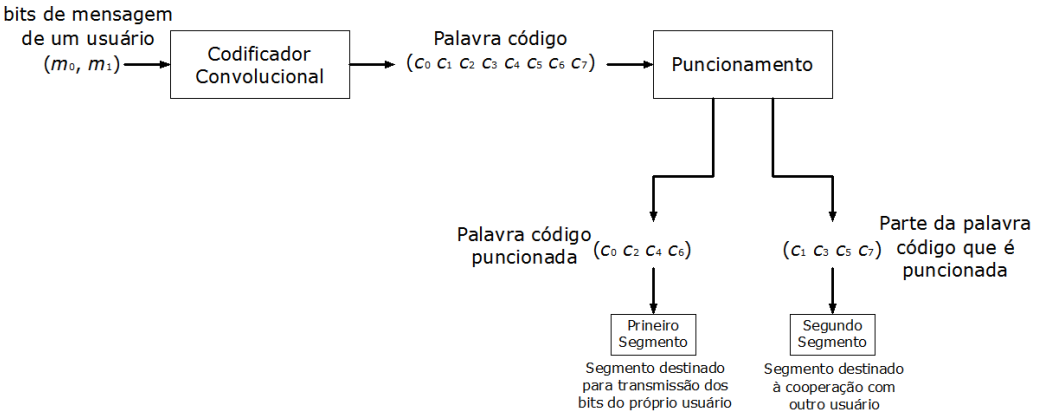
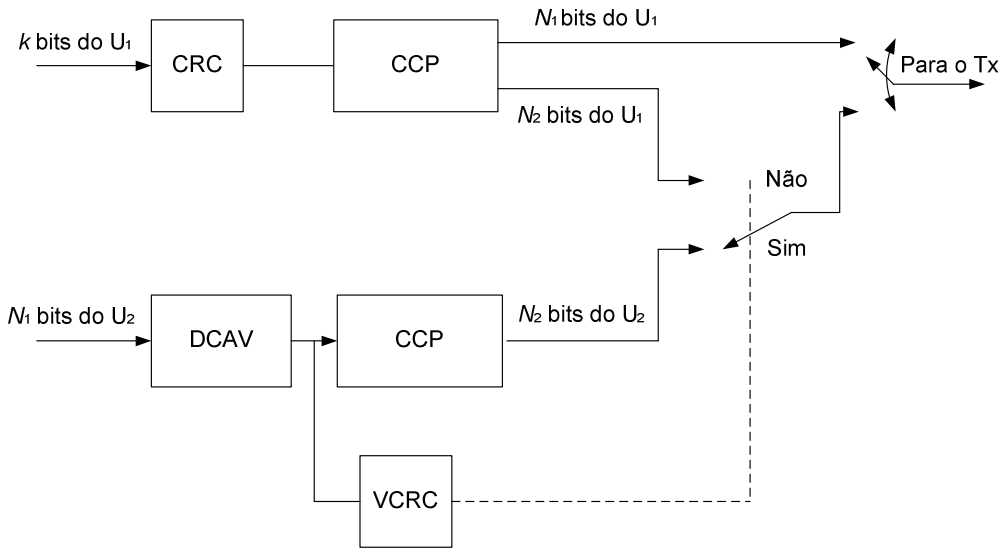


Figura 2.5 – *Exemplo de puncionamento e montagem dos segmentos para um usuário.*

A arquitetura proposta por Hunter & Nosratinia [1], para a codificação cooperativa é ilustrado na Figura 2.6, para o Usuário 1 (U_1), e de acordo com ela, os k bits de informação do U_1 são submetidos a um CRC [14]-[17] (*cyclic redundancy check*), que é um código de detecção de erro, no qual irá inserir bits de redundância aos k bits de informação, e sua utilização tem como objetivo detectar se os k bits de informação estão corretos após a realização da decodificação. Em seguida os bits são codificados por um codificador convolucional com puncionamento (CCP), que irá codificar os bits a uma taxa de codificação total R. Através da técnica de puncionamento do codificador de canal, tem-se a divisão do quadro que será transmitido em dois segmentos N_1 e N_2, (sendo que a quantidade de bits ou símbolos em cada segmento dependerá da capacidade de correção do código utilizado). No primeiro segmento, o U_1 transmite sua própria palavra código puncionada (N_1) com taxa de codificação R_1, que é recebida e pode ser decodificada pelo Usuário 2 (U_2), pois apesar da palavra código transmitida no primeiro segmento estar puncionada, ela é uma palavra código e é decodificável.

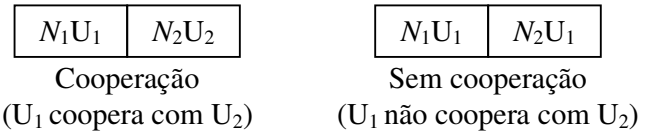


Legenda: CRC – (*cyclic redundancy check*) código de detecção de erro;
CCP - Codificador Convolucional com Puncionamento;
DCAV – Decodificador Convolucional que utiliza o Algoritmo de Viterbi;
VCRC – Verificador do CRC.

Figura 2.6 - *Arquitetura da codificação cooperativa proposto por Hunter & Nosratinia [1], para o Usuário 1.*

Ainda de acordo com a Figura 2.6, paralelamente ao processo de geração dos segmentos com os N_1 e N_2 bits do U_1, o próprio U_1 recebe o quadro transmitido pelo Usuário 2 (U_2) e realiza a decodificação, no entanto a decodificação é feita apenas considerando o primeiro segmento do quadro, ou seja, os N_1 bits do U_2. O resultado desta decodificação é submetido a um verificador do código CRC (VCRC), a fim de se verificar se a decodificação realizada pelo decodificador convolucional está correta ou não. Simultaneamente à verificação do CRC, os bits decodificados, são também recodificados pelo codificador convolucional com puncionamento (CCP), para gerar a parte da palavra código correspondente ao segundo segmento do U2, os N_2 bits, que não foram inicialmente transmitidos por ele, no qual poderá ser utilizado pelo U_1 caso haja cooperação, de modo semelhante ao mostrado na Figura 2.6. Se a verificação do CRC detectar que a decodificação realizada pelo U_1 está correta, então o U_1 irá cooperar com o U_2 e os N_2 bits do U_2 são transmitidos no segundo segmento do U_1, transmitindo redundância incremental para o U_2. Caso contrário, o U_1 transmite o restante da sua própria palavra código no seu segundo segmento.

Evidentemente, a palavra código para a formação dos segmentos foi gerada a partir da informação do U_1 previamente acrescida de bits de redundância pelo CRC, que foram omitidos aqui. A explicação de como ocorre a cooperação entre os usuários na técnica da codificação cooperativa, utilizando como base a arquitetura do Usuário 1, foi feita por pura conveniência, pois ocorrerá da mesma maneira para o Usuário 2. A caracterização dos quadros com cooperação e sem cooperação pode ser vista na Figura 2.7.



Cooperação (U_1 coopera com U_2)

Sem cooperação (U_1 não coopera com U_2)

Figura 2.7 - *Caracterização da cooperação e não-cooperação.*

Note que os quadros transmitidos pelos usuários sempre terão o mesmo comprimento, pois não importa se os usuários estão transmitindo em seu segundo segmento o restante da sua própria palavra código ou a redundância incremental do usuário com o qual se está cooperando. Desta maneira a taxa de codificação será sempre a mesma, havendo ou não cooperação. Além da arquitetura proposta em [1], o codificador de canal empregado na codificação cooperativa pode utilizar além do codificador convolucional, codificadores de bloco, ou outros tipos de codificadores de canal ou uma combinação deles.

É importante evidenciar que o mecanismo fundamental da codificação cooperativa consiste no fato de que, quando um usuário transmite seu sinal, este pode alcançar outro(s) usuário(s) próximo(s) a ele que são candidatos potenciais à cooperação. O processo de cooperação aumenta a robustez do sinal dos usuários, pela formação de um arranjo virtual de antenas, conforme já mencionado anteriormente. Este aumento da robustez do sinal é observado em relação ao ganho que o sistema pode ter com a ajuda do outro usuário para transmitir o seu sinal, permitindo a obtenção de um aumento no desempenho do sistema com cooperação em relação ao sistema sem cooperação.

Note que independentemente do tipo de codificador de canal utilizado no processo de cooperação, a estrutura do codificador é caracterizada por permanecer sem alteração, mantendo sempre o mesmo comprimento total do quadro, formado pela palavra código dos usuários, havendo ou não cooperação, e dessa maneira se conserva a mesma taxa de codificação total do sistema *R*, com e sem cooperação. Como consequência, na avaliação de desempenho do sistema, pode-se comparar de forma justa um sistema com cooperação com um sistema sem cooperação.

A abordagem principal desta dissertação é a de promover uma comparação de desempenho entre algoritmos que utilizam o método da codificação cooperativa. O primeiro destes algoritmos é apresentado nos trabalhos de [1]-[4], e é denominado aqui de Modelo 1. O outro algoritmo, apresentado em [5], é denominado de Modelo 2.

Como contribuição adicional, será mostrada a comparação de desempenho dos dois algoritmos mencionados acima com um terceiro algoritmo, denominado de Modelo 3.

Os três algoritmos abordados neste trabalho serão descritos detalhadamente no **Capítulo 3**.

A Figura 2.8 mostra a estrutura básica da codificação cooperativa para todos os algoritmos de cooperação, considerando a comunicação entre dois usuários e uma ERB. Todos os algoritmos estudados aqui possuem as mesmas estruturas em seus quadros, com relação tanto a transmissão realizada pelos usuários, quanto à recepção realizada pelos usuários e pela ERB. A diferença entre eles está na forma de como é feita a cooperação pelos usuários.

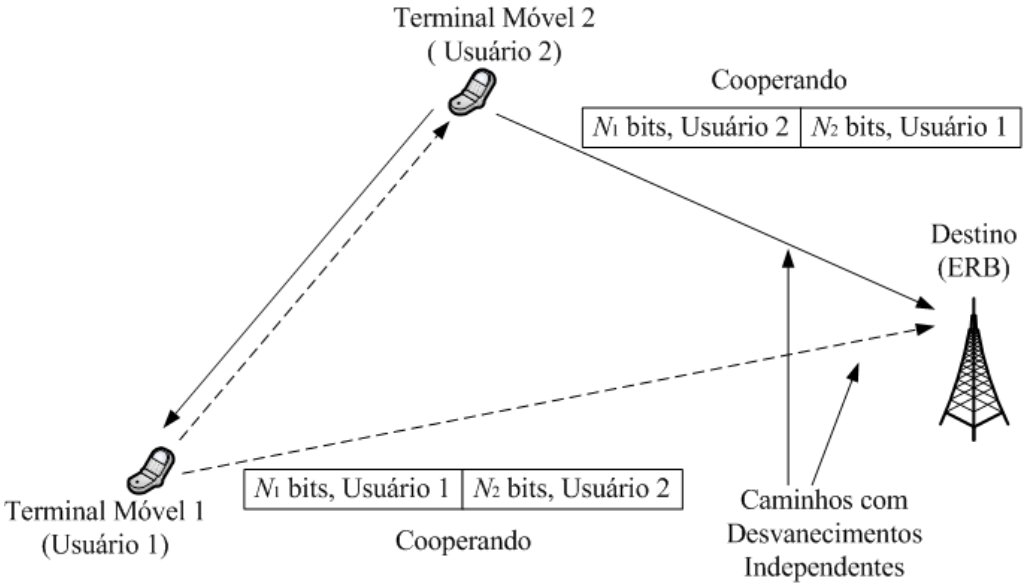


Figura 2.8 - *Técnica da cooperação através da codificação de canal.*

2.2.3.1 Transmissão dos usuários através da divisão no tempo

A Figura 2.9 e a Figura 2.10 apresentam com mais detalhes como é realizada a codificação cooperativa entre dois usuários (Usuário 1 e Usuário 2) e a ERB, operando por meio da divisão de tempo, com base na proposta do algoritmo de Hunter & Nosratinia [1] (Modelo1). No entanto, as duas figuras também são a base para o entendimento da realização da codificação cooperativa na proposta dos algoritmos do Modelo 2 e do Modelo 3.

Em qualquer instante da comunicação o quadro transmitido, formado pela palavra código dos usuários, sempre terá o tamanho de $n = N_1 + N_2$ bits. Os instantes de tempos demonstrados através de t_i nas figuras são os tempos no qual o quadro é transmitido e recebido pelos usuários e pela ERB, pois quando um usuário transmite seu sinal este é recebido tanto pelo outro usuário como também pela ERB naquele mesmo instante.

Os esquemas mostrados pelas Figuras 2.9 e 2.10 apresentam algumas situações possíveis que podem ocorrer na cooperação entre os dois usuários.

