

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

GLAUBER GOMES DE OLIVEIRA BRANTE

**COMUNICAÇÃO COOPERATIVA USANDO RETRANSMISSÃO
PARCIAL CODIFICADA, HARQ TIPO-I E CÓDIGOS LDPC**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2010

GLAUBER GOMES DE OLIVEIRA BRANTE

**COMUNICAÇÃO COOPERATIVA USANDO RETRANSMISSÃO
PARCIAL CODIFICADA, HARQ TIPO-I E CÓDIGOS LDPC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Informática Industrial.

Orientador: Richard Demo Souza

CURITIBA

2010

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UTFPR – Campus Curitiba

B821c	<p>Brante, Glauber Gomes de Oliveira Comunicação cooperativa usando retransmissão parcial codificada, HARQ tipo-I e códigos LDPC / Glauber Gomes de Oliveira Brante. – 2010. 64 f. : il. ; 30 cm</p> <p>Orientador: Richard Demo Souza Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração: Informática Industrial, Curitiba, 2010 Bibliografia: f.61-4</p> <p>1. HARQ (Sistemas de comunicação). 2. Sistemas de comunicação sem fio. 3. Comunicação de dados – Protocolos. 4. Comutação por pacotes (Transmissão de dados). I. Souza, Richard Demo, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração em Informática Industrial. III. Título.</p> <p>CDD 621.3</p>
-------	--

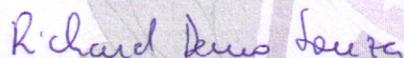
Título da Dissertação Nº 521:

“Comunicação Cooperativa Usando Retransmissão Parcial Codificada, HARQ Tipo-I e Códigos LDPC”

por

Glauber Gomes de Oliveira Brante

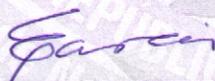
Esta dissertação foi apresentada, às 09h do dia 30 de março de 2010, como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Telemática, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora.



Prof. Richard Demo Souza, Dr.
(Presidente – UTFPR)



Prof. Marcelo Eduardo Pellenz, Dr.
(PUC-PR)



Prof. Evelio Martin Garcia Fernandez, Dr.
(UFPR)



Profª Anelise Munaretto Fonseca, Drª.
(UTFPR)

Visto da coordenação:


Prof. Dr. Humberto Remígio Gamba
(Coordenador do CPGEI)

AGRADECIMENTOS

Tout d'abord, je remercie à celle qui me soutienne inconditionnellement, avec sa joie et patience, et que toujours corrige mes erreurs de portugais d'ingénieur...

Aos meus colegas do Laboratório de Sistemas de Comunicação Sem Fio - LABSC (que apesar de SC está mais para interior do Paraná), pela convivência, pelo suor mútuo em algumas disciplinas, pelas discussões científicas e principalmente pelas nada científicas.

Agradeço a meu orientador, Professor Richard Demo Souza, pela grande ajuda na realização deste trabalho e pelo grande esforço em tornar seus alunos em ótimos pesquisadores. Suas sempre boas ideias enriqueceram muito meu conhecimento na realização deste e dos trabalhos que virão.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), cujas salas de aula fazem parte da minha trajetória há um bom tempo, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI), pela oportunidade de participar deste programa de Mestrado.

Por fim, mas não com menor importância, agradeço à minha família, que sempre se mantém unida e se apoiando em qualquer tipo de situação.

*O que conhece os outros é sábio,
O que conhece a si mesmo é iluminado,
O que vence os outros é forte,
O que vence a si mesmo é poderoso*

(Lao Tzu)

RESUMO

BRANTE, Glauber Gomes de Oliveira. Comunicação Cooperativa Usando Retransmissão Parcial Codificada, HARQ Tipo-I e Códigos LDPC. 64 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

Nessa dissertação de mestrado apresentamos um novo método HARQ para sistemas de comunicação cooperativa, denominado Retransmissão Parcial Codificada (RPC). Esse método é baseado na retransmissão de apenas uma fração da palavra código original por parte dos nós cooperativos, aplicando a essa fração um ganho de potência apropriado. Os resultados numéricos utilizando códigos LDPC e HARQ Tipo-I com *Chase Combining* mostram que o RPC supera os esquemas HARQ cooperativos tradicionais considerando os protocolos AAF e SDF. Além disso, mostramos que a vazão (*throughput*) do RPC, utilizando apenas um único *relay*, pode ser consideravelmente maior que a vazão de alguns métodos HARQ cooperativos que utilizam múltiplos *relays*.

Palavras-chave: Comunicações Cooperativas, Cooperação Codificada, Códigos LDPC, ARQ Híbrido

ABSTRACT

BRANTE, Glauber Gomes de Oliveira. Cooperative Coded Partial Retransmission Scheme Using Type-I HARQ and LDPC Codes. 64 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

In this master thesis we present a novel HARQ scheme for cooperative communication systems, called Coded Partial Retransmission (CPR). The method is based on the retransmission of only a fraction of the original codeword by the cooperating nodes, applying an appropriate power allocation. Numerical results using LDPC codes and Type-I HARQ with Chase Combining show that CPR outperforms regular cooperative HARQ techniques considering both AAF and SDF protocols. Additionally, we show that the CPR throughput, using a single relay, may be considerably larger than the throughput of some regular cooperative HARQ schemes using multiple relays.

Keywords: Cooperative Communications, Coded Cooperation, LDPC Codes, Hybrid ARQ

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FONTE, RELAY E DESTINO NO CANAL COOPERATIVO	18
FIGURA 2 – SISTEMA COOPERATIVO COM K RELAYS	22
FIGURA 3 – ILUSTRAÇÃO DO <i>AMPLIFY-AND-FORWARD</i>	23
FIGURA 4 – ILUSTRAÇÃO DO <i>DECODE-AND-FORWARD</i>	25
FIGURA 5 – AAF, FDF E SDF COMPARADOS À TRANSMISSÃO DIRETA	26
FIGURA 6 – APROXIMAÇÕES MATEMÁTICAS E SIMULAÇÃO PARA O AAF ..	28
FIGURA 7 – SISTEMA COOPERATIVO COM CÓDIGOS DE REPETIÇÃO	29
FIGURA 8 – SISTEMA COOPERATIVO COM CÓDIGOS PARALELOS	29
FIGURA 9 – SISTEMA COM CÓDIGOS DE REPETIÇÃO PARCIAL	31
FIGURA 10 – BER DOS PROTOCOLOS COM CANAL DE RETORNO	33
FIGURA 11 – CANAL <i>RELAY</i>	37
FIGURA 12 – DESCRIÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO	39
FIGURA 13 – MÉTODOS HARQ COOPERATIVOS UTILIZANDO AAF	42
FIGURA 14 – MÉTODOS HARQ COOPERATIVOS UTILIZANDO SDF	42
FIGURA 15 – NÚMERO MÉDIO DE TRANSMISSÕES NO AAF	45
FIGURA 16 – NÚMERO MÉDIO DE TRANSMISSÕES NO SDF	45
FIGURA 17 – GANHO NORMALIZADO DO MÉTODO RPC NO AAF	47
FIGURA 18 – GANHO NORMALIZADO DO MÉTODO RPC NO SDF	47
FIGURA 19 – <i>THROUGHPUT</i> NORMALIZADO NO AAF	48
FIGURA 20 – <i>THROUGHPUT</i> NORMALIZADO NO SDF	48
FIGURA 21 – DESEMPENHO DO RPC NORMALIZADO E MÚLTIPLOS <i>RELAYS</i> NO AAF	50
FIGURA 22 – DESEMPENHO DO RPC NORMALIZADO E MÚLTIPLOS <i>RELAYS</i> NO SDF	50
FIGURA 23 – PERCENTUAL DE PALAVRAS A CADA RETRANSMISSÃO NO AAF	51
FIGURA 24 – PERCENTUAL DE PALAVRAS A CADA RETRANSMISSÃO NO SDF	52
FIGURA 25 – DESEMPENHO DO RPC NORMALIZADO E MÚLTIPLOS <i>RELAYS</i> NO AAF EM CANAL <i>SHORT-TERM</i>	59
FIGURA 26 – DESEMPENHO DO RPC NORMALIZADO E MÚLTIPLOS <i>RELAYS</i> NO SDF EM CANAL <i>SHORT-TERM</i>	59
FIGURA 27 – PERCENTUAL DE PALAVRAS A CADA RETRANSMISSÃO NO SDF EM CANAL <i>SHORT-TERM</i>	60

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	41
TABELA 2	– NÚMERO DE PALAVRAS A CADA TRANSMISSÃO PARA 0DB ..	44

LISTA DE SIGLAS

OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat reQuest</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat reQuest</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise-Ratio</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
MRC	<i>Maximal Ratio Combining</i>
AAF	<i>Amplify-and-Forward</i>
DAF	<i>Decode-and-Forward</i>
FDF	<i>Fixed Decode-and-Forward</i>
SDF	<i>Selective Decode-and-Forward</i>
IAF	<i>Incremental Decode-and-Forward</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
LDPC	<i>Low-Density Parity-Check Codes</i>
STBC	<i>Space-Time Block Codes</i>
STTC	<i>Space-Time Trellis Codes</i>
RC	<i>Repetition Coding</i>
PC	<i>Parallel Coding</i>
FER	<i>Frame Error Rate</i>
SCC	<i>Symmetric Convolutional Coding</i>

SIC	<i>Soft Information Combining</i>
ACC	<i>Asymmetric Convolutional Coding</i>
SIE	<i>Soft Information Exchanging</i>
ETC	<i>Enhanced Turbo Coding</i>
PR	<i>Partial Repetition coding</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
RTS	<i>Request-To-Send</i>
CTS	<i>Clear-To-Send</i>
ACK	sinal de reconhecimento positivo
NACK	sinal de reconhecimento negativo
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
RPC	Retransmissão Parcial Codificada
Pre-HARQ	HARQ pre-cooperativo
AMC	<i>Adaptive Modulation and Coding</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
DC	<i>Diversity Combining</i>
IR	<i>Incremental Redundancy</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

h_{SD}	Coefficiente Rayleigh do desvanecimento no enlace fonte-destino
h_{SR}	Coefficiente Rayleigh do desvanecimento no enlace fonte- <i>relay</i>
h_{RD}	Coefficiente Rayleigh do desvanecimento no enlace <i>relay</i> -destino
G_{SD}	Ganho do enlace fonte-destino
G_{SR}	Ganho do enlace fonte- <i>relay</i>
G_{RD}	Ganho do enlace <i>relay</i> -destino
\mathbf{x}	informação modulada da fonte
P_S	Potência de transmissão da fonte
g_{SD}	Canal sem fio entre a fonte e o destino
g_{SR}	Canal sem fio entre a fonte e o <i>relay</i>
$\hat{\mathbf{x}}$	Mensagem processada pelo <i>relay</i>
P_R	Potência de transmissão do <i>relay</i>
g_{RD}	Canal sem fio entre o <i>relay</i> e o destino
a_0	Peso do MRC para o canal fonte-destino
a_1	Peso do MRC para o canal fonte- <i>relay</i> -destino
$g_{SR,i}$	Canal sem fio entre a fonte e o i -ésimo <i>relay</i>
K	Número de <i>relays</i> operando no sistema
$g_{RD,j}$	Canal sem fio entre o j -ésimo <i>relay</i> e o destino
β	Ganho do AAF
$N_0/2$	Variância do ruído por dimensão
g_{EQ}	Canal equivalente fonte- <i>relay</i> -destino
E_b	Energia por bit de informação
d	Distância entre a fonte e o <i>relay</i>
k	Número de bits de informação

\mathbf{u}	Vetor de símbolos de informação
R_c	Taxa de codificação
n	Número de bits codificados
\mathbf{v}	Vetor de símbolos codificados
$\hat{\mathbf{u}}$	Informação estimada pelo destino
i	Variável auxiliar
j	Variável auxiliar
t_S	Tempo para início da retransmissão da fonte, em segundos
t_R	Tempos para início da retransmissão do <i>relay</i> , em segundos
L	Número de frações em que a mensagem original será dividida
$\hat{\mathbf{x}}^0$	Primeira metade do vetor \mathbf{x}
$\hat{\mathbf{x}}^1$	Segunda metade do vetor \mathbf{x}
\mathbf{r}	Vetor de saída do MRC no destino
\mathbf{r}^0	Primeira metade do vetor \mathbf{r}
\mathbf{r}^1	Segunda metade do vetor \mathbf{r}
α	Expoente da perda de percurso
N_W	Número de palavras sorteadas para cada valor de SNR
$N_{RTX}(i)$	Número de retransmissões necessárias para a correta decodificação da i -ésima palavra
T	<i>Throughput</i>
N_i^j	Número de palavras que necessitam da transmissão i para o método j
E	Energia utilizada em cada transmissão
δ	Razão entre a energia média do método parcial e do método tradicional
δ_{dB}	Constante de normalização, em dB

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	COMUNICAÇÃO COOPERATIVA	18
2.1	CLASSIFICAÇÃO DO CANAL <i>RELAY</i>	18
2.2	MODELO MATEMÁTICO DO CANAL	20
2.2.1	Múltiplos <i>Relays</i>	21
2.3	PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO COOPERATIVA	22
2.3.1	<i>Amplify-and-Forward</i>	23
2.3.2	<i>Decode-and-Forward</i>	25
2.3.3	Desempenho dos Protocolos no Canal sem Fio	25
2.4	CODIFICAÇÃO COOPERATIVA	27
2.5	PROTOCOLOS UTILIZANDO O CANAL DE RETORNO	31
2.6	COMENTÁRIOS FINAIS	33
3	MÉTODO DE RETRANSMISSÃO PARCIAL CODIFICADA	35
3.1	INTRODUÇÃO	35
3.2	MODELO DO SISTEMA	36
3.3	MÉTODO PROPOSTO: RETRANSMISSÃO PARCIAL CODIFICADA	38
3.4	RESULTADOS OBTIDOS	40
3.4.1	Análise do Consumo de Energia	43
3.4.2	Comparação com Múltiplos <i>Relays</i>	47
3.5	CONCLUSÕES	52
4	COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
	APÊNDICE A – ARQ HÍBRIDO	56
A.1	HARQ TIPO-I	56
A.2	HARQ TIPO-II	57
A.3	ANÁLISE COMPARATIVA	57
	APÊNDICE B – RESULTADOS DO MÉTODO PROPOSTO PARA CANAL <i>SHORT-TERM</i>	58
	<i>TERM</i>	58
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicações sem fio têm sido cada vez mais utilizados devido à sua mobilidade e facilidade de instalação. Estão presentes em nosso cotidiano desde dispositivos portáteis, dos mais simples aos com capacidade de processamento que proporcionam as mais avançadas aplicações. As redes locais de acesso sem fio WiFi (IEEE STD 802.11, 1999), as redes metropolitanas sem fio WiMax (IEEE STD 802.16E, 2009), tecnologias celulares de terceira e quarta geração, além da transmissão de TV digital são exemplos de sistemas sem fio amplamente difundidos. O mercado de comunicações sem fio parece não parar de crescer, com os usuários sempre demandando mais taxa, mais qualidade e maior cobertura. Entre os desafios tecnológicos a serem enfrentados para responder a esta demanda de constante evolução dos sistemas sem fio estão as distorções introduzidas pelo canal, como o desvanecimento (RAPPA-PORT, 2002).

Uma das técnicas mais eficientes para combater os efeitos do desvanecimento é a exploração de diversidade (GOLDSMITH, 2005). Dentre as principais formas de diversidade podemos citar a diversidade temporal, a diversidade em frequência e a diversidade espacial. Códigos corretores de erros são exemplos de técnicas que exploram a diversidade temporal, inserindo uma correlação entre os símbolos transmitidos. Técnicas de *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) e espalhamento espectral são exemplos de exploração da diversidade em frequência. Recentemente, a diversidade espacial, através do uso de múltiplas antenas no transmissor e no receptor, tem sido foco de um grande número de pesquisas (ALAMOUTI, 1998; FOSCHINI, 1996; WOLNIANSKY et al., 1998; SELLATHURAI; HAYKIN, 2002; TAROKH; SESHADRI; CALDERBANK, 1998; TAROKH; JAFARKHANI; CALDERBANK, 1999; ZHENG; TSE, 2003; FREITAS-JR.; CAVALCANTI; LOPES, 2005) e já é presente em diversos padrões modernos como o IEEE 802.11n (IEEE STD 802.11N, 2009) e o IEEE 802.16e (IEEE STD 802.16E, 2009). O uso de múltiplas antenas cria caminhos independentes para a transmissão de um mesmo sinal, permitindo que tal característica seja explorada para: i) aumento de taxa sem o aumento da largura de faixa (FOSCHINI, 1996; WOLNIANSKY et al., 1998; SELLATHURAI; HAYKIN, 2002); ii) melhorar a qualidade do enlace e conse-

quentemente diminuir a probabilidade de erro (ALAMOUTI, 1998; TAROKH; SESHADRI; CALDERBANK, 1998; TAROKH; JAFARKHANI; CALDERBANK, 1999); iii) um híbrido das duas alternativas anteriores (ZHENG; TSE, 2003; FREITAS-JR.; CAVALCANTI; LOPES, 2005).

Entretanto, para que o ganho de diversidade espacial seja obtido na prática, é necessário que as antenas estejam devidamente espaçadas no transmissor e no receptor. Dispositivos de tamanho reduzido, como um celular ou os nós de uma rede de sensores, não dispõem de área para a colocação de várias antenas devidamente espaçadas. Além disso, não é de se esperar que o usuário aceite um aumento considerável no tamanho de seu dispositivo para a obtenção de um melhor desempenho.

Devido a esse problema prático para se alcançar a diversidade espacial é que houve motivação para o surgimento da chamada comunicação cooperativa. A comunicação cooperativa está baseada no modelo de canal introduzido por Van der Meulen em 1971 (MEULEN, 1971), denominado canal *relay*. Este modelo é composto por três nós: uma fonte de informação, o destino da comunicação e um nó denominado *relay*. Este nó *relay* é responsável por auxiliar a comunicação entre a fonte e o destino, atuando como um repetidor da informação, de forma que seja possível estabelecer uma comunicação mais confiável ou com potência de transmissão reduzida.

