

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

MARCO ANTÔNIO CHIODI JUNIOR

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SELEÇÃO DE *RELAYS* EM UM
SISTEMA COOPERATIVO MIMO COM CODIFICAÇÃO DE REDE

TESE

CURITIBA

2021

MARCO ANTÔNIO CHIODI JUNIOR

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SELEÇÃO DE *RELAYS* EM UM
SISTEMA COOPERATIVO MIMO COM CODIFICAÇÃO DE
REDE**

**On the Energy-Efficiency of Selective Relaying in a MIMO
Network-Coded Cooperative System**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito à obtenção do título de “Doutor em Ciências” - Área de Concentração: Telecomunicações e Redes.

Orientador: Prof. Dr. João Luiz Rebelatto
Coorientador: Prof. Dr. Richard Demo Souza

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es).

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Curitiba



MARCO ANTONIO CHIODI JUNIOR

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SELEÇÃO DE RELAYS EM UM SISTEMA COOPERATIVO MIMO COM
CODIFICAÇÃO DE REDE**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Ciências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Telecomunicações E Redes.

Data de aprovação: 19 de Março de 2021

Prof Joao Luiz Rebelatto, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Glauber Gomes De Oliveira Brante, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Marcelo Eduardo Pellenz, Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Pucpr)

Prof Ohara Keraususkas Rayel, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Zaqueu Cabral Pereira, Doutorado - Faculdade Dinâmica das Cataratas (Udc)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 29/03/2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo vir-a-ser e pela possibilidade de estar aqui; aos meus pais, Marco Antônio Chiodi e Maria Gorete da Silva Chiodi, por terem sempre me apoiado e acreditado em mim; a minha esposa, Gabriele Regiane Winter Chiodi, por ter me ajudado desde a graduação até aqui; ao meu orientador, Prof. João Luiz Rebelatto, por todo apoio, dedicação e paciência; ao meu coorientador, Prof. Richard Demo Souza, por todo auxílio prestado; ao Prof. Luciano Scandelari e a todos os meus colegas e amigos da Radioenge, pela compreensão e apoio neste período de doutorado, e também aos meus amigos e colegas do LabSC, por toda a ajuda.

Feliz é o homem que acha a sabedoria, e o homem que adquire entendimento; pois melhor é o lucro que ela dá do que o lucro da prata, e a sua renda do que o ouro. (Bíblia).

RESUMO

CHIODI JUNIOR, Marco Antônio. **Eficiência Energética de Seleção de *Relays* em um Sistema Cooperativo MIMO com Codificação de Rede**. 2021. 68 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Neste trabalho, avalia-se a eficiência energética de um esquema cooperativo recentemente proposto com seleção de múltiplos *relays*, em um cenário com múltiplas fontes e apenas um Destino em comum. Por considerar que todos os nós e também o Destino são equipados com múltiplas antenas, compara-se a eficiência energética de uma rede operando sob dois esquemas de recepção, a combinação de seleção, do inglês *Selection Combining* (SC), e a combinação de razão máxima, do inglês *Maximal Ratio Combining* (MRC). A análise realizada, a qual engloba os consumos dos circuitos internos dos nós da rede, demonstra que o esquema MRC, o qual é ótimo a partir de uma perspectiva de confiabilidade, pode ser superado em termos de desempenho pela SC em relação à eficiência energética. Também é apresentada uma investigação sobre o número de *relays* que deve ser utilizado na otimização da Eficiência Energética, propõe-se uma melhoria no sistema com o intuito de aumentar a eficiência da rede, a seleção incremental de múltiplos *relays* (INC-MRS). Finalmente, os resultados numéricos são apresentados a fim de validar as análises matemáticas.

Palavras-chave: Seleção de *Relays*. Eficiência Energética. MIMO.

ABSTRACT

CHIODI JUNIOR, Marco Antônio. **On the Energy-Efficiency of Selective Relaying in a MIMO Network-Coded Cooperative System**. 2021. 68 p. Thesis (Doctorate in Electrical Engineering and Industrial Informatics) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

In this work, we evaluate the energy efficiency of a recently proposed network-coded cooperative scheme with multiple relay selection, in a scenario with multiple sources and a single common destination. By considering that all the nodes and also the destination are equipped with multiple antennas, we compare the EE of the network when operating under two different combination techniques at the receiver side, namely selection combining (SC) and maximum ratio combining (MRC) techniques. Our analysis, which also encompasses the circuitry consumption of all the nodes in the network, shows that the MRC scheme, which is optimal from a reliability perspective, may be outperformed by the SC scheme when the EE is adopted as the performance metric. Based on insights about the number of relays that must be used to optimize EE, an improvement in the system is proposed in order to raise network energetic efficiency, the incremental multiple relay selection (INC-MRS). Finally, numerical results are presented in order to support all the mathematical analyses.