De acordo com a Figura 2.9, a caracterização da cooperação e não cooperação por meio da divisão do tempo, do ponto de vista dos usuários, ocorre conforme descrito a seguir:

- Durante o intervalo de tempo (t_0-t_1), o U_1 transmite em *broadcast* os seus próprios bits tanto no primeiro como no segundo segmento (N_1U_1 e N_2U_1), o que caracteriza uma situação de não cooperação. Neste intervalo de tempo nenhum outro terminal transmite. O outro usuário (U_2) apenas irá receber o quadro do U_1. O U_2 então realiza a decodificação do primeiro segmento do U_1 corretamente e o U_2 coopera com o U_1.
- No intervalo de tempo (t_1-t_2), que é o intervalo destinado à transmissão do sinal do U_2, o U_2 transmite no seu primeiro segmento os seus próprios N_1 bits, e como está cooperando, transmite a redundância incremental para o U_1 no seu segundo segmento, que foi gerada a partir da decodificação realizada corretamente do primeiro segmento recebido do U_1 no intervalo (t_0-t_1), transmitindo um quadro formado por (N_1U_2 e N_2U_1). Ainda de acordo com o intervalo de tempo (t_1-t_2), o U_1 recebe o quadro do U_2 e realiza a decodificação do primeiro segmento do U_2 corretamente, cooperando com o U_2.
- No intervalo de tempo (t_2-t_3), o U_1 volta a transmitir seu sinal e envia em seu primeiro segmento os seus próprios N_1 bits e no seu segundo segmento a redundância incremental para o U_2, que foi obtida a partir da decodificação realizada corretamente do primeiro segmento recebido do U_2 no intervalo (t_1-t_2), transmitindo um quadro formado por (N_1U_1 e N_2U_2). Ainda no intervalo (t_2-t_3), o U_2 não realiza a decodificação do primeiro segmento recebido do U_1 corretamente, e não irá cooperar com o U_1.
- Finalmente, no intervalo tempo (t_3-t_4), U_2 transmite os seus próprios N_1 e N_2 bits no primeiro e segundo segmento do seu quadro, respectivamente, transmitindo um quadro formado por (N_1U_2 e N_2U_2), pois a decodificação feita pelo U_2 no intervalo (t_2-t_3) do primeiro segmento

recebido do U_1 não foi realizada corretamente, impedindo que a cooperação pudesse ter sido concretizada.

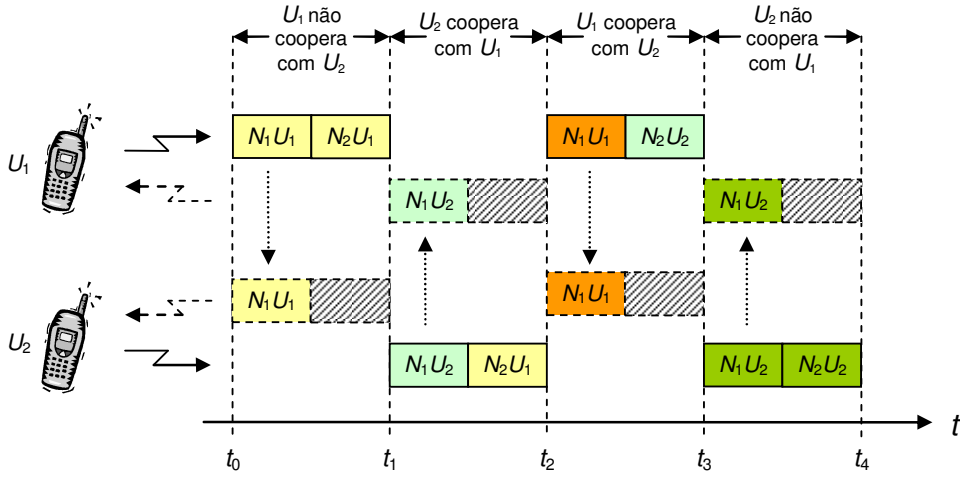


Figura 2.9 - *Caracterização da cooperação e não cooperação por divisão do tempo (ponto de vista dos usuários).*

A Figura 2.10 ilustra como a ERB recebe os quadros dos usuários e do que dispõe para realizar a decodificação, para as mesmas situações apresentadas na Figura 2.9.

Para que a decodificação possa ser realizada pela ERB, ela irá esperar até receber os quadros transmitidos pelos dois usuários, que irão levar dois intervalos de tempo, como pode ser visto pela Figura 2.9 e 2.10. Após receber os quadros transmitidos pelos dois usuários, a ERB então fará as combinações dos segmentos referentes aos quadros recebidos, para que a decodificação possa ser realizada completamente. Nota-se, que a espera realizada pela ERB até receber os quadros transmitidos pelos dois usuários, é necessária, pois os usuários transmitem seus quadros em instantes de tempos distintos, e caso um usuário esteja cooperando com o outro, ele irá apenas transmitir a redundância incremental do outro usuário, no instante estabelecido para a transmissão do seu quadro.

- Durante o intervalo de tempo (t_0-t_1) a ERB recebe o quadro sem cooperação do U_1 e no intervalo de tempo (t_1-t_2) a ERB recebe o quadro com cooperação do U_2. Neste caso a ERB tem o primeiro segmento do

U_1 e dois segundos segmentos idênticos do U_1, um enviado diretamente pelo U_1 e o outro enviado por cooperação pelo U_2. Assim, a ERB terá a sua disposição para realizar a decodificação do quadro correspondente ao U_1, redundância incremental em diversidade (N_1U_1 e $2\times N_2U_1$). Este é o melhor caso possível para decodificação de um usuário.

- No intervalo de tempo (t_1-t_2) a ERB recebe do U_2 um quadro formado pelos seus próprios N_1 bits e os N_2 bits do U_1, que foram utilizados para realizar a decodificação do quadro do U_1 nos intervalos (t_0-t_1-t_2). No intervalo de tempo (t_2-t_3) a ERB recebe do U_1 o seu quadro com cooperação, isto é, os N_1 bits do próprio U_1 e os N_2 bits do U_2. Desta forma, para a decodificação do quadro do U_2, a ERB dispõe dos N_1 bits enviados diretamente pelo U_2 no intervalo (t_1-t_2) e dos N_2 bits de redundância incremental, resultantes da cooperação realizada pelo U_1 no intervalo (t_2-t_3), resultando no quadro (N_1U_2 e N_2U_2). Neste caso não há redundância incremental em diversidade, apenas a recepção dos dois segmentos do U_2 através de dois caminhos diferentes.
- No decorrer do intervalo de tempo (t_2-t_3) a ERB recebeu do U_1 um quadro formado pelos seus próprios N_1 bits e pelos N_2 bits do U_2, enviados como cooperação no intervalo, e que foram utilizados para realizar a decodificação do quadro do U_2 nos intervalos (t_1-t_2-t_3). No intervalo de tempo (t_3-t_4) a ERB recebe do U_2 os seus próprios N_1 e N_2 bits. Como o U_1 cooperou com U_2 no intervalo (t_2-t_3), mas o U_2 não cooperou com U_1 no intervalo (t_3-t_4), a ERB terá a sua disposição para realizar a decodificação do U_1, apenas do primeiro segmento do U_1 enviado pelo próprio U_1 no intervalo (t_2-t_3), resultando no quadro formado apenas pelos (N_1U_1). Este é o pior caso possível para a decodificação de um usuário, realizada pela ERB.
- Durante os intervalos de tempo (t_3-t_4-t_5) a ERB recebe um quadro sem cooperação do U_1, ou seja, formado pelos seus próprios N_1 e N_2 bits enviados no intervalo (t_3-t_4), e um quadro sem cooperação do U_2, também contendo os seus próprios N_1 e N_2 bits enviados no intervalo (t_4-t_5). Dessa forma, para a ERB realizar a decodificação do quadro do

U_2, a ERB dispõe do primeiro e do segundo segmento do U_2 enviados pelo próprio U_2 no intervalo (t_3-t_4).

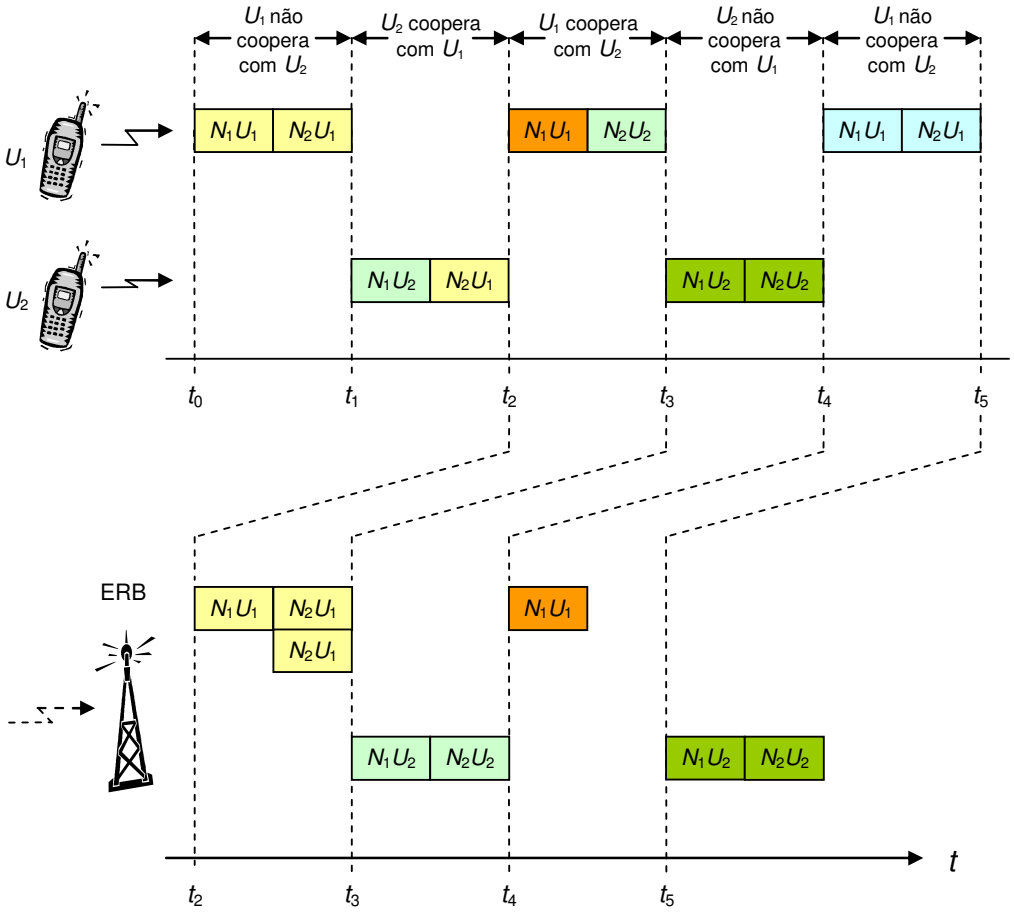


Figura 2.10 - *Montagem dos quadros recebidos pela ERB para a realização da decodificação.*

O quadro efetivo recebido tanto pelo Usuário 1 como pelo Usuário 2, pode ser entendido mais facilmente através da Figura 2.11. Nota-se, que os N_2 bits que compõem o quadro da palavra código recebida pelos usuários, denotado pelo segmento N_2U_X, não são considerados para fins da decodificação, pois como pode ser visto na Figura 2.9, caso o usuário esteja cooperando, os N_2 bits do seu quadro naquele instante não correspondem ao restante da sua própria palavra código, pois o usuário estará transmitindo a redundância incremental para o outro usuário. Dessa forma, o quadro considerado pelos usuários é formado apenas pelos N_1 bits que

compõem o quadro transmitido, no qual é a palavra código puncionada, e que pode ser decodificada pelos usuários. Quando o quadro chega aos usuários, os N_2 bits são considerados pelo decodificador como bits apagados. Evidentemente, a capacidade de correção de erro do primeiro segmento é menor do que seria se os dois segmentos originados pelo mesmo codificador fossem utilizados.

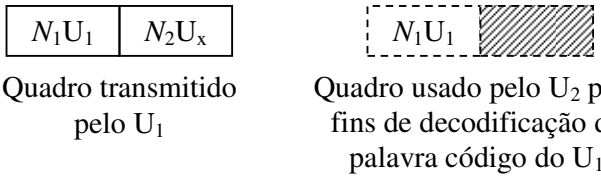


Figura 2.11 - *Quadro efetivo utilizado para fins da decodificação realizada por parte do usuário cooperador.*

2.2.3.2 Taxa de cooperação

Na codificação cooperativa define-se a taxa de cooperação entre os usuários como sendo

$$R_{co}(\%) = \frac{N_2}{n} \cdot 100 \tag{2.1}$$

A taxa de cooperação quantifica a porcentagem de bits ou símbolos que um usuário irá transportar de outro usuário (N_2) em relação ao total de bits ou símbolos transmitidos por palavra código (n). Em outras palavras, a taxa de cooperação define o grau de cooperação de um usuário com outro. A taxa de cooperação afeta diretamente a capacidade de correção de erros da palavra código, composta pelos N_1 bits ou símbolos, e também o ganho de cooperação do sistema. Quanto maior for a palavra código N_1 em relação à n, maior será sua capacidade de correção, porém, isso resultará em um menor ganho de cooperação pelo fato de que a quantidade de redundância incremental correspondente à N_2 será proporcionalmente menor. Para a maximização do ganho do sistema, esta relação depende das relações sinal-ruído envolvidas. Por exemplo, quando o canal entre usuários possui alta relação sinal-

ruído não há necessidade de uma grande capacidade de correção de erro no primeiro segmento. Sendo assim, se o segundo segmento transportar mais redundância incremental, o ganho obtido com a cooperação será maior.

2.2.3.3 Métodos de decodificação que podem ser realizadas pelo destino

Como a ERB não tem o conhecimento de quando os usuários estão ou não cooperando, pode ser inserido um bit ou símbolo a mais no quadro transmitido por cada usuário para sinalizar se está ou não havendo cooperação na transmissão do quadro. Isso facilita e simplifica o processo de combinação e decodificação, por parte da ERB, dos quadros recebidos dos usuários.

A decodificação dos quadros recebidos pela ERB também pode ser feita sem o conhecimento do *status* da cooperação, ou seja, se os usuários estão cooperando ou não, de tal maneira que os dois segmentos que compõem os quadros que são recebidos pela ERB são combinados e decodificados de todas as formas possíveis. Neste caso, o resultado da decodificação que for verificado pelo CRC e detectado como a melhor decodificação realizada, ou seja, a mais correta é o resultado dado como válido, e é levado em conta na determinação do desempenho final do sistema. A realização da decodificação desta maneira, porém, irá ocasionar um aumento de processamento e de complexidade no processo de decodificação pela ERB.