Podemos dizer que considerável esforço de pesquisa já foi feito no desenvolvimento de protocolos de comunicação cooperativa (LANEMAN; WORNELL, 2002; SENDONARIS; ERKIP; AAZHANG, 2003; LANEMAN; TSE; WORNELL, 2004; NOSRATINIA; HUNTER; HEDAYAT, 2004; BAE; JUNG; LEE, 2009; STEFANOV; ERKIP, 2004; ZHAO; VALENTI, 2003; ZHANG; DUMAN, 2005a, 2005b; YIU; SCHOBER; LAMPE, 2006; HU; DUMAN, 2007; KARKOOTI; CAVALLARO, 2008; YUAN et al., 2009; LI, 2009). Porém, uma atenção menor foi dada ao projeto de protocolos e esquemas codificados quando um canal de retorno está presente. Existindo um canal de comunicação do destino para a fonte e *relay*, torna-se interessante o uso de mecanismos de *Automatic Repeat reQuest* (ARQ), os quais podem solicitar uma retransmissão caso um pacote seja recebido com erros. Ao unir as técnicas de retransmissão de pacotes com os códigos corretores de erros temos o que é denominado por *Hybrid Automatic Repeat reQuest* (HARQ), ou ARQ híbrido (LOTT; MILENKOVIC; SOLJANIN, 2007). Alguns trabalhos recentes mostram a aplicação de técnicas de ARQ em sistemas com comunicação cooperativa (ZHAO; VALENTI, 2005; KRIKIDIS, 2007; YU; ZHANG; QIU, 2007; ZHANG; WANG; WEI, 2009), porém a sua investigação com códigos corretores de erro ainda é bastante incipiente. Os sistemas práticos não utilizam mais ARQ puro, o uso de HARQ

se tornou padrão na indústria, como por exemplo nas tecnologias IEEE 802.11n (WiFi) (IEEE STD 802.11N, 2009) e IEEE 802.16e (WiMax) (IEEE STD 802.16E, 2009). A telefonia celular também caminha no mesmo sentido em seus padrões mais recentes, nos quais podemos citar a inclusão de HARQ no CDMA2000 1xEV-DO (LOTT; MILENKOVIC; SOLJANIN, 2007; BHUSHAN et al., 2006; FAN et al., 2005), além dos padrões *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) e *Long Term Evolution* (LTE).

Dessa forma, nesta dissertação desenvolvemos um método HARQ cooperativo visando melhorar o desempenho dos métodos existentes, sempre com o foco em manter a complexidade do sistema relativamente baixa. O método proposto está baseado na retransmissão parcial codificada de pacotes, ou seja, ao retransmitir, os nós enviam apenas uma fração da palavra codificada original. Visto que um menor número de símbolos é enviado nas retransmissões, aplicamos um ganho de potência para que a energia consumida por transmissão seja mantida. Dessa forma, teremos retransmissões com menor duração e melhor razão sinal-ruído, em inglês *Signal-to-Noise-Ratio* (SNR), o que reflete numa melhoria na vazão (*throughput*) do sistema. Os resultados de simulação obtidos para o método proposto mostram ganhos de até 3dB no desempenho do sistema com relação aos métodos atuais presentes na literatura. Além disso, através da análise do consumo de energia do método, conseguimos provar que o ganho vem de uma melhor alocação da potência e não de um maior uso de energia, verificando a eficiência do método proposto.

O restante desta dissertação está organizado da seguinte maneira: no Capítulo 2 apresentamos alguns conceitos básicos sobre a comunicação cooperativa e os protocolos já desenvolvidos para esse tipo de sistema; no Capítulo 3 propomos um novo método HARQ cooperativo, assim como analisamos os resultados. No Capítulo 4 apresentamos os comentários finais e algumas propostas de trabalhos futuros. Finalmente, a seção de apêndices inclui no Apêndice A alguns comentários sobre os tipos de HARQ existentes e no Apêndice B uma extensão dos resultados obtidos no Capítulo 3 quando utilizamos um modelo de canal que varia de forma mais rápida, denominado canal de desvanecimento *short-term*.

2 COMUNICAÇÃO COOPERATIVA

A comunicação cooperativa, baseada no modelo de canal *relay*, faz com que nós distintos compartilhem recursos, com o intuito de alcançar uma transmissão mais confiável (LANEMAN; TSE; WORNELL, 2004; SENDONARIS; ERKIP; AAZHANG, 2003). A ideia principal dessa abordagem é alcançar o ganho de diversidade, denominada diversidade cooperativa, através do compartilhamento das antenas da fonte e do *relay*.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DO CANAL RELAY

O canal *relay*, assim como proposto por Van Der Meulen (MEULEN, 1971), é constituído por 3 nós: fonte (S), *relay* (R) e destino (D), conforme a Figura 1. O *relay* tem a função de atuar como um repetidor, reencaminhando a informação da fonte para o destino, auxiliando na comunicação. Este nó repetidor pode ser tanto um *relay* dedicado, sem informação própria a transmitir, quanto um usuário qualquer do sistema. O termo comunicação cooperativa, em geral, se utiliza quando o *relay* é um nó atuando no sistema, que também possui informações próprias para transmitir ao destino. Dessa forma, fonte e *relay* atuam como parceiros para transmitir a informação de ambos, portanto, os nós atuam ora como fonte, ora como *relay*.

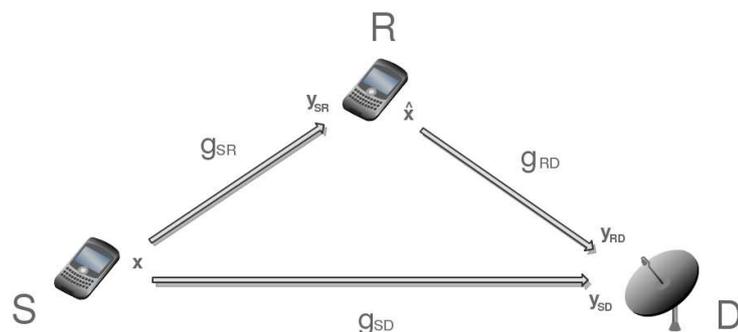


Figura 1: Fonte (S), relay (R) e destino (D) dispostos no canal cooperativo.

Fonte: Autoria Própria

O canal *relay* pode ser classificado de acordo com algumas de suas características, como

a forma de comunicação bidirecional, a forma de múltiplo acesso e a presença ou não de um canal de retorno, como segue:

1. Quanto à forma de comunicação bidirecional dos nós, podemos classificar o canal em:

- *Full-Duplex*:

Os nós tem a capacidade de transmitir e receber ao mesmo tempo. Do ponto de vista teórico é o modelo que proporciona maior capacidade de canal. Entretanto, no canal sem fio, pode haver uma diferença de potência entre o sinal transmitido e o sinal recebido muito grande, de até uma centena de dBs, dificultando a isolamento destes sinais no transceptor. Assim, sua implementação prática ainda é considerada um grande desafio (CHAKRABARTI et al., 2007).

- *Half-Duplex*:

A transmissão e a recepção de cada nó são multiplexadas no tempo, ou seja, os nós não são capazes de enviar e receber ao mesmo tempo. Esse modelo, apesar de oferecer menor capacidade do que os sistemas *full-duplex*, apresenta uma boa relação entre desempenho e complexidade (ZHANG; DUMAN, 2005b), sendo bastante empregado em cenários sem fio.

2. Quanto à forma de múltiplo acesso:

- Superposição:

Fonte e *relay* transmitem suas informações ao mesmo tempo e na mesma frequência, ou seja, de maneira superposta. Dessa forma, há uma maior complexidade na recepção por parte do destino, uma vez que este deve ser capaz de separar as informações provenientes de cada um dos usuários. A principal vantagem desse modelo é que não há perda de eficiência espectral em relação à transmissão direta.

- Ortogonal:

As transmissões da fonte e do *relay* são multiplexadas no tempo, na frequência ou em código (*Time Division Multiple Access (TDMA)*, *Frequency Division Multiple Access (FDMA)* e *Code Division Multiple Access (CDMA)*). Tomando como exemplo um sistema TDMA, a comunicação no canal *relay* é feita em dois instantes de tempo distintos. Num primeiro instante, a fonte transmite sua informação por radiodifusão e, num segundo instante, o *relay* atua como repetidor da informação da fonte. Dessa forma, há perda de eficiência espectral em relação à transmissão direta devido à comunicação realizada em duas etapas. Entretanto, é importante mencionar o trabalho em (BAE; JUNG; LEE, 2009), no qual os autores mostraram que, sob

certas condições de posicionamento e alocação de potência entre fonte e *relay*, os sistemas ortogonais podem ter performance até maior que sistemas que operam por superposição.

3. Quanto à presença de um canal de retorno:

- Sem canal de retorno:

A comunicação é feita somente no sentido fonte-destino e fonte-*relay*-destino. Não há nenhuma realimentação do sistema por parte do destino.

- Com canal de retorno:

Existe um canal de comunicação nos dois sentidos, de forma que o destino pode trocar informações com os nós fonte e *relay* para otimizar a comunicação. O canal *relay* que explora o canal de retorno pode aplicar técnicas de retransmissão de pacotes, ou ARQ (ZHAO; VALENTI, 2005).

2.2 MODELO MATEMÁTICO DO CANAL

O canal sem fio sofre um desvanecimento segundo o modelo Rayleigh quase-estático, ou seja, de ganho constante durante todo um bloco de transmissão. Por ser um canal de desvanecimento lento, assumimos perfeito conhecimento do canal por parte dos receptores. O ruído nos receptores é do tipo AWGN de variância $N_0/2$ por dimensão. Os canais Rayleigh fonte-destino, fonte-*relay* e *relay*-destino são denotadas por $g_{SD} = G_{SD} h_{SD}$, $g_{SR} = G_{SR} h_{SR}$ e $g_{RD} = G_{RD} h_{RD}$, onde h_{SD} , h_{SR} e h_{RD} são complexos, independentes e representam o desvanecimento em pequena escala dos enlaces fonte-destino, fonte-*relay* e *relay*-destino e seguem uma distribuição Rayleigh na magnitude e uniforme na fase. G_{SD} , G_{SR} e G_{RD} , por sua vez, são fatores que dependem do desvanecimento de larga escala em cada um dos enlaces.

Nesta dissertação, por motivos práticos, consideraremos os nós ortogonais e *half-duplex*. Assim, num primeiro instante, a fonte envia um vetor de informação modulada \mathbf{x} simultaneamente para o *relay* e para o destino. O sinal recebido pelo destino é:

$$\mathbf{y}_{SD} = \sqrt{P_S} g_{SD} \mathbf{x} + \mathbf{w}_{SD}, \quad (1)$$

onde P_S representa a potência de transmissão da fonte, g_{SD} representa o canal sem fio entre a fonte e o destino e \mathbf{w}_{SD} é o vetor de ruído. Por sua vez, o sinal recebido pelo *relay* é:

$$\mathbf{y}_{SR} = \sqrt{P_S} g_{SR} \mathbf{x} + \mathbf{w}_{SR}, \quad (2)$$

onde g_{SR} representa o canal sem fio entre a fonte e o *relay* e \mathbf{w}_{SR} representa ruído.

Num segundo instante de tempo, o *relay* processa a informação recebida da fonte e reencaminha essa informação ao destino. A maneira como a informação da fonte é processada depende do protocolo cooperativo empregado, cujo detalhamento sera apresentado na Seção 2.3. Por ora denotaremos a mensagem processada pelo *relay* por $\hat{\mathbf{x}} = f(\mathbf{y}_{SR})$. Dessa forma, o sinal recebido pelo destino a partir do *relay* é:

$$\mathbf{y}_{RD} = \sqrt{P_R} g_{RD} \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{w}_{RD}, \quad (3)$$

onde P_R é a potência de transmissão do *relay*, g_{RD} representa o canal sem fio entre o *relay* e o destino e \mathbf{w}_{RD} representa ruído.

O destino, por sua vez, deve combinar os sinais \mathbf{y}_{SD} e \mathbf{y}_{RD} provenientes de dois caminhos independentes. O método que proporciona o melhor desempenho é a combinação por máxima razão, em inglês *Maximal Ratio Combining* (MRC) (GOLDSMITH, 2005). O MRC é uma soma coerente dos sinais recebidos ponderados pela razão sinal-ruído de cada canal. Dessa forma, o sinal combinado no destino é descrito por:

$$\mathbf{y} = a_0 \mathbf{y}_{SD} + a_1 \mathbf{y}_{RD}, \quad (4)$$

onde a_0 é o peso do MRC para o canal fonte-destino e a_1 para o canal equivalente fonte-*relay*-destino. O cálculo específico dos ganhos depende do protocolo cooperativo empregado, que será detalhado na Seção 2.3.

2.2.1 Múltiplos Relays

Estendendo o canal *relay* para mais usuários, podemos permitir que múltiplos nós atuem de forma cooperativa, conforme a Figura 2. Dessa forma, num primeiro instante a fonte envia sua informação por radiodifusão simultaneamente para os K *relays* e para o destino. O sinal recebido pelo destino nesse primeiro instante é definido pela equação (1). Já os sinais nos K *relays* podem ser denotados por:

$$\mathbf{y}_{SR,i} = \sqrt{P_S} g_{SR,i} \mathbf{x} + \mathbf{w}_{SR,i}, \quad (5)$$

onde $g_{SR,i}$, com $1 \leq i \leq K$, representa o canal sem fio entre a fonte e o i -ésimo *relay* e $\mathbf{w}_{SR,i}$ representa o ruído no i -ésimo *relay*. Num segundo momento, os *relays* tentam regenerar a informação da fonte para reencaminhar essa informação $\hat{\mathbf{x}}$ para o destino. Como consideramos um sistema ortogonal, apenas um *relay* pode transmitir a cada instante, logo, o protocolo cooperativo pode, por exemplo, ser capaz de escolher o nó com a condição de canal mais favorável

para cooperar, de forma que:

$$\mathbf{y}_{RD,j} = \sqrt{P_R} \max\{g_{RD,j}\} \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{w}_{RD}, \quad (6)$$

onde $g_{RD,j}$ representa o canal sem fio entre o j -ésimo *relay* e o destino e \mathbf{w}_{RD} representa ruído.

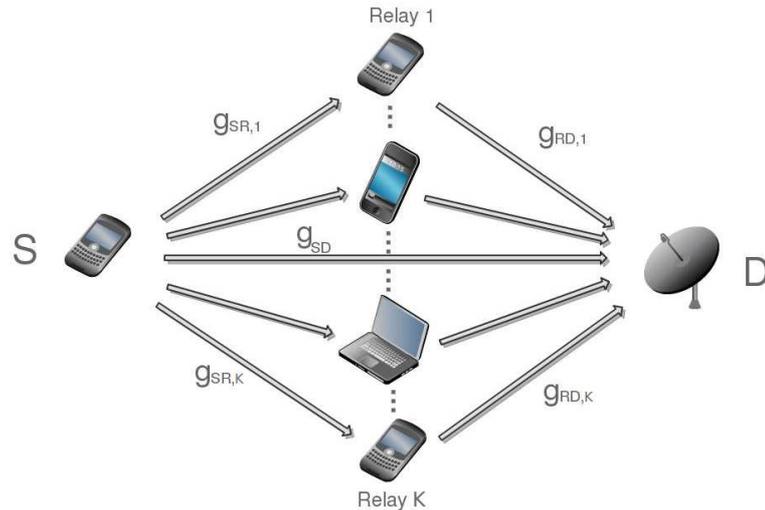


Figura 2: Sistema cooperativo com K relays.

Fonte: Autoria Própria

O destino, de forma semelhante, deve combinar os sinais \mathbf{y}_{SD} e $\mathbf{y}_{RD,j}$ provenientes dos dois caminhos independentes.

2.3 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO COOPERATIVA

Recentemente, alguns protocolos cooperativos para o canal sem fio foram apresentados em (LANEMAN; TSE; WORNELL, 2004). Os protocolos *amplify-and-forward* ("amplifica-e-envia") e *decode-and-forward* ("decodifica-e-envia") deram início à comunicação cooperativa e motivaram muitos outros trabalhos posteriores (NOSRATINIA; HUNTER; HEDAYAT, 2004; BAE; JUNG; LEE, 2009; STEFANOV; ERKIP, 2004; ZHAO; VALENTI, 2003; ZHANG; DUMAN, 2005a, 2005b; HU; DUMAN, 2007; KARKOOTI; CAVALLARO, 2008). A ideia principal do *Amplify-and-Forward* (AAF) é que o *relay* apenas amplifique o sinal recebido da fonte, visando compensar os efeitos do canal fonte-*relay*, e reenvie a informação ao destino. Já no protocolo *Decode-and-Forward* (DAF), o *relay* tenta recuperar a informação enviada pela fonte, transformando-a em bits de informação, para modular novamente e reenviar ao destino.

O *decode-and-forward* apresenta três variações importantes: *Fixed Decode-and-Forward* (FDF), *Selective Decode-and-Forward* (SDF) e *Incremental Decode-and-Forward* (IAF). O

FDF tem a característica do *relay* sempre atuar na comunicação, ou seja, a mensagem enviada pela fonte é sempre regenerada e reenviada ao destino, não importando se a estimação foi feita corretamente ou não. O problema desse protocolo é que a propagação de erros por parte do *relay* pode ser muito grande, reduzindo o desempenho do sistema. O SDF, por sua vez, estabelece uma condição para que o *relay* atue. A ideia é a de que o *relay* seja capaz de detectar se a palavra estimada corresponde à mensagem original vinda da fonte ou não. Com isso, o *relay* reencaminha a informação ao destino apenas caso a estimação esteja isenta de erros. Caso contrário, a própria fonte reenvia a informação original na forma de uma repetição. Portanto, o SDF explora uma realimentação limitada entre fonte e *relay*. Por fim, o IDF explora a realimentação por parte do destino para fonte e *relay*, podendo assim ser feita uma escolha se a cooperação é necessária ou não. As próximas subseções explicarão com mais detalhes as estratégias cooperativas.

2.3.1 Amplify-and-Forward

Como já mencionado, o protocolo AAF é a estratégia mais simples empregada no sistema cooperativo, conforme ilustrado pela Figura 3. Como podemos perceber na figura, a fonte envia uma informação que é recebida pelo *relay* e pelo destino, sofrendo os efeitos de atenuação e ruídos do canal. O *relay*, por sua vez, aplica um ganho de potência no sinal, de forma a tentar compensar os efeitos de atenuação do canal fonte-*relay*. Entretanto, o ruído aditivo também é amplificado por essa operação. No destino, dois sinais provenientes de caminhos independentes terão que ser combinados na decodificação.

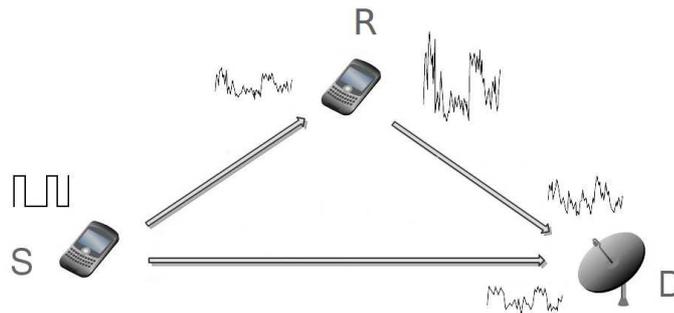


Figura 3: Ilustração da operação do protocolo Amplify-and-Forward.