Keywords: Selection of Relays. Energy Efficiency. MIMO.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo do sistema: N_s fontes, M_r relays e um Destino, providos respectivamente com n_s , n_r e n_d antenas. As fontes transmitem na fase de difusão (BP), enquanto os relays retransmitem, na fase de retransmissão (RP), as mensagens previamente recebidas das fontes durante a BP.	23
Figura 2 – Representação do nó roteador tradicional, em que as mensagens de entrada são apenas encaminhadas à frente.	28
Figura 3 – Representação do nó repetidor codificador, em que o que é encaminhado são funções cujos parâmetros são as mensagens de entrada.	28
Figura 4 – Circuitos utilizados para a transmissão de uma mensagem para canal sem fio, sendo LO o Oscilador Local, do inglês <i>Local Oscillator</i>	31
Figura 5 – Circuitos utilizados para a recepção de uma mensagem do canal sem fio. . .	31
Figura 6 – Modelo do sistema: no primeiro momento (a), chamado difusão, as fontes enviam suas próprias mensagens, e os relays e o Destino as recebem utilizando a SC ou a MRC. Na fase de retransmissão (b), \mathcal{L} relays aplicam codificação de rede nos pacotes recebidos e, então, os enviam para o Destino utilizando o esquema TAS.	33
Figura 7 – Valor esperado do número efetivo de transmissões dos relays na RP, $\mathbb{E}[l_{\text{eff}}]$, em função da SNR do canal. Consideram-se os cenários em que os transmissores operam com a SC e com a MRC, sendo que $N_s = 5$, $M_r = 8$, $\mathcal{L} = 4$, $n_s = 2$ e $n_r = 3$	39
Figura 8 – Probabilidade de <i>outage</i> versus SNR para $n_d = 2$ e $n = 1$. Os números entre parênteses representam (N_s, M_r, \mathcal{L})	41
Figura 9 – Probabilidade de <i>outage</i> versus SNR para $N_s = 8$, $M_r = 10$, $\mathcal{L} = 7$, $n_d = 2$ e $n = 1$, considerando um cenário com variação nas distâncias entre os nós de 5% e 12.5% em relação à distância média $d = 40m$	42
Figura 10 – EE como função de \mathcal{L} , para $N_s = 8$, $M_r = 10$, $n_d = 2$ e $n = 2$	43
Figura 11 – Número médio de relays que transmitem na RP em função de \mathcal{L} para $N_s = 8$, $M_r = 10$, $n_d = 3$ e $n = 2$. Note-se que um aumento em \mathcal{L} reduz a SNR alvo do sistema e que a aproximação utilizada tem como melhor cenário o de alta-SNR.	44
Figura 12 – Comparação da EE para os cenários com a SC e a MRC versus n_d , com $N_s = 8$, $M_r = 6$, $n \in \{1, 2\}$ e adotando o valor exato de \mathcal{L}^* e o aproximado de \mathcal{L}^* a partir de (24).	45
Figura 13 – EE versus M_r , com $N_s = 5$, $n_d = 2$, $n \in \{1, 2\}$ e adotando o valor exato de \mathcal{L}^* e o aproximado de \mathcal{L}^* a partir de (24).	45
Figura 14 – Nova Fase de Retransmissão (a): no primeiro momento, o melhor relay realiza uma transmissão, e o Destino a recebe utilizando a SC ou a MRC. No próximo momento (b), o Destino se aproveita da característica de difusão do meio sem fio e informa as relays se ele foi capaz de decodificar as mensagens das fontes. Caso não tenha conseguido, o próximo melhor relay dá continuidade ao processo.	48
Figura 15 – Fluxograma da Fase de Retransmissão do esquema INC-MRS.	49

Figura 16 – Valor esperado do número efetivo de transmissões dos <i>relays</i> na RP, $\mathbb{E}[l_{\text{eff}}]$, em função da SNR do canal. Consideram-se os cenários em que os transmissores operam com a SC e com a MRC, sendo que $N_s = 5$, $M_r = 8$, $\mathcal{L} = 4$, $n_s = 2$, $n_r = 3$ e $n_d = 2$	50
Figura 17 – EE como função de \mathcal{L} , para $N_s = 8$, $M_r = 10$, $n_d = 2$ e $n = 2$	51
Figura 18 – Ganho de EE como função de \mathcal{L} em relação à INC-MRS e à EE da MRS, para $N_s = 8$, $M_r = 10$, $n_d = 2$ e $n \in \{1,2\}$	52
Figura 19 – Ganho de EE como função de \mathcal{L} em relação à INC-MRS e à melhor EE da MRS considerando \mathcal{L}^* , para $N_s = 8$, $M_r = 10$, $n_d = 2$ e $n \in \{1,2\}$	52
Figura 20 – Comparação da melhora da EE como função de M_r em relação à INC-MRS e à melhor EE da MRS, para $N_s = 5$, $M_r \in [1,10]$, $n_d = 2$ e $n = \{1,2\}$. . .	53
Figura 21 – Comparação da melhora da EE como função de n_d em relação à INC-MRS e à melhor EE da MRS, para $N_s = 8$, $M_r = 6$, $n_d = [1,14]$ e $n = \{1,2\}$	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Divisão de tempo nas transmissões	24
Tabela 2 – Número de transmissões (# TX) e recepções (# RX) do esquema NCC-MIMO-MRS.	38
Tabela 3 – Parâmetros do sistema	41
Tabela 4 – Valores ótimos de \mathcal{L} em função do número de <i>relays</i> disponíveis na rede para o cenário $N_s = 5, n_d = 2, n = 1$	44

