

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

OHARA KERUSAUSKAS RAYEL

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE CODIFICAÇÃO DE
REDE APLICADA A REDES COOPERATIVAS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2013

OHARA KERUSAUSKAS RAYEL

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE CODIFICAÇÃO DE
REDE APLICADA A REDES COOPERATIVAS**

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: Telecomunicações e Redes.

Orientador: Prof. Dr. João Luiz Rebelatto

CURITIBA
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

- R266 Rayel, Ohara Kerusauskas
Análise da eficiência energética de codificação de rede aplicada a redes cooperativas / Ohara Kerusauskas Rayel. – 2013.
63 f. : il. ; 30 cm
- Orientador: João Luiz Rebelatto.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2013.
Bibliografia: f. 60-61.
1. Energia – Consumo. 2. Teoria da codificação. 3. Sistemas de comunicação sem fio. 4. Sistemas de transmissão de dados. 5. Código de controle de erros (Teoria da informação). 6. Métodos de simulação. 7. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Rebelatto, João Luiz, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

Título da Dissertação Nº. 630

“Análise da Eficiência Energética de Codificação de Rede Aplicada a Redes Cooperativas”

por

Ohara Kerusauskas Rayel

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Telecomunicações e Redes, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 14h do dia 27 de fevereiro de 2013. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos doutores:

Prof. João Luiz Rebelatto, Dr.
(Presidente – UTFPR)

Prof. Bartolomeu Ferreira Uchôa F^o. , Dr.
(UFSC)

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

Prof. Richard Demo Souza, Dr.
(UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Ricardo Lüders, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus agradecimentos a todos que, das mais variadas formas, contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

à minha esposa, Liamara, aos meus pais, Katia e Gustavo, ao meu irmão, Natan, e à minha cunhada, Mayara, pelo apoio, carinho e compreensão incomparáveis;

a João Luiz Rebelatto, que me mostrou o caminho a ser tomado neste trabalho, realizando o papel de orientador de forma primorosa, com dedicação verdadeira, além de ser um grande amigo e um exemplo de profissional;

a Richard Demo Souza, que com seu apoio não me permitiu desistir, e incentivou este trabalho desde o princípio;

ao professor Bartolomeu Ferreira Uchôa Filho, pelas valiosas colaborações em publicações realizadas ao longo deste trabalho, e pela participação na banca examinadora;

ao professor Evelio Martín García Fernández, pela participação na banca examinadora;

aos meus grandes amigos e amigas que possuo nas mais diversas esferas de minha vida, pela amizade e companheirismo.

RESUMO

RAYEL, O. K.. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE CODIFICAÇÃO DE REDE APLICADA A REDES COOPERATIVAS. 63 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Nesta dissertação, uma análise da eficiência energética de transmissão de dados sem fio é efetuada, comparando desde a simples transmissão direta entre dois nós, passando por redes cooperativas, onde múltiplos nós possuem informações independentes para enviar para um destino em comum, chegando aos mais avançados esquemas de cooperação com codificação de rede. O objetivo é verificar os benefícios gerados pela diminuição da taxa de erro (ocasionada pela codificação de rede) e do aumento da ordem de diversidade (proporcionado pela cooperação entre os nós) em termos de diminuição do consumo energético para transmissão de uma mesma quantidade de informação. A análise é realizada considerando desvanecimento em bloco Nakagami- m , de forma que o efeito da presença de linha de visada também possa ser avaliado. Através das equações de probabilidade de *outage* e de um modelo de *hardware*, expressões que representam o consumo energético de cada cenário foram obtidas. Além disto, a partir da análise gráfica dos resultados obtidos, foi possível perceber que existe um número ótimo de nós que minimiza o consumo energético da Codificação de Rede Dinâmica Generalizada (GDNC) para uma dada distância. Uma expressão que representa esse número foi obtida, e é a maior contribuição deste trabalho, pois se no projeto da rede sem fio cooperativa conjuntos menores contendo o número ótimo de nós (chamados de *clusters* de cooperação) forem organizados, o consumo energético da rede será minimizado. Estes resultados também são apresentados e, para as configurações utilizadas, a economia de energia pode ser de até 10x.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Codificação de Redes, Redes Cooperativas

ABSTRACT

RAYEL, O. K.. ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS OF NETWORK CODING APPLIED TO COOPERATIVE NETWORKS. 63 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

In this dissertation, an energy efficiency analysis of wireless systems is performed, comparing several schemes, from the direct transmission between two nodes, going through cooperative networks, where multiple nodes have independent information to send to a common destination, and getting to the most advanced network-coded cooperative systems. It is intended to evaluate the gain generated by the error rate reduction (caused by the network coding) and by the increase in the diversity order (provided by the cooperation between the nodes) in terms of the energy consumption reduction when transmitting the same amount of information. The analysis is performed considering Nakagami- m block fading, so the influence of some line-of-sight is also evaluated. Through the outage probability equations and a hardware model, energy consumption expressions for each scenario were obtained. Furthermore, through the graphical analysis of the numeric results, it was possible to notice that exists an optimal number of nodes that minimizes the energy consumption of the Generalized Dynamic Network Coding (GDNC) scheme for a given distance. An expression that represents this number was also obtained, and is the great contribution of this work, since if in the network project smaller sets containing the optimal number of nodes (called cooperation clusters) are organized, the energy consumption will be minimized. These results are also presented, and for the considered configuration, the energy saving can reach 10x.

Keywords: Energy Efficiency, Cooperative Networks, Network Coding

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Rede cooperativa decodifica-e-encaminha	16
FIGURA 1.2 – Rede cooperativa com 2 nós empregando codificação de rede não-binária	16
FIGURA 2.1 – Rede sem fio de múltiplo acesso	21
FIGURA 2.2 – PDF da Distribuição Nakagami- m	22
FIGURA 2.3 – Rede cooperativa decodifica-e-encaminha	25
FIGURA 2.4 – Rede cooperativa com 2 nós empregando codificação de rede binária ...	29
FIGURA 2.5 – Rede cooperativa com 2 nós empregando codificação de rede não-binária	31
FIGURA 2.6 – Esquema DNC para uma rede com M nós e taxa $1/M$	32
FIGURA 2.7 – Protocolo do esquema GDNC	34
FIGURA 4.1 – Consumo de Energia em função da distância	50
FIGURA 4.2 – Consumo de Energia em função da distância - FA-GDNC	51
FIGURA 4.3 – Consumo de Energia em função do número de nós	52
FIGURA 4.4 – Consumo de Energia em função do número de nós - FA-GDNC	53
FIGURA 4.5 – Valor ótimo do número de nós cooperadores em função da distância ...	54
FIGURA 4.6 – Energia consumida x Distância x Número de nós	55
FIGURA 4.7 – GDNC e FA-GDNC otimizados em relação ao número de nós (NLOS) .	56
FIGURA 4.8 – GDNC e FA-GDNC otimizados em relação ao número de nós (LOS) ...	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Número de transmissões e recepções do esquema DF	26
TABELA 2.2 – Número de transmissões e recepções do esquema DNC	32
TABELA 2.3 – Número de transmissões e recepções do esquema GDNC	35
TABELA 2.4 – Número de transmissões e recepções do esquema FA-GDNC	37
TABELA 4.1 – Parâmetros utilizados	49

LISTA DE SIGLAS

Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
M2M	Máquina a Máquina, do inglês <i>Machine to Machine</i>
TS	Slot de Tempo, do inglês <i>Time Slot</i>
SNR	Relação Sinal-Ruído, do inglês <i>Signal to Noise Ratio</i>
PDF	Função Densidade de Probabilidade, do inglês <i>Probability Density Function</i>
CSI	Conhecimento do Estado do Canal, do inglês <i>Channel State Information</i>
DT	Transmissão Direta, do inglês <i>Direct Transmission</i>
DF	Decodifica-e-Encaminha, do inglês <i>Decode-and-Forward</i>
GF(q)	Campo de Galois de ordem q , do inglês <i>Galois Field</i>
BNC	Codificação de Rede Binária, do inglês <i>Binary Network Coding</i>
XOR	Operação Ou Exclusivo, do inglês <i>Exclusive OR</i>
MRC	Combinação de Máxima Razão, do inglês <i>Maximum Ratio Combining</i>
DNC	Codificação de Rede Dinâmica, do inglês <i>Dynamic Network Coding</i>
RNC	Codificação de Rede Aleatória, do inglês <i>Random Network Coding</i>
GDNC	Codificação de Rede Dinâmica Generalizada, do inglês <i>Generalized Dynamic Network Coding</i>
MDS	Máxima Distância Mínima de Hamming, do inglês <i>Maximum Distance Separable</i>
FA-GDNC	Codificação de Rede Dinâmica Generalizada com Canal de Retorno, do inglês <i>Feedback-Assisted Generalized Dynamic Network Coding</i>
ISM	Banda Industrial, Científica e Médica, do inglês <i>Industrial, Scientific and Medical</i>
DAC	Conversor Digital-Analógico, do inglês <i>Digital-to-Analog Converter</i>
IFA	Amplificador de Frequência Intermediária, do inglês <i>Intermediate Frequency Amplifier</i>
ADC	Conversor Analógico-Digital, do inglês <i>Analog-to-Digital converter</i>
PAR	Relação pico-média, do inglês <i>Peak-to-Average ratio</i>
QAM	Modulação em Quadratura e Amplitude, do inglês <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
NLOS	Sem linha de visada, do inglês <i>Non-Line-of-Sight</i>
LOS	Com linha de visada, do inglês <i>Line-of-Sight</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

M	número de nós da rede
D	nó destino
N	comprimento do pacote
j	índice do nó receptor
i	índice do nó transmissor
P_i	potência do nó transmissor
$h_{i,j}$	ganho de canal devido aos multipercursos no enlace $i \rightarrow j$
$\gamma_{i,j}$	perda de propagação no enlace $i \rightarrow j$
\mathbf{x}_i	palavra código em banda básica transmitida do nó i
$\mathbf{y}_{i,j}$	palavra código em banda básica recebida pelo nó j do nó i
\mathbb{C}^N	conjunto de números complexos de comprimento N
$\mathbf{n}_{i,j}$	ruído aditivo Gaussiano no enlace $i \rightarrow j$
N_0	densidade espectral de potência do ruído por Hertz
G	ganho total das antenas transmissora e receptora
λ	comprimento de onda
$d_{i,j}$	distância entre os nós
α	expoente de perda de propagação
M_t	margem do enlace
N_f	figura de ruído
B	largura de banda
m	parâmetro da distribuição de Nakagami
z	variável aleatória da distribuição Nakagami
$\Gamma(a)$	função gama completa
P_r	potência média recebida
$+$	adição sobre números reais
$-$	subtração sobre números reais
\oplus	adição (XOR) binária
\boxplus	adição sobre campo finito
\boxminus	subtração sobre campo finito
$r_{i,j}$	eficiência espectral do enlace $i \rightarrow j$
$\Gamma(a, b)$	função gama incompleta inferior
\mathcal{P}_o	probabilidade de <i>outage</i>
D	ordem de diversidade
$\mathcal{P}_{o,X}$	probabilidade de <i>outage</i> do esquema X
D_X	ordem de diversidade do esquema X
R_X	taxa de pacotes de informação efetivamente transmitidos em relação ao total de pacotes transmitido no esquema X
q	ordem do Campo de Galois
$I_i(t)$	pacote de informação transmitido pelo nó i durante o <i>slot</i> de tempo t
$V_i(t)$	pacote de paridade transmitido pelo nó i durante o <i>slot</i> de tempo t
k_1	quantidade de pacotes de informação transmitidos na fase de difusão para o GDNC

k_2	quantidade de pacotes de paridade transmitidos na fase de cooperação para o GDNC
$\overline{\mathcal{P}_o}$	probabilidade de não ocorrer <i>outage</i>
k'_2	quantidade média de pacotes de paridade transmitidos na fase de cooperação para o FA-GDNC
R_b	taxa de transmissão
P_{tx}	potência consumida pelo circuito de transmissão
P_{rx}	potência consumida pelo circuito de recepção
P_{DAC}	potência consumida pelo conversor digital-analógico
P_{mix}	potência consumida pelo <i>mixer</i>
P_{tx_filt}	potência consumida pelos filtros de transmissão
P_{syn}	potência consumida pelo sintetizador de frequência
P_{LNA}	potência consumida pelo amplificador de baixo ruído
P_{IFA}	potência consumida pelo amplificador de frequência intermediária
P_{rx_filt}	potência consumida pelos filtros de recepção
P_{ADC}	potência consumida pelo conversor analógico-digital
P_{amp}	potência consumida pelo amplificador de transmissão
η	eficiência de dreno do amplificador
ξ	relação pico-média
\mathcal{M}	ordem da modulação QAM
$P_{i,X}^*$	potência de transmissão mínima necessária para se assegurar um limiar máximo de <i>outage</i> no esquema X
\mathcal{P}_o^*	limiar máximo da probabilidade de <i>outage</i>
E_X	energia consumida pelo esquema X
M^*	número ótimo de nós cooperadores
$W(\cdot)$	função Lambert-W

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 INTRODUÇÃO AO PROBLEMA	14
1.2 MOTIVAÇÃO	17
1.3 OBJETIVOS	17
1.3.1 Objetivo Geral	17
1.3.2 Objetivos Específicos	17
1.4 PUBLICAÇÕES	18
1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO	18
2 PRELIMINARES	20
2.1 MODELO DO SISTEMA	20
2.1.1 Probabilidade de <i>Outage</i>	23
2.1.2 Diversidade	24
2.1.2.1 Ordem de Diversidade	24
2.2 COMUNICAÇÃO COOPERATIVA	25
2.2.1 Decodifica-e-Encaminha (DF)	26
2.2.1.1 Probabilidade de <i>Outage</i> e Diversidade	26
2.2.1.2 Análise da taxa	27
2.3 CODIFICAÇÃO DE REDE	28
2.3.1 Codificação de Rede Binária (BNC)	28
2.3.1.1 Probabilidade de <i>Outage</i> e Diversidade	29
2.3.1.2 Análise da taxa	30
2.3.2 Codificação de Rede Dinâmica (DNC)	30
2.3.2.1 Probabilidade de <i>Outage</i> e Diversidade	31
2.3.2.2 Codificação de Rede Dinâmica para Múltiplos Usuários	32
2.3.3 Codificação de Rede Dinâmica Generalizada (GDNC)	33
2.3.3.1 Probabilidade de <i>Outage</i> e Diversidade	34
2.3.3.2 Análise da Taxa	35
2.3.4 Codificação de Rede Dinâmica Generalizada com Canal de Retorno (FA-GDNC)	35
2.3.4.1 Probabilidade de <i>Outage</i> e Diversidade	36
2.3.4.2 Análise da Taxa	37
2.4 COMENTÁRIOS	38
3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	39
3.1 <i>HARDWARE</i>	40
3.2 CONSUMO ENERGÉTICO DA TRANSMISSÃO DIRETA	41
3.3 CONSUMO ENERGÉTICO DO ESQUEMA DF	42
3.4 COMENTÁRIOS	43
4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE CODIFICAÇÃO DE REDE	45
4.1 CONSUMO ENERGÉTICO DO ESQUEMA GDNC	45
4.1.1 Número ótimo de nós cooperadores	46
4.2 CONSUMO ENERGÉTICO DO ESQUEMA FA-GDNC	47
4.2.1 Número ótimo de nós cooperadores	48

4.3	RESULTADOS NUMÉRICOS	48
4.3.1	Parâmetros utilizados	49
4.3.2	Consumo Energético em relação à distância	49
4.3.3	Consumo Energético em relação ao número de nós	50
4.3.4	Número ótimo de nós cooperadores	52
4.3.5	<i>Clusters</i> de Cooperação	53
4.4	COMENTÁRIOS	54
5	COMENTÁRIOS FINAIS	58
	REFERÊNCIAS	60
	Índice Remissivo	62

1 INTRODUÇÃO

Sistemas de comunicação são hoje indispensáveis no cotidiano das pessoas. A velocidade de propagação da informação é tão alta, que ocorre de forma praticamente instantânea. Muitos são os fatores que contribuíram para esta evolução, desde o telefone celular, passando pela popularização da *internet* e por fim, o advento da *internet* móvel, sem fio, que possibilitou que usuários passassem a publicar informações no exato momento em que os fatos estavam ocorrendo.

Uma consequência clara do aumento do acesso à informação é a disponibilização de uma quantidade e variedade ainda maiores de informações, que antes sequer existiam, ou não eram difundidas. Exemplos não faltam: rastreamento de automóveis, câmeras de monitoramento em tempo real, sensores de alarmes residenciais enviando eventos para o celular do proprietário, dados de instrumentação alertando em relação a desastres naturais, etc.

Este “novo” tipo de informação, na grande maioria dos casos, é transmitido sem fio, através dos mais diversos protocolos, como *Wi-Fi*, *Bluetooth*, *Zigbee*, GSM, WCDMA, entre outros, de acordo com a taxa de dados necessária na aplicação. Como a transmissão sem fio permite mobilidade, fundamental para algumas aplicações, e ao mesmo tempo facilidade de instalação, a ausência de cabos para comunicação tem sido uma tendência nos novos produtos que chegam ao mercado.

Segundo a Anatel [Anatel 2013], o Brasil fechou o ano de 2012 com 261,78 milhões de acessos móveis, o que significa 1,33 linha por habitante, um crescimento de mais de 8,70% em relação a 2011. Ainda de acordo com a agência, 2,58% dos acessos no país são relativos a terminais M2M (Máquina a Máquina, do inglês *Machine to Machine*), dentre os quais estão compreendidas as aplicações mencionadas anteriormente. Este número já ultrapassou inclusive o de quantidade de terminais de dados banda larga (*modems* 3G), que representa 2,57% dos acessos.

Os números divulgados ainda mostram que o crescimento é dual: mais de 20% dos acessos móveis no país já são de telefones celulares com tecnologia 3G, ou seja, os usuários

consumidores de todo esse volume de informação. Considerando os números internacionais, de acordo com a Cisco [Cisco 2011] espera-se que em 2015 irão existir 7,1 bilhões de dispositivos móveis conectados à *internet*, praticamente o mesmo número da população mundial.