Fonte: (NOSRATINIA; HUNTER; HEDAYAT, 2004)

Dessa forma, podemos definir a mensagem processada no *relay* como sendo $\hat{\mathbf{x}} = f(\mathbf{y}_{SR}) = \beta \mathbf{y}_{SR}$, onde β é o ganho do AAF. Sendo assim, podemos reescrever a equação (3) como:

$$\mathbf{y}_{RD} = \beta \mathbf{y}_{SR} g_{RD} + \mathbf{w}_{RD}. \quad (7)$$

O ganho β tem duas funções principais: i) compensar os efeitos do canal, normalizando o sinal recebido em energia unitária; ii) aplicar a potência de transmissão P_R característica do *relay*. Dessa forma, primeiramente devemos determinar a energia do sinal recebido pelo *relay*, \mathbf{y}_{SR} :

$$E[|\mathbf{y}_{SR}|^2] = P_S |g_{SR}|^2 + N_0, \quad (8)$$

onde $E[.]$ denota o valor esperado e $N_0/2$ é a variância do ruído por dimensão. Portanto, para normalizar \mathbf{y}_{SR} em energia unitária e aplicar a potência P_R disponível no *relay* teremos:

$$\beta = \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{P_S |g_{SR}|^2 + N_0}}. \quad (9)$$

O destino deve calcular os ganhos do MRC, a_0 e a_1 , para os sinais \mathbf{y}_{SD} e \mathbf{y}_{RD} , segundo a equação (4). Conforme citado na Seção 2.2, o ganho de cada canal será proporcional à SNR. Portanto, para calcular a_0 levamos em conta a potência do sinal transmitido no enlace fonte-destino (1), o ganho do canal fonte-destino e a potência do ruído, N_0 , de forma que:

$$a_0 = \frac{\sqrt{P_S} g_{SD}^*}{N_0}. \quad (10)$$

Já para o cálculo de a_1 , devemos levar em conta que \mathbf{y}_{RD} sofreu os efeitos de dois enlaces: fonte-*relay* e *relay*-destino. Portanto, precisamos calcular o canal equivalente fonte-*relay*-destino. Para tal, substituímos a equação (2) em (7), de forma que:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{RD} &= \beta g_{RD} (\sqrt{P_S} g_{SR} \mathbf{x} + \mathbf{w}_{SR}) + \mathbf{w}_{RD} \\ &= (\beta \sqrt{P_S} g_{SR} g_{RD}) \mathbf{x} + \beta g_{RD} \mathbf{w}_{SR} + \mathbf{w}_{RD} \\ &= g_{EQ} \mathbf{x} + \mathbf{w}_{EQ}, \end{aligned} \quad (11)$$

em que $g_{EQ} = \beta \sqrt{P_S} g_{SR} g_{RD}$ corresponde ao canal equivalente e $\mathbf{w}_{EQ} = \beta g_{RD} \mathbf{w}_{SR} + \mathbf{w}_{RD}$ é o ruído equivalente, cuja variância deve levar em conta a combinação do ruído no canal *relay*-destino (\mathbf{w}_{RD}) com o ruído amplificado do canal fonte-*relay* (\mathbf{w}_{SR}). A variância de \mathbf{w}_{EQ} pode ser escrita como:

$$E[|\mathbf{w}_{EQ}|^2] = [(\beta |g_{RD}|)^2 + 1] N_0. \quad (13)$$

Dessa forma, calculando a_1 , temos:

$$a_1 = \frac{\beta \sqrt{P_S} g_{SR}^* g_{RD}^*}{[(\beta |g_{RD}|)^2 + 1] N_0} = \frac{\sqrt{\frac{P_S P_R}{P_S |g_{SR}|^2 + N_0}} g_{SR}^* g_{RD}^*}{\left[\frac{(P_R |g_{RD}|)^2}{P_S |g_{SR}|^2 + N_0} + 1 \right] N_0} \quad (14)$$

2.3.2 Decode-and-Forward

No *decode-and-forward*, o *relay* realiza uma decisão sobre a informação recebida da fonte, procurando recuperar a informação digital de forma a anular os efeitos da atenuação do canal e do ruído de recepção, conforme ilustrado pela Figura 4. O sinal recebido no destino através do *relay* é dado por (3).

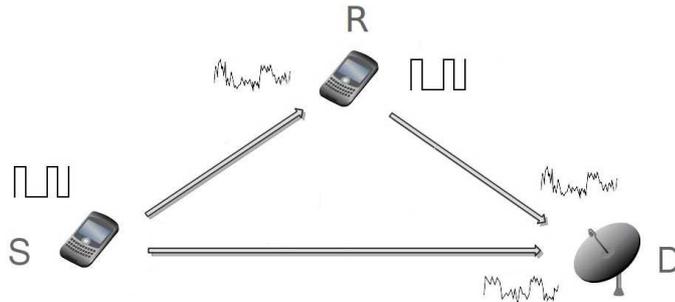


Figura 4: Ilustração da operação do protocolo *Decode-and-Forward*.

Fonte: (NOSRATINIA; HUNTER; HEDAYAT, 2004)

Para calcular os pesos do MRC, a_0 e a_1 , calculamos o complexo conjugado do canal, normalizado pela potência do ruído de cada enlace, de forma que:

$$a_0 = \frac{\sqrt{P_S} g_{SD}^*}{N_0}, \quad (15)$$

$$a_1 = \frac{\sqrt{P_R} g_{RD}^*}{N_0}. \quad (16)$$

O equacionamento apresentado nessa seção é válido tanto para o FDF quanto para o SDF. A diferença entre os dois protocolos será feita caso a informação \mathbf{x} não seja corretamente regenerada no *relay*. Quando isso ocorrer, o FDF enviará a palavra incorreta ao destino, propagando erros que podem deteriorar o desempenho da comunicação. Já o SDF comunicará à fonte que a correta regeneração não foi possível e esta, por sua vez, irá reenviar a informação original na forma de uma repetição. Na sequência apresentaremos o desempenho de cada um dos protocolos.

2.3.3 Desempenho dos Protocolos no Canal sem Fio

Para verificar o desempenho dos protocolos AAF, FDF e SDF no canal sem fio, consideramos um sistema como o da Figura 1. Além disso, supomos que fonte, *relay* e destino estão igualmente distanciados, de forma que os canais fonte-destino, fonte-*relay* e *relay*-destino têm energias iguais e unitárias, ou seja, $g_{SD} = h_{SD}$, $g_{SR} = h_{SR}$ e $g_{RD} = h_{RD}$.

Investigamos o desempenho do sistema em termos de taxa de erro de bit - em inglês, *Bit Error Rate* (BER) - como função da SNR, a qual foi definida como E_b/N_0 , em que E_b é a energia por bit de informação. O nós utilizam modulação por chaveamento de fase binário - em inglês, *Binary Phase Shift Keying* (BPSK). De forma a manter a energia total do canal *relay* igual à da transmissão direta, assumimos que fonte e *relay* transmitem apenas com metade de suas potências. A Figura 5 compara o desempenho do canal *relay*, operando com os protocolos AAF, FDF e SDF normalizados em energia, à transmissão direta (não-cooperativa). Podemos perceber que o desempenho do FDF é pior do que o da transmissão direta, confirmando que a propagação de erros é um fator limitante desse protocolo. O AAF e o SDF, por sua vez, proporcionam um ganho de diversidade em relação à transmissão direta, aumentando consideravelmente o desempenho do sistema. O desempenho do AAF é um pouco inferior ao SDF, porém sua complexidade é menor, visto que o *relay* não precisa demodular e remodular a informação da fonte. Além disso, o SDF apresenta uma arquitetura de sistema um pouco mais complexa, visto que inclui uma comunicação de controle entre a fonte e o *relay*. Portanto, a partir dos resultados da figura, observamos que os dois protocolos cooperativos com interesse prático são o AAF e o SDF. Estes protocolos alcançam o mesmo ganho de diversidade de um sistema operando com duas antenas de transmissão e uma de recepção (ALAMOUTI, 1998), mesmo com a potência de transmissão dos nós fonte e *relay* sendo reduzida pela metade.

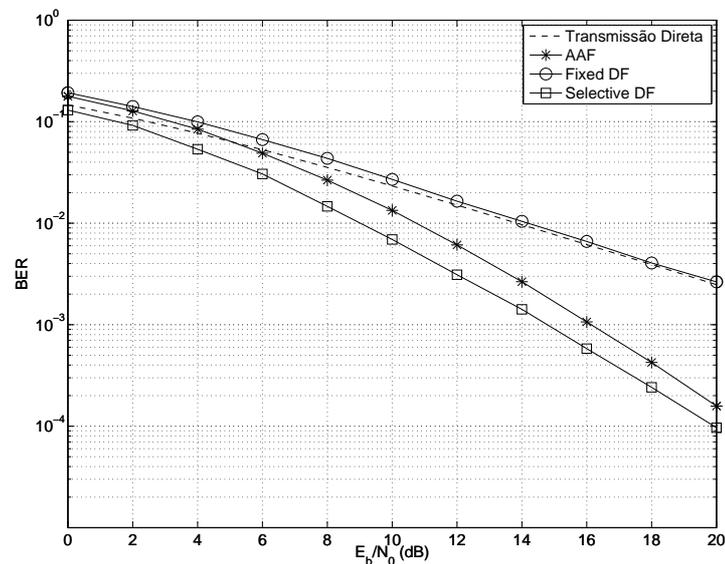


Figura 5: Taxa de erro de bit (BER) dos protocolos cooperativos AAF, FDF e SDF comparados à transmissão direta.

Fonte: Autoria Própria

Em (SU; SADEK; LIU, 2008), os autores analisaram o desempenho dos protocolos coo-

perativos, formulando as expressões para a BER do AAF e do SDF. Os resultados mostram os limitantes superiores, assim como uma aproximação da BER para cada protocolo. Sendo assim, é interessante validar as simulações realizadas utilizando os resultados de (SU; SADEK; LIU, 2008). Para o AAF, o limitante superior da BER com a modulação BPSK é definido por:

$$bound_{BPSK} \approx \frac{3N_0^2}{16P_S^2P_R}. \quad (17)$$

Uma curva aproximada para a BER é dada pela seguinte expressão:

$$CF_{PSK} \approx \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \frac{1}{1 + \frac{P_S}{N_0 \sin^2 \theta}} \left\{ \frac{N_0^2 (P_R - P_S)^2 + P_S P_R N_0 \sin^{-2} \theta}{P_S^2 P_R^2 \Delta^2} + \frac{2N_0^2}{P_S P_R \Delta^3 \sin^2 \theta} \ln \left(\frac{(N_0 + P_S P_R \sin^{-2} \theta + P_S P_R \Delta)^2}{4N_0^2} \right) \right\} \right\} d\theta, \quad (18)$$

onde $\Delta^2 = \left(\frac{N_0(P_R - P_S)}{P_S P_R} \right)^2 + \frac{2N_0}{P_S P_R} \sin^{-2} \theta + \sin^{-4} \theta$. Os resultados das expressões para o limitante superior e para a aproximação do AAF são demonstrados na Figura 6, comparados ao resultado obtido em simulações. Como podemos observar, a simulação tem uma boa precisão quando comparada à expressão para o AAF. Portanto, podemos validar o modelo simulado para o canal cooperativo. É importante também ressaltar que os mesmos resultados podem ser obtidos para o SDF, porém apresentamos apenas a comparação com o AAF, que tem um equacionamento mais extenso, conforme Seção 2.3.1.

2.4 CODIFICAÇÃO COOPERATIVA

Com o uso de códigos corretores de erros (LIN; COSTELLO, 2004; MOREIRA; FARRELL, 2006) na fonte de transmissão, o vetor de símbolos de informação, que representa uma sequência não determinística e decorrelacionada, é transformado num vetor de palavra codificada, que adiciona redundâncias aos símbolos da palavra original, introduzindo um grau de correlação nos símbolos a serem enviados. Dessa forma, o processo de decodificação por parte do receptor pode ser capaz de recuperar símbolos que tenham sido incorretamente recebidos, devido aos efeitos de atenuação do canal e ruídos no receptor. Vários métodos de correção de erros foram propostos ao longo dos anos, dentre os quais podemos citar os códigos de blocos, os códigos convolucionais, os códigos turbo e os códigos *Low-Density Parity-Check Codes* (LDPC). Códigos turbo e LDPC são os códigos que mais se aproximam do limite teórico previsto por Shannon (SHANNON, 1948) e apresentam um desempenho bastante superior aos códigos convolucionais e de bloco, embora requeiram algoritmos de decodificação mais complexos.

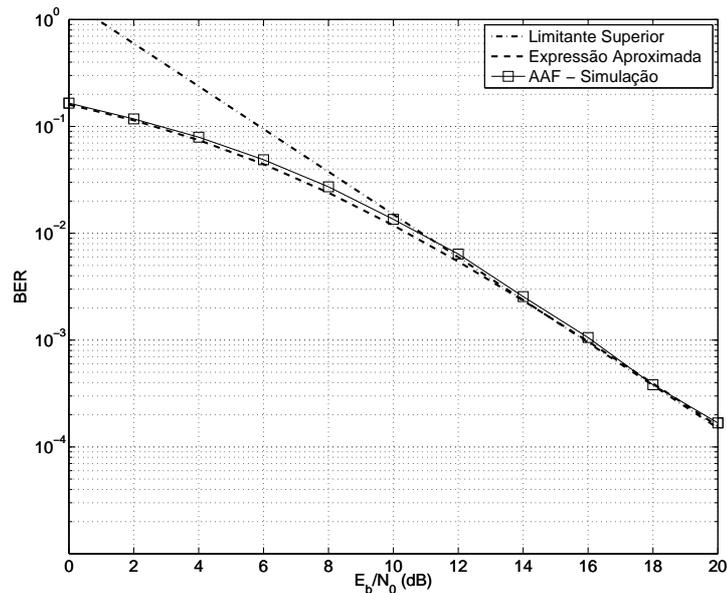


Figura 6: Limitante superior, expressão aproximada e simulação para o protocolo AAF.

Fonte: Autoria Própria

Diversos pesquisadores associaram códigos corretores de erros aos protocolos AAF e DAF verificando interessantes ganhos de desempenho (LANEMAN; WORNELL, 2002; ZHAO; VALENTI, 2003; STEFANOV; ERKIP, 2004; ZHANG; DUMAN, 2005a, 2005b; HU; DUMAN, 2007; KARKOOTI; CAVALLARO, 2008; YIU; SCHOBBER; LAMPE, 2006; YUAN et al., 2009; LI, 2009). As técnicas de correção de erros associadas aos protocolos de (LANEMAN; TSE; WORNELL, 2004) foram denominadas de codificação cooperativa (em inglês, *coded cooperation*). Dentre os tipos de códigos corretores de erros aplicados ao canal *relay* podemos citar os códigos convolucionais em (STEFANOV; ERKIP, 2004; ZHANG; DUMAN, 2005a), os códigos turbo em (ZHAO; VALENTI, 2003; ZHANG; DUMAN, 2005a, 2005b) e os códigos LDPC em (HU; DUMAN, 2007; KARKOOTI; CAVALLARO, 2008). Além disso, técnicas utilizando códigos distribuídos como os códigos *Space-Time Block Codes* (STBC) e *Space-Time Trellis Codes* (STTC) foram aplicadas aos sistemas cooperativos, permitindo que fonte e *relay* transmitissem dados ao mesmo tempo (LANEMAN; WORNELL, 2002; YIU; SCHOBBER; LAMPE, 2006; YUAN et al., 2009; LI, 2009).

Podemos classificar a codificação cooperativa em dois tipos principais: os códigos de repetição - em inglês, *Repetition Coding* (RC) - e os códigos paralelos - em inglês, *Parallel Coding* (PC). Nos códigos de repetição, o mesmo codificador é utilizado tanto na fonte quanto no *relay*, enviando os mesmos símbolos de informação e de paridade em ambas as transmissões,

conforme a Figura 7. Esse tipo de estrutura tem a vantagem da simplicidade de decodificação, uma vez que o receptor utiliza o mesmo circuito para fazer a decodificação das palavras recebidas. Já na codificação paralela, fonte e *relay* têm codificadores construídos especialmente para enviar paridades diferentes, aumentando a robustez da codificação e, em consequência, a complexidade de construção do código e de decodificação. A Figura 8 ilustra tal estratégia.

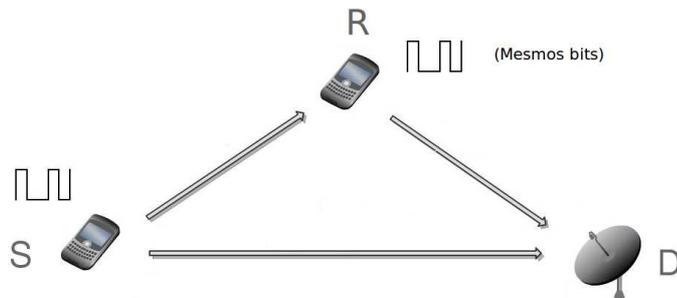


Figura 7: Sistema cooperativo utilizando códigos de repetição (RC).

Fonte: (KHORMUJI; LARSSON, 2009)

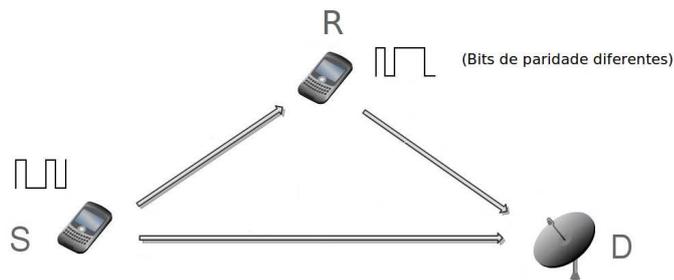


Figura 8: Sistema cooperativo utilizando códigos paralelos (PC).

Fonte: (KHORMUJI; LARSSON, 2009)

A utilização de códigos de repetição foi estudada em (STEFANOV; ERKIP, 2004), onde os autores comparam o desempenho da codificação cooperativa, utilizando códigos convolucionais, ao do protocolo AAF não codificado. Os resultados mostraram ganhos de desempenho de até 3dB na taxa de erros de quadro - em inglês, *Frame Error Rate* (FER) - ao utilizar códigos RC. Posteriormente, os autores em (ZHANG; DUMAN, 2005a, 2005b) desenvolveram diversas estratégias cooperativas comparando o desempenho de códigos RC e PC. As principais estratégias com códigos de repetição foram o *Symmetric Convolutional Coding* (SCC), que implementa códigos convolucionais, e o *Soft Information Combining* (SIC), que utiliza códigos turbo. Em ambos fonte e *relay* operam com o mesmo codificador, de forma que o destino faz uma combinação das duas palavras codificadas recebidas, passando a combinação por um único decodificador.