No próximo capítulo serão descritos os mecanismos de cooperação e as principais características dos algoritmos utilizados para comparação do método da codificação cooperativa.

CAPÍTULO 3

Descrições dos Algoritmos Utilizados para Codificação Cooperativa

Neste capítulo serão descritos alguns algoritmos, suas principais características e diferenças no que diz respeito ao processo de decisão para a cooperação ou não-cooperação na técnica da codificação cooperativa. Os algoritmos descritos contemplam um modelo composto por dois terminais móveis (usuários) e uma ERB.

3.1 Modelo 1 - Algoritmo proposto por Hunter & Nosratinia [1]

O Modelo 1 foi o primeiro algoritmo utilizado no técnica da codificação cooperativa, proposto em 2002 por Hunter & Nosratinia [1]. Este algoritmo foi proposto consistindo de um esquema de codificação composto por um código de detecção de erro (CRC) em cascata com um codificador convolucional, cuja saída é submetida à técnica de puncionamento. O puncionamento utilizado no Modelo 1 é realizado por meio de uma matriz de puncionamento, de forma a ser possível obter taxas codificação variáveis, de acordo com a configuração da matriz utilizada e dessa maneira, pode ser realizada a divisão do quadro transmitido, no qual é formado pela palavra código dos usuários em dois segmentos. Este esquema de codificação convolucional é conhecido como RCPC (*rate-compatible punctured convolutional*) e foi proposto por Hagenauer em 1988 [13]. A Figura 3.1 ilustra um exemplo de um RCPC onde a taxa de codificação foi modificada de 4/8 para 4/5 através da matriz de puncionamento $a(1)$, apresentada abaixo, no qual irá puncionar as saídas do codificador convolucional periodicamente através de um período $P = 4$.

$$a(1) = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{P}.$$

É importante notar que a palavra código puncionada, cuja taxa de codificação é R = 4/5, constitui o primeiro segmento do quadro que será transmitido, os N_1 bits, e pode ser decodificável por meio do algoritmo de Viterbi sobre a mesma treliça do codificador convolucional com taxa R = 4/8. Conforme mostrado na Figura 3.2, isso pode ser feito puncionando-se a treliça que representa o codificador com taxa R = 4/8 nos mesmos bits excluídos pelo puncionamento.

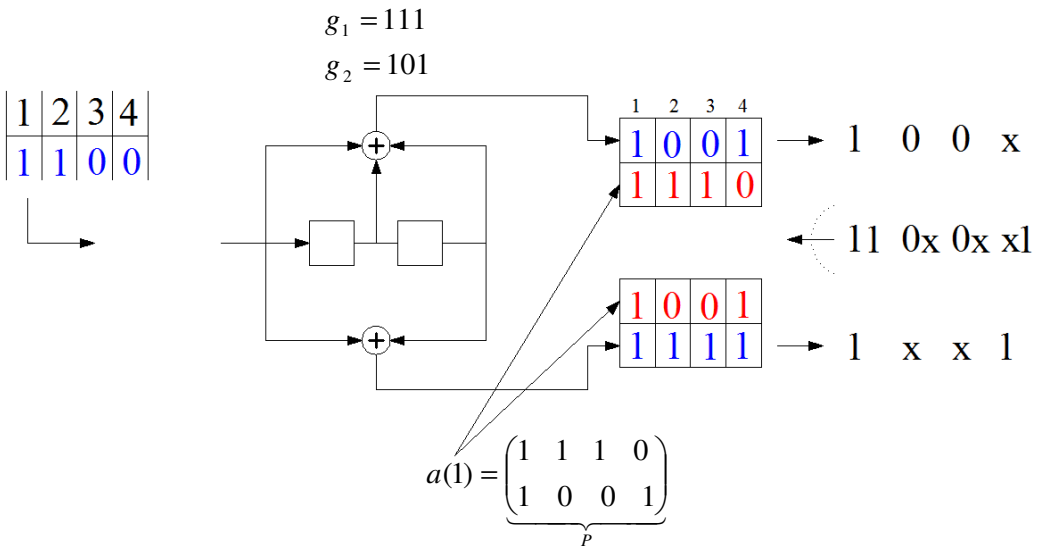


Figura 3.1 – *Exemplo de puncionamento usado no Modelo 1 (RCPC) [13].*

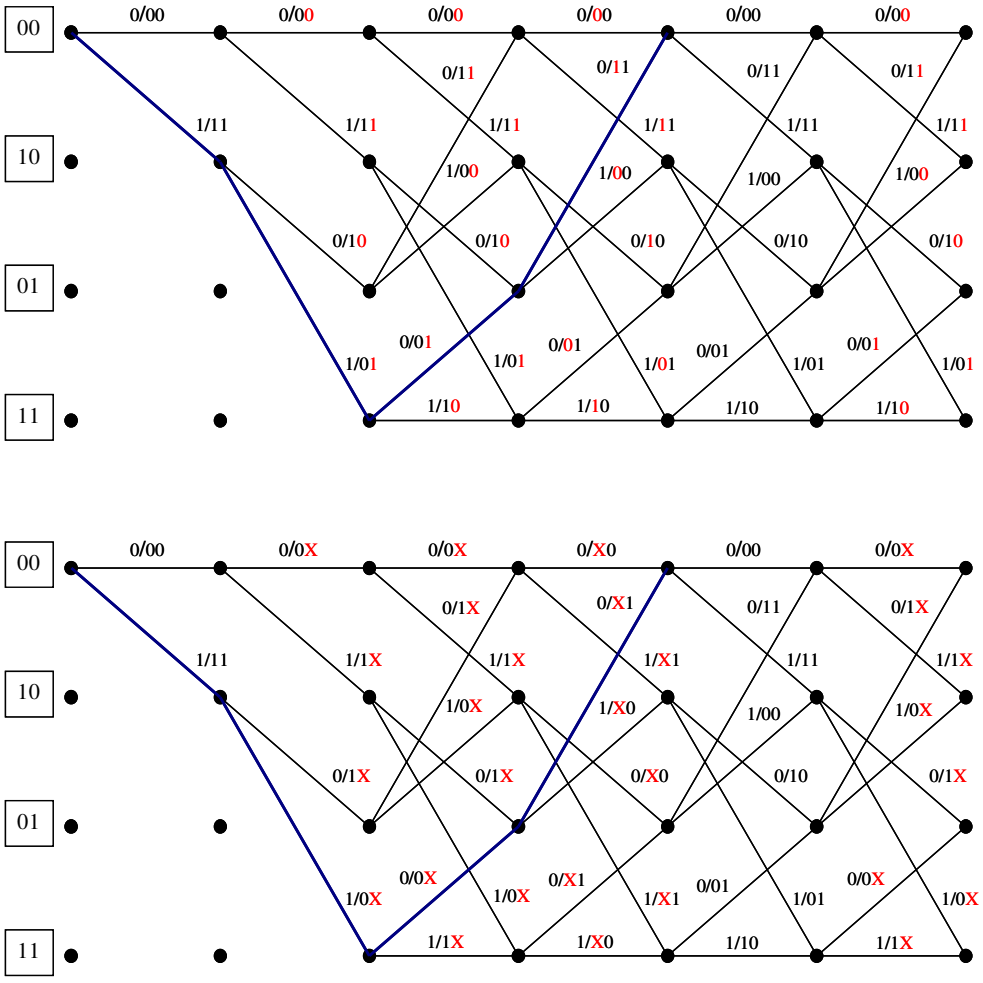


Figura 3.2 – *Exemplo de decodificação para o RCPC da Figura 3.1.*

No caso da estrutura proposta em [1], a taxa de codificação do codificador convolucional é de 1/4 e após ser submetido à técnica de puncionamento, feita por meio da utilização da matriz de puncionamento, a taxa de codificação da palavra código puncionada passa a ser de 1/2. Os N_1 bits do primeiro segmento são os bits que compõem a palavra código puncionada e os N_2 bits, que constituem o segundo segmento são os bits que foram puncionados e compõem a redundância incremental, conforme mostrado na Figura 3.3.

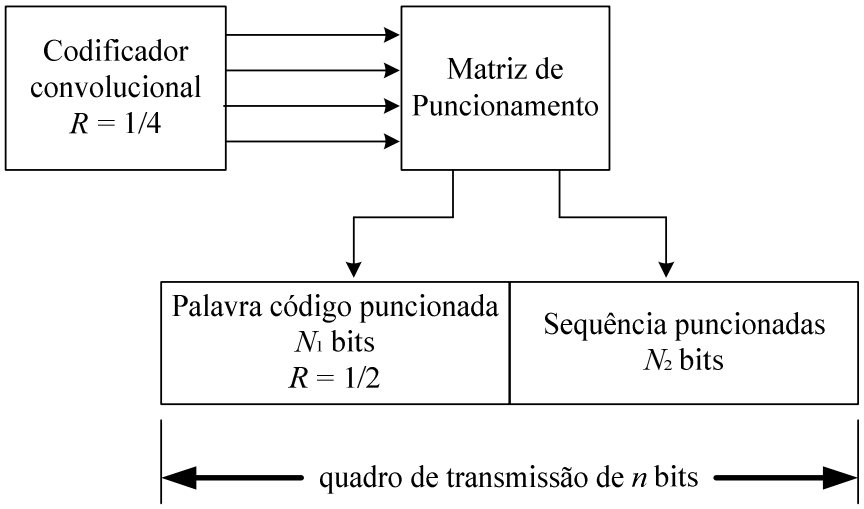


Figura 3.3 – *Formação dos segmentos para o esquema de cooperação do Modelo 1.*

No algoritmo do Modelo 1, os usuários recebem o quadro transmitido pelo outro usuário e tentam decodificá-lo. Qualquer usuário que consiga decodificar corretamente o primeiro segmento do outro usuário poderá recuperar a informação do outro usuário. A informação recuperada do outro usuário será recodificada para recuperar os bits do código que não foram originalmente transmitidos por ele, ou seja, os N_2 bits que foram puncionados. Estes símbolos são transmitidos no segundo segmento do quadro do usuário e a cooperação é estabelecida. Se qualquer um dos usuários não conseguir decodificar corretamente a sequência de N_1 bits recebidos do outro usuário, ele irá enviar seus próprios N_2 bits codificados no segundo segmento do seu quadro transmitido, o que caracteriza uma situação de não cooperação.

Os usuários irão cooperar ou não automaticamente. Portanto, os usuários atuam independentemente no segundo segmento do seu quadro a ser transmitido, sem terem o conhecimento se o outro usuário cooperou ou não.

A Figura 3.4 apresenta o fluxograma do algoritmo de cooperação do Modelo 1.

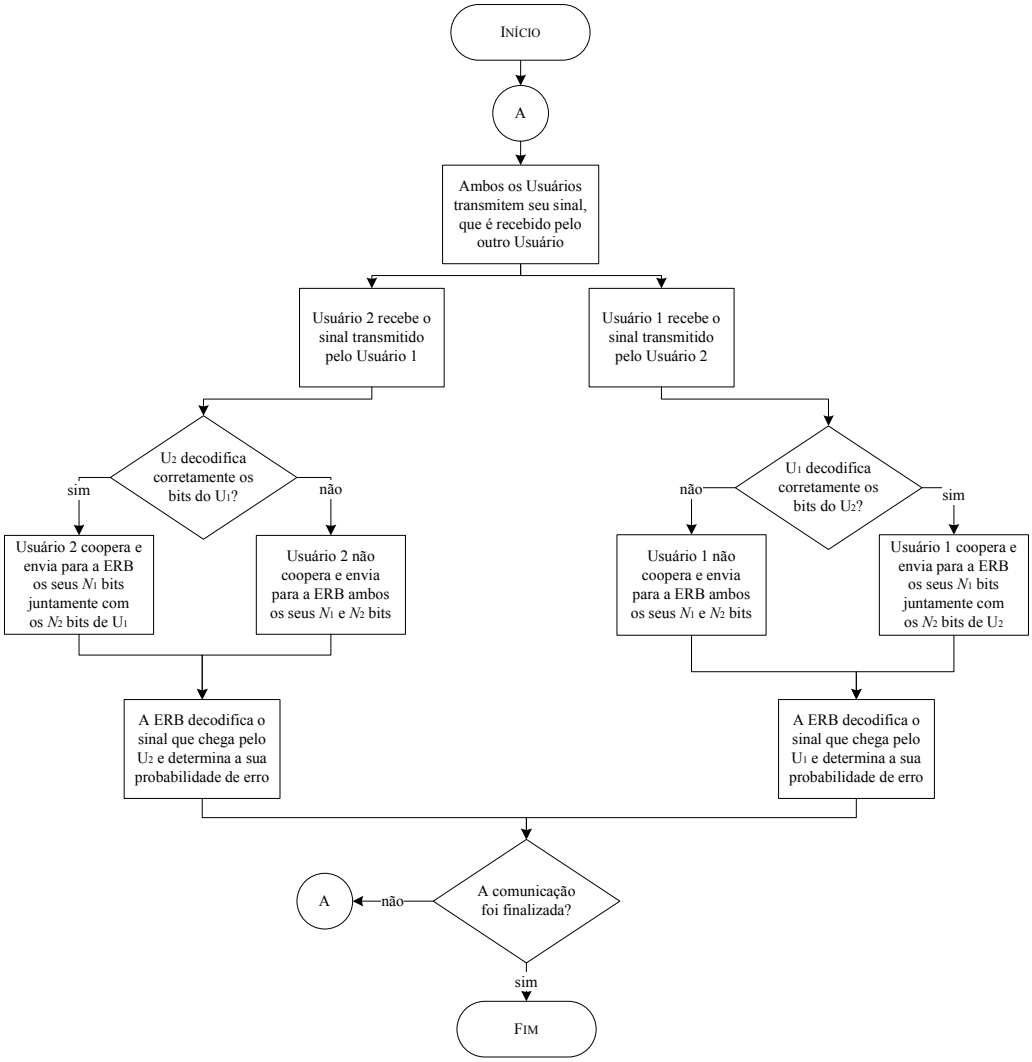


Figura 3.4 - *Fluxograma das características do algoritmo do Modelo 1.*

3.2 Modelo 2 - Algoritmo proposto por Stefanov & Erkip [5]

O algoritmo denominado de Modelo 2, foi proposto em 2004 por Stefanov & Erkip [5], e apresenta um mecanismo de cooperação que difere do algoritmo do Modelo 1. Existem basicamente duas diferenças entre os Modelos 1 e 2: o processo de puncionamento do código convolucional, que não está propriamente associado ao algoritmo e sim ao processo de codificação, e o processo de decisão da cooperação ou não cooperação.