Ao mesmo tempo que cresce o número de pessoas com acesso à *internet* móvel, aumentam as exigências por uma melhor qualidade de serviço e por taxas de transmissão mais elevadas. Recentemente no Brasil a população se viu diante de um impasse: operadoras de telefonia celular chegaram a ser proibidas pela Anatel de comercializar novos acessos, devido à péssima qualidade de serviço que estavam disponibilizando a seus usuários. Para atender a esta demanda, os gastos com infraestrutura apesar de necessários, em um futuro próximo por si só não serão suficientes, já que a capacidade do canal é limitada, e cada vez mais se aproxima de um esgotamento.

Atingir a capacidade teórica do canal sem fio é um grande desafio, já que o mesmo dificulta a transmissão de informação, devido às suas características, como desvanecimento, interferências, múltiplos caminhos, susceptibilidade a ataques, etc. Todos esses obstáculos diminuem a capacidade prática do canal, e os esforços em pesquisas científicas têm sido grandes em busca de tecnologias que possibilitem atingir taxas maiores, utilizando o canal sem fio de forma mais eficiente, atendendo à demanda de forma confiável, com a velocidade de transmissão necessária.

Além disto, a sustentabilidade do planeta tem se tornado um fator de importância fundamental para o futuro. Cada vez mais se exige que produtos sejam ecologicamente corretos, e isso não é diferente para os dispositivos de comunicação. Com a crescente demanda por esses aparelhos, a energia consumida é cada vez maior, e muitas vezes de forma menos eficiente que o desejado.

Pensando em novas gerações de sistemas, a intenção deste trabalho é avaliar a eficiência energética de algumas das técnicas propostas para diminuir a taxa de erro do canal sem fio, utilizadas em conjunto com tecnologias que aumentam a ordem de diversidade da rede, obtendo resultados que auxiliem na escolha deste tipo de técnica nos futuros padrões de comunicação sem fio.

1.1 INTRODUÇÃO AO PROBLEMA

Recentemente, o desenvolvimento de dispositivos M2M que necessitam de conexão móvel tem crescido substancialmente. A aceitação deste tipo de produto é cada vez maior, em um mundo onde as pessoas utilizam cada vez mais a conectividade em seu cotidiano. Boa

parte destes dispositivos, porém, não necessita de taxas de transmissão tão altas quanto as utilizadas pelas pessoas, já que o volume de informação a ser transmitido muitas vezes é baixo. Muitos deles necessitam enviar dados apenas na ocorrência de algum evento esporádico, devido à alteração de alguma condição, ou mesmo por um intervalo de tempo pré-determinado.

Como em sua grande parte se trata de dispositivos sem fio, frequentemente utilizam como fonte de energia baterias, sendo que estas normalmente não são de fácil substituição, muito menos se deseja ter que recarregá-las. Além disto, a utilização da bateria incorre em diminuição de sua vida útil, o que por consequência cria a necessidade de produção de novas baterias. Os recursos naturais utilizados para a tal não são renováveis, e portanto torna-se ainda mais indesejável a substituição das mesmas. Assim, é fundamental que a energia destas baterias seja aproveitada de maneira eficiente, de forma a contribuir para um consumo energético global cada vez mais racional, buscando a sustentabilidade do planeta.

Boa parte do consumo de energia é fruto do processo de transmissão de dados desses dispositivos que, dependendo da condição do canal, precisam utilizar ainda mais energia para conseguir comunicação com taxa de erros aceitável. Em busca de minimizar a taxa de erros, diferentes soluções têm sido propostas, como codificação de canal [Lin e Costello Jr. 1983], utilização de múltiplas antenas [Alamouti 1998, Tarokh et al. 1998], etc.

No tipo de aplicação mencionado, muitas vezes existem mais de um dispositivo sem fio na mesma área de alcance, como em redes de sensores, por exemplo. Tendo isto em vista, técnicas de cooperação entre os nós da rede vem sendo propostas, buscando aproveitar uma característica inerente ao canal sem fio, a radiodifusão, que possibilita que uma mensagem enviada por determinado nó seja “ouvida” pelos demais nós da rede [Sendonaris et al. 2003, Laneman et al. 2004]. Este tipo de esquema aumenta a confiabilidade na transmissão, como pode-se observar na Figura 1.1, já que a informação percorre diferentes caminhos para chegar ao seu destino. Por consequência, a susceptibilidade ao desvanecimento do canal é menor, e a energia despendida para se obter uma mesma taxa de falhas também.

Os sistemas cooperativos consistem basicamente em ajuda mútua entre os nós, onde cada um deles retransmite a informação de seus parceiros. Na Figura 1.1, o esquema decodifica-e-encaminha (DF, do inglês *Decode-and-Forward*) é ilustrado. Na primeira fase, cada nó apenas difunde sua própria informação (normalmente por canais ortogonais). Na segunda fase, cada nó retransmite a informação codificada de seu parceiro, caso a mesma tenha sido corretamente decodificada.

Outra técnica, denominada codificação de rede (em inglês *network coding*), que inicialmente foi proposta para aumentar a vazão de redes com fio [Ahlsvede et al. 2000],

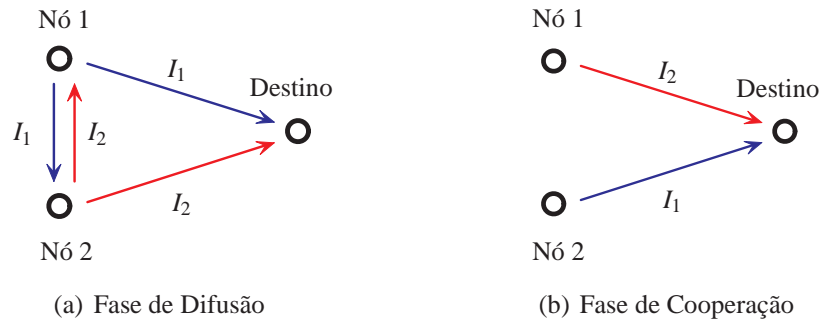


Figura 1.1: Rede cooperativa decodifica-e-encaminha com 2 nós cooperadores. (a) Cada nó difunde sua própria informação e (b) cada nó transmite a informação de seu parceiro após decodificá-la e recodificá-la.

vem sendo utilizada para minimizar a taxa de erro de redes cooperativas sem fio [Xiao et al. 2007, Xiao e Skoglund 2010, Rebelatto et al. 2012]. Em sistemas cooperativos que utilizam codificação de rede, ao invés de somente retransmitir individualmente as informações de seus parceiros, os nós cooperadores são capazes de transmitir combinações lineares (sobre um campo finito $GF(q)$) das informações disponíveis, como é possível observar na Figura 1.2.

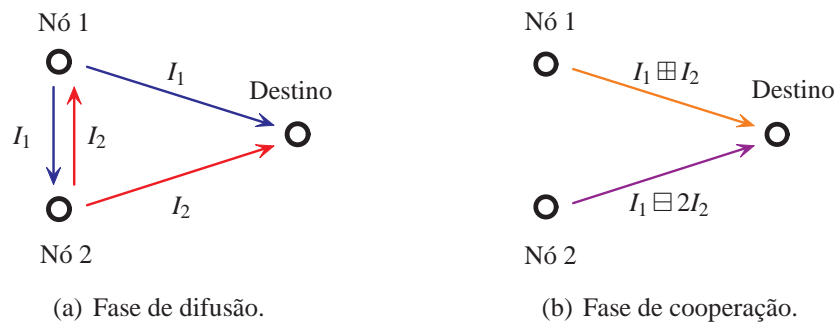


Figura 1.2: Rede cooperativa com 2 nós empregando codificação de rede não-binária. (a) Cada nó difunde a sua própria informação e (b) cada nó transmite uma combinação linear sobre $GF(4)$ composta de todos os pacotes de informação disponíveis.

Apesar de a cooperação com codificação de rede apresentar ganhos tanto em taxa de erro como em taxa de codificação em relação à transmissão direta, dependendo do número de nós cooperadores e da distância entre os mesmos, a cooperação entre eles pode não ser eficiente energeticamente, como poderá ser observado na Seção 4.3.

Assim, neste trabalho de mestrado buscaremos avaliar, em termos de eficiência energética, desde a transmissão direta, passando pela simples cooperação entre os nós, até os esquemas mais avançados de codificação de rede, como o GDNC. O objetivo é criar ferramentas para avaliar o consumo de cada um dos esquemas, para verificar se o esforço adicional utilizado na cooperação e na codificação de rede é compensado por um menor consumo energético.

A fim de não só avaliar, como aumentar a eficiência energética do esquema GDNC, será apresentada uma análise matemática objetivando obter o número de nós cooperadores que minimiza o consumo de energia do sistema. Através de uma expressão analítica obtida, este número poderá ser utilizado no projeto de redes sem fio cooperativas com codificação de rede mais eficientes.

1.2 MOTIVAÇÃO

Eficiência energética vem de encontro à busca de um planeta mais sustentável, e desperta grande interesse da comunidade científica. Uma busca pelo tema “*energy efficiency*” no site de buscas Google, por exemplo, apresenta cerca de 35 milhões de resultados. Em várias conferências internacionais, sessões são dedicadas exclusivamente a soluções energeticamente eficientes.

Ao mesmo tempo em que as pessoas têm cada vez mais acesso a dispositivos de comunicação, existe uma clara tendência no mercado para que esta transmissão de dados seja feita sem fio. Portanto, obter soluções que diminuam o consumo energético de sistemas sem fio pode contribuir de forma importante com a construção de um mundo mais ecologicamente equilibrado.

Além disso, esse foi um tema de comum interesse entre o aluno, seu orientador e o grupo de pesquisa escolhido para realização do mestrado.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Propor ferramentas para análise do consumo energético de redes sem fio cooperativas com codificação de rede, com o intuito de projetá-las de forma a minimizar o seu consumo energético.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Buscar ferramentas para avaliação da eficiência energética de esquemas de transmissão de dados sem fio, desde a transmissão direta, até os esquemas mais sofisticados de cooperação com codificação de rede;
- Elaborar expressões que possibilitem minimizar o consumo energético de redes

cooperativas com codificação de rede, mais especificamente do esquema GDNC;

- Confirmar as impressões sobre as expressões analíticas obtidas com resultados numéricos, possibilitando confrontar todos os esquemas pesquisados, tanto em função da distância entre os nós, como em função do número de nós cooperadores;
- Apresentar graficamente uma comparação entre o consumo energético de codificação de redes otimizado pelas ferramentas propostas em relação à codificação de redes não otimizada.

1.4 PUBLICAÇÕES

As publicações/submissões realizadas durante o período de mestrado estão apresentadas na sequência:

- Artigos completos publicados em anais de conferências: 2 (1 nacional [Rayel et al. 2012a] + 1 internacional [Rayel et al. 2012b]);
- Artigos submetidos para conferências¹: 1 internacional [Rayel et al. 2013b];
- Artigos submetidos para periódicos¹: 1 internacional [Rayel et al. 2013a].

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O Capítulo 2 apresenta o modelo de sistema utilizado, com os principais conceitos considerados para a futura elaboração de ferramentas para avaliação da eficiência energética de codificação de redes cooperativas sem fio. Conceitos preliminares de comunicação cooperativa e de codificação de redes com seus principais esquemas também são apresentados.

O Capítulo 3 traz o conceito de Eficiência Energética, o modelo de *hardware* a ser considerado na análise do consumo energético e apresenta expressões para avaliação da eficiência energética da transmissão direta entre os nós e de sistemas cooperativos sem codificação de rede.

No Capítulo 4 está contida a principal contribuição deste trabalho de mestrado: a avaliação da eficiência energética de codificação de redes sem fio cooperativas, além de ferramentas que possibilitam minimizar o consumo energético através de um projeto de rede considerando o número ótimo de nós cooperadores de acordo com a distância entre os

¹ aguardando revisão

mesmos. Resultados numéricos que comprovam a eficiência energética de codificação de rede são apresentados, sempre em comparação com a transmissão direta e a simples cooperação entre os nós. Também fica comprovado graficamente que a utilização do número ótimo de nós cooperadores que minimiza o consumo energético da rede pode aumentar ainda mais a eficiência energética da codificação de redes sem fio cooperativas.

Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e comentários finais desta dissertação.

2 PRELIMINARES

2.1 MODELO DO SISTEMA

Este trabalho considera a parte de múltiplo acesso de uma rede de comunicação sem fio cooperativa, na qual M nós possuem informações independentes para transmitir para um destino (D) em comum, de acordo com o ilustrado na Figura 2.1.

Um pacote (ou *frame*/bloco) é definido como sendo um vetor de comprimento N . O período de tempo correspondente à transmissão de um pacote é denominado *subslot*. Um *slot* de tempo (TS) é definido como o período de tempo compreendendo M *subslots*, isso é, um TS corresponde a M transmissões individuais, todas elas realizadas em forma de rodízio pelos nós da rede e através de canais ortogonais no tempo.

Assim, omitindo-se o índice temporal, a palavra código em banda básica recebida pelo nó j de seu vizinho i é dada por:

$$\mathbf{y}_{i,j} = \sqrt{P_i \gamma_{i,j}} h_{i,j} \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_{i,j}, \quad (2.1)$$

onde $i \in \{0, \dots, M-1\}$ representa o índice do nó transmissor (e também o índice do *subslot*), $j \in \{0, 1, \dots, M\}$ o índice do nó receptor (M corresponde ao destino), P_i a potência do nó transmissor, $h_{i,j} \in \mathbb{C}$ ganho de canal devido aos multipercursos no enlace $i \rightarrow j$, $\gamma_{i,j}$ a perda de propagação, $\mathbf{x}_i \in \mathbb{C}^N$ e $\mathbf{y}_{i,j} \in \mathbb{C}^N$ são respectivamente os pacotes transmitidos e recebidos, ambos de comprimento N , e $\mathbf{n}_{i,j} \in \mathbb{C}^N$ é o ruído aditivo Gaussiano de média zero e variância $N_0/2$ por dimensão, em que N_0 é a densidade espectral de potência do ruído por Hertz. Considera-se que a perda de propagação entre os nós i e j é dada por [Goldsmith 2005]

$$\gamma_{i,j} = \frac{G \lambda^2}{(4\pi)^2 (d_{i,j})^\alpha M_t N_f}, \quad (2.2)$$

onde G é o ganho total das antenas transmissora e receptora, λ é o comprimento de onda, $d_{i,j}$ é a distância entre os referidos nós, α é o expoente de perda de propagação, M_t é a margem do enlace e N_f é a figura de ruído no receptor [Goldsmith 2005].

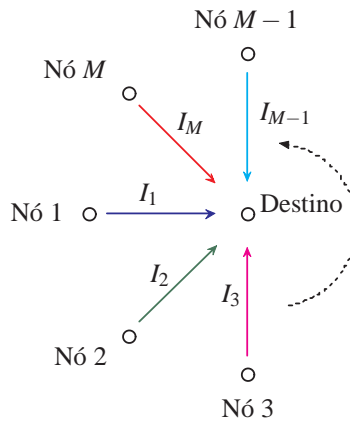


Figura 2.1: Rede de múltiplo acesso, em que múltiplos nós possuem informações diferentes para transmitir para um destino em comum

Dessa forma, a relação sinal-ruído (SNR) é definida como

$$\text{SNR}_{i,j} = \frac{P_i \gamma_{i,j}}{N_0 B}, \quad (2.3)$$

onde B é a largura de banda utilizada (em Hertz).

Neste trabalho, $|h_{i,j}|$ é assumido possuir distribuição de Nakagami- m com variância unitária, independente e identicamente distribuída (i.i.d.) tanto no tempo quanto em espaço. A escolha da distribuição Nakagami- m para representar o comportamento do canal foi realizada para que fosse possível simular diversos cenários, desde ausência total de linha de visada, até a presença de forte linha de visada. A função densidade de probabilidade (PDF, do inglês *Probability Density Function*) da distribuição Nakagami- m , apresentada na Figura 2.2 para potência média recebida de valor unitário é definida por [Goldsmith 2005]:

$$p(z) = \frac{2m^m z^{2m-1} e^{-(mz^2)/P_r}}{\Gamma(m) P_r^m}, \quad (2.4)$$

onde m é o parâmetro da distribuição Nakagami, z é a variável aleatória da distribuição Nakagami, $\Gamma(a) = \int_0^\infty y^{a-1} e^{-y} dy$ representa a função gama completa e P_r é a potência média recebida.

O modelo de desvanecimento considerado é o de bloco, no qual o canal permanece constante durante um *subslot* de N amostras, pois considera-se que a transmissão de dados ocorre por um instante de tempo muito menor que o tempo necessário para a variação de ganho do canal. Também considera-se que os receptores possuem conhecimento perfeito do canal (CSI), mas os transmissores não possuem CSI algum.