Os autores em (ZHAO; VALENTI, 2003) foram um dos pioneiros na introdução de códigos paralelos. Em seu trabalho, os autores propõem a construção de um código turbo distribuído entre fonte e *relay*. A ideia principal é entrelaçar os símbolos que são recebidos pelo *relay*, antes de codificá-los, fazendo com que os bits de paridade desse nó sejam construídos distintamente aos da fonte. O destino, por sua vez, conhecendo o padrão de entrelaçamento do *relay*, decodifica diferenciadamente as duas palavras recebidas para então poder combiná-las. Em (ZHANG; DUMAN, 2005a, 2005b), a codificação paralela é abordada por três métodos principais: *Asymmetric Convolutional Coding* (ACC), *Soft Information Exchanging* (SIE) e *Enhanced Turbo Coding* (ETC). O ACC, que é uma modificação do SCC previamente citado, transmite símbolos diferentes através da fonte e do *relay*. A fonte codifica sua informação utilizando um código convolucional e transmite tanto bits de informação quanto de paridade. Já o *relay*, utiliza o mesmo codificador que a fonte, porém transmite apenas os bits de paridade da palavra código original. O SIE, que é uma extensão do SIC, utiliza codificadores turbo diferentes nos nós cooperativos, fazendo com que estes trabalhem de uma maneira iterativa, trocando informações extrínsecas. O processo de decodificação fica bem mais complexo, visto que dois decodificadores diferentes devem ser aplicados a cada uma das palavras codificadas. Já o terceiro método, o ETC, utiliza códigos turbo distintos nos nós, assim como o SIE, com a diferença de que o *relay* transmite apenas os bits de paridade da palavra codificada, de forma análoga ao ACC. Uma extensão dos trabalhos (ZHANG; DUMAN, 2005a, 2005b) para os códigos LDPC é apresentada em (HU; DUMAN, 2007), onde os códigos são construídos de forma que os bits codificados sejam divididos em três grupos diferentes. O primeiro grupo é enviado pela fonte para o *relay*, o segundo grupo é enviado pelo *relay* para o destino e, simultaneamente ao segundo grupo, um terceiro grupo é enviado pela fonte ao destino. Dessa forma, o receptor utiliza um decodificador capaz de combinar estes três grupos no processo iterativo.

Os resultados dos trabalhos apresentados mostram que os códigos paralelos têm uma performance melhor que a dos códigos de repetição, especialmente quando códigos turbo ou LDPC irregulares são utilizados. Entretanto, tais códigos necessitam ser projetados especificamente para o canal *relay*, aumentando consideravelmente a complexidade de construção do código. Outro fator importante é que o processo de decodificação por parte do destino também se torna bem mais complexo, visto que este deve conter circuitos decodificadores diferentes para cada um dos códigos utilizados. Recentemente, Khormuji e Larsson (KHORMUJI; LARSSON, 2009) propuseram uma nova classe de codificação cooperativa, denominada de códigos de repetição parcial - em inglês, *Partial Repetition coding* (PR). Nesse caso, fonte e *relay* operam com o mesmo codificador, de forma análoga aos códigos de repetição, porém, o *relay* reencaminha apenas uma fração da mensagem original, conforme a Figura 9. A diferença nesse tipo de es-

tratégia é que o transmissor, ao enviar apenas uma fração da mensagem original, aplica um ganho de potência, de forma a aumentar a razão sinal-ruído dos símbolos. Os resultados matemáticos obtidos para os códigos de repetição parcial mostraram um desempenho superior aos códigos de repetição tradicionais e, surpreendentemente, muito próximos aos resultados dos códigos paralelos.

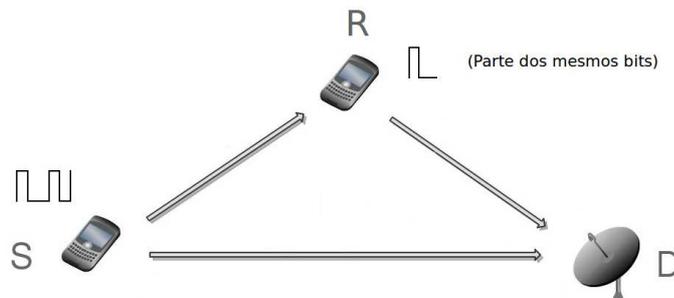


Figura 9: Sistema cooperativo utilizando códigos de repetição parcial (PR).

Fonte: (KHORMUJI; LARSSON, 2009)

2.5 PROTOCOLOS UTILIZANDO O CANAL DE RETORNO

O protocolo *incremental decode-and-forward*, proposto em (LANEMAN; TSE; WORNELL, 2004), já supunha a utilização do canal de retorno para que o destino trocasse informações com os nós transmissores, auxiliando a comunicação. Conforme já citado, quando há um canal de comunicação do destino para a fonte e *relay*, torna-se interessante o uso de mecanismos de ARQ, os quais podem solicitar uma retransmissão caso um pacote seja recebido com erros. Com o uso de ARQ pode-se aumentar o *throughput* de sistemas sem fio (WICKER, 1994) e ao unir as técnicas de retransmissão de pacotes com os códigos corretores de erros temos o HARQ, ou ARQ híbrido (LOTT; MILENKOVIC; SOLJANIN, 2007). Dada uma informação recebida, primeiramente procura-se corrigir eventuais erros, em seguida parte-se para a detecção de possíveis erros persistentes. Se os erros não puderam ser totalmente corrigidos, solicita-se uma retransmissão. O HARQ pode ser consideravelmente superior aos esquemas de ARQ puro ¹.

O emprego de técnicas de retransmissão aplicadas ao canal *relay* é um campo de pesquisa recente, no qual podemos citar (ZHAO; VALENTI, 2005; KRIKIDIS, 2007; YU; ZHANG; QIU, 2007; ZHANG; WANG; WEI, 2009) como alguns dos trabalhos pioneiros. Zhao e Valenti (ZHAO; VALENTI, 2005) foram os primeiros a considerar que o canal *relay* poderia funcionar na prática como uma generalização dos protocolos de HARQ, cujas retransmissões não

¹Uma comparação entre os tipos de HARQ é apresentada no Apêndice A.

mais seriam exclusividade da fonte, pois poderiam partir de qualquer outro nó que estivesse atuando como *relay* com condições de canal favoráveis para a retransmissão. Naquele trabalho, um protocolo de comunicação com múltiplos *relays* chamado HARBINGER (em inglês, *Hybrid-ARQ-based intracluster geographic relaying*) foi desenvolvido, no qual os nós *relay* sabem sua exata posição, assim como a posição da fonte e a do destino. De posse dessa informação, e conhecendo o modelo do canal, os nós *relay* estimam a SNR média de cada enlace e o nó com a melhor condição de canal é escolhido para retransmitir os pacotes. A medida exata da posição dos *relays* é feita por meio de um sistema *Global Positioning System* (GPS), enquanto a posição da fonte e do destino é passada através do cabeçalho das mensagens de controle.

Posteriormente, Krikidis (KRIKIDIS, 2007) desenvolveu um protocolo cooperativo com retransmissão de pacotes para um canal com múltiplos *relays* sem o uso de códigos corretores de erros. Para iniciar a transmissão, a fonte envia uma mensagem de *Request-To-Send* (RTS). Se o canal estiver livre, o destino responde com uma mensagem de *Clear-To-Send* (CTS) e a fonte transmite sua informação, que será recebida por todos os nós intermediários do sistema. Em seguida, o destino detecta possíveis erros na palavra recebida e, caso necessário, envia um pedido de retransmissão (NACK). Esse pedido de retransmissão é recebido por todos os nós da rede (fonte e *relays*) e é utilizado para estimar a condição do canal entre os nós e o destino. Cada nó, de posse dessa informação, aguarda um tempo inversamente proporcional à qualidade de seu enlace para iniciar a retransmissão. Dessa forma, o nó com a melhor condição de canal será o primeiro a retransmitir, reservando o meio para si. O destino, por sua vez, combina os pacotes e realiza uma nova detecção de possíveis erros. A Figura 10 mostra o desempenho, em termos de BER, do protocolo desenvolvido por Krikidis com apenas uma retransmissão permitida. O protocolo de Krikidis, com 1 e 3 *relays*, é comparado ao protocolo AAF desenvolvido em (LANEMAN; TSE; WORNELL, 2004) e à transmissão direta. Podemos perceber que a utilização do canal de retorno traz um ganho de desempenho em relação ao protocolo tradicional. Outro fator que também pode ser notado é o desempenho da rede com múltiplos *relays*, que aumenta na medida que em que aumentamos o número de nós cooperando, contribuindo com a qualidade da transmissão. Como podemos notar pela figura, a introdução de múltiplos *relays* proporciona um ganho de diversidade, indicado pela mudança de inclinação da curva desse método.

Em (YU; ZHANG; QIU, 2007), os autores comparam a performance de um protocolo de comunicação cooperativa com canal de retorno à do protocolo ARQ tradicional, aplicado à uma rede de sensores. Os resultados mostram que o protocolo cooperativo é sempre superior ao protocolo ARQ tradicional devido ao ganho de diversidade que a comunicação cooperativa proporciona. Já em (ZHANG; WANG; WEI, 2009), são comparadas duas estratégias de re-

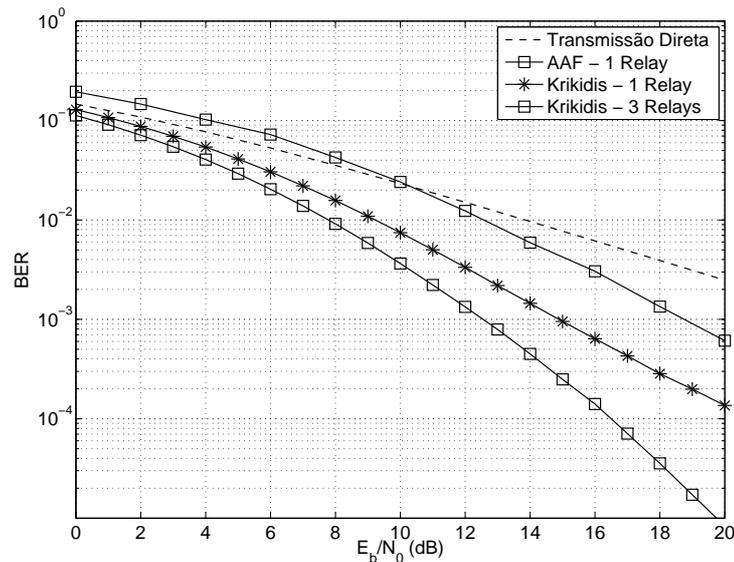


Figura 10: Taxa de erro de bit do protocolo de (KRIKIDIS, 2007) com 1 e 3 relays comparado à transmissão direta e ao AAF.

Fonte: Autoria Própria

transmissão para o canal *relay* denominadas ARQ pós-cooperativo e ARQ pré-cooperativo. No ARQ pós-cooperativo, durante o primeiro instante a fonte transmite sua informação tanto para o destino quanto para o *relay*. Num segundo instante, o *relay* atua repetindo a mesma informação para o destino. No receptor, apenas após combinar os sinais provenientes dos dois caminhos é que a informação de ACK/NACK é enviada pelo canal de retorno. Enquanto que no ARQ pré-cooperativo, o destino já responde com um ACK/NACK após o primeiro instante de transmissão da fonte, evitando a atuação do *relay* quando desnecessário. Dessa forma, o protocolo pós-cooperativo é mais aplicável a sistemas sob condições ruins de canal, diminuindo a taxa de erro em detrimento da vazão. Por sua vez, o ARQ pré-cooperativo é mais interessante para sistemas com boas condições de canal, aumentando a vazão devido à menos usos do canal.

2.6 COMENTÁRIOS FINAIS

Apresentamos neste capítulo conceitos fundamentais da comunicação cooperativa. Mostramos que a diversidade espacial pode ser obtida através do compartilhamento de antenas entre usuários de uma rede, fazendo que os nós cooperem para melhorar a qualidade da comunicação, criando assim a chamada diversidade cooperativa. Dessa forma, o canal *relay* se apresenta como uma alternativa ao uso de múltiplas antenas, o que é interessante em cenários com dispositivos de tamanho reduzido.

Na Seção 2.1 apresentamos os sistemas cooperativos *half-duplex*, *full-duplex*, ortogonais e por superposição, atentando para o fato de que a transmissão ortogonal e *half-duplex* tem a melhor relação entre desempenho e complexidade em cenários práticos. Um sistema sem fio *full-duplex* requer o cancelamento preciso de interferência entre o sinal transmitido e o sinal recebido, o que é bastante complexo uma vez que esses sinais podem diferir em várias ordens de grandeza. Já esquemas que operam em superposição demandam grande processamento computacional no destino, o que consideramos indesejável para a aplicação em questão.

Ao incluir códigos corretores de erros no cenário cooperativo, podemos optar pelos códigos de repetição ou códigos paralelos, conforme a Seção 2.4. Códigos de repetição tem menor complexidade de codificação e decodificação em relação aos códigos paralelos, porém, têm menor desempenho. Todavia, os códigos de repetição parcial se apresentam como uma estratégia interessante no cenário sem fio. Ao permitir que os nós retransmitam apenas uma fração da palavra código original, com a aplicação de um ganho de potência, o desempenho dos códigos de repetição parcial pode ser muito próximo ao dos códigos paralelos.

Ao considerar um sistema com um canal de retorno limitado, torna-se interessante o emprego de protocolos de retransmissão, tal como o ARQ. Na Seção 2.5 apresentamos algumas estratégias desenvolvidas para o cenário cooperativo com canal de retorno e mostramos os ganhos associados a essa troca de informação entre o destino e os nós transmissores. Dentre os trabalhos citados, podemos perceber que todos investigam cenários com ARQ tradicional, ou seja, sem o uso de códigos corretores de erros. Os códigos corretores de erros são parte fundamental de diversos padrões atuais de comunicações. Portanto, o emprego de HARQ, que é a junção de ARQ com códigos corretores de erros, é uma abordagem mais prática, voltada para os cenários de comunicações sem fio atuais. Os diversos tipos de HARQ são descritos com mais detalhes no Apêndice A, de onde é importante mencionar a praticidade do HARQ Tipo-I com *Chase Combining*. O HARQ Tipo-I pode ter um desempenho tão bom, ou até melhor, que HARQ Tipo-II em cenários práticos de comunicação sem fio, além de apresentar uma complexidade de implementação muito menor.

No próximo capítulo apresentaremos uma estratégia baseada na retransmissão parcial utilizando códigos LDPC e HARQ Tipo-I com *Chase Combining*, num sistema ortogonal e *half-duplex*, visando assim cenários práticos de telecomunicações. A presença dos códigos corretores de erros é fundamental nessa estratégia, visto que exploramos a correlação entre os símbolos da palavra codificada introduzida pelo código.

3 MÉTODO DE RETRANSMISSÃO PARCIAL CODIFICADA

Este capítulo tem por objetivo descrever o método cooperativo de retransmissão parcial codificada proposto para o canal *relay*, assim como apresentar o modelo e os resultados de simulação obtidos.

3.1 INTRODUÇÃO

A retransmissão parcial no cenário cooperativo foi inicialmente proposta por Khormuji e Larsson (KHORMUJI; LARSSON, 2009). Em seu trabalho, os autores mostraram que a repetição parcial por parte do *relay* poderia trazer ganhos de desempenho, especialmente se comparados aos códigos de repetição. Essa nova classe de codificação cooperativa foi chamada de códigos de repetição parcial (PR). A vantagem desse método é que fonte e *relay* operam com o mesmo codificador, de forma análoga aos códigos de repetição, porém o *relay* reencaminha apenas uma fração da mensagem original, aplicando uma compensação de potência entre fonte e *relay*. Resultados teóricos, obtidos a partir dos limitantes de probabilidade de falha de cada método, indicam que a performance dos códigos de repetição parcial é muito semelhante aos códigos paralelos. Isto torna esse tipo de estratégia bastante interessante para aplicações práticas, visto que possuem a vantagem construtiva de utilizar códigos mais simples, um único decodificador no receptor, sem um aumento significativo de complexidade de processamento no *relay*, reencaminhando apenas parte da mensagem original.

Sistemas de comunicação sem fio práticos utilizam códigos corretores de erros de alta performance e mecanismos de retransmissão de pacotes. Portanto, desenvolvemos e simulamos um esquema de retransmissão parcial de pacotes utilizando ARQ pré-cooperativo (ZHANG; WANG; WEI, 2009), que é a estratégia com maior vazão presente na literatura; e códigos LDPC, que tem desempenho tão bom quanto o de códigos turbo, com menor complexidade de decodificação (LIN; COSTELLO, 2004).

Os resultados desse capítulo mostram que o método proposto é muito interessante para cenários práticos, pois comprovamos que seu ganho de desempenho não vem de uma maior

utilização de energia, mas de uma correta alocação de recursos por parte dos nós transmissores. Outro ponto importante a ser citado é a complexidade do método, que é relativamente baixa e, por isso, aplicável a sistemas nos quais os nós têm energia limitada. Resultados mostram que o método de retransmissão parcial é inclusive superior à métodos mais complexos, como aquele em que se deve coordenar as transmissões entre vários *relays*.

3.2 MODELO DO SISTEMA

Consideramos um sistema composto por três terminais cooperativos, sendo eles fonte, *relay* e destino, dispostos conforme a Figura 11a). Assumimos uma distância unitária normalizada entre a fonte e o destino, com o *relay* ocupando uma posição intermediária d em relação à fonte. A distância *relay*-destino, por sua vez, é considerada $(1 - d)$. Durante as retransmissões foram consideradas duas estratégias: canal de desvanecimento *long-term* (TABET; DUSAD; KNOPP, 2007), que é constante para todas as retransmissões, e canal de desvanecimento *short-term* (TABET; DUSAD; KNOPP, 2007), que varia de uma retransmissão para outra. Entretanto, para melhor compreensão do texto, apresentaremos nesse capítulo apenas os resultados para o canal Rayleigh *long-term*. Os resultados para o canal *short-term* estão incluídos no Apêndice B, sendo que as conclusões gerais não mudam.

Levando em consideração o modelo log-distância (RAPPAPORT, 2002) de perda de percurso, no qual α é o expoente de perda de percurso, então os canais representados na Figura 11b), conforme definido na seção 2.2, serão:

$$g_{SD} = G_{SD} \times h_{SD} = h_{SD},$$

$$g_{SR} = G_{SR} \times h_{SR} = \sqrt{\left(\frac{1}{d}\right)^\alpha} \times h_{SR}, \text{ e}$$

$$g_{RD} = G_{RD} \times h_{RD} = \sqrt{\left(\frac{1}{1-d}\right)^\alpha} \times h_{RD}.$$

Note que, como consideramos uma distância normalizada unitária entre fonte e destino, o canal representado por g_{SD} tem seu fator de desvanecimento de larga escala G_{SD} igual a 1, enquanto G_{SR} e G_{RD} serão sempre maiores que 1.