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

SIGLAS

ADC	Conversor Analógico-Digital, do inglês <i>Analog-to-Digital Converter</i>
AWG	Branco, Aditivo e Gaussiano, do inglês <i>Additive White Gaussian</i>
BP	Fase de Difusão, do inglês <i>Broadcasting Phase</i>
CC	Comunicação Cooperativa
CSI	Informação dos Estados dos Canais, do inglês <i>Channel State Information</i>
DAC	Conversor Digital-Analógico, do inglês <i>Digital-to-Analog Converter</i>
EE	Eficiência Energética
IFA	Amplificador de Frequência Intermediária, do inglês <i>Intermediate Frequency Amplifier</i>
INC-MRS	Seleção Incremental de Múltiplos <i>Relays</i> , do inglês <i>Incremental Multiple Relay Selection</i>
IoT	Internet das Coisas, do inglês <i>Internet of Things</i>
LNA	Amplificador de Baixo Ruído, do inglês <i>Low-Noise Amplifier</i>
MAC	Controle de Acesso ao Meio, do inglês <i>Medium Access Control</i>
MDS	Máxima Distância de Separação, do inglês <i>Maximum Distance Separable</i>
MIMO	Múltiplas Antenas na Transmissão e na Recepção, do inglês <i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MQAM	Modulação de Amplitude Multinível em Quadratura, do inglês <i>Multilevel Quadrature Amplitude Modulation</i>
MRC	Combinação de Razão Máxima, do inglês <i>Maximal Ratio Combining</i>
MRS	Seleção de Múltiplos <i>Relays</i> , do inglês <i>Multiple Relay Selection</i>
MRT	Transmissão de Razão Máxima, do inglês <i>Maximum-Ratio Transmission</i>
NC	Codificação de Rede, do inglês <i>Network Coding</i>
NCC	Cooperação com Codificação de Rede, do inglês <i>Network Coded Cooperation</i>
NCC-MIMO-	Seleção de Múltiplos <i>Relays</i> com Múltiplas Antenas de Transmissão e Recepção
MRS	utilizando Codificação de Rede
PA	Amplificador de Potência, do inglês <i>Power Amplifier</i>
PSD	Densidade Espectral de Potência, do inglês <i>Power Spectral Density</i>
RF	Radiofrequência
RP	Fase de Retransmissão, do inglês <i>Relaying Phase</i>
RS	Seleção de <i>Relays</i> , do inglês <i>Relay Selection</i>
RTC	Relógio de Tempo Real, do inglês <i>Real-Time Clock</i>
SC	Combinação de Seleção, do inglês <i>Selection Combining</i>
SISO	Uma Antena na Transmissão e na Recepção, do inglês <i>Single-Input Single-Output</i>

SNR	Relação Sinal-Ruído, do inglês <i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SRS	Seleção de Um <i>Relay</i> , do inglês <i>Single Relay Selection</i>
SVD	Decomposição em Valores Singulares, do inglês <i>Singular Value Decomposition</i>
TAS	Seleção de Antena de Transmissão, do inglês <i>Transmit Antenna Selection</i>
TDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo, do inglês <i>Time-Division Multiple Access</i>
WSN	Rede de Sensores Sem Fio, do inglês <i>Wireless Sensor Network</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

NOTAÇÕES

α	Expoente de perda de percurso
B	Largura de banda utilizada
$\bar{\gamma}$	Relação sinal-ruído média do sistema
$\binom{a}{b}$	Coefficiente binominal
b_{R_m}	Símbolo resultante da codificação de rede que será então modulado como \mathbf{x}_{R_m} e enviado para o Destino
C	Capacidade de Canal
\mathcal{CN}	Distribuição de probabilidade Gaussiana complexa circularmente simétrica, em que $\mathcal{CN}(\mu, \sigma^2)$ representa uma distribuição com média μ e variância σ^2
D	Nó destino do sistema
d	Distância entre transmissor e receptor
η	Eficiência do dreno do amplificador de potência
f_c	Frequência de portadora
$f_\gamma(\gamma)$	Função densidade de probabilidade de γ
$\gamma_{B,j}^{A,i}$	Relação sinal-ruído instantânea do canal vista j -ésima antena de B por conta do sinal transmitido pela i -ésima antena de A
$\gamma_{R_m}^{eq}$	Relação sinal-ruído instantânea equivalente considerando o m -ésimo <i>relay</i>
γ_B^A	Relação sinal-ruído instantânea considerando o canal $A \rightarrow B$ abstraindo as técnicas de transmissão e recepção
$\gamma_{B,MRC}^{A,i}$	Relação sinal-ruído instantânea do canal vista pelo nó B após utilizar a técnica de recepção MRC por conta do sinal transmitido pela i -ésima antena de A
$\gamma_{B,SC}^{A,i}$	Relação sinal-ruído instantânea do canal vista pelo nó B após utilizar a técnica de recepção SC por conta do sinal transmitido pela i -ésima antena de A
$\gamma_{B,j}^{A,TAS}$	Relação sinal-ruído instantânea do canal vista pela j -ésima antena de B por conta do sinal transmitido pelo nó A através da técnica TAS
$\Gamma(\Lambda, n)$	Função gama incompleta
$\Gamma(n)$	Função gama completa
$GF(2^q)$	Campo finito ou campo de Galois estendido de ordem p^q , com p primo
G_r	Ganho de antena de um receptor
G_t	Ganho de antena de um transmissor
$h_{B,j}^{A,i}$	Desvanecimento visto pela j -ésima antena no nó B do sinal transmitido pela i -ésima antena de A
κ	Coefficiente de perda de percurso entre os nós
\mathcal{L}	Número máximo de <i>relays</i> que podem transmitir na fase de cooperação
Λ	Coefficiente mínimo de desvanecimento para que o canal não esteja em falha (<i>outage</i>), definido como $(2^{R_0} - 1)/\bar{\gamma}$