Antes de continuar, estabelece-se que os operadores $+$ e $-$ representam operações

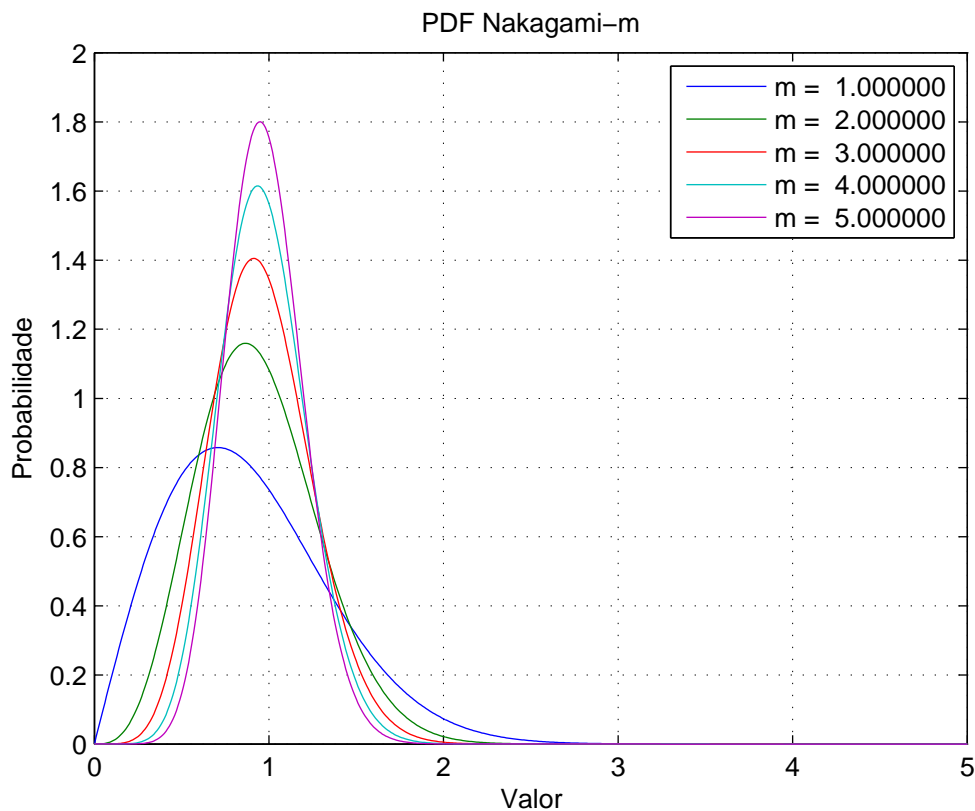


Figura 2.2: Função Densidade de Probabilidade para a Distribuição Nakagami- m com potência média recebida unitária

sobre números reais, \oplus é a adição binária (XOR), e \boxplus e \boxminus são as operações de adição e subtração sobre um campo não binário, respectivamente.

As principais considerações apresentadas acima estão resumidas abaixo:

1. Considera-se ortogonalidade na transmissão/recepção, de tal forma que cada nó da rede pode apenas transmitir ou receber a informação num dado tempo, mas não os dois;
2. Considera-se que o múltiplo acesso no nó destino é ortogonal, ou seja, o mesmo pode receber mensagens de somente um nó por vez;
3. O desvanecimento é considerado lento, constante durante um bloco mas i.i.d. no tempo e no espaço para diferentes blocos;
4. Transmissores e receptores são equipados com somente uma antena.

2.1.1 PROBABILIDADE DE *OUTAGE*

Para analisarmos o desempenho de um sistema de comunicação sem fio, precisamos primeiramente definir a métrica a ser utilizada. Em projeto desse tipo de sistemas, é definida uma potência alvo mínima a ser recebida, caso contrário o desempenho se torna inaceitável (qualidade de voz em comunicação celular, por exemplo). Assim, define-se a probabilidade de que a potência recebida seja menor que a potência alvo mínima como probabilidade de *outage*. Em outros termos, a relação sinal-ruído do sinal recebido deve estar acima de um limiar, abaixo do qual a qualidade da transmissão se torna inaceitável. Define-se probabilidade de *outage* como [Goldsmith 2005]:

$$\mathcal{P}_o = \Pr(\text{SNR} < \text{SNR}_{\min}). \quad (2.5)$$

Para que seja possível chegarmos a uma expressão para a probabilidade de *outage*, precisamos antes analisar todos os fatores que influenciam na potência recebida. Seja \mathbf{x}_i uma variável aleatória Gaussiana i.i.d. e considerando todos os canais com a mesma SNR média, a informação mútua $\text{MI}_{i,j}$ entre \mathbf{x}_i e $\mathbf{y}_{i,j}$, para uma banda de 1 Hz, é igual a

$$\text{MI}_{i,j} = \log_2(1 + |h_{i,j}|^2 \text{SNR}). \quad (2.6)$$

Assumindo a utilização de um código de canal poderoso o suficiente, \mathbf{x}_i pode ser corretamente recuperado no nó j se $\text{MI}_{i,j} > r_{i,j}$, em que $r_{i,j}$ é a eficiência espectral (em bits/s/Hz) do enlace $i \rightarrow j$ (assumida ser a mesma para toda a rede, durante todo o tempo). Dessa forma, \mathbf{x}_i não pode ser corretamente recuperado pelo nó j se

$$|h_{i,j}|^2 < g, \quad (2.7)$$

onde $g = \frac{2^r - 1}{\text{SNR}}$. A probabilidade de tal evento é denominada probabilidade de *outage* e ocasiona a perda do pacote transmitido no enlace $i \rightarrow j$.

Neste trabalho, como já mencionado, consideraremos que o canal obedece a uma distribuição Nakagami- m . Assim, a probabilidade de *outage* de uma *Transmissão Direta* (DT, do inglês *Direct Transmission*) é calculada como [Goldsmith 2005, Brante et al. 2011, Wang e Giannakis 2003]

$$\mathcal{P}_o = \frac{\Gamma(m, mg)}{\Gamma(m)}, \quad (2.8)$$

onde $\Gamma(a, b) = \int_0^b y^{a-1} e^{-y} dy$ corresponde à função gama incompleta inferior. Para pequenos valores de b , foi mostrado em [Wang e Giannakis 2003] que $\Gamma(a, b) \simeq (1/a)b^a$, o que permite

realizar a seguinte aproximação em (2.8) para a região de alta SNR:

$$\mathcal{P}_o \simeq \frac{(mg)^m}{\Gamma(m+1)}. \quad (2.9)$$

Para evitar confusão, ressalta-se que neste trabalho P representa potência, enquanto \mathcal{P}_o indica probabilidade de *outage*.

2.1.2 DIVERSIDADE

Uma das maneiras de diminuir a probabilidade de *outage* é combatendo o desvanecimento do canal sem fio. Para tal, o envio de cópias de uma mesma mensagem por caminhos independentes é utilizado, gerando diversidade na recepção e aumentando a probabilidade de sucesso na transmissão. Isso porque caminhos independentes têm probabilidade baixa de sofrerem desvanecimento profundo ao mesmo tempo. Basta então o receptor selecionar ou combinar os sinais de forma a aproveitar ao máximo a potência recebida [Goldsmith 2005].

2.1.2.1 ORDEM DE DIVERSIDADE

Como o foco deste trabalho está em comunicações sem fio cooperativas, outro importante fator a ser analisado é a ordem de diversidade alcançada pelo sistema após a aplicação do esquema de cooperação. Quanto maior a ordem de diversidade obtida, menor será a potência de transmissão necessária para atingir uma mesma probabilidade de *outage* alvo, já que esta está diretamente relacionada ao número de caminhos independentes percorridos pelo sinal.

Assim, reiterando a consideração do modelo de desvanecimento em bloco, a ordem de diversidade D é definida como [Tse e Viswanath 2005]

$$D \triangleq \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \frac{-\log \mathcal{P}_{o,X}}{\log \text{SNR}}, \quad (2.10)$$

em que $\mathcal{P}_{o,X}$ é a probabilidade de *outage* total do esquema X .

Neste trabalho, D_X sempre denotará a ordem de diversidade do esquema sub-indexado.



Figura 2.3: Rede cooperativa decodifica-e-encaminha com 2 nós cooperadores. (a) Cada nó difunde sua própria informação e (b) cada nó transmite a informação de seu parceiro após decodificá-la e recodificá-la.

2.2 COMUNICAÇÃO COOPERATIVA

Uma característica inerente ao canal sem fio é a da radiodifusão. Isso possibilita que uma mensagem enviada por determinado nó para o destino seja “ouvida” pelos demais nós da rede.

Uma vez que a mesma mensagem é transmitida para o destino por canais independentes, a ordem de diversidade do sistema é aumentada, auxiliando no combate ao desvanecimento característico do canal sem fio [Sendonaris et al. 2003, Laneman et al. 2004, Xiao et al. 2007, Xiao e Skoglund 2010, Rebelatto et al. 2012]. Um sistema cooperativo que resulte em ordem de diversidade 2, por exemplo, equivale a um sistema com transmissão direta, onde o nó destino possui 2 antenas [Tarokh et al. 1998].

A grande diferença para a transmissão direta é que, em sistemas cooperativos, a transmissão geralmente é dividida em duas fases: A *fase de difusão*, em que os nós difundem seu(s) próprio(s) dado(s) (normalmente por canais ortogonais), e a *fase de cooperação*, em que os nós retransmitem as mensagens de seus parceiros que foram corretamente recebidas durante a fase de difusão. Tal procedimento está ilustrado na Figura 2.3.

Esta retransmissão de dados corretamente recebidos de seus parceiros possibilita que o destino receba múltiplas cópias de uma mesma mensagem, que se propagaram por caminhos independentes, aumentando a ordem de diversidade do sistema, e consequentemente a probabilidade de sucesso na comunicação.

2.2.1 DECODIFICA-E-ENCAMINHA (DF)

Em primeiro lugar, apresentaremos o esquema de cooperação mais simples abordado neste trabalho: *Decodifica-e-Encaminha*. A Figura 2.3 apresenta uma rede cooperativa modelo DF (Decodifica-e-Encaminha, do inglês *Decode-and-Forward*) para $M = 2$.

Como o próprio nome do sistema cooperativo decodifica-e-encaminha esclarece, após difundir seus próprios pacotes cada nó cooperador apenas retransmite o pacote de seu parceiro (após decodificá-lo e recodificá-lo), sem realizar processamento adicional algum. Caso algum nó não consiga decodificar corretamente a informação de seu(s) parceiro(s), ele retransmite sua própria informação.

É possível notar na Figura 2.3 que cada informação percorre 2 caminhos independentes até o destino, o que mostra um aumento na ordem de diversidade quando comparado à transmissão direta de dados.

No esquema DF, cada nó transmite 2 vezes, uma na fase de difusão e outra na fase de cooperação, de tal forma que o número total de transmissões é dado por $2M$. Na fase de difusão, durante cada uma das M difusões, todos os M nós restantes ($M - 1$ nós transmissores mais o destino) tentam recuperar a mensagem transmitida, gerando uma quantidade de M^2 recepções. Na fase de cooperação, as transmissões são endereçadas somente ao nó destino, totalizando M recepções. Assim, o número de recepções do esquema DF é dado por $M^2 + M$. Tal resultado está sumarizado na Tabela 2.1, e será útil mais adiante.

Tabela 2.1: Número de transmissões e recepções do esquema DF

	# Transmissões	# Recepções
Fase de Difusão	M	M^2
Fase de Cooperação	M	M
Total	$2M$	$M^2 + M$

2.2.1.1 PROBABILIDADE DE *OUTAGE* E DIVERSIDADE

Como mencionado anteriormente, dado o modelo do sistema sujeito a desvanecimento lento apresentado na Seção 2.1, a métrica a ser utilizada na análise de desempenho dos diversos esquemas a serem apresentados será a probabilidade de *outage*.

Sendo assim, considerando que todos os enlaces da rede possuem SNRs iguais e são sujeitos a falhas, mostra-se que a probabilidade de *outage* é dada por [Laneman et al. 2004]:

$$\mathcal{P}_{o,\text{DF}}(M=2) = 1.5 \mathcal{P}_o^2. \quad (2.11)$$

Para um número de nós relativamente grande, é razoável assumir que todos os pacotes difundidos pelos M nós sejam corretamente recebidos por pelo menos um dos outros nós, que então atua como seu parceiro. Dessa forma, em um cenário com M grande, considera-se a situação em que os canais entre os nós cooperadores são livres de erros como um limitante inferior para a probabilidade de *outage* do esquema DF, a qual pode-se mostrar como sendo [Laneman et al. 2004]:

$$\mathcal{P}_{o,\text{DF}}(M=2) = 0.5 \mathcal{P}_o^2. \quad (2.12)$$

Outro fator importante é o ganho em ordem de diversidade, que proporciona transmissões que oneram menos a fonte de energia do transmissor, sem perda de qualidade. Aplicando-se (2.12) em (2.10),

$$D_{\text{DF}}(M=2) \triangleq \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \frac{-\log 0.5 \mathcal{P}_o^2}{\log \text{SNR}} \quad (2.13a)$$

$$= \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \frac{-\log 0.5 \left(\frac{\Gamma(m, mg)}{\Gamma(m)} \right)^2}{\log \text{SNR}} \quad (2.13b)$$

$$= 2m, \quad (2.13c)$$

pode-se perceber que a ordem de diversidade do esquema DF é $2m$, equivalente a um sistema em que o nó destino possui $2m$ antenas.

2.2.1.2 ANÁLISE DA TAXA

Para que possamos realizar uma comparação justa com a transmissão direta em termos de eficiência espectral, precisamos encontrar uma expressão que represente a taxa, que é a razão entre a quantidade de informação efetiva e a quantidade total de informação transmitida.

Assim, de acordo com o número de transmissões apresentados na Tabela 2.1, a taxa do esquema DF é dada por:

$$R_{\text{DF}} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de pacotes de informação}}{\text{N}^\circ \text{ total de pacotes}} = \frac{M}{2M} = \frac{1}{2}. \quad (2.14)$$

Neste trabalho, R_X sempre denotará a taxa de pacotes de informação efetivamente transmitidos

em relação ao total de pacotes transmitido no esquema sub-indexado.

2.3 CODIFICAÇÃO DE REDE

A técnica de *Codificação de Rede* [Ahlsvede et al. 2000, Koetter e Médard 2003] (do inglês *Network Coding*), originalmente proposta com o intuito de aumentar a vazão de redes com fio, tem sido recentemente utilizada em redes cooperativas sem fio com o objetivo de reduzir a taxa de erro do sistema [Xiao et al. 2007, Xiao e Skoglund 2009, Xiao e Skoglund 2010, Rebelatto et al. 2012]. Em sistemas cooperativos que utilizam codificação de rede, ao invés de somente retransmitir individualmente as informações de seus parceiros, os nós cooperadores são capazes de transmitir combinações lineares das informações disponíveis, combinações estas realizadas sobre um campo finito $GF(q)$, onde q é a ordem do Campo de Galois utilizado.

A transmissão de combinações lineares faz com que cada mensagem seja transmitida por uma quantidade maior de percursos independentes, possibilitando que uma maior ordem de diversidade possa ser obtida, desde que as combinações lineares sejam realizadas de tal forma que o nó destino receba uma quantidade suficiente de combinações lineares independentes para poder decodificar os pacotes de dados combinados.

Vários trabalhos presentes na literatura consideram uma abordagem em que os coeficientes das combinações lineares são obtidos de forma aleatória [Ahlsvede et al. 2000, Koetter e Médard 2003]. Neste tipo de abordagem, mostra-se que desde que o tamanho do campo finito q seja suficientemente grande, a probabilidade de que as combinações lineares sejam independentes² tende a 1. Porém, uma vez que o aumento no campo finito resulta em aumento na complexidade do sistema [Xiao e Skoglund 2010], este trabalho concentrará esforços em codificação de rede determinística [Xiao et al. 2007, Xiao e Skoglund 2010, Rebelatto et al. 2012].

2.3.1 CODIFICAÇÃO DE REDE BINÁRIA (BNC)

O primeiro esquema a ser apresentado é o BNC (*Codificação de Rede Binária*, do inglês *Binary Network Coding*) [Xiao et al. 2007]. O sistema sem codificação apresentado na Figura 2.3 considera apenas *roteamento*. Não há processamento das informações nos nós da rede. Porém, ao permitir que os nós processem as diferentes informações, utilizando o conceito de codificação de rede, ganhos podem ser obtidos. Na Figura 2.4 esta combinação de informações é ilustrada, apresentando uma rede com 2 nós em que ambos são aptos a transmitir

²Probabilidade de que a matriz de transferência do sistema possua posto completo

a soma binária de sua própria informação e a informação de seu nó parceiro (se corretamente decodificada) durante o segundo *slot* de tempo.

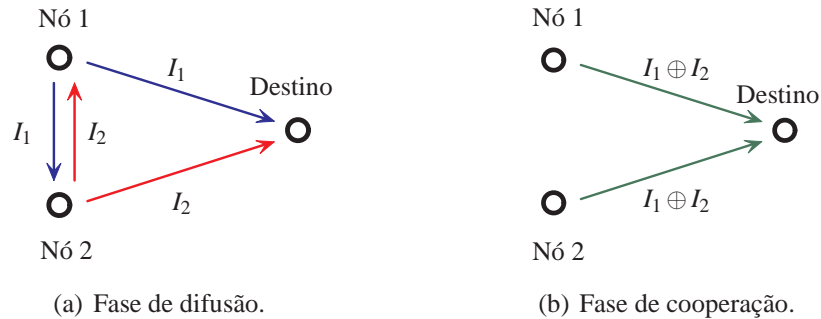


Figura 2.4: Rede cooperativa com 2 nós empregando codificação de rede binária. (a) Cada nó difunde a sua própria informação e (b) cada nó transmite uma soma binária (XOR) de sua própria informação e da informação de seu parceiro. O símbolo \oplus , como apresentado na Seção 2.1 representa a adição binária (XOR).

2.3.1.1 PROBABILIDADE DE *OUTAGE* E DIVERSIDADE

Considerando que os dois canais entre os nós são recíprocos, (*i.e.*, $h_{j,i} = h_{i,j}$), se o mesmo não falhar, o que acontece com probabilidade $(1 - \mathcal{P}_o)$, os quatro pacotes transmitidos para o destino são I_1 , I_2 , $I_1 \oplus I_2$ e $I_1 \oplus I_2$. Neste trabalho, $I_i(t)$ sempre se referirá a um determinado pacote de informação. Considera-se que ao receber duas ou mais cópias da mesma mensagem, o destino realiza MRC (Combinação de Máxima Razão, do inglês *Maximum Ratio Combining*). Nesse caso, um evento de *outage* para $I_1 \oplus I_2$ ocorre se $(|h_{1,D}|^2 + |h_{2,D}|^2) < g$ e tem probabilidade: [Laneman et al. 2004, Tse e Viswanath 2005].

$$\mathcal{P}_1 \approx \frac{\mathcal{P}_o^2}{2} \quad (2.15)$$

Sem perda de generalidade, será analisada a probabilidade de *outage* do Nó 1. O mesmo resultado é válido para o Nó 2 devido à simetria do problema. Um evento de *outage* ocorre quando a transmissão direta I_1 e pelo menos um dentre I_2 e $I_1 \oplus I_2$ não podem ser recuperados pelo destino. Nesse caso, a probabilidade de *outage* para o Nó 1 é

$$\mathcal{P}_{p,1} \approx \mathcal{P}_o(\mathcal{P}_o + \mathcal{P}_1). \quad (2.16)$$

Se o canal entre os nós está em *outage*, o que ocorre com probabilidade \mathcal{P}_o , cada nó retransmite sua própria informação. Ao receber duas cópias da mesma informação, novamente,

o destino realiza MRC, resultando na seguinte probabilidade de *outage* para o Nó 1 [Laneman et al. 2004, Tse e Viswanath 2005]

$$\mathcal{P}_{f,1} \approx \frac{\mathcal{P}_o^2}{2}. \quad (2.17)$$

Considerando todas as possibilidades do canal entre os nós, a probabilidade de *outage* para o Nó 1 é dada por

$$\mathcal{P}_{o,\text{BNC}}(M=2) = (1 - \mathcal{P}_o)\mathcal{P}_{p,1} + \mathcal{P}_o\mathcal{P}_{f,1} \approx \mathcal{P}_o^2. \quad (2.18)$$

Caso os canais entre os nós não sejam recíprocos, através de uma análise semelhante pode-se mostrar que a probabilidade de *outage* de uma rede com 2 nós com Codificação de Rede Binária é dada por [Xiao et al. 2007]

$$\mathcal{P}_{o,\text{BNC}}(M=2) \approx \mathcal{P}_o^2, \quad (2.19)$$

a qual corresponde a uma ordem de diversidade $D_{\text{BNC}} = 2m$ de acordo com (2.10).