Apesar dos processos de puncionamentos dos codificadores convolucionais utilizados nos dois modelos serem diferentes, o objetivo deles tem o mesmo princípio, que é o de alcançar outras taxas de codificação sem alterar a estrutura do codificador de canal. Desta maneira os resultados obtidos através do processo de puncionamento, nos dois modelos, podem ser semelhantes, se forem utilizados os mesmos parâmetros nos sistemas dos dois modelos. No entanto a técnica de puncionamento utilizada no Modelo 2, para alcançar outras taxas de codificação, e com isso criar os dois segmentos no quadro a ser transmitido, se dá por meio da eliminação de saídas do codificador convolucional. Conforme mostrado na Figura 3.5, o primeiro segmento é formado pelos bits de duas das quatro saídas existentes no codificador convolucional de taxa $R = 1/4$, resultando, em uma palavra código puncionada com taxa $R = 1/2$. O segundo segmento é composto pelos bits das saídas que foram excluídas para obter a palavra código puncionada, que compõe o primeiro segmento, constituindo desta forma, na redundância incremental para o primeiro segmento. A decodificação do quadro formado pela palavra código completa, pode ser feita aplicando-se o algoritmo de Viterbi sobre a treliça com taxa $R = 1/4$. A decodificação apenas do primeiro segmento, ou seja, da palavra código puncionada, pode ser feita com a mesma treliça do código com taxa $R = 1/4$ modificada para $R = 1/2$, pela eliminação adequada dos dois bits de saída atribuídos a cada transição.

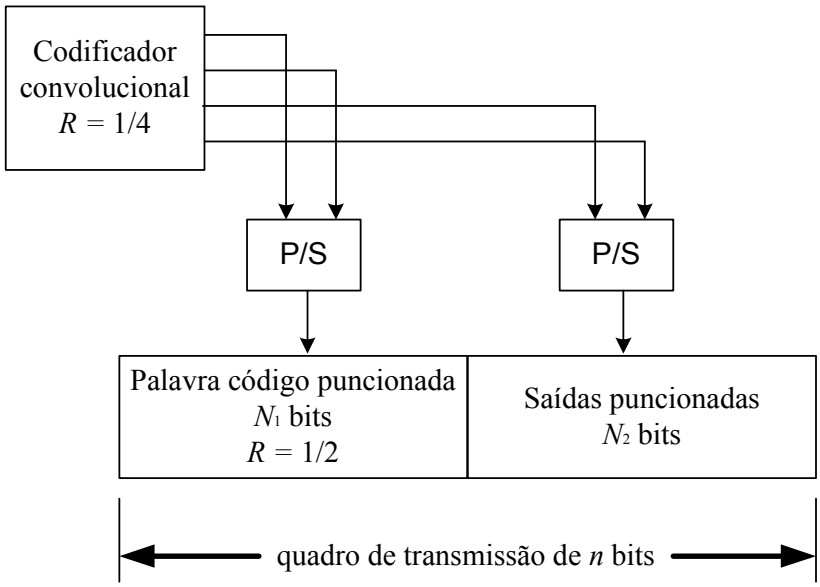


Figura 3.5 – *Esquema utilizado para o puncionamento do codificador convolucional do Modelo 2.*

No Modelo 2, ao contrário do Modelo 1, cada usuário possui o conhecimento sobre a atual situação da decodificação feita pelo outro usuário, ou seja, se a decodificação foi realizada corretamente ou não. O conhecimento é obtido pelos usuários através do envio de um bit ou símbolo de sinalização de um usuário para o outro. Portanto, a cooperação não ocorre de forma independente pelos usuários, como no Modelo 1, pois cada usuário irá depender do conhecimento com relação a decodificação realizada sobre o seu quadro transmitido, para cooperar ou não com o outro usuário.

Cada um dos dois usuários que fazem parte da comunicação, (Usuário 1 e Usuário 2), recebem o quadro transmitido pelo outro usuário e tentarão decodificar corretamente a palavra código puncionada, no qual constituem o primeiro segmento do quadro, os N_1 bits. Após a realização de tal decodificação, cada usuário irá informar ao outro, por meio do envio do bit ou símbolo de sinalização, se a decodificação foi realizada corretamente ou não. Os dois usuários também irão analisar o bit ou símbolo de sinalização recebido por eles, para terem o conhecimento se o outro usuário realizou ou não a decodificação da sua palavra código puncionada corretamente.

A cooperação entre os usuários ocorre apenas caso ambos os usuários decodifiquem corretamente a palavra código puncionada do outro usuário, os N_1 bits. Com isso, ambos os usuários irão utilizar a informação recuperada pela decodificação realizada corretamente, para recodificá-la a fim de que cada um dos dois usuários possa gerar o segundo segmento do outro usuário, os N_2 bits. Desta forma cada usuário irá transmitir a redundância incremental para o outro e uma cooperação mútua é estabelecida. Caso um dos dois usuários, por exemplo, o Usuário 1, não realize corretamente a decodificação da palavra código puncionada, os N_1 bits, que compõe o quadro do Usuário 2, o Usuário 1 irá passar para uma situação de não cooperação, informar o Usuário 2, e transmitir o seu quadro formado pela sua palavra código, ou seja, os seus próprios N_1 e N_2 bits. Com isso, o Usuário 2, por sua vez, também não irá cooperar, mesmo que ele tenha realizado corretamente a decodificação da palavra código puncionada do Usuário 1, e também irá transmitir seu quadro formado pela sua palavra código, seus próprios N_1 e N_2 bits.

Em resumo, no algoritmo do Modelo 2 diferentemente do algoritmo do Modelo 1 os usuários sempre terão o seu quadro completo formado pela sua palavra código, os seus N_1 e N_2 bits para ser decodificado pela ERB, no qual o seu segundo segmento pode ter sido transmitido pelo próprio usuário, caso um dos dois usuários não coopere, ou pode ter sido transmitido por cooperação pelo outro usuário, na forma de redundância incremental. O ganho de diversidade por meio da cooperação no algoritmo do Modelo 2 é obtida através do envio dos seus segmento por caminhos diferentes para a ERB. No Modelo 2 um usuário nunca terá para ser decodificada pela ERB o seu quadro formado apenas pelo seu primeiro segmento, no entanto, também nunca terá dois segundos segmentos, como ocorre com o Modelo 1 conforme pode ser visto na Figura 3.6. A Figura 3.7 mostra o fluxograma do algoritmo de cooperação do Modelo 2.

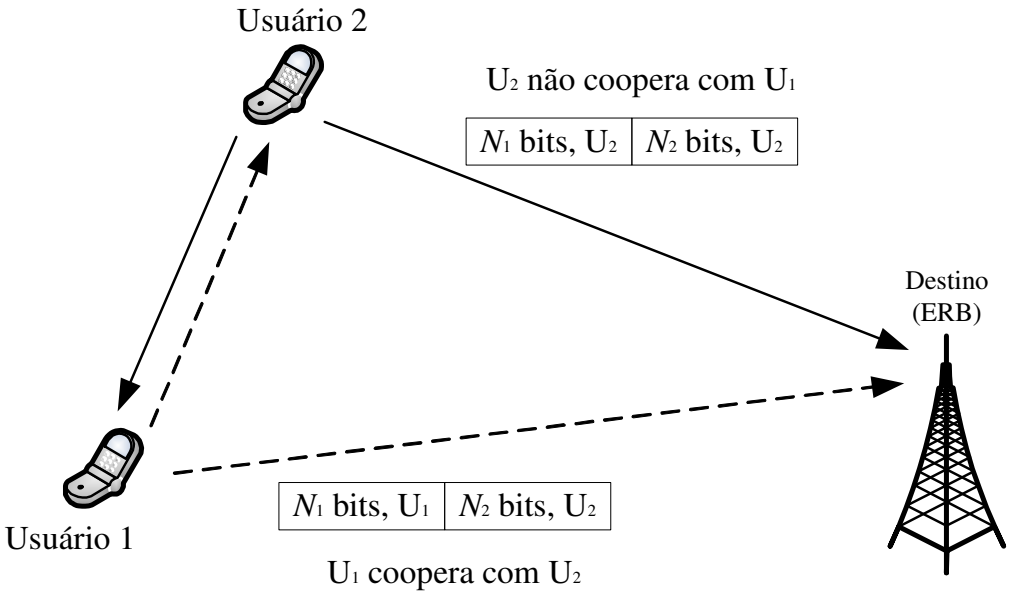


Figura 3.6 – *Possibilidade que pode ocorrer com o algoritmo do Modelo 1 e não ocorre com o algoritmo do Modelo 2.*

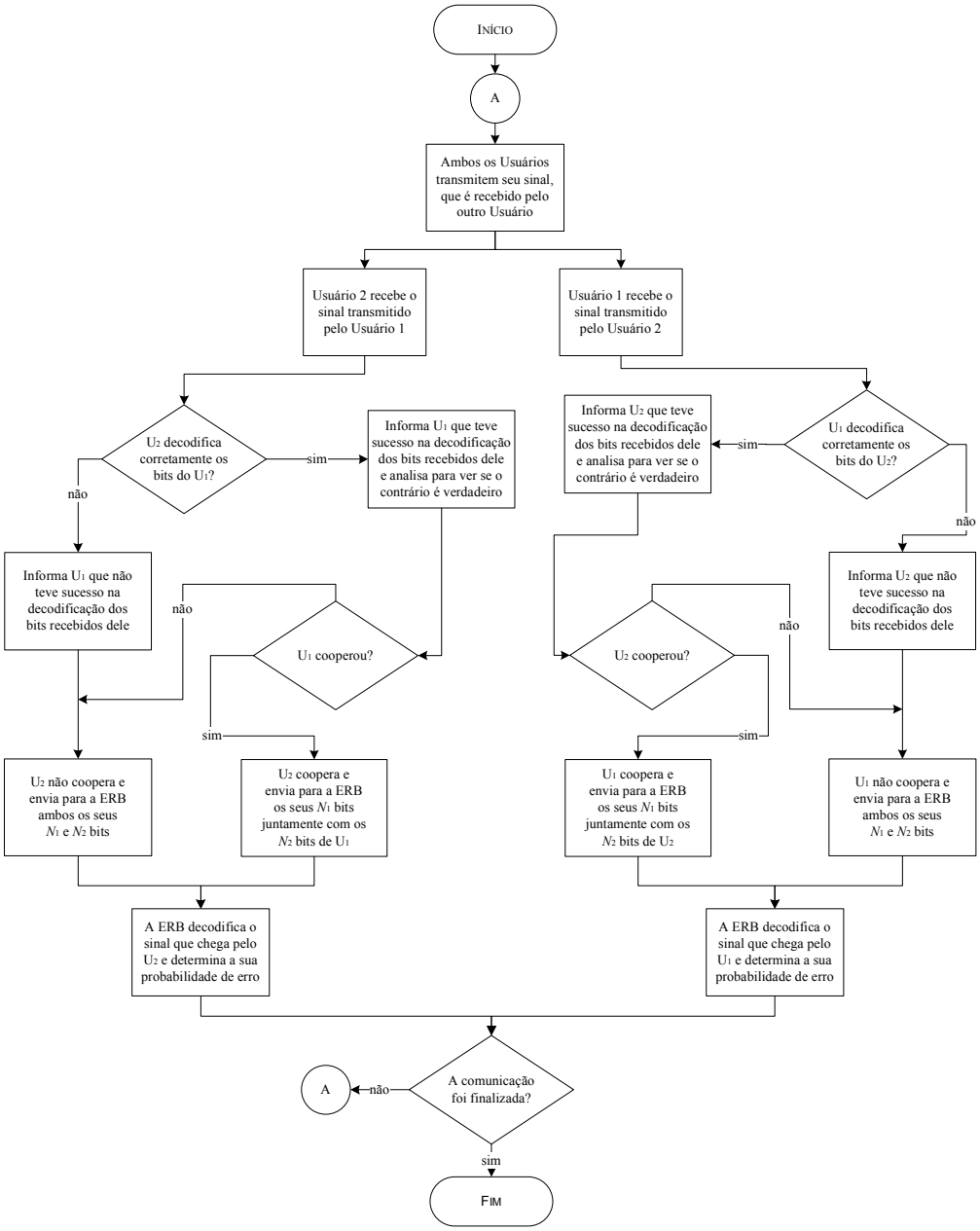


Figura 3.7 - *Fluxograma das características do algoritmo do Modelo 2.*

3.3 Modelo 3 - Algoritmo sugerido neste trabalho

O algoritmo do Modelo 3 é uma combinação dos algoritmos do Modelo 1 e 2. Este algoritmo funciona apenas com um usuário tendo o conhecimento sobre a decodificação dos seus bits ou símbolos pelo outro usuário, ou seja, ele coopera ou não dependendo da informação que receberá do outro usuário, como no Modelo 2. Como apenas um usuário tem o conhecimento sobre a decodificação do outro, o outro usuário irá cooperar independentemente da cooperação do primeiro, isto é, ele irá cooperar ou não automaticamente se decodificar ou não corretamente os bits do primeiro segmento do primeiro usuário, como no Modelo 1. O usuário que tem o privilégio de ter o conhecimento sobre a decodificação do outro usuário é o usuário que tem o melhor *uplink* entre os dois usuários. O conhecimento sobre a decodificação é feita através do envio de um bit ou símbolo de sinalização para o usuário que tem o benefício do conhecimento, pelo outro usuário, da mesma forma que no Modelo 2.