Um bloco de k símbolos binários equiprováveis e independentes, $\mathbf{u} = [u_0, u_1, \dots, u_{k-1}]$, é codificado por um codificador LDPC sistemático de taxa $R_c = k/n$, resultando num bloco de n símbolos codificados, $\mathbf{v} = [v_0, v_1, \dots, v_{n-1}]$. Este bloco codificado \mathbf{v} é modulado em BPSK, gerando uma sequência $\mathbf{x} = [x_0, x_1, \dots, x_{n-1}]$, que é transmitida simultaneamente para os nós *relay*

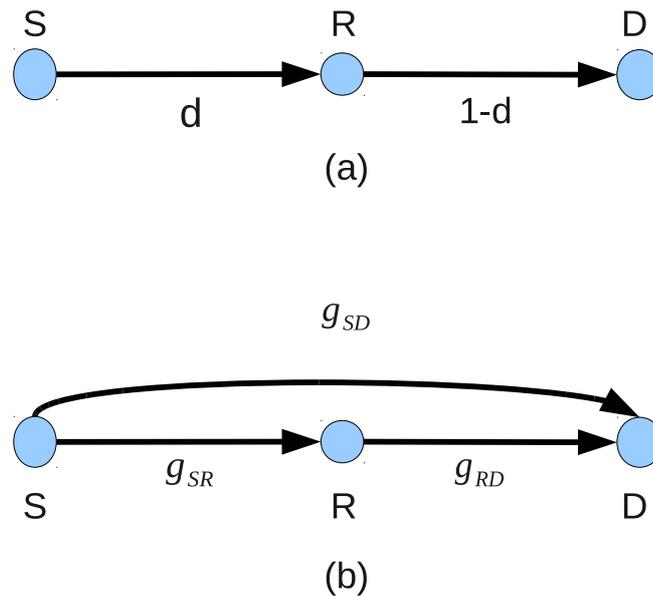


Figura 11: Canal relay. a) Modelo do sistema; b) Modelo dos enlaces entre os nós.

Fonte: Autoria Própria

e destino. Os sinais recebidos no *relay* e no destino, denotados por \mathbf{y}_{SR} e \mathbf{y}_{SD} , respectivamente, são modelados conforme as equações (1) e (2). O receptor, por sua vez, faz uma estimativa $\hat{\mathbf{u}}$ a partir da palavra \mathbf{y}_{SD} recebida e, caso a síndrome da palavra decodificada indique que não existem erros de transmissão, um sinal de reconhecimento positivo (ACK) é enviado pelo canal de retorno para fonte e *relay* e a fonte prosseguirá com a transmissão de um novo bloco de dados. Caso contrário, se ainda forem detectados erros não corrigidos após a decodificação, um sinal de reconhecimento negativo (NACK) é enviado pelo canal de retorno, requisitando a retransmissão do último bloco. Ou seja, modelo equivalente ao ARQ *stop-and-wait* (LIN; COSTELLO, 2004). O canal de retorno é considerado imune ao ruído, o que na prática pode ser obtido com uma codificação de taxa muito baixa, portanto, assumimos que os sinais de ACK/NACK são corretamente recebidos pela fonte e pelo *relay*.

O esquema de retransmissão empregado é o ARQ pré-cooperativo (ZHANG; WANG; WEI, 2009), o que significa que a retransmissão virá do nó com a melhor condição de canal em relação ao destino. Apenas os receptores têm conhecimento do canal, todavia, para que essa informação chegue aos transmissores utilizamos uma estratégia baseada em (KRIKIDIS, 2007). Sendo assim, de acordo com o trabalho citado, considera-se simetria de canal, ou seja, a condição do canal direto é igual à do canal de retorno, $g_{ij} = g_{ji}$ onde $i \in \{S, R\}$ e $j \in \{R, D\}$, é possível que fonte e *relay* estimem a condição de seus enlaces até o destino através da mensagem de reconhecimento negativo proveniente do receptor. Sendo assim, fonte e *relay* aguardam tempos

$t_S \propto \frac{1}{|g_{SD}|}$ e $t_R \propto \frac{1}{|g_{RD}|}$ antes de transmitir, de forma que o nó com a melhor condição de canal será o primeiro a retransmitir. Como assumimos que o sistema utiliza um protocolo de acesso ao meio similar ao *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA), caso ao final do tempo para retransmissão o espectro esteja ocupado, o nó sabe que uma retransmissão já está ocorrendo e cancela seu envio, evitando assim a colisão de pacotes.

O destino faz o MRC do pacote retransmitido com os pacotes previamente armazenados e repete o processo de decodificação e verificação de síndrome. Este processo é repetido até que a palavra recebida esteja totalmente livre de erros ou um número limite de retransmissões M seja alcançado. Este limite é importante para que as retransmissões não ocupem o canal indefinidamente e caso uma palavra não tenha sido corretamente recebida dentro deste limite, ela é descartada e um novo bloco de dados é gerado pela fonte.

3.3 MÉTODO PROPOSTO: RETRANSMISSÃO PARCIAL CODIFICADA

Nessa seção apresentaremos um método de retransmissão parcial proposto para o canal cooperativo. Tal método se baseia na transmissão de apenas uma fração de tamanho fixo da palavra original por parte dos nós retransmissores, o que apresenta uma baixa complexidade de algoritmo. A preocupação com a complexidade do algoritmo é importante visto que os nós, em geral, possuem energia limitada, portanto, o aumento da complexidade de algoritmos implica em mais processamento e, conseqüentemente, em maior consumo de energia. A ideia principal do método de Retransmissão Parcial Codificada (RPC) é de que as retransmissões, sejam elas provenientes da fonte ou do *relay*, enviem apenas uma fração da mensagem original, aplicando um ganho de potência à essa fração de forma que a energia total por transmissão seja mantida. A vantagem desse tipo de método é que a mensagem retransmitida, mesmo contendo apenas parte da mensagem original, terá uma melhor razão sinal-ruído e apresentará um papel decisório importante na decodificação por parte do receptor.

Seja $L < n|L \in \mathbb{Z}^+$ o número de frações em que a mensagem original será dividida. Na primeira transmissão se opera da forma usual, transmitindo todos os n símbolos da palavra codificada com potência P . No caso de uma segunda transmissão ser necessária, apenas a primeira fração de $\frac{n}{L}$ símbolos codificados é enviada ¹. De forma a utilizar a mesma energia por transmissão, os símbolos tem sua magnitude multiplicada por \sqrt{L} . O destino aplica a combinação por MRC entre a palavra completa da primeira transmissão e os $\frac{n}{L}$ símbolos da segunda transmissão. Caso uma terceira transmissão se faça necessária, a segunda fração de $\frac{n}{L}$ símbolos é enviada com sua magnitude multiplicada por \sqrt{L} . O destino, por sua vez, combina os pacotes

¹ Levando em conta n sendo múltiplo de L . Caso contrário, a adaptação do método é bastante simples.

anteriormente recebidos com os novos $\frac{n}{L}$ símbolos e repete o processo de decodificação. Se mais retransmissões forem necessárias, o sistema irá proceder com os próximos $\frac{n}{L}$ símbolos, com a devida potência, e o destino fará a combinação por MRC. Caso os últimos $\frac{n}{L}$ símbolos da palavra original tenham sido enviados na última retransmissão, o sistema retorna ao início da palavra e, caso uma nova retransmissão seja requisitada, os $\frac{n}{L}$ primeiros símbolos serão reenviados. A Figura 12 exemplifica a aplicação do método para $L = 2$, quando o número máximo de retransmissões é $M = 4$ e todas as retransmissões são feitas pelo *relay*.

TX	Símbolos Transmitidos	Ganho	MRC dos Símbolos Recebidos	
0	$\mathbf{x}=[x_0 \dots x_{n-1}]$	1	$\mathbf{r} = a_0 \mathbf{y}_{SD,0}$	
1	$\hat{\mathbf{x}}^0 = [\hat{x}_0 \dots \hat{x}_{\frac{n}{2}-1}]$	$\sqrt{2}$	$\mathbf{r}^0 = a_0 \mathbf{y}_{SD,0}^0 + a_1 \mathbf{y}_{RD,1}$	$\mathbf{r}^1 = a_0 \mathbf{y}_{SD,0}^1$
2	$\hat{\mathbf{x}}^1 = [\hat{x}_{\frac{n}{2}} \dots \hat{x}_{n-1}]$	$\sqrt{2}$	$\mathbf{r}^0 = a_0 \mathbf{y}_{SD,0}^0 + a_1 \mathbf{y}_{RD,1}$	$\mathbf{r}^1 = a_0 \mathbf{y}_{SD,0}^1 + a_2 \mathbf{y}_{RD,2}$
3	$\hat{\mathbf{x}}^0 = [\hat{x}_0 \dots \hat{x}_{\frac{n}{2}-1}]$	$\sqrt{2}$	$\mathbf{r}^0 = a_0 \mathbf{y}_{SD,0}^0 + a_1 \mathbf{y}_{RD,1} + a_3 \mathbf{y}_{RD,3}$	$\mathbf{r}^1 = a_0 \mathbf{y}_{SD,0}^1 + a_2 \mathbf{y}_{RD,2}$
4	$\hat{\mathbf{x}}^1 = [\hat{x}_{\frac{n}{2}} \dots \hat{x}_{n-1}]$	$\sqrt{2}$	$\mathbf{r}^0 = a_0 \mathbf{y}_{SD,0}^0 + a_1 \mathbf{y}_{RD,1} + a_3 \mathbf{y}_{RD,3}$	$\mathbf{r}^1 = a_0 \mathbf{y}_{SD,0}^1 + a_2 \mathbf{y}_{RD,2} + a_4 \mathbf{y}_{RD,4}$

Figura 12: Descrição do método proposto quando $L = 2$, $M = 4$ e todas as retransmissões são feitas pelo *relay*.

Fonte: Autoria Própria

A figura apresenta, para cada transmissão, os símbolos transmitidos, o ganho aplicado a estes símbolos e a saída do combinador no nó destino. Podemos ver que as retransmissões alternam entre $\hat{\mathbf{x}}^0$ e $\hat{\mathbf{x}}^1$, que representam a primeira e segunda metades da palavra modulada $\hat{\mathbf{x}}$ regenerada no *relay*. A saída do MRC no destino é denotada por $\mathbf{r} = [r_0, r_1, \dots, r_{n-1}]$, que é decomposto em duas metades \mathbf{r}^0 e \mathbf{r}^1 . No caso exemplificado, após a primeira retransmissão (TX=1), o destino recebeu uma palavra codificada completa ($\mathbf{y}_{SD,0}$) da primeira transmissão e uma fração desta palavra após a primeira retransmissão ($\mathbf{y}_{RD,1}$). Os pesos do MRC, a_0 e a_1 , são calculados baseados em g_{SR} , g_{RD} , nos ganhos de potência e no protocolo cooperativo utilizado, conforme a Seção 2.3. Com isso, o combinador calcula $\mathbf{r}^0 = a_0 \cdot \mathbf{y}_{SD,0}^0 + a_1 \cdot \mathbf{y}_{RD,1}$ e $\mathbf{r}^1 = a_0 \cdot \mathbf{y}_{SD,0}^1$, onde $\mathbf{y}_{SD,0}^0$ representa a primeira metade de $\mathbf{y}_{SD,0}$ e $\mathbf{y}_{SD,0}^1$ a segunda metade. Podemos notar que, devido a um maior número de componentes no cálculo de \mathbf{r}^0 , os símbolos em \mathbf{r}^0 tendem a ser mais confiáveis que os símbolos em \mathbf{r}^1 . A ideia principal do método proposto é que, devido à correlação dos símbolos intrínseca ao código LDPC, a parcela mais confiável dos símbolos ajude na correta decodificação da parcela menos confiável. Além disso, nota-se que as retransmissões são sempre menores que no esquema HARQ Tipo-I clássico, o que deve

refletir em melhor desempenho em termos de *throughput*.

3.4 RESULTADOS OBTIDOS

Através de simulações computacionais investigamos o desempenho do sistema em termos de *throughput* como função da razão sinal-ruído. A SNR foi definida como E_b/N_0 , em que E_b é a energia por bit de informação e $N_0/2$ a variância do ruído por dimensão. Nas simulações efetuadas consideramos E_b/N_0 fixo para todas as retransmissões, igual ao valor da primeira transmissão. Para cada E_b/N_0 foram sorteados e enviados 1000 blocos de 288 bits de informação. Esses 288 bits de informação foram codificados pelo código LDPC regulamentado no padrão IEEE 802.16e (IEEE STD 802.16E, 2009) de taxa $R_c = 1/2$ que gera uma palavra codificada de 576 bits na forma sistemática. A decodificação é feita por um algoritmo soma-produto (MOREIRA; FARRELL, 2006) com número máximo de iterações igual a 50. O *relay* foi posicionado a uma distância intermediária $d = 0,5$ em relação à fonte e o expoente de perda de percurso foi $\alpha = 4$, que leva em consideração regiões urbanas densamente povoadas (RAPPAPORT, 2002)².

O método de retransmissão parcial codificada proposto foi implementado utilizando os protocolos AAF e SDF (LANEMAN; TSE; WORNELL, 2004). O número máximo de retransmissões para cada palavra enviada foi fixado em $M = 6$. Consideramos três valores para o número de frações de tamanho fixo (L), sendo $L \in \{2, 3, 4\}$. Um número maior de frações não foi considerado devido ao ganho de potência que seria necessário aos nós transmissores. Com $L = 4$, exigimos um ganho de 6dB dos amplificadores dos nós. Utilizando ainda mais frações da palavra codificada precisaríamos de amplificadores capazes de multiplicar sua potência usual de operação por \sqrt{L} , podendo ocasionar perda de linearidade na amplificação (PEDRONI, 1986). Sendo assim, supomos $L = 4$ como um limiar prático de implementação do método. A Tabela 1 condensa os parâmetros principais de simulação.

Nessa seção comparamos o método RPC proposto com o HARQ pre-cooperativo (Pre-HARQ), que é o esquema ARQ pre-cooperativo proposto em (ZHANG; WANG; WEI, 2009) com a inclusão do código LDPC com os mesmos parâmetros da Tabela 1. No Pre-HARQ, após a recepção da primeira transmissão, o destino envia um sinal de reconhecimento positivo ou negativo (ACK/NACK) para fonte e *relay*. As possíveis retransmissões são feitas pelo nó com a melhor condição de canal. Caso a retransmissão seja feita pelo *relay*, tanto o AAF quanto o SDF podem ser utilizados. Portanto, a diferença entre os métodos RPC e Pre-HARQ é que no último as retransmissões incluem a palavra codificada completa, enquanto no esquema proposto

²A consideração de outros valores para d e α não leva a conclusões qualitativamente diferentes daquelas que são apresentadas nessa seção.

Tabela 1: Parâmetros de Simulação

Parâmetro	Descrição
$N_W = 1000$	Número de blocos de informação sorteados
$k = 288$	Número de bits de informação
$n = 576$	Número de bits codificados
$R_C = 1/2$	Taxa do código LDPC
50	Número máximo de iterações
$d = 0,5$	Distância entre fonte e <i>relay</i>
$\alpha = 4$	Expoente de perda de percurso
AAF e SDF	Protocolos cooperativos utilizados
$M = 6$	Número máximo de retransmissões
$L = \{2, 3, 4\}$	Número de frações de tamanho fixo utilizadas

Fonte: Autoria própria.

as retransmissões são parciais.

O *throughput* é definido pela seguinte expressão:

$$T = \frac{1}{N_W} \sum_{i=0}^{N_W-1} \frac{R_C}{\frac{N_{RTX}(i)}{L} + 1}, \quad (20)$$

onde N_W é o número de palavras sorteadas para cada valor de SNR, $N_{RTX}(i)$ é o número de retransmissões necessárias para correta decodificação da i -ésima palavra. Quando $N_W \rightarrow \infty$, essa equação se aproxima do valor esperado do *throughput* instantâneo $E \left[\frac{R_C}{\frac{N_{RTX}(i)}{L} + 1} \right]$.

Caso uma palavra i não tenha sido corretamente decodificada e o número máximo de retransmissões tenha sido alcançado, consideramos que $N_{RTX}(i) \rightarrow \infty$, a palavra i é descartada e uma nova palavra $i + 1$ começará a ser transmitida. Note que essa expressão também é válida para o cálculo do *throughput* do Pre-HARQ, considerando $L = 1$.

Os resultados obtidos utilizando o protocolo AAF, com SNR variando entre -15dB e 10dB, estão demonstrados na Figura 13. O método RPC proposto é comparado à transmissão direta da fonte para o destino e ao HARQ cooperativo tradicional (Pre-HARQ). A partir da figura podemos perceber que as estratégias cooperativas codificadas (RPC e Pre-HARQ) superam a transmissão direta codificada. O método proposto teve melhor desempenho quando $L = 4$, chegando a ganhos da ordem de 2,5dB em relação ao Pre-HARQ e 4,5dB em relação à transmissão direta.

Resultados semelhantes podem ser observados utilizando o protocolo SDF, conforme a Figura 14. Novamente o melhor desempenho é obtido quando $L = 4$, superando o Pre-HARQ em até 3,5dB e superando a transmissão direta em até 5dB.

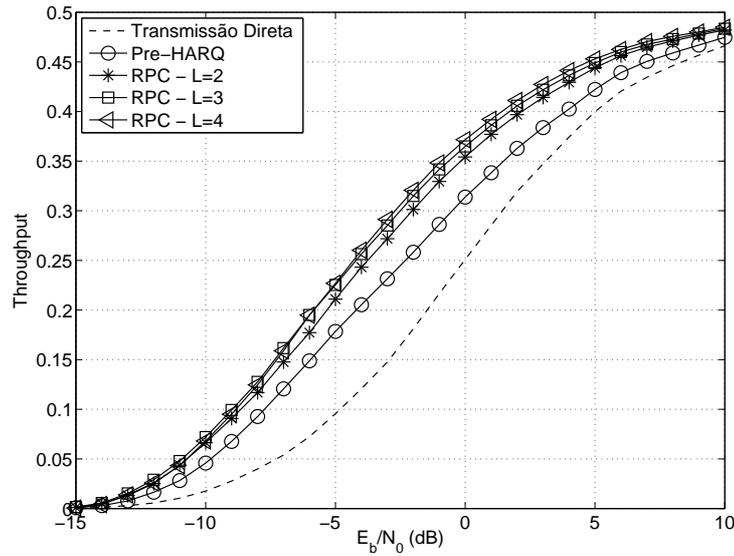


Figura 13: *Throughput* dos métodos HARQ cooperativos utilizando o protocolo AAF comparados ao HARQ da transmissão direta.

Fonte: Autoria Própria

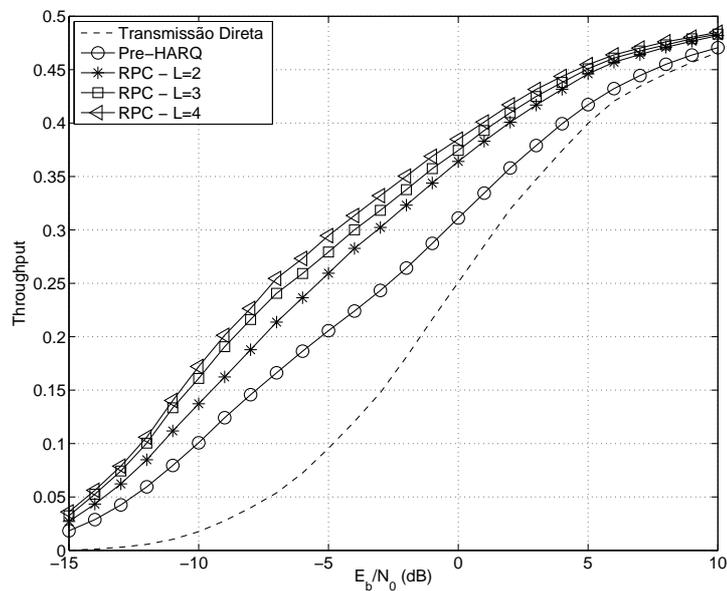


Figura 14: *Throughput* dos métodos HARQ cooperativos utilizando o protocolo SDF comparados ao HARQ da transmissão direta.