Pode-se perceber que, apesar de Codificação de Rede em (2.19) apresentar um ganho em termos de taxa de erro se comparada ao esquema DF (roteamento) em (2.12), a diversidade obtida em ambos os esquemas é a mesma. Mais que isso, não é um valor ótimo, já que a informação de cada nó é transmitida através de três caminhos independentes, e portanto uma ordem de diversidade maior poderia ser atingida.

2.3.1.2 ANÁLISE DA TAXA

Como cada nó transmite apenas uma combinação binária de sua própria informação e as informações dos $M - 1$ nós parceiros, a taxa do esquema BNC é dada por:

$$R_{\text{BNC}} = \frac{M}{2M} = \frac{1}{2}. \quad (2.20)$$

2.3.2 CODIFICAÇÃO DE REDE DINÂMICA (DNC)

Em [Xiao e Skoglund 2009], os autores mostraram que o uso de codificação de rede não-binária é necessário para atingir uma maior ordem de diversidade, e então propuseram a chamada *Codificação de Rede Dinâmica* (DNC, do inglês *Dynamic Network Coding*)³. A

³Posteriormente chamada de *Diversity Network Coding* em [Xiao e Skoglund 2010].

Figura 2.5 apresenta uma rede com 2 nós utilizando DNC, em que o tamanho do campo é aumentado e coeficientes não-binários são utilizados.

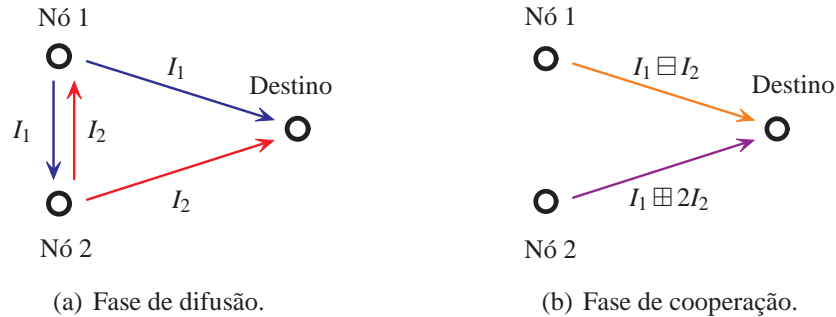


Figura 2.5: Rede cooperativa com 2 nós empregando codificação de rede não-binária. (a) Cada nó difunde a sua própria informação e (b) cada nó transmite uma combinação linear sobre GF(4) composta de todos os pacotes de informação disponíveis. Os símbolos \boxplus e \boxminus , como apresentado na Seção 2.1, representam adição e subtração sobre campos finitos, respectivamente.

2.3.2.1 PROBABILIDADE DE *OUTAGE* E DIVERSIDADE

Assumindo canais entre os nós perfeitos, o destino recebe os pacotes I_1 , I_2 , $I_1 \boxplus I_2$ e $I_1 \boxplus 2I_2$. Pode-se ver que o destino é capaz de recuperar os dois pacotes de informação I_1 e I_2 a partir de quaisquer 2 dentre os 4 pacotes recebidos. Focando no Nó 1 (o mesmo resultado vale para o Nó 2 devido à simetria do sistema), um evento de *outage* ocorre quando a transmissão direta do pacote I_1 e pelo menos 2 dos 3 pacotes restantes não são decodificados corretamente. Isso ocorre com probabilidade [Xiao e Skoglund 2009]

$$\mathcal{P}_0 = \mathcal{P}_o \left[\binom{3}{2} \mathcal{P}_o^2 (1 - \mathcal{P}_o) + \mathcal{P}_o^3 \right] \approx 3 \mathcal{P}_o^3, \quad (2.21)$$

em que, novamente, a aproximação vale para a região de alta SNR.

Todavia, com probabilidade \mathcal{P}_o um nó não consegue decodificar corretamente o pacote de seu parceiro. Nesta situação, ele retransmite a sua própria informação. O destino então realiza MRC, resultando na probabilidade de *outage* [Laneman et al. 2004, Tse e Viswanath 2005]:

$$\mathcal{P}_1 \approx \mathcal{P}_o^2 / 2. \quad (2.22)$$

Assim sendo, a probabilidade de *outage* total para o Nó 1 é [Xiao e Skoglund 2009]

$$\mathcal{P}_{o,\text{DNC}}(M=2) = \mathcal{P}_o \mathcal{P}_1 + (1 - \mathcal{P}_o) \mathcal{P}_0 \approx 3.5 \mathcal{P}_o^3. \quad (2.23)$$

É possível perceber que a diversidade é $D_{\text{DNC}}(M = 2) = 3m$, ao aplicarmos (2.23) em (2.10). Se os canais entre os nós não são recíprocos, (*i.e.*, $h_{j,i} \neq h_{i,j}$), mostrou-se que a probabilidade de *outage* para o esquema DNC com 2 nós é dada por [Xiao e Skoglund 2009]

$$\mathcal{P}_{o,\text{DNC}}(M = 2) \approx 4\mathcal{P}_o^3.$$

2.3.2.2 CODIFICAÇÃO DE REDE DINÂMICA PARA MÚLTIPLOS USUÁRIOS

Expandindo o esquema DNC para uma rede com M nós, como apresentado em [Xiao e Skoglund 2009], cada nó transmite $M - 1$ combinações lineares na fase de cooperação, de acordo com o ilustrado na Figura 2.6.

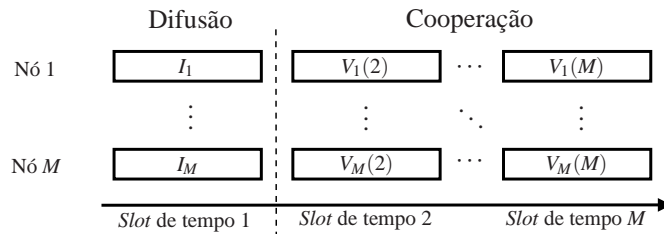


Figura 2.6: Esquema DNC para uma rede com M nós e taxa $1/M$. $V_i(t)$ corresponde ao pacote de paridade transmitido pelo nó i durante o slot de tempo t .

Na Tabela 2.2, computamos o número de transmissões e recepções adicionais necessários para o esquema DNC, em função do número de nós cooperadores.

Tabela 2.2: Número de transmissões e recepções do esquema DNC

	# Transmissões	# Recepções
Fase de Difusão	M	M^2
Fase de Cooperação	$M^2 - M$	$M^2 - M$
Total	M^2	$2M^2 - M$

Assim, em um sistema DNC com M nós, a taxa do sistema é dada por

$$R_{\text{DNC}} = \frac{\text{n}^\circ \text{ pacotes de informação}}{\text{n}^\circ \text{ total de pacotes}} = \frac{M}{M^2} = \frac{1}{M}. \quad (2.24)$$

Com relação à ordem de diversidade, mostrou-se em [Xiao e Skoglund 2009] que para o esquema DNC com taxa $1/M$, a probabilidade de *outage* (e consequentemente a ordem de diversidade) é dominada pela situação em que todos os canais entre os nós se encontram em *outage*. Nessa situação, que ocorre com probabilidade \mathcal{P}_o^{M-1} (uma vez que são $M - 1$ canais

entre os nós), cada mensagem de informação transmitida para o destino estaria contida apenas nas M mensagens enviadas pelo próprio nó que a originou, já que nenhum dos seus parceiros conseguiu decodificá-la corretamente. Dessa forma, foi mostrado em [Xiao e Skoglund 2009] que a ordem de diversidade atingida pelo esquema DNC é

$$D_{\text{DNC}} = 2M - 1, \quad (2.25)$$

porém, com a taxa baixa e fixa dada em (2.24).

O código de rede necessário para atingir a diversidade apresentada em (2.25) foi provado existir através de uma associação entre o esquema DNC e os códigos de rede lineares com fonte única apresentados em [Koetter e Médard 2003, Th.11]. O projeto do código de rede proposto em [Xiao e Skoglund 2009] resume-se a encontrar a matriz de transferência que é não-singular para todos os possíveis padrões de erros nos canais entre os nós. Esta busca pode ter alta complexidade na medida em que M cresce [Rebelatto 2010].

Em [Xiao 2009], Xiao propôs um esquema simplificado para construção de DNC, o qual leva em consideração somente um padrão de *outage* no projeto do código de rede. Tal redução na complexidade de projeto de código é obtida às custas de uma pequena piora no desempenho, a qual é amenizada à medida que o campo finito que compõe o código torna-se maior, sendo desprezível para um campo suficientemente grande como [Xiao 2009]

$$q \geq \binom{M^2 - 1}{M - 1}. \quad (2.26)$$

Essa abordagem segue na linha dos códigos de rede aleatórios (RNC, do inglês *random network coding*) [Ahlsvede et al. 2000], em que a complexidade de projeto do código de rede é reduzida às custas de um aumento no tamanho do campo finito, aumentando a complexidade das operações tais como decodificação.

2.3.3 CODIFICAÇÃO DE REDE DINÂMICA GENERALIZADA (GDNC)

Em [Rebelatto et al. 2012], através de uma associação entre codificação de rede e códigos corretores de erros clássicos, uma generalização do esquema DNC introduzido em [Xiao e Skoglund 2010] foi proposta, mais flexível em termos de taxa de transmissão, e que se mostrou capaz de atingir simultaneamente tanto taxa quanto ordem de diversidade mais elevados que no esquema DNC.

Mais especificamente, através de uma analogia entre a matriz de transferência da rede e uma matriz geradora de um código de bloco, mostrou-se em [Rebelatto et al. 2012] uma

equivalência entre a ordem de diversidade do sistema e a distância mínima de Hamming do código de bloco utilizado. Sabe-se que a distância mínima de um código de bloco é restringida superiormente pelo limitante de Singleton [Macwilliams e Sloane 1977], e que tal limitante cresce com o aumento das dimensões do código.

Dessa forma, o esquema proposto em [Rebelatto et al. 2012], denominado *Codificação de Rede Dinâmica Generalizada* (GDNC, do inglês *Generalized Dynamic Network Coding*), considera que durante a fase de difusão cada nó da rede difunde uma quantidade de k_1 pacotes de informação. Durante a fase de cooperação, cada nó transmite para o destino uma quantidade de k_2 pacotes de paridade, compostos por combinações lineares de toda a informação disponível, sobre um campo finito $\text{GF}(q)$ suficientemente grande, que satisfaça a condição [Rebelatto 2010] $q \geq M(k_1 + k_2)$. A Figura 2.7 ilustra o funcionamento do esquema GDNC.

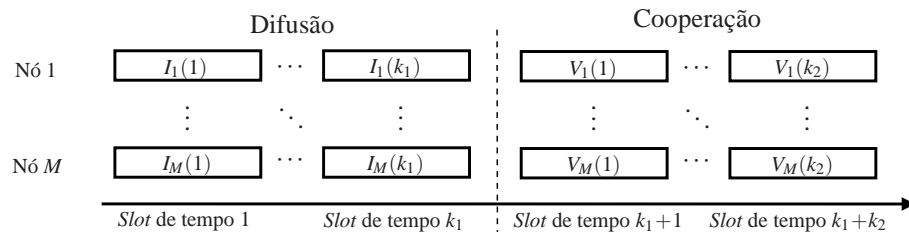


Figura 2.7: Protocolo do esquema GDNC. Cada nó inicialmente difunde k_1 pacotes de informação $I_i(t)$ durante a fase de difusão e depois transmite k_2 pacotes de paridade $V_i(t')$, compostos por combinações lineares sobre $\text{GF}(q)$ de suas próprias informações e de todos os pacotes dos parceiros que foram corretamente decodificados durante a fase de difusão.

2.3.3.1 PROBABILIDADE DE *OUTAGE* E DIVERSIDADE

Em [Rebelatto et al. 2012], mostrou-se que a probabilidade de *outage* do esquema GDNC com parâmetros (k_1, k_2, M) é dada por:

$$\mathcal{P}_{o,\text{GDNC}} \approx \binom{k_1 + k_2 - 1}{k_2} \mathcal{P}_o^{M+k_2} \quad (\text{para } k_2 \geq 2), \quad (2.27)$$

em que $\binom{k_1+k_2-1}{k_2}$ corresponde ao coeficiente binomial. A partir de (2.27) e (2.10), percebe-se que a ordem de diversidade do esquema GDNC é $D_{\text{GDNC}} = m(M + k_2)$, a qual é atingida caso seja utilizada como matriz de transferência da rede (como coeficientes das combinações lineares) uma matriz geradora de um código com máxima distância mínima de Hamming (MDS, do inglês *Maximum Distance Separable*), como por exemplo a bem conhecida classe de códigos Reed-Solomon [Rebelatto et al. 2012].

2.3.3.2 ANÁLISE DA TAXA

De acordo com o ilustrado na Figura 2.7, a taxa do código de rede no esquema GDNC é dada por

$$\begin{aligned} R_{\text{GDNC}} &= \frac{Mk_1}{Mk_1 + Mk_2} \\ &= \frac{k_1}{k_1 + k_2}, \end{aligned} \quad (2.28)$$

uma vez que uma quantidade de $M(k_1 + k_2)$ pacotes é transmitida, sendo que somente Mk_1 destes efetivamente carregam nova informação. Na fase de difusão, durante cada uma das Mk_1 difusões realizadas, todos os outros M nós da rede ($M - 1$ nós cooperadores mais o destino) tentam decodificar o pacote difundido, mantendo seus circuitos receptores ativos. Durante a fase de cooperação, todas as transmissões são encaminhadas somente para o destino. A Tabela 2.3 apresenta o resumo do número de transmissões e recepções realizadas pelo esquema GDNC para cada conjunto de Mk_1 pacotes de informação efetivamente transmitidos para o destino.

Tabela 2.3: Número de transmissões e recepções do esquema GDNC

	# Transmissões	# Recepções
Fase de Difusão	Mk_1	M^2k_1
Fase de Cooperação	Mk_2	Mk_2
Total	$M(k_1 + k_2)$	$M(Mk_1 + k_2)$

2.3.4 CODIFICAÇÃO DE REDE DINÂMICA GENERALIZADA COM CANAL DE RETORNO (FA-GDNC)

Em ambos os esquemas DNC e GDNC, uma vez que o código de rede é projetado, este permanece o mesmo até que ocorra uma alteração na topologia da rede (tal como mudança no número de nós) e um novo código seja requisitado. Porém, tal característica tem um impacto maléfico na taxa do sistema: à medida que a SNR aumenta, a probabilidade de que o destino decodifique corretamente toda a informação recebida durante a fase de difusão também aumenta. Nesse caso, a transmissão de pacotes de paridade não seria mais necessária.

Como o número de pacotes de informação transmitidos durante a fase de difusão no esquema GDNC é igual a Mk_1 , a probabilidade de todos estes pacotes serem corretamente decodificados é dada por

$$\Pr\{\text{Nenhum em } \textit{outage}\} = (1 - \mathcal{P}_o)^{Mk_1}, \quad (2.29)$$

em que \mathcal{P}_o é a probabilidade de *outage* de um enlace individual, dada em (2.8) para desvanecimento Nakagami- m .

Tendo isso em vista, uma alteração para o esquema GDNC foi proposta em [Rebelatto et al. 2011], com o intuito de se evitar esse desperdício na taxa do sistema, sem comprometer a sua ordem de diversidade. O esquema é baseado na suposição de que existe um canal de retorno entre o destino e os nós, livre de erros, pelo qual os nós são informados sobre o sucesso/falha na decodificação dos pacotes transmitidos durante a fase de difusão. Cada mensagem transmitida pelo destino é composta por somente um bit, chamado *bit de outage* (OUT). $\text{OUT} = 0$ significa que o destino decodificou corretamente determinado pacote de informação (ou um conjunto de pacotes de informação), e $\text{OUT} = 1$ significa que o pacote de informação (ou parte de um conjunto de pacotes) não foi corretamente decodificado. Este esquema é denominado FA-GDNC, *Codificação de Rede Dinâmica Generalizada com Canal de Retorno*, do inglês *Feedback-Assisted Generalized Dynamic Network Coding*.

Dependendo de quando os bits OUT são enviados, como também da quantidade de bits OUT enviados, diferentes abordagens podem ser consideradas. Neste trabalho, apresentaremos apenas a abordagem que requer apenas um bit de *feedback*. Nesse caso, o destino envia um bit OUT após cada fase de difusão. Se este bit for igual a 0, significa que todos os Mk_1 pacotes de informação recebidos anteriormente foram corretamente decodificados, e novos pacotes de informação podem ser gerados e transmitidos, sem a necessidade de transmissão de pacotes de paridade. De acordo com o apresentado em (2.29), este evento tem probabilidade $\Pr\{\text{OUT}=0\} = (1 - \mathcal{P}_o)^{Mk_1}$. Caso contrário, se um bit 1 é recebido de volta pelos nós, significa que pelo menos um dos Mk_1 pacotes de informação não foi decodificado corretamente, o que ocorre com probabilidade $\Pr\{\text{OUT}=1\} = 1 - \Pr\{\text{OUT}=0\}$. Nesse caso, cada nó transmite k_2 pacotes de paridade, de acordo com o esquema GDNC original apresentado na Sub-Seção 2.3.3, composto de todos os pacotes de informação que ele pôde decodificar corretamente durante a fase de difusão.