λ	Comprimento de onda
$\lceil \cdot \rceil$	Operação de arredondamento para cima
l_{eff}	Número efetivo de <i>relays</i> que transmitem na fase de cooperação
l_{op}	Número de pacotes corretamente decodificados pelo Destino vindos dos <i>relays</i> na fase de cooperação
\mathcal{L}^*	Número máximo de <i>relays</i> que podem transmitir que otimiza a EE
$W(\cdot)$	Função Lambert-W
$\min(\cdot, \cdot)$	Operação que retorna o menor entre dois valores
m_{QAM}	Quantidade de símbolos da constelação para a modulação MQAM
M_r	Número de nós <i>relays</i> no sistema
M_t	Margem de compensação do enlace
$\mu_{R_m}^{S_n}$	Coefficiente da codificação de rede utilizado pelo m -ésimo <i>relay</i> no pacote recebido da n -ésima fonte
n	Número de antenas das fontes e dos <i>relays</i>
N_0	Densidade espectral de potência de ruído
$\mathbf{n}_{\mathcal{B},j}$	Ruído térmico visto pela j -ésima antena do nó \mathcal{B}
n_d	Número de antenas no nó destino
N_f	Figura de ruído do receptor
N_r	Densidade espectral de ruído efetivo total na entrada do receptor
n_r	Número de antenas nos <i>relays</i>
n_{rx}	Número de cadeias de RF utilizadas na recepção
N_s	Número de nós fonte no sistema
n_s	Número de antenas nas fontes
n_{sop}	Número de pacotes corretamente decodificados pelo Destino vindos das fontes na fase de difusão
\mathcal{O}	Probabilidade de <i>outage</i>
\mathcal{O}^*	Probabilidade de <i>outage</i> alvo do sistema
\mathcal{O}^{MRC}	Probabilidade de <i>outage</i> para o sistema NCC-MIMO-MRS considerando a técnica MRC nos receptores
\mathcal{O}^{SC}	Probabilidade de <i>outage</i> para o sistema NCC-MIMO-MRS considerando a técnica SC nos receptores
\mathcal{O}_R^D	Probabilidade de <i>outage</i> no canal $R_m \rightarrow D$
\mathcal{O}_S^D	Probabilidade de <i>outage</i> no canal $S_n \rightarrow D$
\mathcal{O}_S^R	Probabilidade de <i>outage</i> no canal $S_n \rightarrow R_m$
P_{ADC}	Potência consumida pelo conversor analógico-digital
P_{ctx}	Soma das potências consumidas pelos blocos de LNA, <i>mixer</i> e filtro ativo
P_{ctx}	Soma das potências consumidas pelos blocos de DAC, <i>mixer</i> e filtro ativo
P_{DAC}	Potência consumida pelo conversor digital-analógico
P_{filt}	Potência consumida pelo filtro ativo de transmissão
P_{filr}	Potência consumida pelo filtro ativo da recepção
P_{IFA}	Potência consumida pelo amplificador de frequência intermediária
P_{LNA}	Potência consumida pelo amplificador de baixo ruído
P_{mix}	Potência consumida pelo <i>mixer</i>

P_{PA}	Potência consumida pelo amplificador de potência
P_{rx}	Potência de todos os blocos de <i>hardware</i> envolvidos em uma única recepção
P_{syn}	Potência consumida pelo sintetizador de frequência
P_t	Potência de transmissão de um nó
P_{tx}	Potência de todos os blocos de <i>hardware</i> envolvidos em uma única transmissão
q	Valor inteiro positivo representando o tamanho das mensagens codificadas e, conseqüentemente, o grau de extensão do campo de Galois com 2^q elementos
\mathcal{R}_0	Eficiência espectral em <i>bits</i> por uso de canal
R_b	Taxa de transmissão em <i>bits</i> por segundo
\mathcal{R}_l	Conjunto com os l <i>relays</i> que decodificaram corretamente todas as N_s mensagens vindas das fontes
R_m	m -ésimo <i>relay</i> do sistema
S_n	n -ésimo nó fonte do sistema
T_b	Tempo de <i>bit</i> em segundos
\mathbf{x}_A	Sinal enviado pelo nó \mathcal{A}
ξ	Razão entre o pico e a média do sinal modulado
$\mathbf{y}_{B,j}^{A,i}$	Sinal recebido na j -ésima antena do nó \mathcal{B} e transmitido pela i -ésima antena do nó \mathcal{A}