A ERB é quem tem o conhecimento sobre o estado do *uplink* dos usuários e, com isso, sabe qual usuário tem o melhor *uplink*. Cabe então a ERB a coordenação da mudança de privilégio de um usuário para o outro usuário através do envio de um bit ou símbolo de sinalização para os usuários.

Cada um dos dois usuários que faz parte da comunicação tentará decodificar a palavra código puncionada, que compõe o primeiro segmento do quadro transmitido pelo outro usuário, isto é, os N_1 bits ou símbolos. Caso, por exemplo, o Usuário 1 tenha o melhor *uplink*, entre os dois usuários, então ele irá cooperar apenas se decodificar com sucesso os N_1 bits ou símbolos do Usuário 2 e o Usuário 2 também decodificar com sucesso os N_1 bits ou símbolos do Usuário 1. Caso o Usuário 2 não tenha sucesso na decodificação dos bits ou símbolos do Usuário 1, o Usuário 1 não irá cooperar, mesmo que ele tenha decodificado com sucesso os bits ou símbolos do Usuário 2. O Usuário 2 irá cooperar ou não automaticamente se ele decodificar ou não corretamente os bits ou símbolos do Usuário 1 e também sinalizará ao Usuário 1, através de um bit ou símbolo de sinalização se está ou não cooperando.

Como a ERB tem o conhecimento sobre o estado dos *uplinks* dos usuários, caso o estado do melhor *uplink* mude do Usuário 1 para o Usuário 2, os usuários

serão sinalizados e os papéis dos dois usuários será invertido. Com isso o benefício do conhecimento sobre a decodificação mudará do Usuário 1 para o Usuário 2. Portanto, como mencionado anteriormente, o algoritmo do Modelo 3 é uma combinação dos algoritmos dos Modelos 1 e 2, pois o usuário que tem o melhor *uplink* no Modelo 3 trabalha de forma semelhante aos usuários do Modelo 2, isto é, a cooperação ocorrerá de acordo com o conhecimento da decodificação do outro usuário. O outro usuário do Modelo 3, o usuário que tem o pior *uplink*, trabalha de forma semelhante aos usuários do Modelo 1, cooperando independentemente, ou seja, sem ter o conhecimento sobre a decodificação do outro usuário. A Figura 3.8 mostra o fluxograma do algoritmo de cooperação do Modelo 3, tendo como usuário com o melhor *uplink* o Usuário 1.

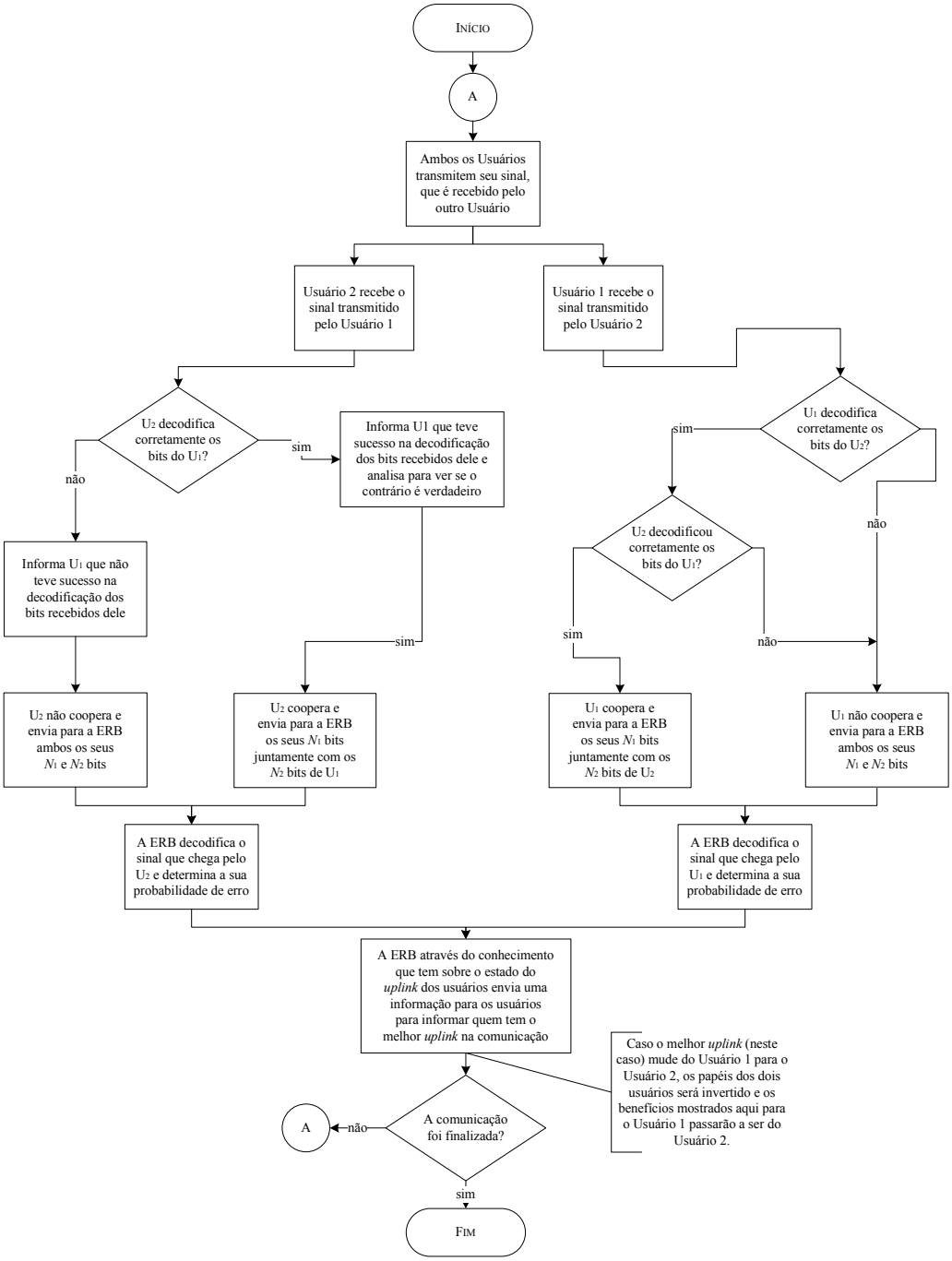


Figura 3.8 - *Fluxograma das características do algoritmo do Modelo 3.*

No próximo capítulo serão descritas as características principais utilizadas para as realizações das comparações dos algoritmos de cooperação descritos neste

capítulo, que serão feitas por meio de simulações computacionais, para alguns cenários escolhidos para serem estudados.

CAPÍTULO 4

Comparações dos Algoritmos

Neste capítulo são descritas as abordagens utilizadas para a realização das simulações para as comparações dos desempenhos dos algoritmos que foram descritos no **Capítulo 3**. Os resultados são mostrados por meio de curvas de desempenhos obtidas por simulações computacionais ambientadas na ferramenta de simulações Simulink® integrada com o programa MATLAB®.

4.1 Descrição dos Elementos Utilizados para a Elaboração das Comparações

Para a realização das comparações dos três algoritmos da codificação cooperativa foi utilizado um codificador de canal *Reed-Solomon* (RS) (n, k) [16]-[18], no qual n = 15 e k = 3, modulação BPSK e canal com desvanecimento *Rayleigh* plano.

O codificador de canal *Reed-Solomon* foi adotado por pura conveniência sem qualquer análise de mérito, com a finalidade de estabelecer uma comparação justa e direta entre os algoritmos dos Modelos 1 e 2 e difere do esquema de cooperação que utiliza códigos *Reed-Solomon* apresentada em [19]. A conveniência desta escolha reside no fato de se poder utilizar apenas um código para a comparação dos algoritmos e que esse código fosse diferente do utilizado nos trabalhos dos Modelos 1 e 2. Outra característica que motivou a utilização dos códigos *Reed-Solomon* foi por eles possuírem a propriedade de apontar a sua própria inabilidade para a correção de padrões de erros não corrigíveis, e desta maneira a utilização de um CRC não é necessário no sistema. Os códigos *Reed-Solomon* são códigos não

binários construídos a partir de um campo finito (campo de *Galois*) GF(2^m). A Tabela 1 mostra as características do código RS (15, 3), no qual $m = 4$.

Tabela 1 - *Características do codificador de canal RS (15,3).*

Comprimento do código em símbolos	$n = 2^m - 1 = 15$
Número de símbolos de mensagem	$k = 2^m - 1 - (2t) = 3$
Número de símbolos de paridade ou redundância	$n - k = 2t = 12$
Distância mínima do código em símbolos	$d_{\min} = n - k + 1 = 13$
Capacidade de correção do código em símbolos	$t = \left\lfloor \frac{d_{\min} - 1}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{n-k}{2} \right\rfloor = 6$
Taxa de Codificação	$R = \frac{k}{n} = \frac{3}{15} = \frac{1}{5}$
Polinômio Primitivo gerador do campo	$p(x) = 1 + X + X^4$
Polinômio gerador do código	$g(x) = X^{12} + \alpha^8 X^{11} + \alpha^{14} X^{10} + \alpha^8 X^9 + \alpha^3 X^8 + X^7 + \alpha^2 X^6 + \alpha^{13} X^5 + \alpha^{14} X^4 + \alpha^2 X^3 + \alpha^6 X^2 + \alpha^{13} X + \alpha^3$

obs: $2^i \equiv$ elementos do campo $GF(2^4)$.

Uma vez que o campo utilizado para a geração do código RS (15, 3) é um campo binário estendido 2^m onde $m = 4$, então o campo é constituído por 16 símbolos, que podem representar palavras binárias de 4 bits.

Com base nos elementos escolhidos neste trabalho para serem feitas as comparações dos algoritmos da codificação cooperativa, e de acordo com as simulações realizadas, o sistema funcionará da seguinte maneira: as fontes localizadas nos usuários irão gerar bits de informação, que de quatro em quatro, são transformados em símbolos para então serem submetidos a codificação de canal. Cada bloco de $k = 3$ símbolos é codificado em palavras código de quinze símbolos ($n = 15$). Assim, a taxa de codificação é $R = 3/15$. A capacidade de correção do código, conforme mostrada na Tabela 1, é de 6 símbolos por palavra

código. A palavra código é então puncionada de forma a se obter a divisão do quadro de transmissão dos usuários em dois segmentos, para realizar a codificação cooperativa. O método de puncionamento utilizado é realizado através da eliminação de alguns símbolos de paridade na saída do codificador *Reed-Solomon*, ou seja, da palavra código. Desta maneira consegue-se obter diferentes taxas de codificação e de cooperação. O primeiro segmento do quadro transmitido é constituído pela palavra código puncionada, no qual contém N_1 símbolos e pode ser decodificável pelo usuário candidato à cooperação. O segundo segmento é composto pelos N_2 símbolos, que foram puncionados, e constitui exclusivamente a redundância incremental.

Para a elaboração das comparações, o primeiro segmento foi escolhido para ter o seu comprimento mínimo limitado em $N_1 = n - (t-1) = 10$ símbolos, para que a palavra código puncionada contida nele tivesse pelo menos a capacidade de correção de um erro. Uma palavra código com uma capacidade de correção menor que esta, teria uma distância mínima não suficiente para correção de um erro, tornando a codificação cooperativa muito frágil, e desta forma a cooperação entre os usuários ficará mais susceptível a uma situação de não cooperação.

Como descrito na **Seção 2.2.3.3** do **Capítulo 2**, podem ser utilizados dois métodos para fazer a decodificação da palavra código recebida pela ERB. Uma das maneiras é enviando um símbolo a mais nas palavras códigos dos usuários para sinalizar se o usuário está ou não cooperando. O outro método é realizado sem a ERB ter o conhecimento se o usuário está ou não cooperando, e isto é feito através da decodificação de todas as combinações possíveis das palavras códigos recebidas pela ERB. No entanto para maior facilidade na realização das simulações para as comparações dos algoritmos, foi utilizado o método no qual se envia um símbolo a mais para sinalizar se os usuários estão ou não cooperando. Com isso o bloco total da palavra código com ou sem cooperação, passa a ser formado por $N = N_1 + N_2 + S = 16$ símbolos, no qual $N_1 + N_2 = n = 15$ símbolos, pelo fato de estar sendo usado o código RS (15, 3). Com isso a taxa de codificação efetiva passa a valer $R = 3/16$ e a de cooperação $R_{co}(\%) = \left[(N_2/16)\cdot 100\right]$. A Figura 4.1 mostra o quadro da palavra código transmitida com a inserção do símbolo de sinalização. Apesar de poder utilizar apenas um bit para sinalizar o estado de cooperação de cada usuário para a ERB, a escolha por utilizar 4 bits, foi pela conveniência de estar

trabalhando com o código *Reed-Solomon* (15, 3), no qual cada símbolo deste código representa 4 bits, e também por oferecer mais proteção a sinalização que irá passar através de um canal até ser recebido pela ERB.