2.3.4.1 PROBABILIDADE DE *OUTAGE* E DIVERSIDADE

A análise da probabilidade de *outage* para esta abordagem é a mesma apresentada na Sub-Seção 2.3.3. Como todos os nós transmitem k_2 pacotes de verificação de paridade se qualquer um dos pacotes de informação não for corretamente decodificado pelo destino, a condição necessária para que uma *outage* ocorra é a mesma do esquema GDNC, apresentado na sub-seção anterior. Isso resulta na mesma probabilidade de *outage* e conseqüentemente na mesma diversidade $M + k_2$ que em (2.27).

2.3.4.2 ANÁLISE DA TAXA

Para analisar a taxa do esquema FA-GDNC com canal de retorno, devemos levar em consideração a probabilidade dos nós não necessitarem transmitir os pacotes de paridade. Na Sub-Seção 2.3.4, verificou-se que esta probabilidade é dada por $\Pr\{\text{OUT}=0\} = (1 - \mathcal{P}_o)^{Mk_1}$. Portanto, como o número de pacotes de informação transmitidos por rodada é sempre Mk_1 , e considerando que $\overline{\mathcal{P}_o} = 1 - \mathcal{P}_o$, a taxa resultante para o esquema FA-GDNC pode ser deduzida como:

$$\begin{aligned} R_{\text{FA-GDNC}} &= \frac{Mk_1}{Mk_1 + Mk_2(1 - \overline{\mathcal{P}_o}^{Mk_1})} \\ &= \frac{k_1}{k_1 + k_2(1 - \overline{\mathcal{P}_o}^{Mk_1})}, \end{aligned} \quad (2.30)$$

Pode-se perceber em em (2.30) que, como $0 \leq \overline{\mathcal{P}_o}^{Mk_1} \leq 1$, $R_{\text{FA-GDNC}}$ é sempre maior ou igual à taxa do esquema GDNC dada em (2.28).

A partir de (2.30) pode-se também avaliar o comportamento assintótico de $R_{\text{FA-GDNC}}$. Com respeito à SNR, à medida que ela aumenta sem limites, pode-se perceber que $R_{\text{FA-GDNC}} \rightarrow 1$. Quando a SNR diminui sem limites, tem-se que $R_{\text{FA-GDNC}} \rightarrow \frac{k_1}{k_1 + k_2}$. Para uma SNR fixa e com o número de nós aumentando sem limites, pode-se concluir a partir de (2.30) que

$$\lim_{M \rightarrow \infty} R_{\text{FA-GDNC}} = \frac{k_1}{k_1 + k_2}, \quad (2.31)$$

o que significa que, mesmo fazendo uso de um canal de retorno, a taxa média dessa abordagem tende para a mesma taxa do esquema GDNC sem canal de retorno à medida em que o número de nós aumenta.

Como nem sempre a fase de cooperação é necessária, representamos o número médio de pacotes de paridade transmitido por cada nó através de k'_2 , que corresponde a $k_2(1 - \overline{\mathcal{P}_o}^{Mk_1})$. Na Tabela 2.4 são contabilizados o número total de transmissões e recepções realizadas no esquema FA-GDNC.

Tabela 2.4: Número de transmissões e recepções do esquema FA-GDNC

	# Transmissões	# Recepções
Fase de Difusão	Mk_1	M^2k_1
Fase de Cooperação	Mk'_2	Mk'_2
Total	$M(k_1 + k'_2)$	$M(Mk_1 + k'_2)$

2.4 COMENTÁRIOS

Neste capítulo, o modelo de um sistema de comunicação cooperativa foi apresentado, e posteriormente analisado com a aplicação de alguns dos principais esquemas de codificação de rede presentes na literatura, desde o mais simples, uma pura codificação binária, até os mais sofisticados, como a codificação de rede generalizada de rede com canal de retorno.

Foi possível perceber que a simples cooperação entre os nós do sistema aumenta a ordem de diversidade, já que novos caminhos para uma mesma mensagem são adicionados, proporcionando redução na taxa de erro.

Já ao introduzirmos codificação de rede, concluímos que a combinação linear transmitida pelos nós na fase de cooperação aumenta a possibilidade de decodificação das mensagens no destino, diminuindo ainda mais a taxa de erro.

Dentre os diversos esquemas de codificação apresentados, o GDNC com canal de retorno foi mostrado ser o mais vantajoso, já que além de transmitir combinações lineares sobre Campos de Galois de ordem superior, como no caso do DNC, cada nó envia múltiplas informações na fase de difusão e múltiplas combinações lineares na fase de cooperação, fase esta que só ocorre caso o bit que indica a correta decodificação de todas as informações na fase de difusão (enviado por um canal de retorno considerado livre de erros) não seja verdadeiro.

Dessa forma, essa variante do esquema GDNC visa evitar a transmissão de pacotes de verificação de paridade desnecessários. De acordo com a informação recebida do destino, os nós projetam os códigos de rede de forma adaptativa, mantendo a mesma ordem de diversidade e aumentando a taxa de transmissão.

A consideração de canal de retorno livre de erros é uma consideração razoável, visto que a quantidade de informação transmitida é pequena e pode ser transmitida a uma taxa de transmissão baixa o suficiente para tornar a transmissão altamente confiável.

Entretanto, em sistemas sem fio, os nós da rede normalmente são alimentados por bateria, que geralmente não são fáceis de ser recarregadas ou substituídas. Assim, maximizar sua vida útil se torna um importante tópico a ser considerado no projeto da rede. Com essa motivação, no próximo capítulo iremos analisar a eficiência energética de cada um dos esquemas cooperativos e com codificação de rede apresentados, para confirmar se as vantagens em termos de confiabilidade introduzidas pelos mesmos se traduzem também em economia de energia na transmissão de dados por redes sem fio.

3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Neste capítulo, apresentaremos a análise da *Eficiência Energética* da transmissão de dados sem fio, desde a transmissão direta de um ponto a outro, até os primeiros esquemas envolvendo Redes Sem Fio Cooperativas. Investigaremos o quão vantajoso é explorar a característica da radiodifusão mencionada no capítulo anterior de forma que os nós da rede cooperem entre si, buscando menores taxas de erro e maiores ordens de diversidade.

O motivo principal para que busquemos a Eficiência Energética ótima é muito claro: a energia se torna a cada dia um fator mais importante no cotidiano, mas na contramão disso, os recursos naturais estão se exaurindo. Dentre estes, pode-se citar o petróleo e seus derivados, carvão mineral, potencial hidrelétrico, etc. Já é consenso que o consumo da sociedade precisa ser racionalizado, para que possamos viver de forma sustentável. Vários fatores são necessários para que a sustentabilidade do planeta possa ser atingida, mas não há dúvidas que o consumo energético racional é um dos principais pilares na construção de um futuro viável.

Concomitantemente à busca pela sustentabilidade, a cada dia mais dispositivos pessoais de comunicação sem fio são utilizados, e portanto, mais energia é consumida. Na grande maioria das vezes, estes aparelhos contém baterias, que por sua vez são fabricadas com recursos naturais. Quanto mais vezes for necessário recarregá-las, mais rapidamente sua vida útil chegará ao fim, levando à necessidade de fabricação de novas baterias, implicando na utilização de mais recursos não-renováveis.

Existem também outros dispositivos de comunicação sem fio, que apesar de não serem pessoais, representam grande importância para a economia mundial. Facilmente podemos citar exemplos, como rastreadores de veículos ou sensores, utilizados nas mais diversas áreas. Neste tipo de aplicação, a taxa de transmissão é geralmente baixa, além do período entre o envio dessas informações, que é normalmente elevado quando comparado à transmissão de dados de um computador conectado à *internet*, por exemplo. Devido a isto, muitos destes dispositivos operam com bateria interna, que na maioria dos casos não é substituível, ou muito difícil de ser recarregada. Portanto, no projeto da rede é muito importante levar em conta a eficiência

energética do sistema.

Ao mesmo tempo em que se busca otimizar o consumo de energia, o canal sem fio oferece grande resistência à propagação de sinais, devido ao seu desvanecimento característico. Isto ocorre de forma ainda mais aguda nas frequências livres, como 2.4 GHz ou 5.8 GHz, da Banda ISM, com menor comprimento de onda [Rappaport 2002]. Recentemente, técnicas de cooperação vêm sendo bastante utilizadas em sistemas com múltiplos nós, com o intuito de aumentar a diversidade do sistema e assim auxiliar no combate ao desvanecimento característico do canal sem fio [Sendonaris et al. 2003, Laneman et al. 2004, Xiao et al. 2007, Xiao e Skoglund 2010, Rebelatto et al. 2012].

Tendo todos esses fatores em vista, este trabalho terá como objetivo principal analisar a Eficiência Energética dos diversos esquemas cooperativos, levando-se em consideração, além da energia despendida com a transmissão em si, o consumo energético dos circuitos transmissores e receptores que formam a rede. Para tal, utilizaremos como métrica a relação entre a energia despendida pela quantidade de informação transmitida, em Joules/bit. As seções seguintes detalharão de que forma essa análise será realizada.

3.1 *HARDWARE*

Para iniciarmos a análise do consumo de energia, devemos analisar o *hardware* de um nó sem fio. Utilizaremos como modelo o apresentado em [Cui et al. 2005], onde foi considerado o consumo dos circuitos de transmissão e recepção no cálculo do consumo total da rede.

Sendo assim, o consumo energético dos nós de uma rede sem fio pode ser classificado em três diferentes blocos:

- Circuito de Recepção
- Circuito de Transmissão
- Potência de Transmissão

Em [Cui et al. 2005], mostrou-se que, dependendo da distância entre os nós, a potência despendida pelos circuitos de transmissão e recepção destes nós pode exercer grande influência no consumo total da rede. Assim sendo, para uma dada taxa de transmissão $R_b = r \cdot B$ (em bits/s), e levando-se em consideração o consumo dos circuitos transmissores e receptores, o *consumo de energia* é definido como [Cui et al. 2005]

$$E = \frac{P_{\text{amp}} + P_{\text{tx}} + P_{\text{rx}}}{R_b} \quad (\text{Joules/bit}), \quad (3.1)$$

em que P_{tx} e P_{rx} são as potências consumidas exclusivamente pelos circuitos de transmissão e recepção, respectivamente, que de acordo com [Cui et al. 2005] dependem das potências do conversor analógico-digital (DAC, do inglês *Digital-to-Analog Converter*) P_{DAC} , *mixer* P_{mix} , filtros transmissores P_{tx_filt} , sintetizador de frequência P_{syn} , amplificador de baixo ruído (LNA, do inglês *Low Noise Amplifier*) P_{LNA} , amplificador de frequência intermediária (IFA, do inglês *Intermediate Frequency Amplifier*) P_{IFA} , filtros de recepção P_{rx_filt} e do conversor analógico-digital (ADC, do inglês *Analog-to-Digital Converter*) P_{ADC} , sendo definidas como:

$$P_{tx} = P_{DAC} + P_{mix} + P_{tx_filt} + P_{syn}, \quad (3.2)$$

$$P_{rx} = P_{syn} + P_{LNA} + P_{mix} + P_{IFA} + P_{rx_filt} + P_{ADC}. \quad (3.3)$$

Em (3.1), $P_{amp} = \frac{\xi}{\eta} P_i$ corresponde à potência do amplificador utilizada no processo de transmissão, dependente da potência de transmissão P_i , da eficiência de dreno η do amplificador e da relação pico-média, do inglês *peak-to-average ratio* (PAR) ξ , que é igual a $\xi = 3 \left(\frac{\sqrt{\mathcal{M}}-1}{\sqrt{\mathcal{M}+1}} \right)$ para modulações \mathcal{M} QAM [Cui et al. 2005].

Em [Howard et al. 2006], mostra-se que, em sistemas em que a taxa de transmissão não é muito elevada (< 1 Mbps), tais como redes de sensores, o consumo de energia relacionado ao processo de codificação/decodificação de canal é irrisório no cálculo do consumo total, podendo ser desprezado.

Analisando-se (3.1), percebe-se que, para se minimizar o consumo de energia E para uma taxa R_b , deve-se minimizar o valor da potência consumida pelo amplificador (P_{amp}), uma vez que P_{tx} e P_{rx} são fixas (dependentes do *hardware* e não da topologia da rede).

Portanto, o foco deve estar em transmitir a informação de maneira mais energeticamente eficiente, diminuindo a potência despendida pelo amplificador. Como já discutido no início deste capítulo, podemos diminuir a taxa de erro e aumentar o grau de diversidade de uma rede sem fio aplicando técnicas de cooperação e codificação de rede.

Para evitar confusão, vale ressaltar que neste trabalho $P_{i,X}^*$ se referirá à mínima potência de transmissão necessária para se assegurar um limiar máximo de *outage* \mathcal{P}_o^* no esquema X, e E_X ao consumo energético do esquema X.

3.2 CONSUMO ENERGÉTICO DA TRANSMISSÃO DIRETA

Em primeiro lugar, buscaremos analisar o consumo energético de uma simples transmissão direta entre dois nós. Para tal, devemos analisar a equação de probabilidade de

outage da transmissão direta. Assim, observando-se (2.9), pode-se perceber que é possível isolar a potência de transmissão mínima exigida para se assegurar que a probabilidade de *outage* seja no máximo \mathcal{P}_o^* . Realizando-se as manipulações matemáticas necessárias, obtém-se a seguinte expressão, considerando-se desvanecimento Nakagami- m :

$$P_{i,DT}^* = \frac{mN_0B(2^r - 1)}{\gamma_{i,j} \sqrt[m]{\mathcal{P}_o^* \Gamma(m+1)}}. \quad (3.4)$$

Assim, a partir de (3.1) e (3.4) tem-se que o consumo energético do esquema DT é igual a:

$$E_{DT} = \frac{\frac{\xi}{\eta} P_{i,DT}^* + P_{tx} + P_{rx}}{R_b}. \quad (3.5)$$

Com isto, é possível traçar o consumo energético mínimo da rede para que uma probabilidade de *outage* alvo não seja ultrapassada, de forma a garantir a qualidade da troca de dados entre os nós.

3.3 CONSUMO ENERGÉTICO DO ESQUEMA DF

Iniciando a análise de sistemas com cooperação entre os nós, buscaremos a expressão que retrate o consumo energético do esquema cooperativo mais simples apresentado neste trabalho: o decodifica-e-encaminha (DF). Analisando-se (2.9) e (2.12), e considerando-se desvanecimento Nakagami- m , pode-se mostrar que a potência mínima exigida para se assegurar que a probabilidade de *outage* do esquema DF seja no máximo $\mathcal{P}_{o,DF}^*$ é

$$P_{i,DF}^* = \frac{mN_0B(2^{(r/R_{DF})} - 1)}{\gamma_{i,j} \sqrt[2m]{2\mathcal{P}_{o,DF}^* \Gamma(m+1)^2}}. \quad (3.6)$$

Ressalta-se que a divisão da eficiência espectral r por R_{DF} em (3.6) foi realizada para que a eficiência espectral efetiva, medida em bits de informação/s/Hz, fosse mantida inalterada se comparada com a transmissão direta, com o intuito de realizar uma comparação justa entre os diversos esquemas.

Uma vez que a quantidade de transmissões e recepções realizadas no esquema DF de acordo com a Tabela 2.1 são, respectivamente, $2M$ e $M^2 + M$, tem-se que o consumo energético (em Joules/bit) do esquema DF é igual a [Rayel et al. 2012a]

$$E_{DF} = \frac{2M \left(\frac{\xi}{\eta} P_{i,DF}^* + P_{tx} \right) + M(M+1)P_{rx}}{MR_b/R_{DF}}. \quad (3.7)$$

A taxa de transmissão R_b também é dividida por R_{DF} , já que existe mais de uma cópia de uma mesma mensagem, e este número é diretamente proporcional à taxa do esquema.

Como apresentado no item 2.2.1.1, a ordem de diversidade do esquema DF é $2m$, o que torna a potência necessária para a transmissão menor, como pode-se observar em (3.6). Na Seção 4.3, será possível analisar se esta economia na energia despendida pelo amplificador será suficiente para compensar a quantidade de transmissões e recepções adicionadas pelo esquema de cooperação implantado na rede.

3.4 COMENTÁRIOS

Neste capítulo, ferramentas para a avaliação da eficiência energética de redes sem fio foram apresentadas, desde a simples transmissão direta, até os primeiros esquemas envolvendo Redes Sem Fio Cooperativas. A motivação principal para essa análise é fundamentada no alto crescimento na demanda por dispositivos de comunicação sem fio, cada vez mais poderosos e portanto maiores consumidores de energia, na contramão da limitação energética que esse tipo de aparelho possui, já que é normalmente alimentado por baterias, que por sua vez são produzidas com recursos naturais limitados, que caminham para um esgotamento.

Afim de minimizar o consumo de energia de redes sem fio, na Seção 3.1 analisou-se o *hardware* dos nós da rede, e concluiu-se que o consumo é dividido em três partes: circuito de transmissão, circuito de recepção e potência de transmissão. Porém, como os consumos dos circuitos de transmissão e recepção são fixos, independentes da topologia da rede, devemos minimizar a potência de transmissão para tornar o sistema mais energeticamente eficiente.

Assim, através das expressões de probabilidade de *outage* obtidas na Seção 2.2 para cada um dos esquemas de transmissão, foi possível obter a potência mínima necessária para manter a probabilidade de *outage* abaixo de um determinado limiar.

Conhecendo o número de transmissões e recepções de cada um dos esquemas, foi possível criar expressões que representam o consumo energético dos mesmos, que é função da potência do circuito de transmissão, da potência do amplificador e da potência dos circuitos de recepção.