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	MOTIVAÇÃO	21
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo Geral	21
1.2.2	Objetivos Específicos	22
1.3	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	22
2	PRELIMINARES	23
2.1	MODELO DO SISTEMA	23
2.2	TÉCNICAS DE COMBINAÇÃO PARA MÚLTIPLAS ANTENAS	25
2.2.1	Diversidade na Transmissão: Seleção de Antena de Transmissão (TAS)	25
2.2.2	Diversidade na Recepção: Seleção de Combinação de Antena (SC)	25
2.2.3	Diversidade na Recepção: Combinação de Razão Máxima (MRC)	26
2.3	PROBABILIDADE DE <i>OUTAGE</i>	26
2.4	COMUNICAÇÃO COOPERATIVA	27
2.5	CODIFICAÇÃO DE REDE	28
2.6	COOPERAÇÃO COM CODIFICAÇÃO DE REDE	29
2.7	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	30
3	ANÁLISE DO ESQUEMA NCC-MIMO-MRS	33
3.1	PROTOCOLO DE TRANSMISSÃO MRS	33
3.1.1	Probabilidade de <i>Outage</i> para o Esquema MRS	35
3.1.2	Eficiência Energética do Esquema NCC-MIMO-MRS	38
3.1.3	Número Ótimo de <i>Relays</i> Selecionados que Minimiza a EE	40
3.2	RESULTADOS NUMÉRICOS	41
3.3	COMENTÁRIOS	46
4	PROPOSTA DE ESQUEMA NCC-MIMO-MRS: MRS INCREMENTAL (INC-MRS)	47
4.1	PROTOCOLO DE TRANSMISSÃO PROPOSTO	47
4.2	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO ESQUEMA INC-MRS	48
4.3	RESULTADOS NUMÉRICOS	49
4.4	COMENTÁRIOS	52
5	COMENTÁRIOS FINAIS	55
5.1	TRABALHOS FUTUROS	55
	REFERÊNCIAS	57
	APÊNDICES	63
	APÊNDICE A – PROVA DO TEOREMA 1: DEMONSTRAÇÃO DAS PROBABILIDADES DE <i>OUTAGE</i> PARA O CENÁRIO NCC-MIMO-MRS PARA ALTA- SNR	64

A.1	PROBABILIDADE DO CASO 1	64
A.2	PROBABILIDADE DO CASO 2	64
A.3	PROBABILIDADE DO CASO 3	65
	APÊNDICE B – NÚMERO EFETIVO DE <i>RELAYS</i> SELECIONADOS PARA UM CENÁRIO DE REGIME EM ALTA-SNR	66
	APÊNDICE C – PROVA DO TEOREMA 2	67
	APÊNDICE D – NÚMERO EFETIVO DE <i>RELAYS</i> SELECIONADOS PARA UM CENÁRIO DE REGIME EM ALTA-SNR CONSIDERANDO A INC-MRS	68

1 INTRODUÇÃO

Com o advento da Internet das Coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT), houve um aumento de interesse no tema de Rede de Sensores Sem Fio, do inglês *Wireless Sensor Network* (WSN) (STANKOVIC, 2014). Uma WSN é constituída por pequenos dispositivos autônomos espacialmente distribuídos, normalmente alimentados por baterias, que se comunicam através do canal sem fio. Eles são capazes de juntar informações e/ou detectar certos eventos do ambiente em que estão instalados, além de processar tais dados antes de transmiti-los para um Destino comum (CUI *et al.*, 2004; ZHANG; LI, 2019).

Nesta era da IoT, há uma abundância de aplicações de WSNs. Há, ainda, outras sendo desenvolvidas, tais como soluções para cidades inteligentes (*smart cities*), redes de telemetria, saúde, agricultura e segurança (KHAN *et al.*, 2015), além de soluções para problemas mais sofisticados propostas na literatura para melhorar a qualidade de vida humana (YETGIN *et al.*, 2017). Devido à localização e ao tamanho, tais equipamentos têm normalmente uma fonte de energia limitada, comprometendo, assim, o alcance da comunicação (CUI *et al.*, 2005).

Um sistema com Múltiplas Antenas na Transmissão e na Recepção, do inglês *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO), é uma técnica bem estabelecida capaz de atingir a diversidade espacial e, conseqüentemente, combater os efeitos do desvanecimento, que é uma característica inerente do canal sem fio (GOLDSMITH, 2005). Em redes com dispositivos com restrições de tamanho e/ou custo, o efeito de múltiplas antenas pode ser emulado ou até impulsionado através do conceito de Comunicação Cooperativa (CC) (SENDONARIS *et al.*, 2003), em que os nós se aproveitam da natureza de difusão do canal sem fio e se auxiliam retransmitindo as mensagens de seus parceiros. Em um sistema cooperativo, a diversidade espacial é atingida de forma distribuída por toda a rede (LANEMAN *et al.*, 2004).

Diversos trabalhos têm mostrado que a Codificação de Rede, do inglês *Network Coding* (NC), uma técnica inicialmente proposta para aumentar o *throughput* de um sistema (AHLWEDE *et al.*, 2000), também é capaz de melhorar a confiabilidade de uma rede cooperativa (REBELATTO *et al.*, 2012; VU *et al.*, 2015; HEIDARPOUR; ARDAKANI, 2017; HEIDARPOUR *et al.*, 2017; HEIDARPOUR *et al.*, 2019b). Assim, em uma rede com Cooperação com Codificação de Rede, do inglês *Network Coded Cooperation* (NCC), ao invés de apenas retransmitir suas mensagens individuais, os nós são capazes de transmitir combinações lineares de várias mensagens, sendo essas operações realizadas em um campo finito $GF(2^q)$ com q

sendo um número inteiro positivo qualquer. Um esquema NCC é proposto em (REBELATTO *et al.*, 2012), em que as fontes agem também como *relays* (repetidores). Nesse esquema, é demonstrado que é possível atingir uma ordem de diversidade maior do que esquemas tradicionais de cooperação que não são baseados em codificação de rede, tais como (SENDONARIS *et al.*, 2003; LANEMAN *et al.*, 2004), e que uma rede NCC não binária pode ser mais vantajosa do que uma baseada em operações binárias (XOR).