Fonte: Autoria Própria

Esses resultados trazem duas conclusões importantes: i) a transmissão cooperativa associada à códigos corretores de erros e protocolos de retransmissão de pacotes traz um ganho

considerável em relação ao sistema não-cooperativo. Conforme descrito anteriormente, ganhos de até 5dB em termos de *throughput* podem ser alcançados; ii) os métodos de retransmissão parcial aumentam o desempenho em relação ao HARQ cooperativo tradicional em até 3,5dB, com complexidade semelhante nos nós transmissores. Na próxima seção investigaremos a razão de tal melhoria de desempenho através da análise do consumo de energia do método proposto.

3.4.1 Análise do Consumo de Energia

Ao retransmitir apenas uma fração da mensagem original é possível que utilizemos mais retransmissões que o método de HARQ cooperativo tradicional. Por exemplo, suponha que determinada palavra tivesse dois pedidos de retransmissão no esquema Pre-HARQ. Seu *throughput* instantâneo seria $T = \frac{R_c}{1 + \frac{N_{RTX}}{L}} = \frac{1/2}{1+2} = 0,167$, uma vez que neste caso $L = 1$. Agora suponha que no método RPC com $L = 2$ apenas duas retransmissões parciais não fossem suficientes e houvesse a necessidade de uma terceira retransmissão, seu *throughput* instantâneo seria $T = \frac{1/2}{1+\frac{3}{2}} = 0,2$. Ou seja, mesmo utilizando mais retransmissões seu *throughput* é maior. Como o número de transmissões no esquema RPC é maior, seu consumo de energia também é maior. Portanto, é necessário investigar se o ganho do método proposto é devido a uma alocação diferenciada de potência na retransmissão parcial ou ao maior uso de energia.

Para investigar essa questão é importante verificar o comportamento das retransmissões no caso do sistema utilizando Pre-HARQ e RPC. Em razão disso, fixamos o valor de E_b/N_0 em 0dB e computamos o número de palavras que necessitaram de cada transmissão. A escolha de E_b/N_0 em 0dB se dá apenas pelo fato de ser um valor em que a visualização dos resultados é facilitada. Os resultados estão listados na Tabela 2. Tomando a primeira linha da tabela como exemplo, vemos que no protocolo AAF com Pre-HARQ foram sorteadas 1000 palavras, correspondente à coluna da primeira transmissão, TX=0. Das 1000 palavras transmitidas, 698 precisaram ser retransmitidas, correspondendo à coluna TX=1. Dessas 698 palavras retransmitidas, 68 precisaram de uma segunda retransmissão, 42 de uma terceira e 36 de uma quarta retransmissão, correspondendo às colunas TX=2, TX=3 e TX=4, respectivamente. As colunas TX=4 e TX=5 tem o mesmo valor, o que indica que as mesmas 36 palavras que precisaram de 4 retransmissões tiveram que ser retransmitidas uma quinta vez. Por fim, a coluna TX=6 mostra que das 36 palavras que precisaram de 5 retransmissões apenas uma foi corrigida corretamente e 35 precisaram de uma sexta retransmissão. Comparando com o método RPC, também no protocolo AAF, podemos perceber que há um aumento considerável de palavras que necessitaram de uma segunda retransmissão (TX=2), aumento que é proporcional ao número de frações de cada método. Tomando como exemplo o caso de método RPC para $L = 2$ comparado ao Pre-

HARQ vemos que o número de palavras que precisaram de uma segunda retransmissão passa de 68 para 251. As mesmas observações se aplicam para outros valores de SNR, assim como no caso do protocolo SDF.

Tabela 2: Número de palavras que necessitaram de cada transmissão para 0dB

Protocolo	Método	TX=0	TX=1	TX=2	TX=3	TX=4	TX=5	TX=6
AAF	Pre-HARQ	1000	698	68	42	36	36	35
AAF	RPC - $L = 2$	1000	698	251	43	38	32	31
AAF	RPC - $L = 3$	1000	698	470	95	39	35	30
AAF	RPC - $L = 4$	1000	698	545	233	66	40	37
SDF	Pre-HARQ	1000	704	62	25	12	10	7
SDF	RPC - $L = 2$	1000	704	187	28	14	10	7
SDF	RPC - $L = 3$	1000	704	447	39	12	11	8
SDF	RPC - $L = 4$	1000	704	529	145	19	10	8

Fonte: Autoria própria.

Se estendermos o método utilizado para gerar a Tabela 2 para todos os valores de SNR, podemos calcular o número médio de transmissões para cada valor de SNR de cada um dos métodos. A partir da tabela, o número médio de transmissões pode ser calculado por:

$$\overline{N_{TX}^j} = \frac{1}{N_W} \sum_{i=0}^M (N_i^j - N_{i+1}^j)(i+1), \quad (21)$$

onde N_i^j é o número de palavras que necessitaram da transmissão $i \in \{0, \dots, M\}$ para o método $j \in \{\text{Pre-HARQ}, \text{RPC}\}$ e $N_i^j = 0$ para $i > M$. Por exemplo, N_1^{RPC} corresponde ao número de palavras que precisaram da transmissão TX=1 no método RPC conforme a Tabela 2. Também é importante notar que $\frac{N_i^j - N_{i+1}^j}{N_W}$ representa a probabilidade de erro em cada transmissão. As Figuras 15 e 16 mostram o número médio de transmissões por SNR, obtidos a partir da extensão dos resultados da Tabela 2 e da aplicação da equação (21), para os protocolos AAF e SDF.

A partir dessa figuras podemos notar que o número médio de retransmissões é proporcional ao número de frações da palavra codificada retransmitida no método parcial, tanto para o AAF quanto para o SDF. Portanto, como mais transmissões implicam em um maior consumo de energia do método RPC, devemos investigar a contribuição efetiva do método proposto, descontando a parcela correspondente ao maior número médio de retransmissões (consumo).

A partir da Tabela 2, podemos definir a energia média consumida pelos métodos por:

$$\overline{E^j} = \frac{E}{N_W} \sum_{i=0}^M N_i^j, \quad (22)$$

onde $E = kE_b$ é a energia utilizada em cada transmissão, que é igual para todos os métodos.

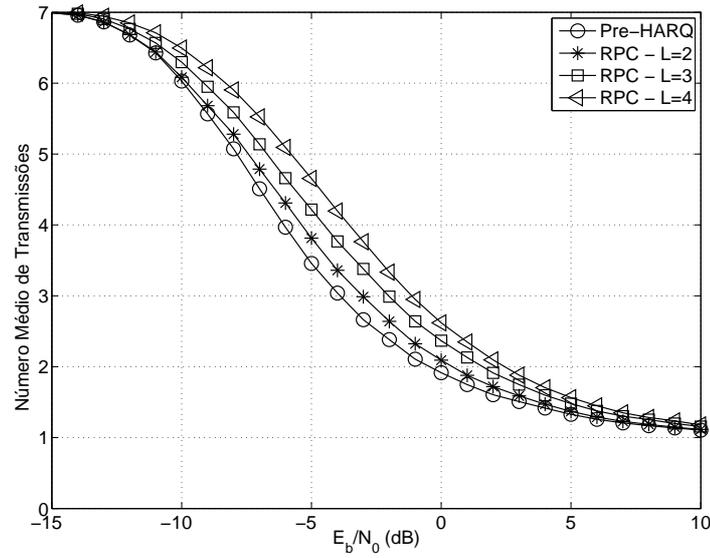


Figura 15: Número médio de transmissões para os métodos RPC e Pre-HARQ no protocolo AAF.

Fonte: Autoria Própria

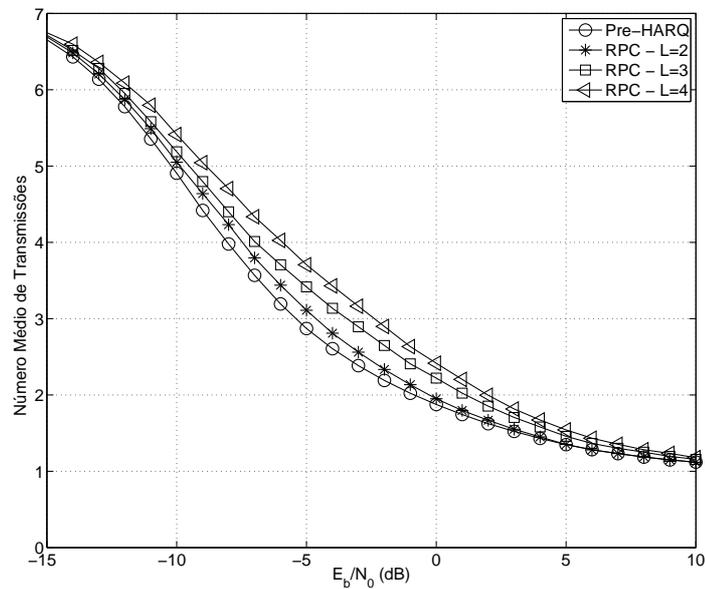


Figura 16: Número médio de transmissões para os métodos RPC e Pre-HARQ no protocolo SDF.

Fonte: Autoria Própria

Para saber a parcela de energia excedente utilizada pelo método RPC em relação ao Pre-HARQ definimos uma razão δ entre a energia média do método parcial e do método tradicional:

$$\delta = \frac{E^{RPC}}{E^{Pre-HARQ}} = \frac{\frac{E}{N_W} \sum_{i=0}^M N_i^{RPC}}{\frac{E}{N_W} \sum_{i=0}^M N_i^{Pre-HARQ}} = \frac{\sum_{i=0}^M N_i^{RPC}}{\sum_{i=0}^M N_i^{Pre-HARQ}}. \quad (23)$$

Podemos utilizar a razão δ para penalizar a energia usada no método RPC para que a comparação de *throughput* seja justa. Para tal, definimos uma constante de normalização $\delta_{dB} = 10 \log_{10}(\delta)$.

É importante ressaltar que δ_{dB} deve ser calculado para cada valor de SNR simulado, sendo que seu valor varia para cada diferente SNR do canal. A normalização das curvas do método de retransmissão parcial se dá pela penalização de cada valor de SNR simulado, somando δ_{dB} pontualmente. Com isso, há um deslocamento para a direita das curvas do esquema RPC representando a punição imposta devido ao maior número médio de retransmissões e consequentemente maior consumo de energia.

As Figuras 17 e 18 mostram, em uma região detalhada, a comparação do método RPC com $L = 2$, antes e depois da normalização de energia, em relação ao Pre-HARQ utilizando os protocolos AAF e SDF. É interessante observar que a curva normalizada continua apresentando ganho em relação ao Pre-HARQ, ganho que vem da forma com que a potência é alocada à fração dos símbolos retransmitidos. Para o caso do protocolo AAF com $E_b/N_0 = 0\text{dB}$ e $L = 2$, de acordo com a Tabela 2, $\delta = \frac{2093}{1915} = 1,093 = 0,39\text{dB}$. Portanto, o esquema RPC com $L = 2$ utiliza 9,3% a mais de energia que o Pre-HARQ nesse caso particular. Logo, a curva da Figura 17 foi deslocada para a direita em 0,39dB para esse valor de E_b/N_0 . A diferença entre a curva normalizada e o método tradicional é de 1,3dB, representando o ganho efetivo do método para esse valor de SNR. Já para o caso do protocolo SDF com $E_b/N_0 = 0\text{dB}$ e $L = 2$, de acordo com a Tabela 2, $\delta = \frac{1950}{1820} = 1,0714 = 0,3\text{dB}$. Portanto, RPC com $L = 2$ utiliza 7,14% a mais de energia que o Pre-HARQ e a curva da Figura 18 foi deslocada em 0,3dB para a direita em $E_b/N_0 = 0\text{dB}$. A diferença entre a curva normalizada e o método tradicional ainda é de 2,3dB.

Estendendo as operações de normalização de *throughput* para todos os valores de E_b/N_0 simulados no método RPC com $L = 2$, $L = 3$ e $L = 4$, e comparando ao HARQ cooperativo tradicional, temos os resultados contidos nas Figuras 19 e 20. Podemos perceber que mesmo após a normalização, os métodos RPC continuam a ser vantajosos em relação aos protocolos HARQ cooperativos tradicionais. No protocolo AAF, o método que mais se destaca é o RPC com $L = 3$, alcançando ganhos de até 1,3dB em relação ao Pre-HARQ. No caso do protocolo SDF, a curva que mais se destaca é o RPC com $L = 4$, com ganhos de até 3dB em relação ao Pre-HARQ.

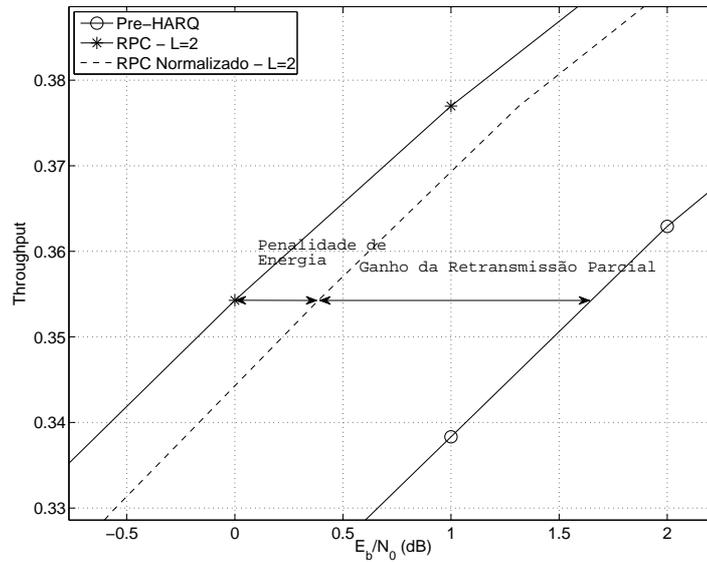


Figura 17: Ganho normalizado do método RPC após a aplicação da constante de normalização δ . $L = 2, M = 6$ e o relay opera no protocolo AAF.

Fonte: Autoria Própria

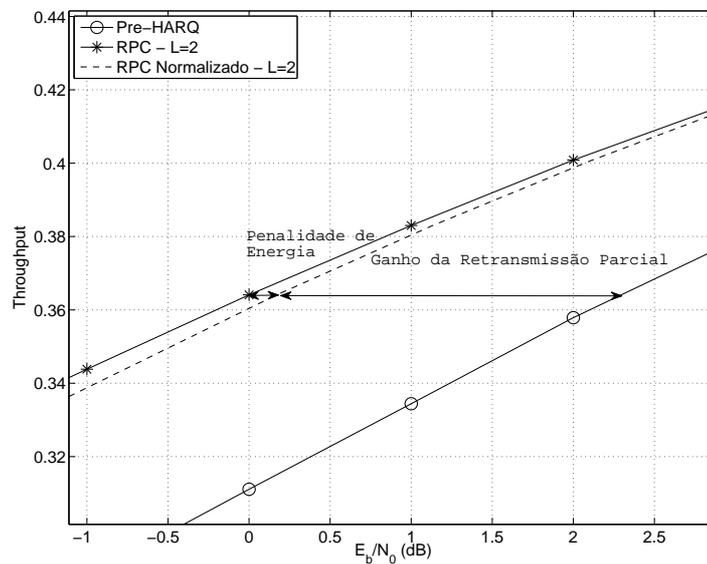


Figura 18: Ganho normalizado do método RPC após a aplicação da constante de normalização δ . $L = 2, M = 6$ e o relay opera no protocolo SDF.

Fonte: Autoria Própria

3.4.2 Comparação com Múltiplos Relays

Os resultados obtidos na seção anterior mostram que o método RPC proposto proporciona ganhos de *throughput* em relação aos protocolos de retransmissão tradicionais aplicados ao ca-

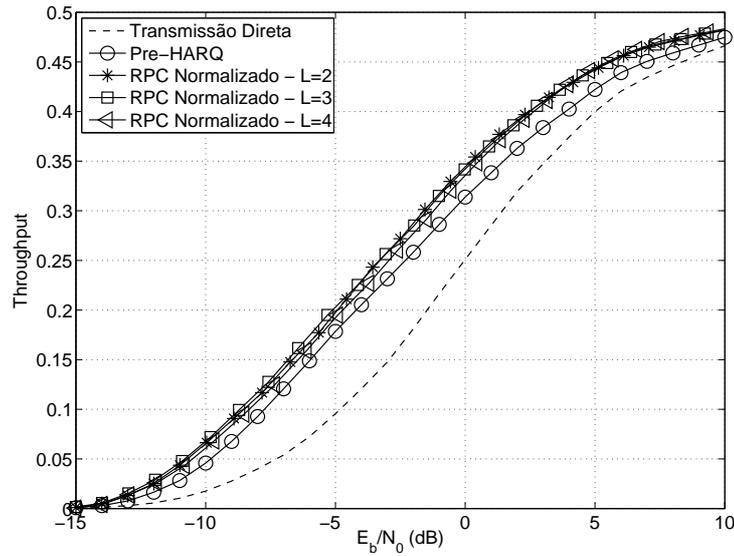


Figura 19: *Throughput* normalizado para os métodos de retransmissão parcial em comparação com o HARQ cooperativo tradicional para o protocolo AAF.

Fonte: Autoria Própria

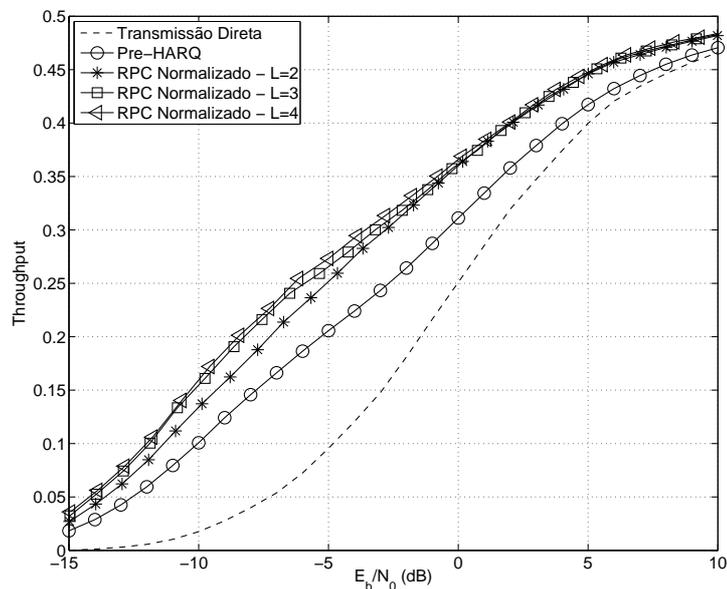


Figura 20: *Throughput* normalizado para os métodos de retransmissão parcial em comparação com o HARQ cooperativo tradicional para o protocolo SDF.