A taxa de cada esquema foi considerada no cálculo das potências mínimas necessárias, bem como no caso do consumo energético em Joule/bit, para garantir uma comparação justa com a transmissão direta.

Ao analisar a expressão da potência de transmissão mínima do esquema DF (3.6), foi

possível perceber que, devido à ordem de diversidade maior que a da transmissão direta, a potência de transmissão necessária será menor. Com as equações que representam o consumo energético obtidas, será possível compará-las no próximo capítulo, verificando se a economia na energia despendida pelo amplificador será suficiente para compensar a quantidade de transmissões e recepções adicionadas pelo esquema de cooperação implantado na rede.

4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE CODIFICAÇÃO DE REDE

Como mencionado na Seção 2.3, a técnica de Codificação de Rede, originalmente proposta com o intuito de aumentar a vazão de redes com fio, tem sido recentemente utilizada em redes cooperativas sem fio com o objetivo de reduzir a taxa de erro do sistema, já que em sistemas cooperativos que utilizam codificação de rede, ao invés de somente retransmitir individualmente as informações de seus parceiros na fase de cooperação, os nós cooperadores são capazes de transmitir combinações lineares, sobre um campo finito $GF(q)$, das informações disponíveis.

No capítulo anterior, observamos que, apesar da técnica de cooperação apresentar um melhor desempenho de erro (maior ordem de diversidade) que a técnica de transmissão direta, há situações em que esta pode ser mais vantajosa quando considera-se como métrica o consumo energético da rede.

Neste capítulo, avaliaremos o consumo energético do esquema GDNC (com e sem canal de retorno), e apresentaremos uma análise a fim de determinar as condições (número ótimo de nós cooperadores) que resultem em um consumo energético minimizado da rede.

Resultados numéricos serão apresentados, comparando o consumo energético dos esquemas DT, DF e GDNC, de modo a confirmar as impressões sobre as expressões analíticas obtidas.

4.1 CONSUMO ENERGÉTICO DO ESQUEMA GDNC

Seguindo a mesma linha de raciocínio do Capítulo 3, é preciso encontrar a expressão que define o consumo energético do esquema GDNC, que na Sub-Seção 2.3.3 mostramos ser o mais eficiente em termos de taxa de erro e ordem de diversidade, atrás apenas do FA-GDNC, uma variante do GDNC com canal de retorno. Assim, considerando-se desvanecimento Nakagami- m , pode-se mostrar a partir de (2.9) e (2.27) que a potência mínima exigida para que o esquema GDNC assegure probabilidade de *outage* menor ou igual a $\mathcal{P}_{o,\text{GDNC}}^*$ é:

$$P_{i,\text{GDNC}}^* = \frac{mN_0B(2^{(r/R_{\text{GDNC}})} - 1)}{\gamma_{i,j}\Gamma(m+1)^{\frac{1}{m}}(\mathcal{P}_{o,\text{GDNC}}^*/\mu)^{\frac{1}{m(M+k_2)}}} \quad (4.1)$$

onde $\mu = \binom{k_1+k_2-1}{k_2}$. De acordo com a quantidade de transmissões/recepções realizadas pelo esquema GDNC apresentadas na Tabela 2.3, obtém-se que o consumo energético do esquema GDNC é dado por:

$$E_{\text{GDNC}} = \frac{(k_1+k_2) \left(\frac{\xi}{\eta} P_{i,\text{GDNC}}^* + P_{\text{tx}} \right) + (Mk_1+k_2)P_{\text{rx}}}{k_1R_b/R_{\text{GDNC}}}. \quad (4.2)$$

A partir das equações (4.1) e (4.2) é possível perceber que o consumo energético do esquema GDNC está diretamente relacionado ao número de nós da rede (M), além da distância entre os nós ($d_{i,j}$), contida na expressão de SNR que compõe a probabilidade de *outage* alvo $P_{i,\text{GDNC}}^*$.

4.1.1 NÚMERO ÓTIMO DE NÓS COOPERADORES

Como mencionamos na seção anterior, ao analisarmos (3.6)-(3.7) e (4.1)-(4.2) em conjunto com (2.2), percebemos que o consumo de energia dos esquemas DF e GDNC é influenciado pela quantidade de nós, M . Tendo isso em vista, para uma dada distância $d_{i,j}$, haveria um valor ótimo M^* para o número de nós cooperadores a fim de minimizar o consumo energético?

Para se obter o ponto crítico de $E_{\text{GDNC}}(M)$, basta realizar a derivada de E_{GDNC} com relação ao número de nós M , igualá-la a zero e isolar M , já que assim obteremos a tangente ao ponto com menor valor na curva de Consumo de Energia x Número de nós cooperadores, a ser apresentada na Seção 4.3. Abaixo, segue a derivada da energia despendida em relação ao número de nós:

$$\frac{dE_{\text{GDNC}}}{dM} = \frac{P_{\text{rx}}}{R_b} - \frac{\Psi \ln(\Omega) \Omega^{1/(m(M+k_2))}}{m(M+k_2)^2}, \quad (4.3)$$

onde $\Psi = \frac{\xi N_0 B (2^{(r/R_{\text{GDNC}})} - 1)}{\eta \gamma_{i,j}^m \sqrt[m]{\Gamma(m+1)}}$ e $\Omega = \mu / \mathcal{P}_{o,\text{GDNC}}^*$.

Resta fazer $dE_{\text{GDNC}}/dM = 0$ e isolar M , podendo assim mostrar que o valor ótimo (que minimiza o consumo energético) para o número de nós cooperadores do esquema GDNC é dado por:

$$M^* = \max \left\{ 2 ; \frac{\ln(\Omega)}{2mW \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_{\text{rx}} R_{\text{GDNC}} \ln(\Omega)}{m^2 \Psi}} \right)} - k_2 \right\}, \quad (4.4)$$

onde $W(\cdot)$ corresponde à função Lambert-W [Corless et al. 1996] e $\max\{2 ; \cdot\}$ limita o número mínimo de nós cooperadores a 2. Para o esquema DF, através do mesmo princípio, pode-se mostrar que o número ótimo de nós que minimiza o consumo energético é $M_{DF}^* = 2$, independentemente da distância entre os nós.

Assim, com o auxílio de (4.4) é possível encontrar o número de nós cooperadores capaz de minimizar o consumo energético da rede para uma dada distância entre os nós. Este resultado pode ser explorado de maneira a se criar “*clusters* de cooperação”, dividindo os nós da rede em conjuntos menores, onde os mesmos cooperam entre si somente dentro de seus *clusters* associados.

Este tipo de análise será realizada mais profundamente na Seção 4.3, que apresentará resultados numéricos deste estudo e proporcionará uma melhor visão a respeito do assunto.

4.2 CONSUMO ENERGÉTICO DO ESQUEMA FA-GDNC

Na Sub-Seção 2.3.4, mostramos que uma variante do esquema GDNC, com canal de retorno entre o destino e os nós cooperadores, pode evitar a fase de cooperação quando o destino receber corretamente todas as informações já na fase de difusão. Assim, o consumo energético seria ainda menor, já que, como mostrado em [Brante et al. 2011], se o tamanho do pacote for grande o suficiente, o consumo de energia associado ao retorno de informação realizado pelo destino pode ser desprezado.

Tendo isto em vista, aplicando o mesmo método utilizado na seção anterior, apresentaremos a expressão que define o consumo energético do esquema FA-GDNC. Alterando para Nakagami- m a expressão obtida em [Rayel et al. 2012b], pode-se mostrar a partir de (2.9) e (2.27) (levando-se em conta que a probabilidade de *outage* do esquema FA-GDNC é a mesma do GDNC, como mencionado no item 2.3.4.1) que a potência mínima exigida para que o esquema FA-GDNC assegure probabilidade de *outage* menor ou igual a $\mathcal{P}_{o,FA-GDNC}^*$ é:

$$P_{i,FA-GDNC}^* = \frac{mN_0B(2^{(r/R_{FA-GDNC})} - 1)}{\gamma_{i,j}\Gamma(m+1)^{\frac{1}{m}}(\mathcal{P}_{o,FA-GDNC}^*/\mu)^{\frac{1}{m(M+k_2)}}}. \quad (4.5)$$

Já que a quantidade de transmissões/recepções realizadas pelo esquema FA-GDNC depende na probabilidade de *outage*, como mostrado em (2.30) e apresentado na Tabela 2.4, obtém-se que o consumo energético do esquema FA-GDNC (em Joules/bit) é dado por:

$$E_{FA-GDNC} = \frac{(k_1+k'_2) \left(\frac{\xi}{\eta} P_{i,FA-GDNC}^* + P_{tx} \right) + (Mk_1+k'_2)P_{tx}}{k_1R_b/R_{FA-GDNC}}. \quad (4.6)$$

Então, é possível perceber que o consumo energético do FA-GDNC, assim como no caso em que não há canal de retorno, segue diretamente relacionado ao número de nós da rede e à distância entre os nós. Portanto, vale analisar também o número ótimo de nós cooperadores para esse esquema aprimorado.

4.2.1 NÚMERO ÓTIMO DE NÓS COOPERADORES

Uma análise similar à feita na Sub-Seção 4.1.1 pode ser realizada, porém, devido à variação da taxa do esquema FA-GDNC, com dependência em relação ao número de nós, a derivada do consumo energético em relação ao número de nós se torna mais complexa, dificultando a obtenção de uma expressão fechada.

4.3 RESULTADOS NUMÉRICOS

Após apresentarmos os conceitos de cooperação e codificação de redes no Capítulo 2 e encontrarmos expressões que avaliam seu consumo de energia nos Capítulos 3 e 4, apresentaremos agora os resultados numéricos obtidos através dessas expressões, com o intuito de confirmar as impressões sobre as expressões analíticas obtidas.

Observando-se a equação encontrada para o consumo de energia da transmissão direta (3.5), é possível verificar a dependência clara com relação à distância $d_{i,j}$ entre os nós, que é diretamente proporcional ao consumo de energia do esquema.

Para o esquema cooperativo DF, ao se analisar (3.7), é possível perceber que o consumo agora é influenciado também pelo número de nós cooperadores M ao invés de apenas pela distância $d_{i,j}$ entre os nós.

Como o GDNC é uma generalização do esquema de codificação de rede dinâmica DNC, este trabalho se limitará a analisar a eficiência energética do primeiro. Fica evidente em (4.2) que o consumo é influenciado também pelo número de nós cooperadores M e pela distância entre os nós cooperadores. A mesma constatação fica clara em (4.6), para o caso do FA-GDNC.

Sendo assim, deve-se analisar o consumo energético de cada esquema em relação à distância entre os nós, que influencia o valor da potência utilizada pelo amplificador de transmissão, mas também em relação ao número de nós cooperadores, que multiplicará o consumo energético dos circuitos de transmissão e recepção de cada um dos nós. Nas seções seguintes, uma análise comparativa será realizada nestes termos.

4.3.1 PARÂMETROS UTILIZADOS

Na Sub-Seção 3.1, adotamos o modelo apresentado em [Cui et al. 2005] para analisar as potências despendidas por cada nó da rede. Portanto, os parâmetros considerados nas simulações a seguir também estarão em conformidade com [Cui et al. 2005], e estão apresentados na Tabela 4.1. Para $\mathcal{P}_o^* = 10^{-4}$, pode-se mostrar que a aproximação de alta SNR realizada em (2.9) é válida.

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados

M_l	40	dB	f_c	2.5	GHz
N_f	10	dB	B	10	KHz
G	5	dBi	r	1	b/s/Hz
N_0	-174	dBm/Hz	α	4	
P_{tx}	97.9	mW	η	0.35	
P_{rx}	112.2	mW	\mathcal{P}_o^*	10^{-4}	
\mathcal{M}	4				

4.3.2 CONSUMO ENERGÉTICO EM RELAÇÃO À DISTÂNCIA

Conforme a análise realizada no início deste capítulo, um fator que afeta o consumo energético de todos os esquemas, inclusive da transmissão direta, é a distância entre os nós. Tendo isto em vista, apresentamos na Figura 4.1 o consumo energético (em Joules/bit) em função da distância (em metros) para uma rede com $M = 2$ nós cooperadores, considerando-se a transmissão direta, cooperação (DF) e o esquema GDNC, este com $k_1 = k_2 = 2$ (valores escolhidos para que a taxa do código de rede do esquema GDNC seja igual à do esquema DF, e observando-se a restrição para k_2 de (2.27)). Cada esquema foi avaliado quando submetido a desvanecimento Nakagami- m , com $m = 1$ - sem linha de visada (NLOS, do inglês *Non-Line-of-Sight*) - e com $m = 2$ - com alguma linha de visada (LOS, do inglês *Line-of-Sight*).

Percebe-se que para distâncias pequenas, a quantidade quadrática de recepções dos esquemas DF e GDNC compromete a eficiência energética destes esquemas, sendo a transmissão direta mais eficiente. Porém, à medida que a distância entre os nós aumenta, o consumo referente à circuitaria influencia cada vez menos em (3.1). Nessa situação, percebe-se que o esquema GDNC é o mais eficiente energeticamente, devido à sua maior ordem de diversidade. Pode-se notar também que a falta de linha de visada entre os nós afeta o desempenho do GDNC de forma menos intensa quando comparada à queda de desempenho do DF, e principalmente à da transmissão direta.

Como mencionado na Sub-Seção 2.3.4, ao não realizar a fase de cooperação quando

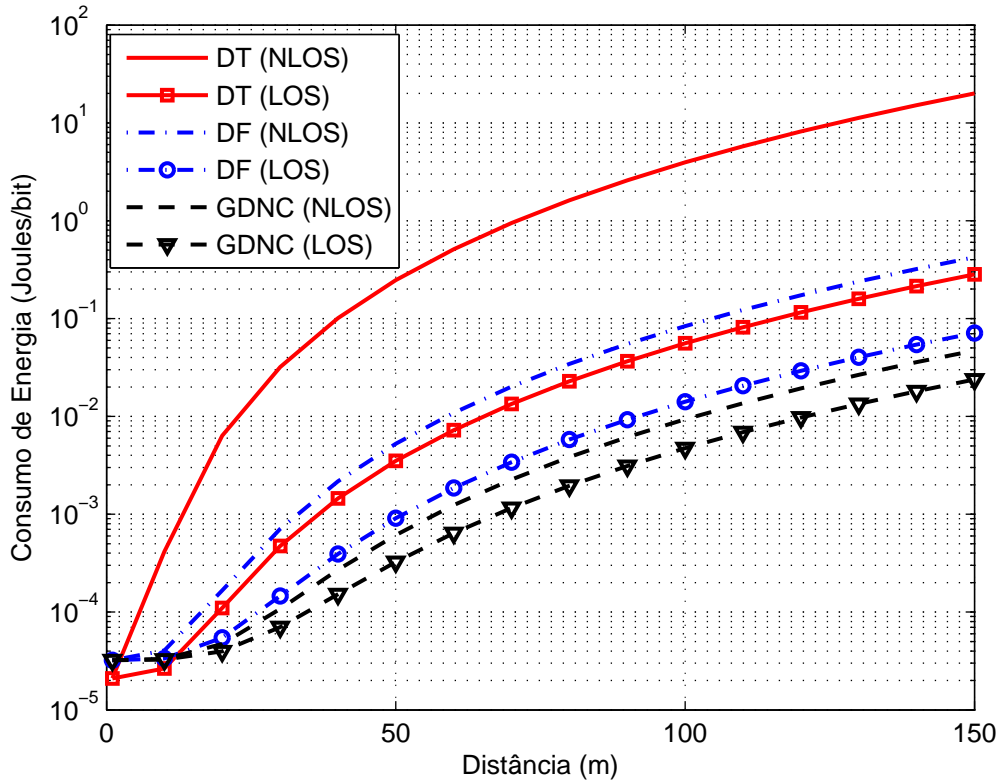


Figura 4.1: Consumo de Energia (em Joules/bit) em função da distância (em metros) para uma rede com $M=2$ nós cooperadores, considerando a transmissão direta, cooperação DF e o esquema GDNC, este com $k_1 = k_2 = 2$, sujeitos a desvanecimento Nakagami- m , com $m=1$ (NLOS) e $m=2$ (LOS).

não necessário, o FA-GDNC tem um consumo energético ainda menor que o GDNC. Isto pode ser provado graficamente, na Figura 4.2. Fica evidente que o FA-GDNC consome menos energia em relação ao GDNC para uma mesma distância entre os nós, tanto no caso sem linha de visada, como no caso com a presença de alguma linha de visada. Entretanto, também pode-se observar que o canal de retorno não é suficiente para sobrepujar o desempenho do GDNC com presença de alguma linha de visada.

4.3.3 CONSUMO ENERGÉTICO EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE NÓS

No início deste capítulo, foi mostrado que outra variável afeta o consumo energético dos esquemas cooperativos: o número de nós M . Assim, na Figura 4.3, apresenta-se o consumo energético (em Joules/bit) em função do número de nós cooperadores M , para uma distância fixa $d = 50$ m, considerando-se os mesmos esquemas da Figura 4.1.