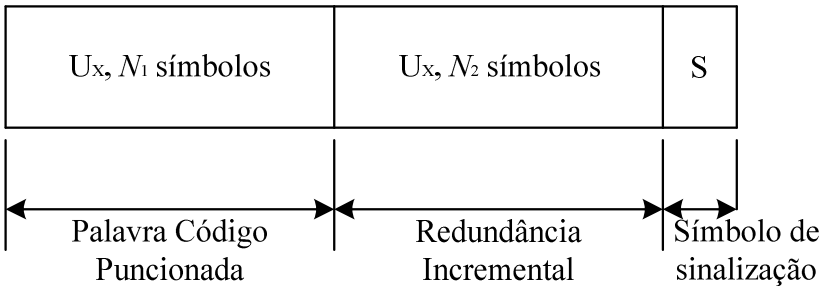


Figura 4.1 - *Esquema de cooperação com a inserção do símbolo de sinalização aos quadros transmitidos.*

Com a adição do símbolo de sinalização no quadro transmitido pelos usuários, para facilitar o processo de decodificação realizado pela ERB, os desempenhos dos esquemas de codificação cooperativa irão apresentar uma inferioridade de desempenho de aproximadamente 0,28 dB, em relação ao sistema que utiliza a decodificação pela "força bruta", pois a taxa de codificação, ao se tornar menor, por meio da alteração de $R = 3/15$ para $R = 3/16$, produz um discreto desvio para a direita das curvas de desempenho. Porém, como a mudança da taxa de codificação é a mesma para os três algoritmos comparados, todos terão seus desempenhos afetados igualmente, o que não irá influenciar na comparação dos resultados de desempenhos finais dos algoritmos.

Para as comparações dos algoritmos, foram utilizados três diferentes taxas de cooperação. Essas diferentes taxas de cooperação implicam em diferentes tamanhos nos segmentos utilizados no quadro de transmissão, formado pela palavra código, e com isso, produzem diferentes capacidades de correções de erros da palavra código puncionada, que é composta pelo segmento com N_1 símbolos. Os esquemas de codificação utilizados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - *Características das palavras códigos com as diferentes taxas de cooperação utilizadas para comparação dos algoritmos.*

PRIMEIRO SEGMENTO DA PALAVRA CÓDIGO TRANSMITIDA (N_1)	SEGUNDO SEGMENTO DA PALAVRA CÓDIGO TRANSMITIDA (N_2)	TAXA DE COOPERAÇÃO $R_{co}(\%)[(N_2/N)\cdot 100]$ N = 16	PALAVRA CÓDIGO PUNCIONADA (N_1)	CAPACIDADE DE CORREÇÃO DA PALAVRA CÓDIGO (N_1)
10	5	31,25%	(10, 3)	1
11	4	25%	(11, 3)	2
12	3	18,75%	(12, 3)	3

A Figura 4.2 apresenta as estruturas e as características dos quadros compostos pelas três palavras códigos puncionadas utilizadas nas simulações para fazer as comparações dos algoritmos.

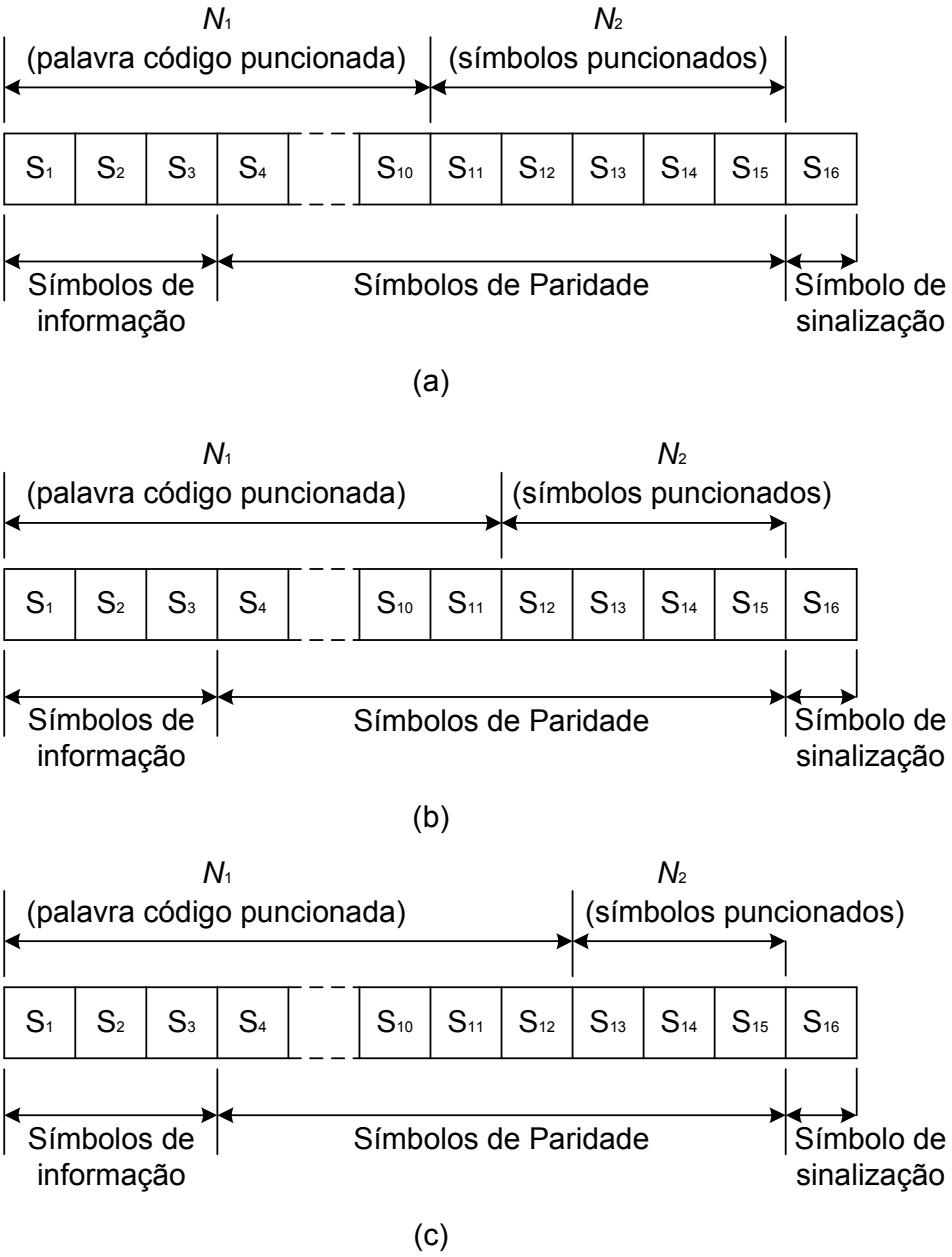


Figura 4.2 - *Estruturas das palavras código puncionadas, que serão utilizadas nas comparações dos algoritmos: (a) código RS (10, 3); (b) código RS (11, 3); (c) código RS (12, 3).*

4.2 Abordagens Realizadas para Comparação dos Resultados

Os resultados das comparações das simulações computacionais são apresentados na forma de curvas da taxa de erro de bit (BER) como função da relação entre energia do bit e a densidade espectral de potência do ruído (E_b/N_0), obtidos por simulações computacionais ambientadas no Simulink® integradas com o programa MATLAB®.

Vale ressaltar que com o uso do código *Reed-Solomon* não é necessário a utilização de um código de verificação de paridade (CRC) para verificar quando a decodificação não foi realizada corretamente. No caso em que o número de erros excede a capacidade de correção do código *Reed-Solomon*, não é possível determinar as posições dos erros e com isso se estabelece que a decodificação não foi realizada corretamente.

Para cada conjunto de resultados de desempenho os cenários das simulações foram caracterizados pelos seguintes parâmetros:

- Relação sinal-ruído para os *uplinks* dos usuários,
- Taxas de codificação apresentados na Tabela 2;
- Relação sinal-ruído do canal entre usuários.

Para todos os cenários de simulação, os canais entre usuários foram considerados recíprocos, ou seja, o estado do canal entre usuários é o mesmo tanto do Usuário 1 para o Usuário 2, quanto do Usuário 2 para o Usuário 1 e valem $E_b/N_0 = 10\,\text{dB}$ ou $E_b/N_0 = 20\,\text{dB}$ ou canal entre usuários perfeito. Quando o canal entre usuários é considerado perfeito, todos os modelos apresentam desempenhos iguais, pois apesar dos algoritmos de cooperação entre os três Modelos serem diferentes os canais entre usuários não irão afetar os quadros transmitidas pelos usuários e eles sempre irão cooperar.

Os resultados das curvas de desempenhos das simulações, apresentados nas figuras, para todos os modelos e cenários comparados, representam os desempenhos do Usuário 2.

4.3 Resultados dos Desempenhos das Simulações para Cada Cenário Estudado

4.3.1 Cenário 1

O conjunto de parâmetros que caracterizam as simulações do primeiro cenário é relacionado abaixo e apresentados na Figura 4.3.

- *Uplink* (Usuário 1): E_b/N_0 = 20 dB (fixo);
- *Uplink* (Usuário 2): E_b/N_0 = 0 a 20 dB (variável);
- Canal entre usuários: E_b/N_0 = 10 dB, E_b/N_0 = 20 dB e canal entre usuários perfeito;
- Taxa de Cooperação: 31,25%.

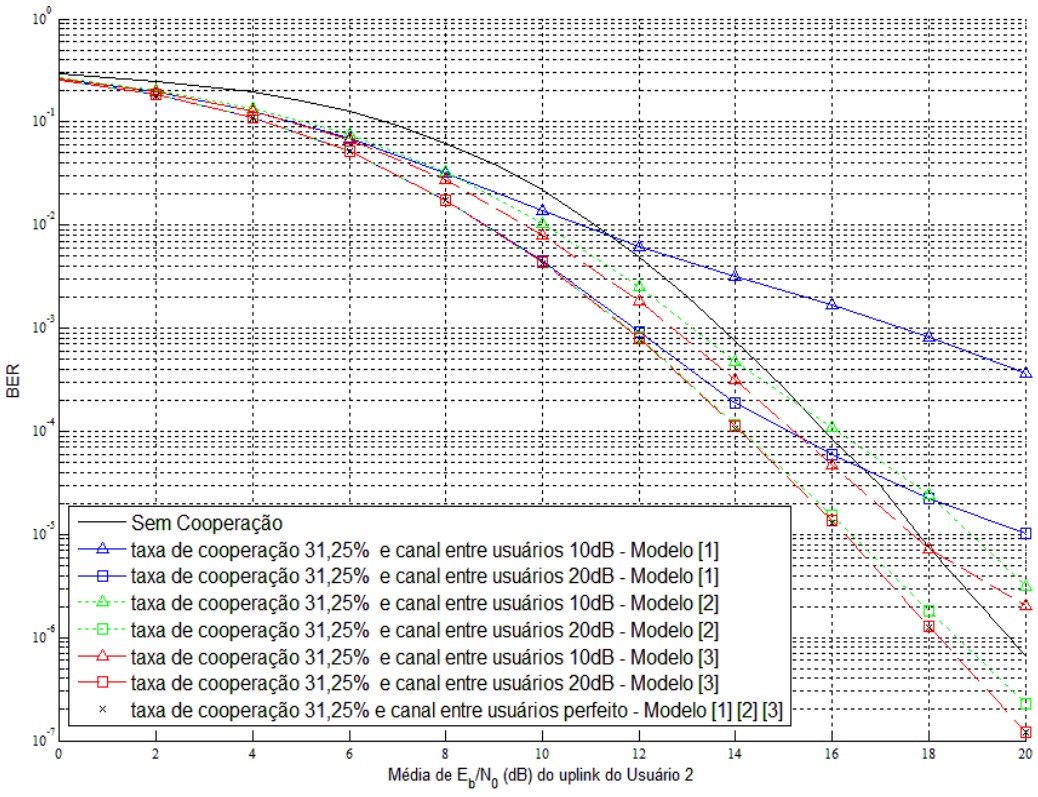


Figura 4.3 - *Gráfico das curvas de desempenho do Usuário 2, para os Modelos 1, 2 e 3 com taxa de cooperação de 31,25%; uplink (Usuário 1) E_b/N_0 = 20 dB (fixo).*

Neste cenário, como pode ser notado pela Figura 4.3, para as curvas de desempenho de todos os modelos, para canal entre usuários de $E_b/N_0 = 10\,\text{dB}$ a cooperação não se mostrou eficaz, pois seus resultados de desempenho não foram superiores ao do sistema sem cooperação, para toda a faixa de E_b/N_0 (dB), no qual o Modelo 3 começou a apresentar um desempenho inferior, em relação ao sistema sem cooperação, a partir da faixa de 18 dB, o Modelo 2 a partir da faixa de 15,3 dB e Modelo 1 a partir da faixa de 11,4 dB. Ainda de acordo com o canal entre usuários de $E_b/N_0 = 10\,\text{dB}$, pode ser constatado, que o Modelo 3 obteve o melhor resultado de desempenho em relação aos três modelos, e esse ganho apresentado foi de aproximadamente 6 dB em comparação com o Modelo 1 e de aproximadamente 0,6 dB em comparação com o Modelo 2.