Uma vez que o conceito de cooperação normalmente trabalha com múltiplos canais ortogonais, foram propostos protocolos de seleção de *relays* a fim de melhorar a eficiência espectral (LIMA *et al.*, 2017; MA *et al.*, 2019), sendo recentemente considerados também no escopo de IoT (ALKHAWATRAH *et al.*, 2019; REDHU *et al.*, 2019) e de 5G (VAEZI *et al.*, 2018; NOMIKOS *et al.*, 2019). Partindo de uma perspectiva de confiabilidade, é mostrado em (VU *et al.*, 2015) que os esquemas de Seleção de Um *Relay*, do inglês *Single Relay Selection* (SRS), e, também, de Seleção de Múltiplos *Relays*, do inglês *Multiple Relay Selection* (MRS), melhoram a diversidade de uma rede NCC. Além disso, também é mostrado que esses esquemas podem prover diversidade completa independentemente do número de fontes e *relays* disponíveis. Os autores em (HEIDARPOUR; ARDAKANI, 2017; HEIDARPOUR *et al.*, 2017), então, estendem os resultados de (VU *et al.*, 2015) considerando que os *relays* e o Destino são equipados com múltiplas antenas. Quando o transmissor e o receptor operam sob os protocolos de Seleção de Antena de Transmissão, do inglês *Transmit Antenna Selection* (TAS), e de Combinação de Razão Máxima, do inglês *Maximal Ratio Combining* (MRC), respectivamente, a confiabilidade aumenta ainda mais devido à combinação de benefícios da MRS e MIMO (HEIDARPOUR; ARDAKANI, 2017; HEIDARPOUR *et al.*, 2017).

No entanto, os esquemas propostos em (HEIDARPOUR; ARDAKANI, 2017; HEIDARPOUR *et al.*, 2017) assumem que o Destino possui a Informação dos Estados dos Canais, do inglês *Channel State Information* (CSI), da rede inteira, incluindo os canais entre as fontes e os *relays*, informações que, na prática, são muito difíceis de estimar. Mais tarde, os autores estendem os resultados de (HEIDARPOUR; ARDAKANI, 2017; HEIDARPOUR *et al.*, 2017) em (HEIDARPOUR *et al.*, 2019b), sem considerar agora como requisito o conhecimento da CSI global. Os resultados indicam que um desempenho similar pode ser obtido mesmo com CSI limitada.

Entretanto, os trabalhos mencionados acima avaliam o desempenho da rede apenas sob o ponto de vista da confiabilidade, a qual não é necessariamente a única métrica relevante

para a análise de uma rede sem fio. A Eficiência Energética (EE) é um parâmetro extremamente importante, principalmente no escopo de IoT e WSN.

Assim, nesses tipos de redes, além da restrição de custo dos nós, torna-se imprescindível torná-los eficientes do ponto de vista energético, uma vez que a capacidade de carga de uma bateria é finita e estas nem sempre são facilmente substituíveis (KHAN *et al.*, 2015; RUIZ *et al.*, 2016; NA *et al.*, 2018). Além disso, essas baterias não são normalmente do tipo recarregáveis; assim, uma vez que ela é exaurida, o nó não pode mais realizar a sua função (ZHANG; LI, 2019).

A abordagem tradicional para melhorar a EE de um esquema de comunicação e, conseqüentemente aumentar a duração da bateria, é tentar diminuir o consumo do rádio reduzindo a potência de transmissão. O uso de MIMO, por exemplo, é uma forma de realizar isso (CUI *et al.*, 2004; CUI *et al.*, 2005). No entanto, o uso exclusivo de tal prática é válido apenas quando a energia consumida pela cadeia de Radiofrequência (RF) é dominante em relação ao consumo total, como no caso da comunicação em longa distância.

Em cenários de curto alcance, a energia consumida pelo circuito se torna tão relevante quanto a da transmissão (CUI *et al.*, 2004; CUI *et al.*, 2005). Além disso, o uso de sistemas MIMO, embora com potência de transmissão inferior ao do esquema com Uma Antena na Transmissão e na Recepção, do inglês *Single-Input Single-Output* (SISO), acaba entrando em conflito com a restrição de custo, pois são necessárias mais cadeias de RF operando em um mesmo dispositivo. Em (CUI *et al.*, 2004), por exemplo, a EE para esses casos é calculada levando em consideração todos os circuitos referentes à comunicação, tais como os conversores analógico-digital e digital-analógico, o sintetizador de frequência e o amplificador de potência, entre outros.

Muitas aplicações de IoT precisam funcionar durante anos sem que seja necessário realizar a troca de bateria. Para reduzir o consumo para tais aplicações, uma das abordagens mais comuns é a escolha de componentes de baixíssimo consumo (*ultra low power*), sendo o consumo típico da ordem de μA em *standby* (RUAN *et al.*, 2017). No entanto, também se faz necessário complementar tais projetos com abordagens em camadas superiores, tais como a definição de um protocolo de transmissão que seja energeticamente eficiente. Muitos esquemas para WSNs e IoT foram propostos; no entanto, nenhum deles é universalmente aplicável, cada problema exige uma solução adequada (RAULT *et al.*, 2014; SISINNI *et al.*, 2018).