Pode-se observar que, para essa distância, o esquema GDNC supera a transmissão direta quando $M < 600$, mas tende a ser menos eficiente que esta para um número muito

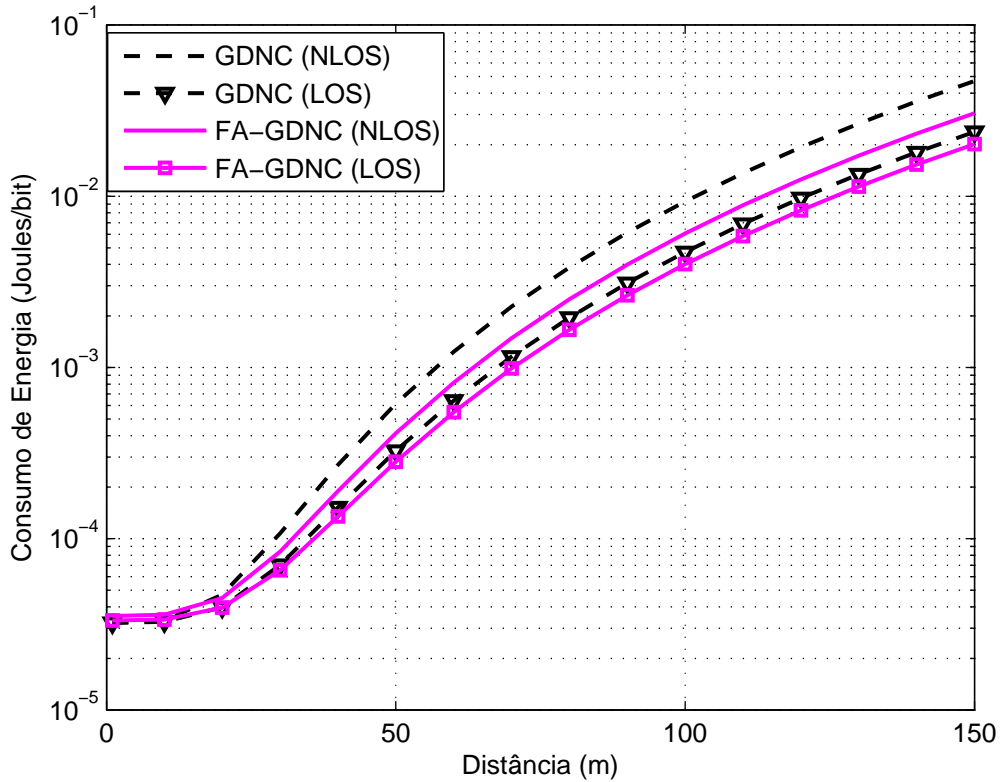


Figura 4.2: Consumo de Energia (em Joules/bit) em função da distância (em metros) para uma rede com $M=2$ nós cooperadores, considerando os esquemas GDNC e FA-GDNC, com $k_1=k_2=2$, sujeitos a desvanecimento Nakagami- m , com $m=1$ (NLOS) e $m=2$ (LOS).

elevado de nós. Novamente, isso deve-se à quantidade quadrática de recepções do esquema GDNC. Nota-se também ao se observar a Figura 4.3 que o esquema GDNC apresenta um valor ótimo para o número de nós, para o qual o consumo energético apresenta um valor mínimo, dependendo do fator linha de visada. Além disto, é possível perceber que existe uma grande faixa de variação no número de nós em que o consumo energético não é significativamente afetado.

Já na Figura 4.4, podemos avaliar o desempenho em relação ao número de nós do GDNC e do FA-GDNC, tanto sem a presença de linha de visada, quanto na presença de alguma linha de visada. É possível perceber que, apesar de ser mais energeticamente eficiente que o GDNC para um número pequeno de nós cooperadores, o FA-GDNC tende para o mesmo consumo energético do GDNC à medida em que o número de nós aumenta, com ou sem presença de linha de visada, o que confirma a afirmação realizada na Sub-Seção 4.2.1.

Devido à aproximação realizada em (2.9), temos uma pequena imprecisão, que resulta no cruzamento das curvas GDNC e FA-GDNC sem linha de visada com as curvas dos mesmos esquemas, mas com alguma linha de visada. Porém, à medida em que o número de nós

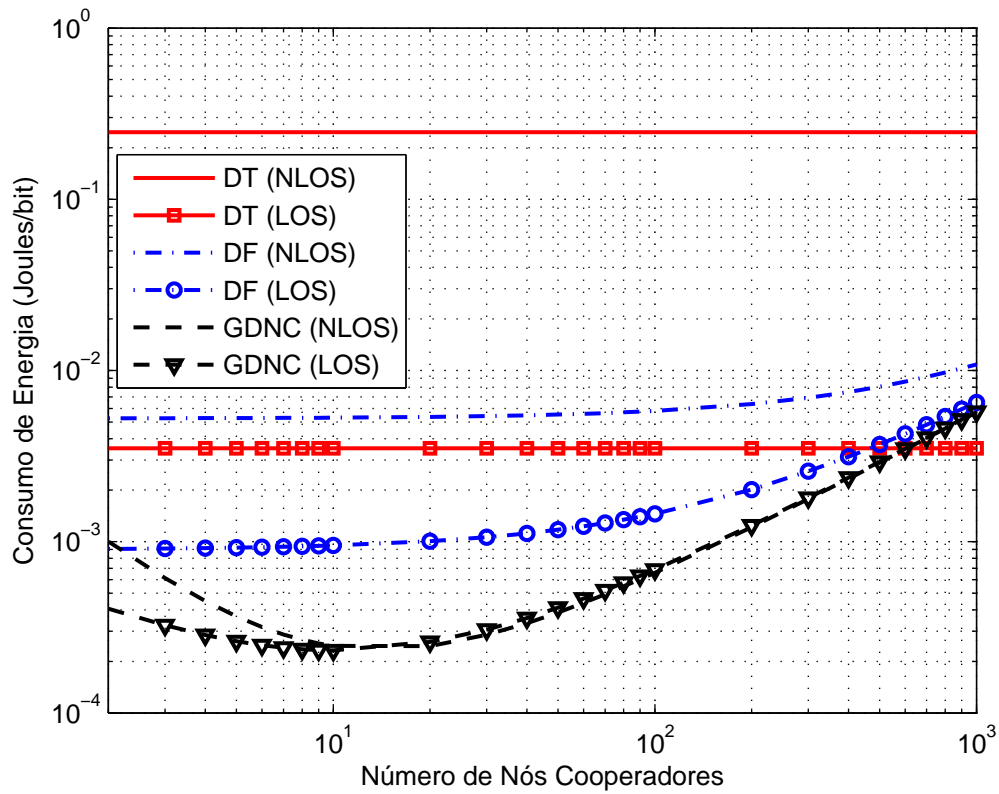


Figura 4.3: Consumo de Energia (em Joules/bit) em função do número de nós cooperadores, para $d = 50$ m, considerando a transmissão direta, cooperação DF e o esquema GDNC, com $k_1 = k_2 = 2$, sujeitos a desvanecimento Nakagami- m , com $m=1$ (NLOS) e $m=2$ (LOS).

cooperadores aumenta, as duas curvas se sobrepõem, o que no caso sem aproximação ocorreria já no ponto em que houve cruzamento.

4.3.4 NÚMERO ÓTIMO DE NÓS COOPERADORES

Como foi possível observar na Figura 4.3, existe um número ótimo de nós que minimiza o consumo de energia. Assim, é possível avaliar se a equação (4.4) se confirma com os resultados numéricos obtidos nesta seção.

Na Figura 4.5 apresenta-se o valor ótimo de nós cooperadores M^* em função da distância para os esquemas GDNC, obtido numericamente a partir dos resultados obtidos com (4.2) e analiticamente de acordo com (4.4). Para o esquema FA-GDNC, está apresentado apenas o resultado obtido com (4.6), conforme explanado na Sub-Seção 4.2.1.

Nota-se que à medida em que a distância entre os nós aumenta, a quantidade de nós necessários para que o consumo energético do esquema GDNC seja minimizado também aumenta. Entretanto, para uma grande faixa de distâncias o número ótimo de nós é pequeno,

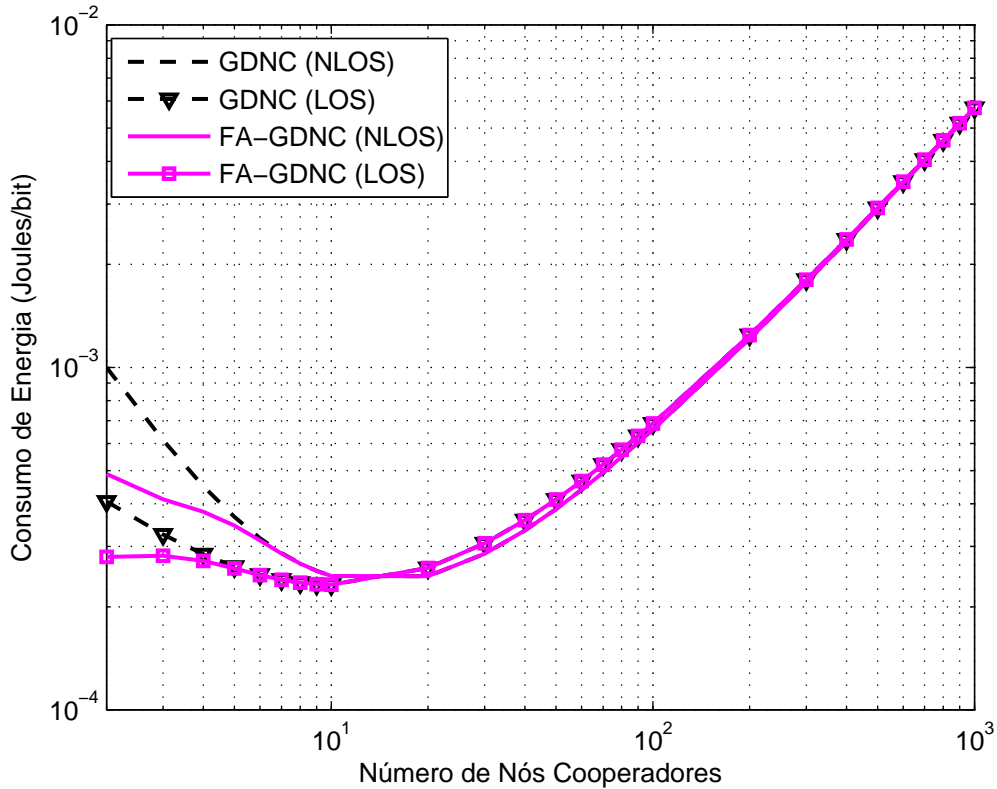


Figura 4.4: Consumo de Energia (em Joules/bit) em função do número de nós cooperadores, para $d=50$ m, considerando os esquemas GDNC e FA-GDNC, com $k_1=k_2=2$, sujeitos a desvanecimento Nakagami- m , com $m=1$ (NLOS) e $m=2$ (LOS).

sendo totalmente viável. É possível observar também que a presença de linha de visada reduz o valor ótimo de M^* . A Figura 4.6 apresenta a variação do consumo energético em relação à distância e ao número de nós cooperadores, ao mesmo tempo, apresentando uma ideia sobre a faixa de distâncias e número de nós cooperadores na qual o GDNC tem consumo menor que o esquema DT, ambos sem linha de visada.

4.3.5 CLUSTERS DE COOPERAÇÃO

Como foi possível confirmar na sub-seção anterior, para cada distância, existe o número ótimo de nós cooperadores que minimiza o consumo energético dos esquemas GDNC e FA-GDNC. Portanto, utilizar esse dado no projeto do sistema pode ser muito importante, e para isto iremos avaliar a diferença de consumo de um esquema com número de nós otimizado para uma dada distância, em relação a um sistema com um número de nós M fixo.

Na Figura 4.7 apresentamos o resultado dessa avaliação, realizada para os esquemas GDNC e FA-GDNC, ambos com $k_1 = k_2 = 2$, sujeitos a desvanecimento Nakagami- m , com $m=1$ (NLOS). O número de nós das versões não otimizadas foi fixado em $M = 50$. É possível

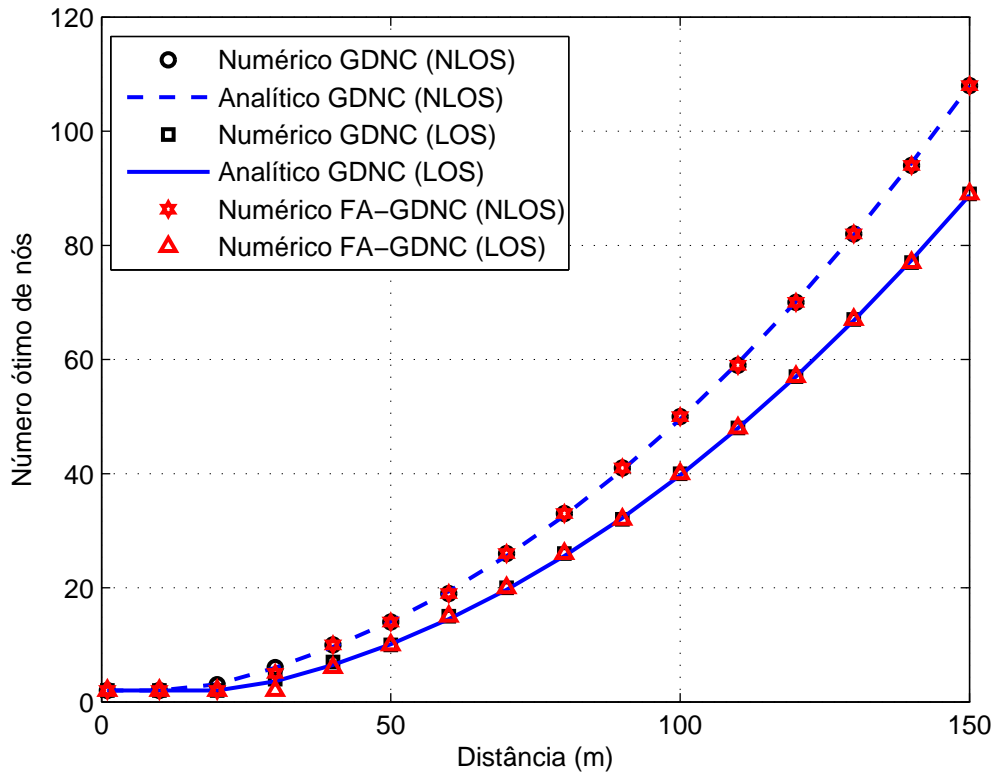


Figura 4.5: Valor ótimo do número de nós cooperadores em função da distância para o esquema GDNC, com $k_1 = k_2 = 2$, sujeitos a desvanecimento Nakagami- m , com $m=1$ (NLOS) e $m=2$ (LOS).

perceber que, para toda a faixa de distâncias apresentadas, a otimização do número de nós cooperadores resulta em economia de energia. Além disso, constata-se que o resultado obtido está de acordo com a Figura 4.4, já que a energia consumida em relação a um mesmo número de nós é a mesma para o GDNC e o FA-GDNC.

Como nem sempre todos os nós podem estar a uma mesma distância uns dos outros, pode-se organizá-los em pequenos conjuntos, chamados de *clusters* de cooperação, onde a distância entre os nós é similar, podendo assim utilizar-se o número ótimo de nós que minimiza o consumo energético.

Tal resultado também é válido para a versão com linha de visada, como podemos observar na Figura 4.8.

4.4 COMENTÁRIOS

Neste capítulo, ferramentas para a avaliação da eficiência energética da codificação de redes cooperativas foram obtidas, para que se possa comparar o desempenho desses esquemas no quesito consumo de energia com relação à transmissão direta e à cooperação simples, sem

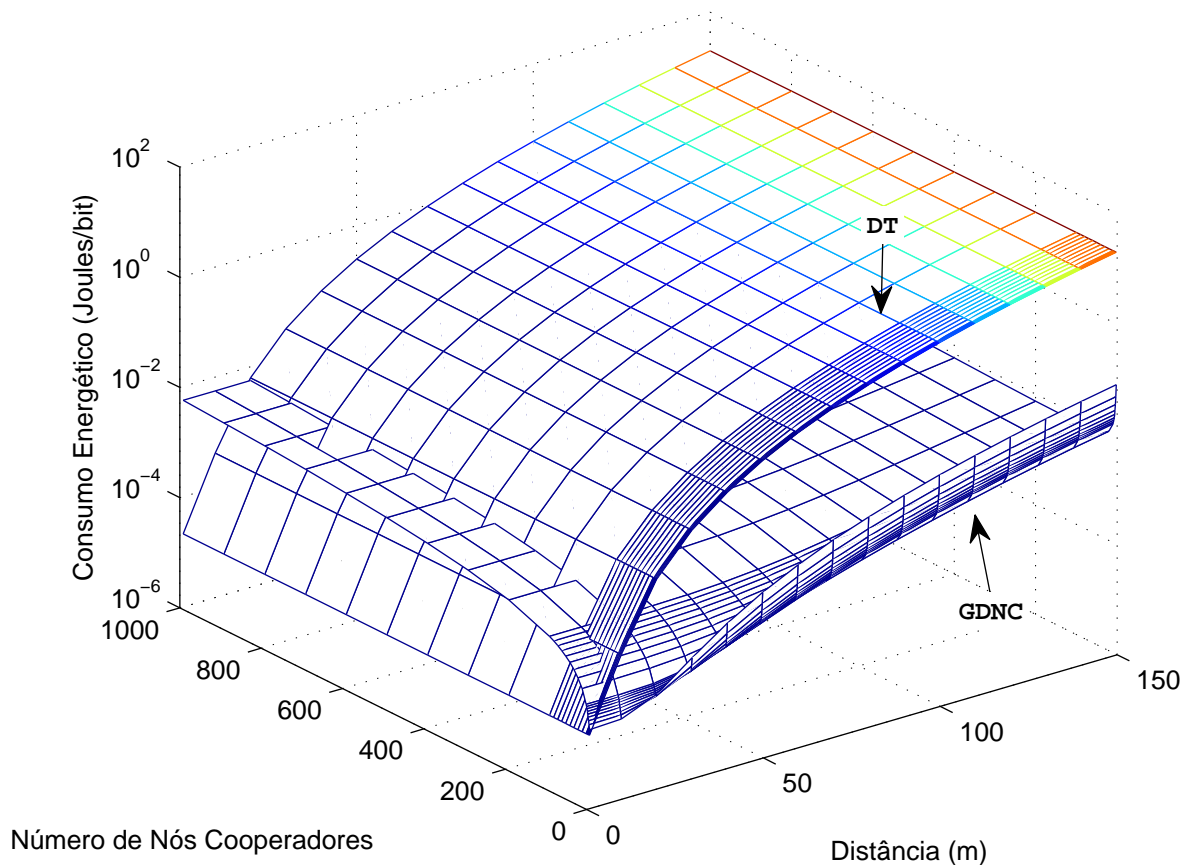


Figura 4.6: Energia consumida pelos esquemas DT (NLOS) e GDNC (NLOS) em relação à distância e ao número de nós cooperadores.

codificação de rede.