Fonte: Autoria Própria

na *relay*, sem aumento da complexidade do protocolo nos nós retransmissores. Outra estratégia interessante, que foi descrita na Seção 2.2.1, é a cooperação entre diversos nós de uma rede, ou

seja, a utilização de múltiplos *relays*.

Quando o sistema permite a utilização de múltiplos *relays*, o protocolo HARQ pode escolher o nó com a melhor condição de canal em relação ao destino para transmitir. A vantagem vem do fato de que, com o maior número de nós atuando de forma cooperativa, a probabilidade de que um dos nós esteja em condições favoráveis para a retransmissão aumenta. Porém, a complexidade do protocolo tende a aumentar com a introdução de um maior número de nós cooperativos. Funções de controle de tráfego e sinalização entre os diversos *relays* devem ser implementadas.

O objetivo dessa seção é comparar o desempenho do esquema RPC operando com um único *relay* com o esquema Pre-HARQ com múltiplos *relays*, de forma a verificar a relação entre desempenho e complexidade de ambos os métodos. A Figura 21 compara o *throughput* normalizado do método RPC com $L = 3$ à transmissão direta, Pre-HARQ e Pre-HARQ com 2 *relays*, utilizando o protocolo AAF para todos os esquemas. A partir da figura podemos perceber que o método proposto supera o Pre-HARQ com 2 *relays*, alcançando ganhos de até 1,1dB. Ou seja, obtivemos ganhos de desempenho mesmo utilizando apenas um *relay* no método RPC. A Figura 22 mostra resultados similares para o protocolo SDF, comparando o método RPC com $L = 4$, a transmissão direta, Pre-HARQ, Pre-HARQ com 2 e 4 *relays*. Como podemos notar, no caso do esquema proposto, mesmo utilizando apenas um *relay*, o método RPC supera o Pre-HARQ com 4 *relays*, alcançando ganhos de até 1,8dB. Os valores de $L = 3$ e $L = 4$ foram utilizados nas figuras citadas por serem os parâmetros que desempenharam melhor para o método RPC em cada um dos protocolos.

A coordenação entre vários nós cooperando não é uma tarefa trivial. Quando a rede opera com mais de um *relay*, existe a necessidade de coordenar entre esses múltiplos usuários qual será o escolhido para retransmitir. Para tanto, é necessária uma estimação tanto dos canais *relay*-destino quanto dos canais fonte-*relay*, de forma que o tráfego de informações de controle e processamento do algoritmo de coordenação pode ser muito grande. Além disso, o atraso na rede pode crescer com o número de nós cooperando, tanto pela quantidade de informação trocada entre os nós quanto a outros fatores diversos como, por exemplo, nós em estado de economia de energia que precisam entrar em operação rapidamente. Com isso, há uma perda de eficiência espectral dos sistemas com múltiplos *relays* que deveria penalizar as curvas de *throughput* apresentadas. Penalização que não foi considerada nas simulações.

Outro resultado importante a ser observado na Figura 22 é que as curvas de múltiplos *relays* convergem a partir de um certo valor de SNR. Da mesma forma como construímos a Tabela 2 para investigar o método RPC, fixamos o valor de E_b/N_0 em 0dB e computamos o percentual

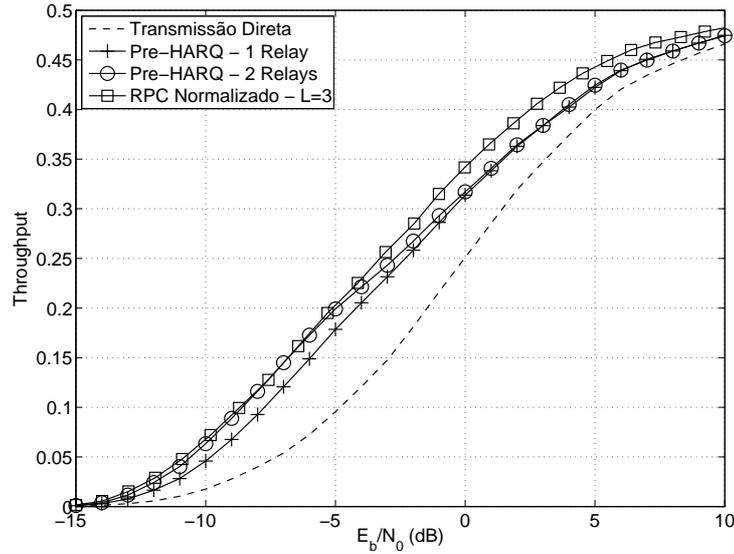


Figura 21: Desempenho do método RPC normalizado, Pre-HARQ com único e múltiplos relays e transmissão direta no protocolo AAF.

Fonte: Autoria Própria

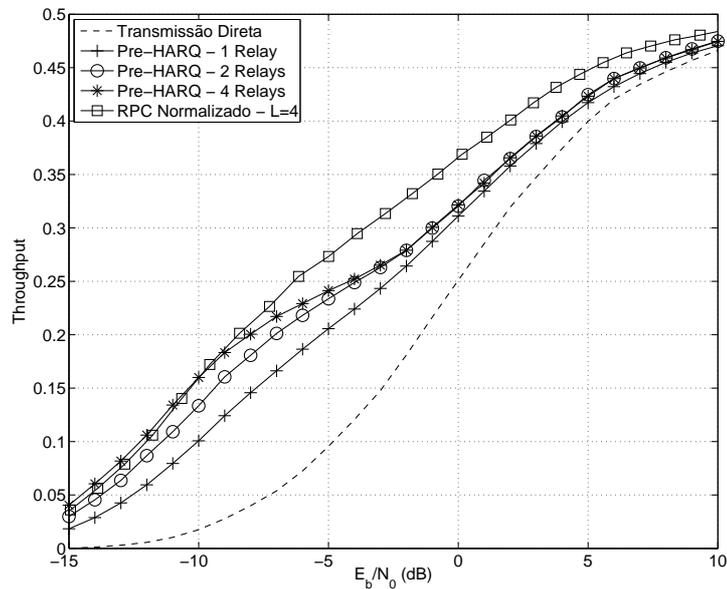


Figura 22: Desempenho do método RPC normalizado, Pre-HARQ com único e múltiplos relays e transmissão direta no protocolo SDF.

Fonte: Autoria Própria

de palavras que necessitaram de cada transmissão no caso do método Pre-HARQ operando com múltiplos relays, comparado ao esquema RPC com $L = 2$, $L = 3$ e $L = 4$, operando com

um único *relay*. Os resultados estão apresentados na forma de gráficos de barras, conforme as Figuras 23 e 24. A primeira transmissão nos gráficos representa a transmissão original a partir da fonte, ou seja, sempre terá seu valor em 100%. A partir das figuras, podemos observar que a maioria dos erros são corrigidos com apenas uma retransmissão, com menos de 10% das palavras código requisitando uma terceira transmissão para o método Pre-HARQ, tanto com um ou mais *relays*. Isso significa que, para esse valor de E_b/N_0 , o uso de múltiplos nós cooperando não reflete numa melhoria considerável de performance, uma vez que a segunda transmissão já é suficiente em mais de 90% dos casos. Esse comportamento observado nos gráficos de barras explica porque, mesmo aumentando o número de *relays*, a performance do método Pre-HARQ converge após um certo valor de SNR. Esse comportamento dos métodos com múltiplos *relays* também foi notado em (STANOJEV et al., 2006).

As Figuras 23 e 24 também mostram que, para o método RPC, quanto maior o valor de L , maior o número de retransmissões necessárias. Entretanto, o número maior de retransmissões, e a correspondente penalização δ , não são suficientemente grandes para anular os ganhos de *throughput* obtidos devido às retransmissões parciais, conforme demonstrado na seção 3.4.1.

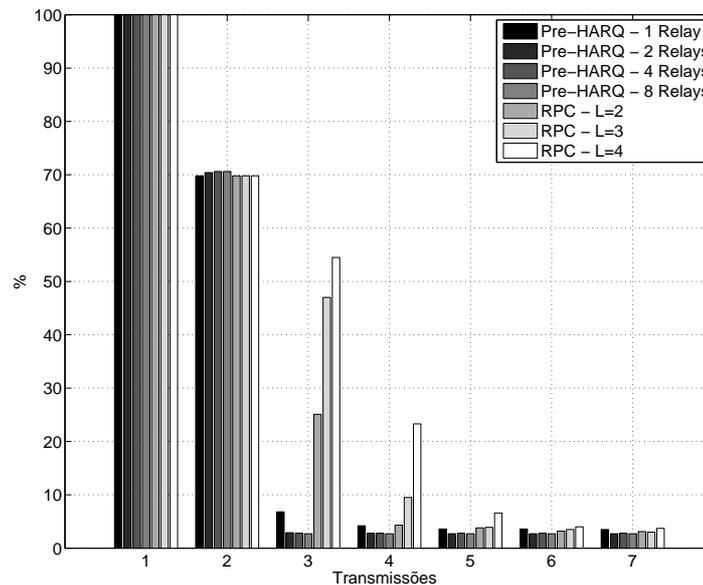


Figura 23: Percentual de palavras que necessitaram de cada retransmissão entre o método RPC e Pre-HARQ, com um ou mais *relays* utilizando o protocolo AAF.

Fonte: Autoria Própria

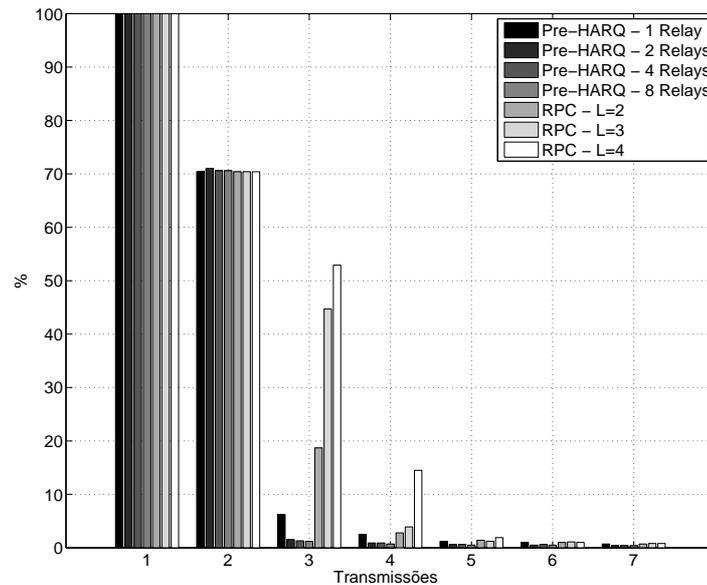


Figura 24: Percentual de palavras que necessitaram de cada retransmissão entre o método RPC e Pre-HARQ, com um ou mais *relays* utilizando o protocolo SDF.

Fonte: Autoria Própria

3.5 CONCLUSÕES

Apresentamos nesse capítulo um método de HARQ cooperativo baseado na retransmissão parcial de pacotes com alocação diferenciada de potência. Os resultados contidos na seção 3.4 mostram que o desempenho, em termos de *throughput*, pode ser melhorado em até 3dB com relação aos métodos atuais presentes na literatura, mesmo após aplicada a normalização de energia. Conseguimos também provar que o ganho do método proposto vem de uma correta alocação de potência e não de um maior uso de energia, comprovando assim sua eficiência.

Ao compararmos o desempenho do método proposto ao caso de múltiplos *relays*, podemos perceber que, na medida em que aumentamos o número de nós cooperando no HARQ tradicional, o desempenho em baixa SNR aumenta consideravelmente, porém esse ganho de desempenho em relação ao método parcial é muito pequeno. Além disso, esse desempenho vem aliado a uma complexidade maior de protocolo, que deve coordenar as retransmissões entre diversos nós. De forma adicional, conseguimos mostrar que o ganho ao utilizar vários *relays* é característico apenas das regiões de baixa razão sinal-ruído e, se a condição do canal é melhorada, o método RPC proposto é sempre superior em termos de *throughput*.

Portanto, podemos concluir que o método proposto é muito interessante para cenários

práticos de comunicações sem fio. Em redes de sensores ou até redes de comunicação celular, onde cada nó é dotado de energia limitada por uma bateria, o aumento da vazão acarreta em um menor consumo de energia por parte dos nós, aumentando sua vida útil. Além disso, se uma comunicação mais confiável pode ser estabelecida, os limites de potência utilizados podem ser reduzidos ainda mantendo uma comunicação estável.

4 COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido nessa dissertação foi um esquema de comunicação cooperativa, na presença de um canal de retorno, denominado método de Repetição Parcial Codificada (RPC), que faz uso de cinco estratégias principais: i) transmissão ortogonal, que reduz a complexidade computacional do nó de destino da comunicação (BAE; JUNG; LEE, 2009); ii) nós *half-duplex*, uma vez que isolar sinais de transmissão e recepção que diferem de muitas ordens de grandeza no transceptor sem fio é uma tarefa complexa (CHAKRABARTI et al., 2007); iii) HARQ Tipo-I com *Chase Combining* que, conforme demonstrado em (FRENGER; PARKVALL; DAHLMAN, 2001; MOTOROLA, 2000; BEH; DOUFEXI; ARMOUR, 2007; CHENG, 2006; TOUMPAKARIS et al., 2008; LEE et al., 2009), tem um desempenho semelhante, ou até superior, ao HARQ Tipo-II em ambientes de comunicações sem fio, com uma complexidade construtiva menor; iv) códigos LDPC, que apresentam alto desempenho, assim como os códigos turbo, mas com menor complexidade de decodificação e menor número de patentes existentes (MOREIRA; FARRELL, 2006); v) repetição parcial, o que reduz bastante a complexidade na construção dos códigos e na decodificação, apresentando desempenho muito próximo ao caso de codificação paralela (KHORMUJI; LARSSON, 2009). Dessa forma, mantivemos o foco do trabalho em quesitos de implementação prática, visando protocolos de complexidade relativamente baixa e que aumentem o desempenho dos sistemas de comunicação sem fio atuais.

Ao utilizar retransmissões de frações da palavra codificada original, aplicamos um ganho de potência aos símbolos transmitidos, de forma que a energia consumida por retransmissão fosse a mesma que seria utilizada ao retransmitir a palavra completa. Assim, a fração retransmitida tem uma melhor SNR, responsável por auxiliar o processo de decodificação no destino. Através da análise do consumo de energia do método, conseguimos provar que o ganho vem de uma melhor alocação de potência e não de um maior uso de energia. Isso foi feito ao considerarmos o *throughput* normalizado. Ao comparar o *throughput* normalizado do método proposto ao dos métodos atuais encontrados na literatura, ganhos de desempenho de até 3dB em favor do RPC foram obtidos.

O que consideramos como a maior contribuição dessa dissertação é a comparação do de-

sempenho do RPC ao HARQ cooperativo tradicional com múltiplos *relays*. O desempenho em baixa SNR para esquemas com múltiplos *relays* aumenta na medida em que aumentamos o número de nós cooperando. Porém, esquemas HARQ com vários nós cooperando têm maior complexidade, em função da tarefa de coordenar as retransmissões entre diversos *relays*. De forma adicional, conseguimos mostrar que o ganho ao utilizar vários *relays* é característico apenas das regiões de baixa SNR e, no geral, o método RPC proposto é superior em termos de *throughput*. Concluimos assim que o método proposto é muito interessante para redes sem fio práticas, uma vez que maior *throughput* e menor complexidade de processamento estão diretamente ligados ao consumo de energia. Reduzir o consumo acarreta em maior tempo de vida de dispositivos dotados de energia limitada, como no caso de redes de sensores ou redes de comunicação celular.

Como propostas para trabalhos futuros, poderia ser feita a análise formal do desempenho do método, em termos de probabilidade de erro. Dessa forma, poderíamos comparar analiticamente o desempenho do método proposto em relação aos esquemas atuais, com a possibilidade de se encontrar uma otimização do método. Outro ponto a ser considerado é a criação de um método semelhante para um sistema que opere por superposição. Ao operar de forma ortogonal há uma perda de eficiência espectral quando comparamos o sistema cooperativo à transmissão direta. Dessa forma, a superposição permitiria que fonte e *relay* transmitissem ao mesmo tempo, melhorando a eficiência do método, porém aumentando sua complexidade. Além disso, outra questão bastante interessante é como projetar um esquema de retransmissão cooperativo se o sistema utilizar de *Adaptive Modulation and Coding* (AMC) (GOLDSMITH, 2005; GOLDSMITH; CHUA, 1998; KATONA; BITO, 2007; PENG; SONG; SONG, 2007; ANSARI; RAJPUT; HASHMANI, 2009). AMC é uma técnica que visa aumentar a vazão e a eficiência espectral do canal com desvanecimento, através da adequação da ordem de modulação e da taxa de codificação de acordo com a condição do canal. Dessa forma, há necessidade de controlar os diversos tipos de modulação e codificação entre fonte, *relay* e destino.

APÊNDICE A – ARQ HÍBRIDO

Os métodos de ARQ puros apenas consideram o uso de um detector de erros como, por exemplo, um *Cyclic Redundancy Check* (CRC). No entanto, ao adicionar um código corretor de erros, ou *Forward Error Correction* (FEC), para corrigir ou minimizar os erros no pacote recebido, obtém-se um mecanismo do tipo HARQ. Esta técnica apresenta um ganho substancial, pois diminui a quantidade de retransmissões (WICKER, 1994)

A.1 HARQ TIPO-I

No modelo HARQ Tipo-I puro o transmissor gera a informação, inclui o CRC para detecção de erros e adiciona um FEC que codifica esta informação gerando uma palavra codificada, a qual é transmitida. No receptor, primeiro corrige-se o máximo de erros que o FEC suporta e, em seguida, verifica-se o CRC para detectar possíveis erros persistentes. Caso não haja erros, o receptor envia um ACK que faz com que o transmissor envie uma informação nova. Caso contrário, ainda havendo erros, uma retransmissão será requisitada através do envio de um NACK no canal de retorno e o pacote atual é descartado. Ao receber o pacote retransmitido, o receptor realizará os mesmos procedimentos da transmissão anterior. Estes procedimentos são realizados até que não haja mais erros ou que um limite de retransmissões seja atingido. Se o limite de retransmissões for atingido, e mesmo assim persistirem os erros, então deverá ser considerada uma falha de transmissão.

Uma forma de melhorar o desempenho é através da realização de combinação por diversidade - em inglês, *Diversity Combining* (DC), também conhecida como Combinação de Chase - em inglês, *Chase Combining* (CHASE, 1985). O processo é bem semelhante ao do HARQ Tipo I puro, no entanto, os pacotes recebidos com erros não são descartados pelo receptor, mas são combinados símbolo à símbolo. A combinação por diversidade faz com que a probabilidade de erro de símbolo seja minimizada (LIN; COSTELLO, 2004).