Para canal entre usuários de $E_b/N_0 = 20\,\text{dB}$, com relação ao resultado de desempenho do Modelo 1, pode ser observado que ele não obteve um desempenho superior ao do sistema sem cooperação, para toda faixa de E_b/N_0 (dB), apresentando a partir da faixa de 16,6 dB um resultado desempenho inferior. Ainda com relação ao Modelo 1, para canal entre usuários de $E_b/N_0 = 20\,\text{dB}$, nota-se também que o seu resultado de desempenho foi inferior aos dos Modelos 2 e 3 para canal entre usuários de $E_b/N_0 = 10\,\text{dB}$, no qual isto pode ser observado a partir da faixa de 18,1 dB em relação ao Modelo 2 e a partir da faixa de 15,4 dB em relação ao Modelo 3. Com relação aos Modelos 2 e 3 para canal entre usuários de $E_b/N_0 = 20\,\text{dB}$, já se pode observar um ganho de desempenho em relação ao do sistema sem cooperação para toda faixa de E_b/N_0 (dB). Pode também ser notado que o Modelo 3 apresentou um resultado de desempenho igual ao dos modelos utilizando canal entre usuários perfeito, e é superior ao resultado de desempenho apresentado pelo Modelo 2 em 0,5 dB.

4.3.2 Cenário 2

Para a elaboração das simulações que resultaram nas curvas de desempenho do segundo cenário, que são mostrados na Figura 4.4, foram consideradas as seguintes características.

- *Uplink* (Usuário 1): E_b/N_0 = *Uplink* (Usuário 2) + 5 dB (variável);
- *Uplink* (Usuário 2): E_b/N_0 = 0 a 20 dB (variável);
- Canal entre usuários: E_b/N_0 = 10 dB, E_b/N_0 = 20 dB e canal entre usuários perfeito;
- Taxa de Cooperação: 31,25%.

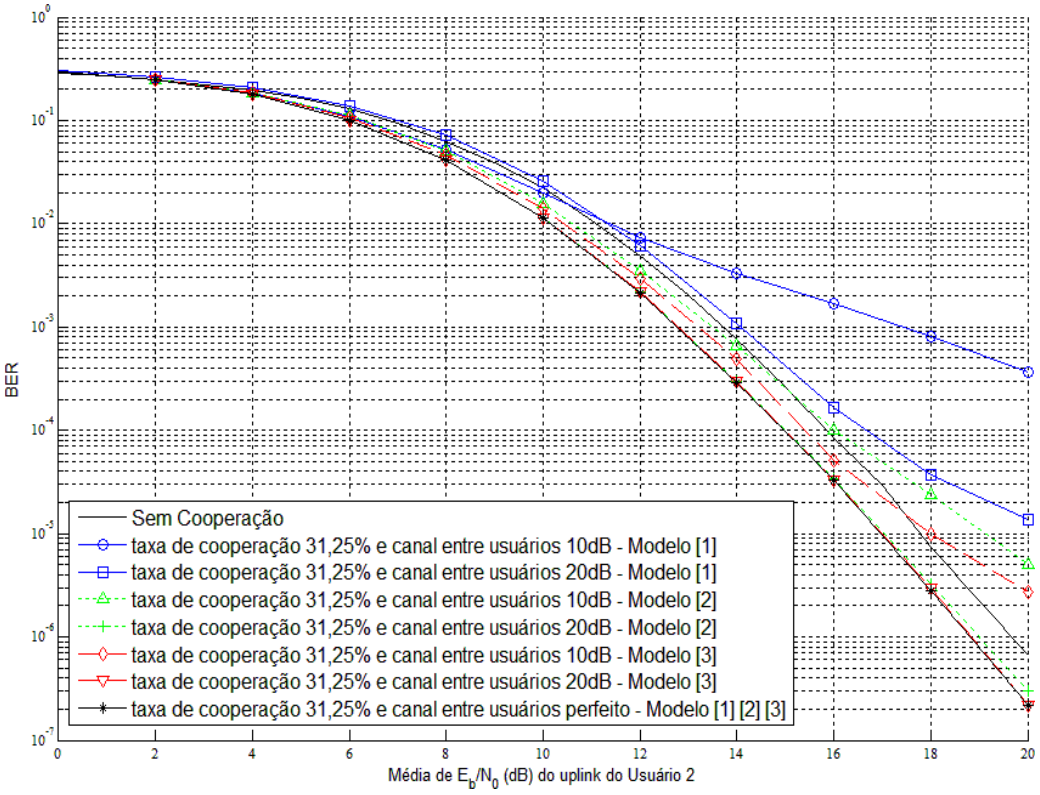


Figura 4.4 - *Gráfico das curvas de desempenho do Usuário 2, para os Modelos 1, 2 e 3 com taxa de cooperação de 31,25%; uplink (Usuário 1) E_b/N_0 = uplink (Usuário 2) + 5 dB (variável).*

Nota-se na Figura 4.4 que as curvas de desempenho para o segundo cenário mostram resultados similares as curvas de desempenho exibidos no primeiro cenário (Figura 4.3), para os três Modelos. Como o primeiro cenário tem o *uplink* do Usuário 1 fixo, observa-se que as curvas de desempenhos para todos os Modelos e, para todos os valores de canal entre usuários, o segundo cenário tem um desempenho um pouco inferior. No entanto, estas diferenças entre os dois cenários são menores que 1 dB. Como o segundo cenário exibe desempenhos semelhantes ao do cenário anterior, o Modelo 3 também apresenta o melhor resultado de desempenho dos três modelos. Para $E_b/N_0 = 20\,\text{dB}$, o desempenho do Modelo 3 é igual ao desempenho dos modelos utilizando canal entre usuários perfeito, mas a relação entre o desempenho do Modelo 2 é de apenas 0,2 dB, e dessa maneira também pode ser notado uma diminuição entre a relação que apresentavam no cenário anterior.

4.3.3 Cenário 3

Para a elaboração das simulações que resultaram nas curvas de desempenho do terceiro cenário, que são mostradas na Figura 4.5, foram considerados os seguintes valores:

- *Uplink* (Usuário 1): E_b/N_0 = 20 dB (fixo);
- *Uplink* (Usuário 2): E_b/N_0 = 0 a 20 dB (variável);
- Canal entre usuários: E_b/N_0 = 10 dB, E_b/N_0 = 20 dB e canal entre usuários perfeito;
- Taxa de Cooperação: 25%.

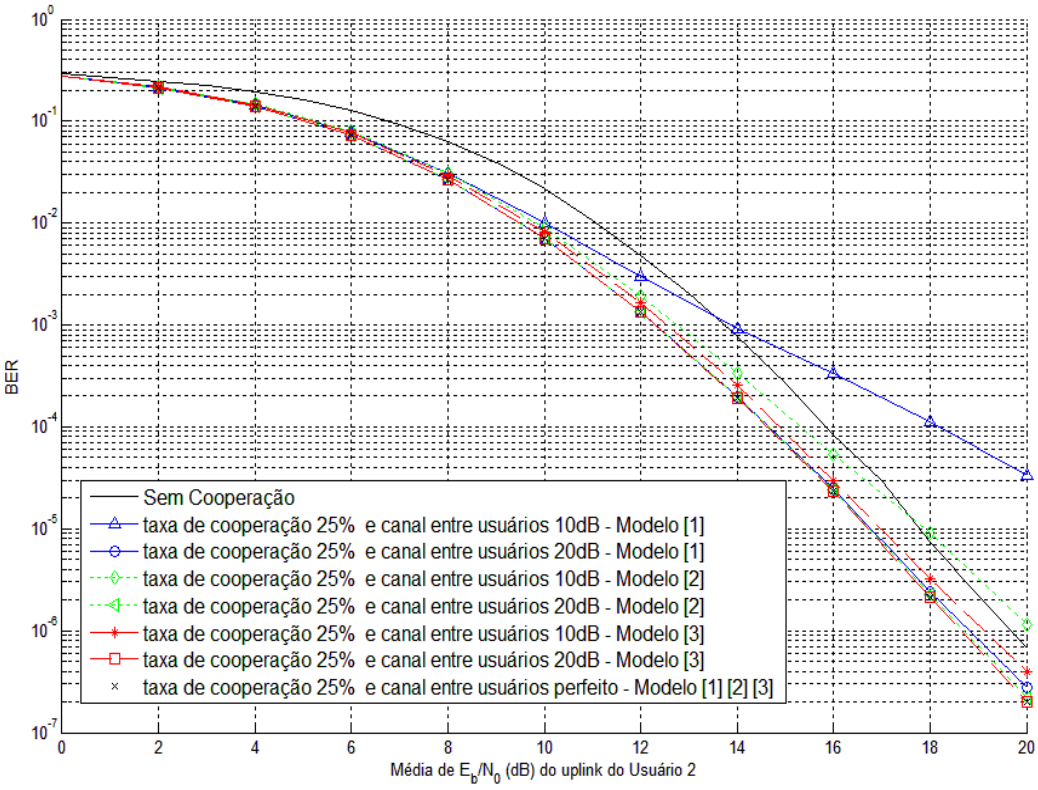


Figura 4.5 - *Gráfico das curvas de desempenho do Usuário 2, para os Modelos 1, 2 e 3 com taxa de cooperação de 25%; uplink (Usuário 1) E_b/N_0 =*20 dB *(fixo).*

Para o cenário da Figura 4.5, considerando o canal entre usuários de $E_b/N_0 = 10\,\text{dB}$ os três modelos apresentaram resultados de desempenho melhores, com relação aos cenários anteriores. Estes ganhos de desempenho apresentados pelos Modelos 1, 2 e 3 em relação aos cenários anteriores foram de 4,35 dB, 1 dB e 1,5 dB, respectivamente. Pode ser observado também para o canal entre usuários de $E_b/N_0 = 10\,\text{dB}$, que o Modelo 3, obteve um resultado de desempenho superior ao do sistema sem cooperação para toda faixa de E_b/N_0 (dB) e seu desempenho apresentado também foi melhor do que os desempenhos dos Modelos 1 e 2 em 4 dB e 1 dB, respectivamente. Ainda de acordo com o canal entre usuários de $E_b/N_0 = 10\,\text{dB}$, os resultados de desempenho dos Modelos 1 e 2 não foram superiores ao do sistema sem cooperação para toda a faixa de E_b/N_0 (dB), no qual os Modelos 1 começou a apresentar um desempenho inferior, em relação ao sistema

sem cooperação, a partir da faixa de 13,51 dB, e o Modelo 2 a partir da faixa de 17,55 dB e o Modelo 2 em comparação com o Modelo 1, obteve um resultado de desempenho superior de 3 dB

Para o canal entre usuários de $E_b/N_0 = 20\,\text{dB}$ os três modelos apresentaram um ganho de desempenho em relação ao do sistema sem cooperação para toda faixa de E_b/N_0 (dB). No entanto, em relação aos seus desempenhos nos cenários anteriores o Modelos 3 apresentou uma inferioridade de aproximadamente 0,4 dB, enquanto o Modelo 2 apresentou um desempenho semelhante e o Modelo 1 obteve um ganho de desempenho de 3,2 dB. Ainda com relação ao canal entre usuários de $E_b/N_0 = 20\,\text{dB}$, como nos cenários anteriores, o Modelo 3 também se igualou aos desempenhos dos modelos utilizando canal entre usuários perfeito, porém sua diferença em relação ao Modelo 2 foi superior em apenas 0,1 dB, mas essa diferença é tão pequena que não pode ser notada analisando o gráfico sem uma ampliação. Já o Modelo 1 em comparação com os Modelos 2 e 3, para o canal entre usuários de $E_b/N_0 = 20\,\text{dB}$, ainda apresenta um desempenho inferior, como nos cenários anteriores de aproximadamente 0,2 dB e 0,3 dB, respectivamente.

4.3.4 Cenário 4

Para a elaboração das simulações que resultaram nas curvas de desempenho do quarto cenário, que são mostrados na Figura 4.6, foram consideradas as seguintes características:

- *Uplink* (Usuário 1): E_b/N_0 = 20 dB (fixo);
- *Uplink* (Usuário 2): E_b/N_0 = 0 a 20 dB (variável);
- Canal entre usuários: E_b/N_0 = 10 dB, E_b/N_0 = 20 dB e canal entre usuários perfeito;
- Taxa de Cooperação: 18,75%.