Vários trabalhos avaliam a EE de esquemas NCC, como é o caso de (RAYEL *et al.*, 2013), em que o método proposto em (REBELATTO *et al.*, 2012) é avaliado, mostrando que

existe um número ótimo de nós para cooperação em relação à EE. Em (ESKANDARI *et al.*, 2018), é mostrado que a técnica TAS tem duplo efeito no sistema. Por um lado, ela melhora significativamente a probabilidade de *outage* do sistema, aumentando a diversidade e, por outro, não aumenta a potência gasta na transmissão por utilizar apenas uma cadeia de RF. Assim, os sistemas MIMO também podem ser utilizados para minimizar o gasto energético total dos nós, principalmente adotando técnicas de seleção de antenas, devido ao menor uso de cadeias de RF por vez. No entanto, a EE não melhora monotonicamente com o aumento do número de antenas da TAS. Conforme mostrado em (WANG; VANDENDORPE, 2017), existe um número ótimo de antenas que é uma função da distância entre transmissor e receptor.

Outrossim, diversos trabalhos avaliaram o uso de seleção de *relays*, agora utilizando a EE como métrica de escolha do melhor *relay*. O Fator de Eficiência de Potência é uma métrica proposta em (SHENG *et al.*, 2015), utilizada para determinar a melhor posição para o *relay* da rede. Já em (KIM *et al.*, 2017), a métrica utilizada para avaliar a escolha do *relay* é o número de retransmissões na rede em um cenário com um protocolo HARQ cooperativo.

Igualmente, em (Y. *et al.*, 2017), os autores mostram que o consumo de energia total e o custo de uso do *link* de celular podem ser drasticamente reduzidos quando esquemas de cooperação com seleção de *relays* são empregados. Além disso, as técnicas de NC para reduzir o consumo de uma rede não ficam restritas aos cenários sem fio. Em (MUSA *et al.*, 2018), por exemplo, é mostrado que a utilização de codificação de rede em redes óticas sob IP implica na redução de consumo.

Neste trabalho, avalia-se a EE de um esquema de Seleção de Múltiplos *Relays* com Múltiplas Antenas de Transmissão e Recepção utilizando Codificação de Rede (NCC-MIMO-MRS) proposto em (HEIDARPOUR *et al.*, 2019b), utilizando não apenas a MRC como técnica de recepção, mas também a Combinação de Seleção, do inglês *Selection Combining* (SC), a qual exige uma complexidade de *hardware* menor do que a primeira. Esse conceito está alinhado com redes baseadas em *hardwares* de baixa complexidade, em que os dispositivos são equipados com apenas uma cadeia de RF, tais como as redes baseadas no padrão IEEE 802.15.4 (IEEE. . . , 2016). Assim, levando em consideração o consumo dos circuitos utilizados por todos os nós da rede, mostra-se que é mais vantajoso utilizar o esquema SC nos receptores do que fazer uso da MRC. Após, é proposto um esquema baseado em (HEIDARPOUR *et al.*, 2019b), a fim de melhorar a EE da rede, a Seleção Incremental de Múltiplos *Relays*, do inglês *Incremental Multiple Relay Selection* (INC-MRS). Como resultado, verificou-se que a INC-MRS é capaz de melhorar em

15% a EE total do sistema e em até 25% para o caso em que o número de *relays* que retransmitem não é ótimo. Para todas as análises energéticas, adotou-se um modelo realista de consumo para analisar o gasto energético total da rede, o qual engloba o consumo dos circuitos de rádio de todos os nós transmissores e receptores da rede (CUI *et al.*, 2004; CUI *et al.*, 2005).

1.1 MOTIVAÇÃO

Como os avanços no desenvolvimento de *hardware* possibilitaram a integração de mais funcionalidades em um mesmo *chip*, tornou-se possível desenvolver rádios cada vez menores. Esses pequenos dispositivos apresentam dimensões reduzidas, tal como uma moeda, e são utilizados em redes de sensores sem fio. Tais redes sem fio normalmente necessitam operar com pequenas baterias, as quais devem funcionar durante anos sem troca. Pode ser muito difícil ou muito caro realizar o trabalho de trocar baterias, mesmo quando ele é possível. Além disso, o descarte de baterias, se realizado de forma descontrolada, pode ser prejudicial ao meio ambiente.

Desta forma, problemas relacionados à EE em redes de comunicação são de grande importância nesse cenário. Com o objetivo de resolver esses problemas, soluções voltadas para a EE tipicamente são direcionadas para a minimização da potência de transmissão. Essa abordagem é razoável em cenários de longas distâncias, pois o gasto para a transmissão é dominante no consumo total do circuito. No entanto, para cenários de curtas distâncias (distâncias inferiores a $100m$), como em alguns cenários de redes de sensores sem fio, o consumo de outras funcionalidades são comparáveis ou ainda maiores do que o utilizado para transmitir pacotes no canal. Assim, esses outros consumos também devem ser levados em conta na otimização da EE total do sistema.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a EE de esquemas NCC-MIMO-MRS recentemente propostos na literatura e propor alternativas que sejam mais eficientes do ponto de vista energético.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a EE de alguns esquemas NCC-MIMO-MRS recentemente propostos na literatura, levando em consideração também o consumo dos circuitos transmissores e receptores;
- Avaliar a influência na EE de parâmetros tais como o número de antenas nos nós e o número de *relays* selecionados para a cooperação;
- Propor um esquema derivado do esquema NCC-MIMO-MRS avaliado, a fim de melhorar a EE.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O Capítulo 2 apresenta o modelo de sistema utilizado, apontando as principais informações para a elaboração dos conceitos e conclusões do trabalho. Conceitos preliminares relacionados à EE também são apresentados.