A.2 HARQ TIPO-II

No HARQ Tipo-II, também chamado de redundância incremental - em inglês, *Incremental Redundancy* (IR), a cada pedido de retransmissão feito pelo receptor, o transmissor irá enviar alguns bits de paridade (redundância) adicionais. Conforme aumenta a quantidade de retransmissões, a taxa do código torna-se cada vez menor até atingir a menor taxa aceitável pelo FEC utilizado. Na primeira transmissão, o transmissor envia uma palavra na maior taxa possível. Caso o transmissor receba um NACK, este enviará mais bits de redundância para o receptor. O receptor, por sua vez, inclui os bits recebidos no processo de decodificação. Esse processo se repete até que se alcance a menor taxa possível ou a palavra seja corretamente decodificada.

A.3 ANÁLISE COMPARATIVA

É esperado que métodos de HARQ Tipo-II superem técnicas de HARQ Tipo-I com DC, uma vez que estes são apenas uma forma de código de repetição. Entretanto, algumas comparações demonstram que sob várias condições práticas Tipo-I com DC possui desempenho próximo, ou até superior, ao Tipo-II. Em (FRENGER; PARKVALL; DAHLMAN, 2001; MOTOROLA, 2000) vários cenários considerando HSDPA foram investigados. Em cenários de alta mobilidade dos dispositivos (canais com desvanecimento) Tipo-II apresenta um desempenho marginalmente superior ao Tipo-I com DC. Entretanto, quando utilizam-se modulações de baixa ordem e códigos de taxa baixa, Tipo-I com DC torna-se mais vantajoso que Tipo-II. Os autores de (FRENGER; PARKVALL; DAHLMAN, 2001) ainda ressaltam que para dispositivos que utilizem o HSDPA em cenários reais Tipo-I com DC é melhor que Tipo-II, uma vez que o Tipo-I requer uma complexidade de circuito menor e também um uso de memória menor que para o Tipo-II. Em (BEH; DOUFEXI; ARMOUR, 2007), cenários considerando LTE utilizando OFDM são investigados, chegando-se a conclusões semelhantes.

Em (CHENG, 2006) é apresentado que, no caso de canais com desvanecimento, técnicas de Tipo-I com DC podem ser uma melhor solução do que Tipo-II. Além disso, em (TOUMPAKARIS et al., 2008; LEE et al., 2009) o impacto de utilizar HARQ em sistemas sem fio usando *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) é investigado. Os autores concluem que em alguns casos esquemas Tipo-I com DC podem superar métodos Tipo-II.

Portanto, dado o exposto acima, consideramos que o uso de HARQ Tipo-I com *Chase Combining* é mais vantajoso do que HARQ Tipo-II no cenário assumido nesse trabalho, já que focamos em complexidade reduzida.

APÊNDICE B – RESULTADOS DO MÉTODO PROPOSTO PARA CANAL *SHORT-TERM*

Neste apêndice apresentamos os resultados para o canal de desvanecimento *short-term*, que é constante durante todo um bloco de transmissão, mas varia entre as retransmissões. Com exceção dessa característica, os demais parâmetros do sistema se mantêm.

A Figura 25, que é a correspondente da Figura 21, compara o *throughput* normalizado do método RPC com $L = 3$ à transmissão direta, Pre-HARQ e Pre-HARQ com 2 *relays*, utilizando o protocolo AAF para todos os esquemas. De forma semelhante, o método proposto supera o Pre-HARQ com 2 *relays*, alcançando ganhos de até 1,2dB. A Figura 26, correspondente da Figura 22, mostra resultados similares para o protocolo SDF, comparando o método RPC com $L = 4$, a transmissão direta, Pre-HARQ, Pre-HARQ com 2 e 4 *relays*. Como podemos notar, no caso do esquema proposto, mesmo utilizando apenas um *relay*, o método RPC supera o Pre-HARQ com 4 *relays*, alcançando ganhos de até 2,7dB. De forma análoga ao Capítulo 3, os valores de $L = 3$ e $L = 4$ foram utilizados nas figuras citadas por serem os parâmetros que desempenharam melhor para o método RPC em cada um dos protocolos.

Da mesma forma como construímos os gráficos de barras das Figuras 23 e 24, analisamos o percentual de palavras que necessitaram de cada transmissão no caso do método Pre-HARQ operando com múltiplos *relays*, comparado ao esquema RPC com $L = 2$, $L = 3$ e $L = 4$, operando com um único *relay* para uma $E_b/N_0 = 0$ dB. Os resultados são demonstrados na Figura 27 para o caso do protocolo SDF. Podemos perceber que, apesar de um maior número de palavras que requerem a terceira e quarta transmissões, a proporção entre os métodos HARQ tradicionais e o esquema RPC proposto se mantem. Portanto, podemos dizer que os resultados para *long-term* e *short-term* são qualitativamente os mesmos.

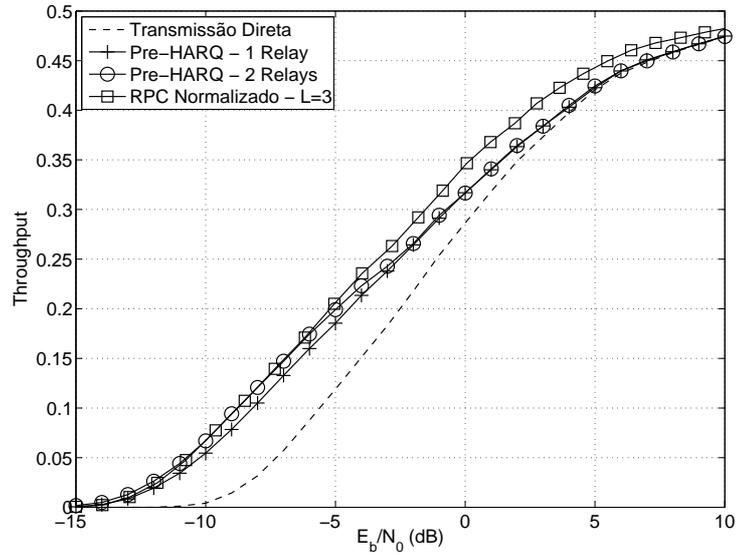


Figura 25: Desempenho do método RPC normalizado, Pre-HARQ com único e múltiplos *relays* e transmissão direta no protocolo AAF em canal de desvanecimento *short-term*.

Fonte: Autoria Própria

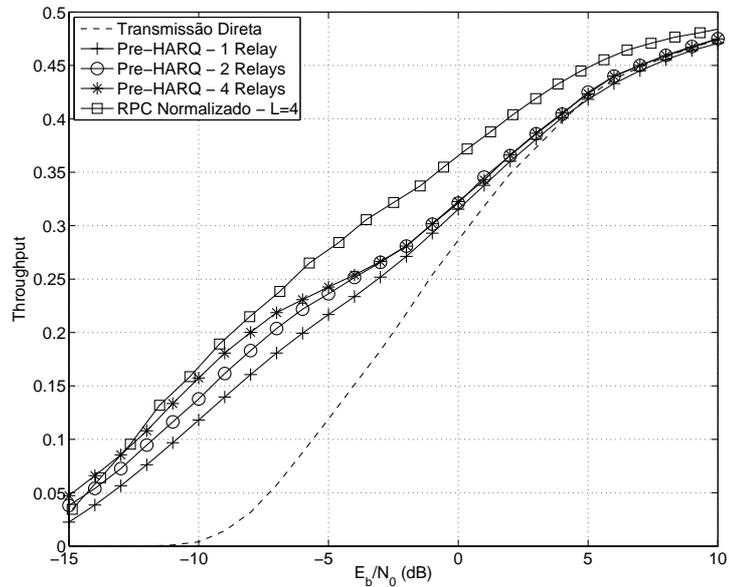


Figura 26: Desempenho do método RPC normalizado, Pre-HARQ com único e múltiplos *relays* e transmissão direta no protocolo SDF em canal de desvanecimento *short-term*.

Fonte: Autoria Própria

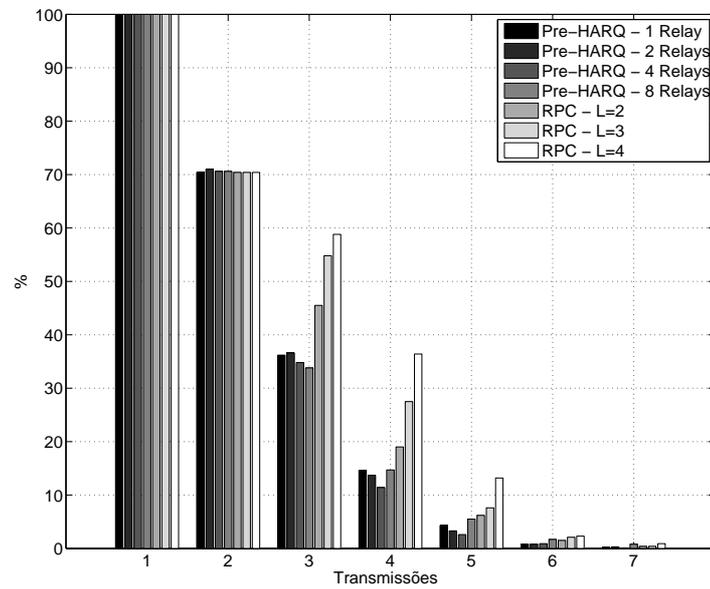


Figura 27: Percentual de palavras que necessitaram de cada retransmissão entre o método RPC e Pre-HARQ, com um ou mais *relays* utilizando o protocolo SDF em canal de desvanecimento *short-term*.

Fonte: Autoria Própria

REFERÊNCIAS

- ALAMOUTI, S. A simple transmit diversity technique for wireless communications. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 16, n. 8, p. 1451 – 1458, October 1998.
- ANSARI, A.; RAJPUT, A.; HASHMANI, M. Wimax network optimization - analyzing effects of adaptive modulation and coding schemes used in conjunction with ARQ and HARQ. In: **Proc. 7th Annual Communication Networks and Services Research Conference**. TESTE: [s.n.], 2009. p. 6–13.
- BAE, Y.; JUNG, S.; LEE, J. Capacity comparison of orthogonal and non-orthogonal cooperative relay systems. **Proc. IEEE 69th Vehicular Technology Conference**, p. 26–29, April 2009.
- BEH, K. C.; DOUFEXI, A.; ARMOUR, S. Performance evaluation of hybrid ARQ schemes of 3GPP LTE OFDMA system. In: **Proc. IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–5.
- BHUSHAN, N. et al. CDMA2000 1xEV-DO revision A: a physical layer and MAC layer overview. **IEEE Communications Magazine**, v. 44, n. 2, p. 37–49, 2006. ISSN 0163-6804.
- CHAKRABARTI, A. et al. Code designs for cooperative communication. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 24, n. 5, p. 16–26, Sept. 2007.
- CHASE, D. Code combining—a maximum-likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets. **IEEE Transactions on Communications**, v. 33, n. 5, p. 385–393, May 1985.
- CHENG, J.-F. Coding performance of hybrid ARQ schemes. **IEEE Transactions on Communications**, v. 54, n. 6, p. 1017–1029, 2006. ISSN 0090-6778.
- FAN, M. et al. On the reverse link performance of CDMA2000 1xEV-DO revision A system. In: **Proc. IEEE International Conference on Communications**. [S.l.: s.n.], 2005. v. 4, p. 2244–2250 Vol. 4.
- FOSCHINI, G. J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. **Bell Labs Tech. Journal**, v. 2, p. 41–59, Autumn 1996.
- FREITAS-JR., W. C.; CAVALCANTI, F. R. P.; LOPES, R. R. Hybrid transceiver schemes for spatial multiplexing and diversity in MIMO systems. **SBrT/IEEE Journal of Communication and Information Systems**, v. 20, n. 3, p. 63–76, 2005.
- FRENGER, P.; PARKVALL, S.; DAHLMAN, E. Performance comparison of HARQ with chase combining and incremental redundancy for HSDPA. In: **Proc. IEEE 54th Vehicular Technology Conference**. [S.l.: s.n.], 2001. v. 3, p. 1829–1833.
- GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. 1st. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.

- GOLDSMITH, A.; CHUA, S.-G. Adaptive coded modulation for fading channels. **IEEE Transactions on Communications**, v. 46, n. 5, p. 595–602, 1998. ISSN 0090-6778.
- HU, J.; DUMAN, T. M. Low density parity check codes over wireless relay channels. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 6, n. 9, p. 3384–3394, September 2007.
- IEEE STD 802.11. **Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications**. 1999.
- IEEE STD 802.11N. **IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems–Local and metropolitan area networks–Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput**. October 2009.
- IEEE STD 802.16E. **IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems**. May 2009.
- KARKOOTI, M.; CAVALLARO, J. R. Cooperative communication using scalable, medium block-length LDPC codes. **Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference**, p. 88–93, March 31–April 3 2008.
- KATONA, Z.; BITO, J. Performance analysis of cross layer adaptation of modulation and coding in slow, flat fading channels. In: **Proc. 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–5.
- KHORMUJI, M.; LARSSON, E. Cooperative transmission based on decode-and-forward relaying with partial repetition coding. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 8, n. 4, p. 1716–1725, April 2009.
- KRIKIDIS, I. Distributed truncated ARQ protocol for cooperative diversity networks. **IET Communications**, v. 1, n. 6, p. 1212–1217, December 2007.
- LANEMAN, J.; WORNELL, G. Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks. In: **IEEE Global Telecommunications Conference**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 77–81.
- LANEMAN, J. N.; TSE, D. N. C.; WORNELL, G. W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, December 2004.
- LEE, J. et al. Transceiver design for MIMO wireless systems incorporating hybrid ARQ. **IEEE Communications Magazine**, v. 47, n. 1, p. 32–40, 2009. ISSN 0163-6804.
- LI, Y. Distributed coding for cooperative wireless networks: An overview and recent advances. **IEEE Communications Magazine**, v. 47, n. 8, p. 71–77, August 2009.
- LIN, S.; COSTELLO, D. J. **Error Control Coding: Fundamentals and Applications**. 2nd. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 2004.
- LOTT, C.; MILENKOVIC, O.; SOLJANIN, E. Hybrid ARQ: Theory, state of the art and future directions. In: **Proc. IEEE Information Theory Workshop on Information Theory for Wireless Networks**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–5.

- MEULEN, E. C. Van der. Three-terminal communication channels. **Advanced Applied Probability**, v. 3, p. 120–154, 1971.
- MOREIRA, J. C.; FARRELL, P. G. **Essentials of Error-Control Coding**. 1st. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- MOTOROLA. **Performance Comparison of Hybrid-ARQ Schemes**. [S.l.], Oct. 2000.
- NOSRATINIA, A.; HUNTER, T. E.; HEDAYAT, A. Cooperative communication in wireless networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 42, n. 10, p. 74–80, October 2004.
- PEDRONI, V. A. **Circuitos Eletrônicos**. Ro de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos, 1986. 349 p. (ISBN 85-216-0444-0).
- PENG, X.; SONG, M.; SONG, J. Cross-layer design for adaptive modulation and coding with hybrid ARQ. In: **Proc. International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 138–141.
- RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. 2nd. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 2002.
- SELLATHURAI, M.; HAYKIN, S. Turbo-BLAST for wireless communications: theory and experiments. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 50, n. 10, p. 2538–2546, 2002. ISSN 1053-587X.
- SENDONARIS, A.; ERKIP, E.; AAZHANG, B. User cooperation diversity - part I: System description. **IEEE Transactions on Communications**, v. 51, n. 11, p. 1927–1938, November 2003.
- SHANNON, C. E. A mathematical theory of communications. **Bell Systems Tech. Journal**, v. 27, p. 379–423; 623–656, 1948.
- STANOJEV, I. et al. Performance of multi-relay collaborative hybrid-ARQ protocols over fading channels. **IEEE Communications Letters**, v. 10, n. 7, p. 522–524, July 2006.
- STEFANOV, A.; ERKIP, E. Cooperative coding for wireless networks. **IEEE Transactions on Communications**, v. 52, n. 9, p. 1470–1476, September 2004.
- SU, W.; SADEK, A. K.; LIU, K. J. R. Cooperative communication protocols in wireless networks: Performance analysis and optimum power allocation. **Springer Wireless Personal Communications**, v. 44, n. 2, p. 181–217, January 2008.
- TABET, T.; DUSAD, S.; KNOPP, R. Diversity-multiplexing-delay tradeoff in half-duplex ARQ relay channels. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 53, n. 10, p. 3797–3805, October 2007. ISSN 0018-9448.
- TAROKH, V.; JAFARKHANI, H.; CALDERBANK, A. R. Space-time block codes from orthogonal designs. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 45, p. 1456–1467, July 1999.
- TAROKH, V.; SESHADRI, N.; CALDERBANK, A. R. Space-time codes for high data rate wireless communication I: performance criterion and code construction. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 44, p. 744–765, March 1998.

TOUMPAKARIS, D. et al. Performance of MIMO HARQ under receiver complexity constraints. In: **Proc. IEEE Global Telecommunications Conference**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–5. ISSN 1930-529X.

WICKER, S. B. **Error Control Systems for Digital Communication and Storage**. 1st. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 1994.

WOLNIANSKY, P. et al. V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel. In: **Proc. URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics**. [S.l.]: IEEE, 1998. p. 295–300.

YIU, S.; SCHOBBER, R.; LAMPE, L. Distributed space-time block coding. **IEEE Transactions on Communications**, v. 54, n. 7, p. 1195–1206, July 2006.

YU, G.; ZHANG, Z.; QIU, P. Efficient ARQ protocols for exploiting cooperative relaying in wireless sensor networks. **Elsevier Computer Communications**, v. 30, n. 14-15, p. 2765–2773, June 2007.

YUAN, J. et al. Distributed space-time trellis codes for a cooperative system. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 8, n. 10, p. 4897–4905, October 2009.

ZHANG, C.; WANG, W.; WEI, G. Design of ARQ protocols for two-user cooperative diversity systems in wireless networks. **Elsevier Computer Communications**, v. 32, n. 6, p. 1111–1117, April 2009.

ZHANG, Z.; DUMAN, T. M. Capacity-approaching turbo coding and iterative decoding for relay channels. **IEEE Transactions on Communications**, v. 53, n. 11, p. 1895–1905, November 2005.

ZHANG, Z.; DUMAN, T. M. Capacity approaching turbo coding for half duplex relaying. **Proc. IEEE International Symposium on Information Theory**, p. 1888–1892, September 2005.

ZHAO, B.; VALENTI, M. C. Distributed turbo coded diversity for relay channel. **IEE Electronics Letters**, v. 39, n. 10, p. 786–787, May 2003.

ZHAO, B.; VALENTI, M. C. Practical relay networks: A generalization of hybrid-ARQ. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 23, n. 1, p. 7–18, January 2005.

ZHENG, L.; TSE, D. Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple antenna channels. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 49, p. 1073–1096, May 2003.