Como a Codificação de Rede se mostrou vantajosa em relação à transmissão direta e à cooperação simples tanto em termos de taxa de erro como em termos de ordem de diversidade, é fundamental que possamos analisar seu consumo energético, para confirmar sua viabilidade.

Através dos mesmos procedimentos realizados no Capítulo 3, expressões de probabilidade de *outage* foram obtidas, e assim foi possível obter a potência mínima necessária para manter a probabilidade de *outage* abaixo de um determinado limiar.

Da mesma forma, conhecendo o número de transmissões e recepções de cada um dos esquemas, foi possível criar expressões que representam o consumo energético dos mesmos.

A taxa de cada esquema também foi considerada no cálculo das potências mínimas necessárias, bem como no caso do consumo energético em Joule/bit, para garantir uma comparação justa com a transmissão direta.

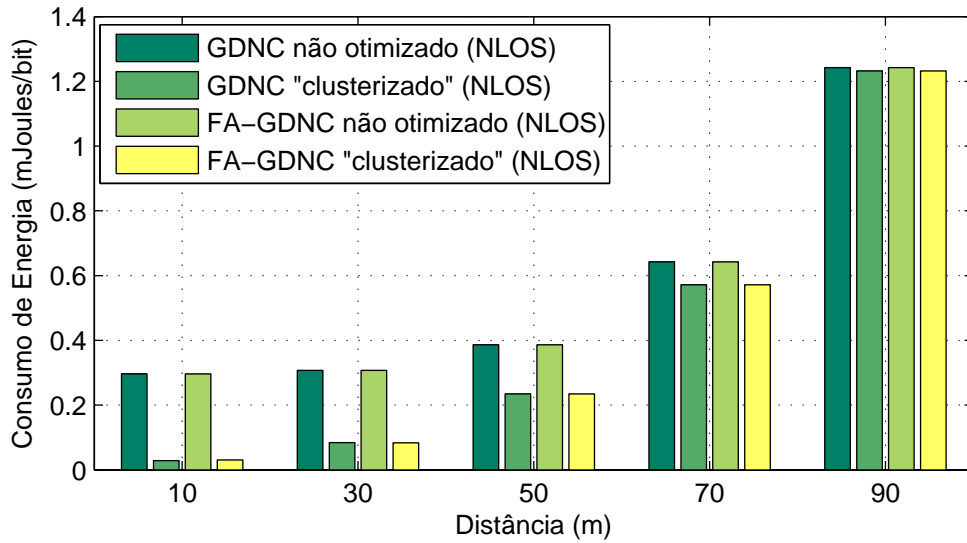


Figura 4.7: Comparação do consumo energético dos esquemas GDNC e FA-GDNC com $k_1 = k_2 = 2$, otimizados em relação ao número de nós cooperadores em função da distância sujeitos a desvanecimento Nakagami- m , com $m=1$ (NLOS) e $M = 50$.

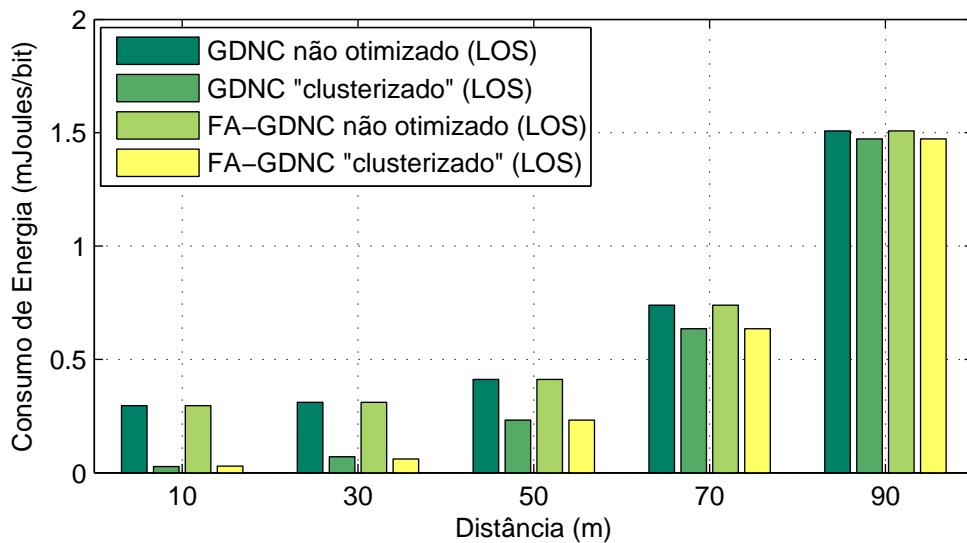


Figura 4.8: Comparação do consumo energético dos esquemas GDNC e FA-GDNC com $k_1 = k_2 = 2$, otimizados em relação ao número de nós cooperadores em função da distância sujeitos a desvanecimento Nakagami- m , com $m=2$ (LOS) e $M = 50$.

Ao analisar a expressão do consumo energético do esquema GDNC, foi possível perceber que existe um valor ótimo de nós cooperadores que minimiza o consumo energético para uma dada distância fixa entre os nós. Uma equação que representa este número foi obtida, e poderá ser utilizada na formação de *clusters* de cooperação durante o projeto da rede. Como nem sempre todos os nós podem estar a uma mesma distância uns dos outros, pode-se organizá-los em pequenos conjuntos, cada um deles mais eficiente energeticamente.

A mesma abordagem foi realizada para o GDNC com canal de retorno, e através das expressões obtidas, foi possível perceber que este é ainda mais eficiente energeticamente, pois evita a fase de cooperação em situações em que ela não é necessária, e por consequência economiza energia.

Com a obtenção destas expressões, buscamos simular sistemas cooperativos com codificação de rede, para verificar se as impressões obtidas com a análise das equações se confirmariam graficamente. Foi possível assim analisar a eficiência energética de diversas redes sem fio, desde as com simples transmissão direta, até as com as mais sofisticadas técnicas de codificação de rede. Pode-se perceber que o esquema FA-GDNC tem grande vantagem sobre as demais abordagens, pois ao aumentar a ordem de diversidade através da cooperação, e diminuir a taxa de erro através da codificação, exige uma quantidade menor de energia para manter uma probabilidade de *outage* alvo. Como a fase cooperativa é evitada quando não necessária, o FA-GDNC se mostrou ligeiramente mais eficiente que o GDNC.

A desvantagem fica por conta da quantidade quadrática de recepções dos esquemas FA-GDNC e GDNC, que compromete a eficiência energética do esquema em cenários onde a distância entre os nós é pequena, pois neste caso o consumo dos circuitos de transmissão e recepção é significativo em relação ao gasto de energia total do sistema.

Foi possível encontrar também uma expressão analítica para o número ótimo de nós cooperadores que maximiza a eficiência energética do GDNC, expressão esta que foi confirmada com boa precisão pelos resultados numéricos. Foi possível perceber também que o número ótimo de nós cooperadores em relação à distância para o FA-GDNC é idêntico ao do GDNC.

Uma sugestão deste trabalho é a utilização de *clusters* de cooperação, cada um deles contendo o número ótimo de nós cooperadores para a distância dada, minimizando assim o consumo energético, e otimizando o projeto do sistema. Através da análise realizada na Sub-Seção 4.3.5, foi possível perceber que o GDNC “clusterizado” pode ser até 10x mais econômico que o GDNC comum, um dado que pode ser primordial no projeto de uma rede cooperativa eficiente energeticamente.

5 COMENTÁRIOS FINAIS

Neste trabalho de mestrado, técnicas de codificação de rede foram utilizadas com o intuito de melhorar a eficiência energética de uma rede de múltiplo acesso em que os nós são aptos a cooperar entre si. Percebeu-se que isso seria possível através dos resultados apresentados em [Rebelatto et al. 2012], onde a cooperação aumentava a ordem de diversidade do sistema, diminuindo assim a energia necessária para obter sucesso na comunicação, além da codificação de rede, que diminui a taxa de erro do sistema, incorrendo no mesmo resultado da cooperação, aumentando ainda mais o ganho em economia de energia.

Assim, diversas abordagens foram apresentadas, desde as com cooperação simples (DF), até os mais avançados esquemas de codificação de rede com cooperação (GDNC). Uma variante do esquema GDNC foi também avaliada, visando evitar a transmissão de pacotes de paridade desnecessários e conseqüentemente aumentar ainda mais a eficiência energética. Para tal, foi assumida a existência de um canal de retorno entre o destino e os nós, através do qual uma pequena quantidade de informação relativa ao sucesso/fracasso na decodificação dos pacotes recebidos durante a fase de difusão é transmitida pelo destino. Em posse desta informação, os nós são aptos a projetar o código de rede de forma adaptativa, reduzindo a quantidade de pacotes de paridade quando conveniente.

Para todas as abordagens apresentadas, através das análises da probabilidade de *outage* desenvolvidas em [Rebelatto et al. 2012], foram desenvolvidas expressões que relacionam a energia consumida pelo sistema com um valor alvo de probabilidade de *outage*. A fim de avaliar o consumo energético, foram traçados gráficos que compararam o desempenho de diversos esquemas, desde a transmissão direta entre os nós, passando pelos de cooperação simples, até o GDNC com canal de retorno. Como já era esperado, o GDNC com canal de retorno apresentou melhor desempenho em relação às demais abordagens para uma vasta faixa de distâncias entre os nós, quando o número de nós é fixo, sendo inviável para distâncias curtas, onde o consumo energético dos circuitos de transmissão e recepção passa a ter grande influência no consumo energético total do sistema e para um número de nós muito grande, onde a quantidade quadrática de recepções compromete a eficiência energética do sistema.

Através da análise do consumo energético em relação ao número de nós, pode-se perceber também que existe um número ótimo de nós que minimiza o consumo energético do sistema. Uma expressão analítica para a obtenção desse número foi desenvolvida, e confirmada com boa precisão pelos resultados numéricos. A partir desse resultado, este trabalho sugere que os nós da rede sejam organizados em *clusters* de cooperação, possibilitando assim que cada grupo de nós tenha o consumo energético minimizado, otimizando assim o consumo geral do sistema. Através dessa otimização, foi possível perceber que a economia de energia pode ser de até 10x para a configuração considerada.

REFERÊNCIAS

- AHLWEDE, R. et al. Network information flow. **IEEE Trans. Inf. Theory**, v. 46, n. 4, p. 1204 – 1216, 2000.
- ALAMOUTI, S. A simple transmit diversity technique for wireless communications. **Selected Areas in Communications, IEEE Journal on**, v. 16, n. 8, p. 1451 –1458, oct 1998. ISSN 0733-8716.
- ANATEL. **Números sobre Telefonia móvel**. January 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/kbf0G>>.
- BRANTE, G. G. O.; KAKITANI, M. T.; SOUZA, R. D. Energy efficiency analysis of some cooperative and non-cooperative transmission schemes in wireless sensor networks. **IEEE Trans. Commun.**, v. 59, n. 10, p. 2671 – 2677, October 2011.
- CISCO. **Devices, Devices, Everywhere**. June 2011. Disponível em: <<http://goo.gl/fQOSt>>.
- CORLESS, R. M. et al. On the Lambert W function. **Advances in Computational Mathematics**, v. 5, n. 1, p. 329–359, 1996.
- CUI, S.; GOLDSMITH, A.; BAHAI, A. Energy-constrained modulation optimization. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, v. 4, n. 5, p. 2349 – 2360, September 2005.
- GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.
- HOWARD, S. L. et al. Error control coding in low-power wireless sensor networks: When is ECC energy-efficient? **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2, p. 1–14, May 2006.
- KOETTER, R.; MÉDARD, M. An algebraic approach to network coding. **IEEE/ACM Trans. Netw.**, v. 11, n. 5, p. 782– 795, October 2003.
- LANEMAN, J. N.; TSE, D. N. C.; WORNELL, G. W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. **IEEE Trans. Inf. Theory**, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, December 2004.
- LIN, S.; Costello Jr., D. J. **Error Control Coding: Fundamentals and Applications**. [S.l.]: Prentice-Hall, 1983.
- MACWILLIAMS, F.; SLOANE, N. **The Theory of Error Correcting Codes**. Amsterdam: North Holland, 1977.
- RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. 2. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 2002.
- RAYEL, O. K. et al. Análise da eficiência energética de sistemas cooperativos com codificação de rede. In: **XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBRT'12)**. Brasília, Brazil: [s.n.], 2012a.

- RAYEL, O. K. et al. On the energy efficiency of feedback-assisted network coding in multiuser cooperative systems. In: **Proceeding of the IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'12)** . Sydney, Australia: [s.n.], 2012b.
- RAYEL, O. K. et al. Energy efficiency of network coded cooperative communications in nakagami- m fading. 2013a.
- RAYEL, O. K. et al. Network coding for cooperative mimo vehicular ad-hoc networks. In: . [S.l.: s.n.], 2013b.
- REBELATTO, J. et al. Multiuser cooperative diversity through network coding based on classical coding theory. **IEEE Trans. Signal Process.**, v. 60, n. 2, p. 916–926, feb. 2012. ISSN 1053-587X.
- REBELATTO, J. L. **Codificação de Rede Baseada em Códigos Corretores de Erros Clássicos**. Tese (Doutorado) — Federal University of Santa Catarina (UFSC), Florianopolis, Brazil, 2010.
- REBELATTO, J. L. et al. Adaptive distributed network-channel coding. **IEEE Trans. Wirel. Commun.**, v. 10, n. 9, p. 2818–2822, 2011.
- REBELATTO, J. L. et al. Multi-user cooperative diversity through network coding based on classical coding theory. **IEEE Trans. Signal Process.**, v. 60, n. 2, p. 916–926, February 2012.
- SENDONARIS, A.; ERKIP, E.; AAZHANG, B. User cooperation diversity: Part I and Part II. **IEEE Trans. Commun.**, v. 51, n. 11, p. 1927–1948, November 2003.
- TAROKH, V.; SESHADRI, N.; CALDERBANK, A. Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction. **IEEE Trans. Inf. Theory**, v. 44, n. 2, p. 744–765, mar 1998. ISSN 0018-9448.
- TSE, D.; VISWANATH, P. **Fundamentals of Wireless Communications**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- WANG, Z.; GIANNAKIS, G. A simple and general parameterization quantifying performance in fading channels. **IEEE Trans. Commun.**, v. 51, n. 8, p. 1389–1398, August 2003.
- XIAO, L. et al. A network coding approach to cooperative diversity. **IEEE Trans. Inf. Theory**, v. 53, n. 10, p. 3714–3722, October 2007.
- XIAO, M. Efficient network codes for wireless relaying. In: **Third ACoRN Workshop on Co-operative Wireless Communications**. Sydney: [s.n.], 2009. Disponível em: <<http://www.ee.usyd.edu.au/lyh/Ccoopcomm2009/Papers/MingXiao.pdf>>.
- XIAO, M.; SKOGLUND, M. M-user cooperative wireless communications based on nonbinary network codes. In: **Proc. IEEE Inf. Theory Workshop. ITW'09**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 316–320.
- XIAO, M.; SKOGLUND, M. Multiple-user cooperative communications based on linear network coding. **IEEE Trans. Commun.**, v. 58, n. 12, p. 3345–3351, December 2010.

ÍNDICE REMISSIVO

- banda ISM, 40
- código de canal, 23
- código de rede, 33
- códigos corretores de erros, 33
- códigos de canal
 - Reed-Solomon, 34
- campo de Galois, 28
- canal
 - de retorno, 36
 - entre nós recíproco, 29
 - entre os nós não-recíproco, 30
 - entre os nós perfeito, 31
 - sem fio, 40
- clusters* de cooperação, 47
- codificação de rede, 28
 - aleatória (RNC), 33
 - binária (BNC), 28
 - dinâmica (DNC), 30
 - dinâmica generalizada (GDNC), 34
 - dinâmica generalizada com canal de retorno (FA-GDNC), 36
 - dinâmica multiusuário, 32
- combinação de razão máxima (MRC), 29
- combinação linear, 16, 28, 31
- comprimento de onda, 20, 40
- comunicação cooperativa, 25
- conhecimento perfeito do canal (CSI), 21
- consumo de energia, 40
 - DF, 42
 - DT, 42
 - FA-GDNC, 47
 - GDNC, 46
- decodifica-e-encaminha (DF), 26
- desvanecimento, 25, 40
- distribuição Nakagami-*m*, 21
- diversidade, 24
- eficiência de dreno, 41
- eficiência energética, 40, 41
- eficiência espectral, 23, 42
- expoente de perda de propagação, 20
- figura de ruído, 20
- função gama
 - completa, 21
 - incompleta inferior, 23
- informação mútua, 23
- largura de banda, 21
- máxima distância mínima de Hamming (MDS), 34
- múltiplo acesso, 20
 - ortogonal, 22
- margem do enlace, 20
- matriz de transferência
 - DNC, 33
 - GDNC, 34
- número ótimo de nós cooperadores
 - DF, 47
 - FA-GDNC, 48
 - GDNC, 46
- ordem de diversidade, 24, 25
 - BNC, 30
 - DF, 27
 - DNC, 32
 - DNC Multiusuário, 33
 - FA-GDNC, 36
 - GDNC, 34
- pacote, 20
- palavra código, 20
- perda de propagação, 20
- potência
 - amplificador de transmissão, 41
 - circuito de recepção, 41
 - circuito de transmissão, 41
 - do nó transmissor, 20
 - média recebida, 21

- transmissão, 41
- potência de transmissão mínima
 - DF, 42
 - DT, 42
 - FA-GDNC, 47
 - GDNC, 45
- probabilidade de *outage*, 23
 - BNC, 29
 - DF, 27
 - DNC, 32
 - DNC multiusuário, 32
 - DT, 23
 - FA-GDNC, 36
 - GDNC, 34
- relação pico-média, 41
- relação sinal-ruído, 21
- ruído aditivo Gaussiano, 20
- slot* de tempo, 20
- soma binária (XOR), 29
- taxa de erro, 28
- taxa de transmissão, 33, 41
- taxa do sistema
 - BNC, 30
 - DF, 27
 - DNC, 32
 - FA-GDNC, 37
 - GDNC, 35
- transmissão direta (DT), 23
- variável aleatória, 23
- vazão, 28