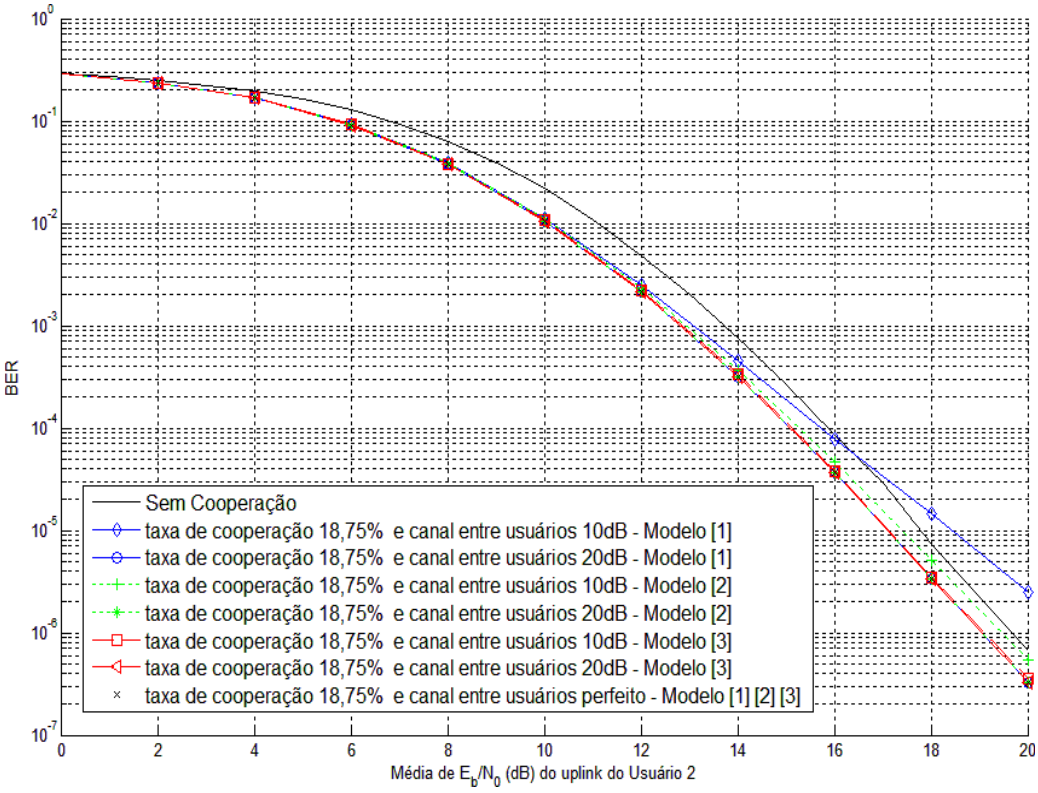


Figura 4.6 - *Gráfico das curvas de desempenho do Usuário 2, para os Modelos 1, 2 e 3 com taxa de cooperação de 18,75%; uplink (Usuário 1) E_b/N_0 =20 dB (fixo).*

Para os desempenhos do quarto cenário, que são mostrados na Figura 4.6, nota-se que, quando o canal entre usuários utilizado é de $E_b/N_0 = 10\,\text{dB}$, e em comparação com o cenário anterior, os Modelos 1 e 2 apresentaram uma evolução em seus resultados de desempenho, enquanto o Modelo 3 apresentou um resultado de desempenho semelhante. O ganho de desempenho apresentado pelo Modelo 1 em relação ao cenário anterior, foi de aproximadamente 3 dB, e o apresentado pelo Modelo 2 foi de aproximadamente 0,7 dB. Contudo, também pode ser observado, que os Modelos 2 e 3 obtiveram desempenhos superiores em relação ao sistema sem cooperação, no qual este ganho, foi de aproximadamente 0,2 dB para o Modelo 2 e de 0,5 dB para o Modelo 3. Apesar do Modelo 1 ter apresentado um ganho de desempenho em relação aos cenários anteriores, para canal entre usuários de $E_b/N_0 = 10\,\text{dB}$, ele não obteve um desempenho superior ao do sistema sem

cooperação para toda faixa de E_b/N_0 (dB), no qual ele começou a apresentar um desempenho inferior em relação ao do sistema sem cooperação a partir da faixa de 16,35 dB.

Quando o canal entre usuários utilizado é de $E_b/N_0 = 20\,\text{dB}$, os três modelos apresentam os mesmos resultados de desempenho, e também se igualaram ao desempenho dos modelos utilizando canal entre usuários perfeito. No entanto, ainda de acordo com o canal entre usuários de $E_b/N_0 = 20\,\text{dB}$, pode ser observado que os Modelos 2 e 3 obtiveram desempenhos inferiores comparados com os do cenário anterior, constatando que para o Modelo 2 esta inferioridade foi de 0,35 dB e para o Modelo 3 foi de aproximadamente 0,45 dB. Já o Modelo 1, para o canal entre usuários de $E_b/N_0 = 20\,\text{dB}$, apresentou o mesmo desempenho que aquele obtido por ele no cenário anterior.

Em resumo, pode ser notado por meio dos resultados de desempenho obtidos, considerando os três modelos e todos os cenários estudados, que quanto mais baixa a taxa de cooperação foi ficando ao mudar de um cenário para outro, os modelos foram apresentando melhores resultados de desempenho, quando foram utilizados canal entre usuários de $E_b/N_0 = 10\,\text{dB}$. No entanto, para os modelos utilizando canal entre usuários perfeito, e para os Modelos 2 e 3, quando foi utilizado canal entre usuários de $E_b/N_0 = 20\,\text{dB}$ os resultados de desempenho obtidos foram se tornando piores.

No próximo capítulo serão feitas as considerações finais sobre esta dissertação e sobre os resultados obtidos e apresentando sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 5

Conclusão

5.1 Comentários Finais

Neste trabalho foram analisados os resultados de desempenho de algoritmos de cooperação para alguns modelos de codificação cooperativa. Os resultados foram obtidos em condições e cenários construídos para uma comparação justa entre os algoritmos testados.

As comparações apresentadas foram motivadas pelo fato dos resultados apresentados na literatura terem sido obtidos por diferentes critérios para verificação de desempenho, dificultando, desta forma, a determinação do algoritmo com o melhor desempenho. No entanto, no decorrer dos trabalhos foi desenvolvido um novo algoritmo de cooperação para a codificação cooperativa. Este algoritmo basicamente é uma combinação dos outros dois algoritmos. O algoritmo proposto, também foi comparado com os outros dois algoritmos utilizando as mesmas características para a elaboração e realização das simulações computacionais.

Para todos os cenários e taxas de cooperações utilizados nesta dissertação, na comparação dos dois primeiros algoritmos, o Modelo 2 apresentou desempenhos superiores ao do Modelo 1. Já, na comparação entre os três Modelos, o Modelo 3 apresentou os melhores resultados de desempenhos. No entanto, apenas no quarto e ultimo cenário estudado, com o canal entre usuários de $E_b/N_0 = 20$ dB todos os modelos se igualaram. Porém, o algoritmo do Modelo 3 depende do conhecimento do estado do canal de *uplink* dos usuários, o que pode ser mais complicado para se realizar em sistemas práticos. Além disso, não foram realizadas simulações que contemplassem o desempenho de alguma técnica de estimativa de canal, ou seja, o

estado do canal de *uplink* dos usuários foi considerado a partir de uma estimativa perfeita e sem a troca dos estados entre os canais de *uplink* dos usuários, uma vez que para todos os cenários o melhor canal de *uplink* foi sempre considerado o mesmo, o *uplink* do Usuário 1.

Pode ser notado também analisando os cenários que contêm apenas a taxa de cooperação diferente, ou seja, os cenários 1, 3 e 4, por meio dos resultados de desempenho obtidos neles pelos três modelos, que quanto mais baixa foi a taxa de cooperação utilizada nesses cenários, quando o canal entre usuários utilizado foi de $E_b/N_0 = 10\,\text{dB}$, os resultados de desempenho obtidos pelos modelos, foram apresentando um ganho de um cenário para outro. Para a mudança da taxa de cooperação de $R_{co} = 31{,}25\%$ para $R_{co} = 25\%$, os ganhos apresentados pelos Modelos 1, 2 e 3 foram de aproximadamente 4,35 dB, 1 dB e 1,5 dB, respectivamente. Para a mudança da taxa de cooperação de $R_{co} = 25\%$ para $R_{co} = 18{,}75\%$, apesar do Modelo 3 ter apresentado um resultado de desempenho semelhante nos dois cenários, os Modelos 1 e 2 apresentaram ganhos em seus desempenhos, que foram de aproximadamente 3 dB e 0,67 dB, respectivamente.

Porém, na medida em que as taxas de cooperação mudaram de $R_{co} = 31{,}25\%$ para $R_{co} = 25\%$, de acordo com a mudança dos cenários, tanto o Modelo 3 utilizando canal ente usuários de $E_b/N_0 = 20\,\text{dB}$, como os modelos utilizando canal entre usuários perfeito, apresentaram uma inferioridade em seus desempenhos, na comparação de um cenário para o outro, de aproximadamente 0,4 dB. No entanto, com relação aos Modelos 1 e 2, utilizando canal entre usuários de $E_b/N_0 = 20\,\text{dB}$, quando o cenário que empregava a taxa de cooperação de $R_{co} = 31{,}25\%$ mudou para $R_{co} = 25\%$, o Modelo 1 apresentou um ganho de desempenho de aproximadamente 3,2 dB, enquanto o Modelo 2 obteve resultados de desempenho semelhantes nos dois cenários. Já com a mudança da taxa de cooperação de $R_{co} = 25\%$ para $R_{co} = 18{,}75\%$, tanto os Modelos 1, 2 e 3 utilizando canal entre usuários de $E_b/N_0 = 20\,\text{dB}$, como os modelos utilizando canal entre usuários perfeito, apresentaram uma inferioridade de desempenho, que foi de aproximadamente 0,16 dB, 0,35 dB, 0,4 dB e 0,4 dB, respectivamente.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A experiência adquirida durante a realização deste trabalho bem como os questionamentos que surgiram como consequência da obtenção dos resultados apresentados aqui, permitem sugerir os temas a seguir para futuras investigações nesta mesma linha de trabalho.

- Avaliar os algoritmos comparados aqui em outros cenários não contemplados neste trabalho.
- Criar e/ou adaptar algoritmos que contemplem cenários com a comunicação entre três usuários e uma ERB e verificar os seus desempenhos.
- Testar outros códigos curtos e adequados à codificação cooperativa em busca de maior ganho de cooperação.
- Testar o algoritmo apresentado no Modelo 3, com a inclusão de um estimador de canal, para que seja possível testar o algoritmo com a inversão dinâmica dos papeis entre os usuários.
- Testar novas formas de decodificação que utilizem a informação do estado de canal e/ou distância Euclidiana.

Anexo A

Artigo publicado

- FERRO, V. L. D., GOMES, G. G. R., MENDES, L. L.; *Comparison between decision algorithms in communication systems with cooperative coding*, International Workshop on Telecommunications – IWT, Rio de Janeiro, Brasil, May 2011.

Referências Bibliográficas

[1] HUNTER, T. E., NOSRASTINIA, A.; *Cooperation Diversity Through Coding,* in Proc. IEEE Int. Symp. Information Information Theory, Lausanne, Switzerland, June 2002.

[2] HUNTER, T. E.; *Coded Cooperation: A New Framework for User Cooperation in Wireless Networks*, Ph.D. thesis, The University of Texas at Dallas, May 2004.

[3] NOSRATINIA, A.; HUNTER, T. E.; HEDAYAT, A. *Cooperative communication in wireless networks*. IEEE Communications Magazine, October 2004.

[4] HUNTER, T. E., NOSRATINIA, A.; *Diversity through coded cooperation*. IEEE Transaction on Wireless Communications Vol. 5, No. 2, February 2006.

[5] STEFANOV, A., ERKIP, E.; *Cooperative coding for wireless networks,* in Proc. IEEE Transactions on Communications, Vol. 52, NO. 9, September 2004.

[6] RAPPAPORT, T. S.; *Wireless Communications – Principles and Practice*. Second Edition. New Jersey, Press. Prentice Hall, Inc., 2002.

[7] PROAKIS, J. G.; *Digital Communications*. Fourth Edition. New York, McGraw-Hill Companies, Inc., 2001.

[8] BENEDETTO, S., BIGLIERI, E.; *Principles of Digital Transmission: With Wireless Aplications*. Plenum Pub Corp, 1999.

[9] COVER, T., GAMAL, A. E.; *Capacity Theorems for Relay Channel*, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 25, Issue 5, Sep, 1979, pp. 572-584.

[10] SENDONARIS, A., ERKIP, E., AAZHANG, B.; *User Cooperation Diversity Part I: System Description*, IEEE Trans. Commun., vol. 51, no. 11, Nov 2003, pp. 1927-1938.

[11] SENDONARIS, A., ERKIP, E., AAZHANG, B.; *User Cooperation Diversity Part II: Implementation Aspects and Performance Analysis*, IEEE Trans. Commun., vol. 51, no. 11, Nov 2003, pp. 1939-1948.

[12] LANEMAN, J. N., WORNELL, G. W., TSE, D. N. C.; *An Efficient Protocol for Realizing Cooperative Diversity in Wireless Networks*, in Proc. IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), Washington, D. C., June 2001, pp. 294.

[13] HAGENAUER, J.; *Rate-compatible punctured convolutional codes (RCPC codes) and their applications*. IEEE Transactions on Communications, Vol. 36, No. 4**,** April 1988.

[14] MOREIRA, J. C., FARREL, P. G.; *Essentials of Error-Control Coding*, John Wiley & Sons, Ltd, 2006.

[15] SWEENEY, P.; *Error Control Coding – From Theory to Pratice*, John Wiley & Sons, Ltd, 2002.

[16] LIN, S., COSTELLO, D. J.; *Error Control Coding Fundamentals and Applications*, New Jersey: Prentice Hall, Inc.; 1983.

[17] WICKER, B. S.; *Error Control Systems for Digital Communication and Storage*, New Jersey: Prentice Hall, Inc.; 1995.

[18] REED, I. S., CHEN, X.; *Error-Control Coding for Data Networks*, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers; 1999.

[19] ALMAWGANI, A. H. M., SALLEH, M. F. M.; *RS coded cooperation with adaptive cooperation level scheme over multipath Rayleigh fading channel*. IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC), Dec. 2009, pp. 480–494.

[20] SENDONARIS, A.; *Advanced Techniques for Next-Generation Wireless Systems*, Ph.D. thesis, Rice University, May 1999.

[21] RIBEIRO, J. A. J.; *Princípios de propagação das ondas eletromagnéticas*, Inatel, Santa Rita do Sapucaí, 2001.

[22] SKLAR, B.; *Digital Communication – Fundamentals and Applications*, Prentice Hall, 2000.

[23] HAYKIN, S.; *Communication System*, John Wiley, 2000.

[24] GUIMARÃES, D. A.; *Introdução às Comunicações Móveis*, Revista Telecomunicações, Vol. 1, No. 1, pp. 1-22: Inatel. Santa Rita do Sapucaí, MG, Agosto 1998.