No Capítulo 3, é apresentado o esquema NCC-MIMO-MRS, utilizando como método de recepção a MRC e a SC, incluindo a dedução da probabilidade de *outage* geral do sistema. Com isso, é possível encontrar as expressões analíticas para a EE em ambos os casos, uma vez que a potência de transmissão das fontes é calculada a partir de uma probabilidade de *outage* alvo. Além disso, evidencia-se a expressão analítica do número ótimo de *relays* selecionados para transmitir no esquema MRS para ambos os cenários. Os resultados apresentados nesse capítulo foram publicados em (CHIODI *et al.*, 2020).

O Capítulo 4 propõe um esquema derivado da NCC-MIMO-MRS avaliada, a INC-MRS, em que é encontrada a função analítica da EE, inclusive para os cenários MRC e SC. Nesse capítulo, também comparam-se os esquemas NCC-MIMO-MRS e apresentam-se alguns *insights* sobre os modelos.

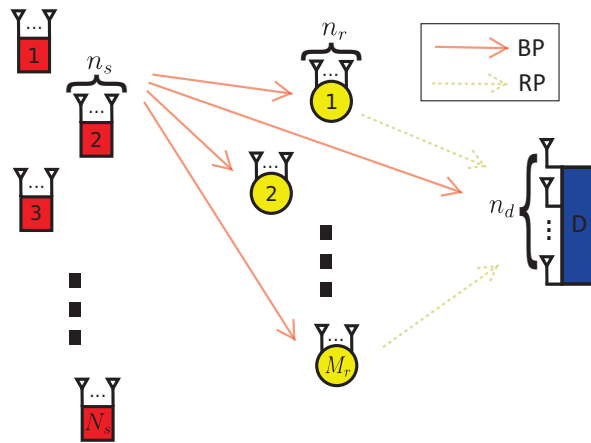
Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões finais do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

2 PRELIMINARES

2.1 MODELO DO SISTEMA

Neste trabalho, considera-se uma rede com N_s fontes de informação denotadas como S_n , com $n \in \{1, \dots, N_s\}$, M_r relays simbolizados por R_m com $m \in \{1, \dots, M_r\}$ e um Destino comum (D), como ilustrado na Figura 1. Assume-se que todos os nós são equipados com múltiplas antenas, sendo $n_s \geq 1$, $n_r \geq 1$ e $n_d \geq 1$ o número de antenas das fontes, dos relays e do Destino, respectivamente.

Figura 1 – Modelo do sistema: N_s fontes, M_r relays e um Destino, providos respectivamente com n_s , n_r e n_d antenas. As fontes transmitem na fase de difusão (BP), enquanto os relays retransmitem, na fase de retransmissão (RP), as mensagens previamente recebidas das fontes durante a BP.



Fonte: Autoria Própria

As fontes transmitem na Fase de Difusão, do inglês *Broadcasting Phase* (BP), enquanto os relays transmitem na Fase de Retransmissão, do inglês *Relaying Phase* (RP). Para realizar o Controle de Acesso ao Meio, do inglês *Medium Access Control* (MAC), é utilizado o protocolo de Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo, do inglês *Time-Division Multiple Access* (TDMA), em que cada transmissão é feita individualmente em um *slot* de tempo (PROAKIS, 2001; GOLDSMITH, 2005). Esse sincronismo pode ser feito por circuitos contadores de tempo de baixo consumo, tal como um Relógio de Tempo Real, do inglês *Real-Time Clock* (RTC), e também por pequenos pacotes balizadores (*beacons*), os quais são utilizados para corrigir pequenos desvios nos contadores de tempo. Neste trabalho, considera-se o tamanho dos *beacons* como sendo muito menor do que o dos pacotes contendo informação e redundância, assim sendo, o gasto energético dos para transmitir os *beacons* não será considerado. A Tabela 1 representa a

ordem das transmissões em um cenário hipotético em que as S_n fontes e os M_r relays transmitem.

Tabela 1 – Divisão de tempo nas transmissões

	BP				RP			
Slot de tempo	1	2	...	N_s	$N_s + 1$	$N_s + 2$...	$N_s + M_r$
Transmissor	S_1	S_2	...	S_{N_s}	R_1	R_2	...	R_{M_r}

Fonte: Autoria Própria

Assim, omitindo o índice de tempo e considerando o enlace genérico $\mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$, sendo $\mathcal{A} \in \{S_n, R_m\}$ e $\mathcal{B} \in \{R_m, D\}$ com $\mathcal{A} \neq \mathcal{B}$, pode-se escrever o sinal transmitido pela i -ésima antena de \mathcal{A} e recebido pela j -ésima antena de \mathcal{B} como:

$$\mathbf{y}_{\mathcal{B},j}^{\mathcal{A},i} = \sqrt{P_t} \kappa h_{\mathcal{B},j}^{\mathcal{A},i} \mathbf{x}_{\mathcal{A}} + \mathbf{n}_{\mathcal{B},j}, \quad (1)$$

em que P_t representa a potência de transmissão; $\mathbf{x}_{\mathcal{A}}$, o sinal transmitido com energia unitária; $\mathbf{n}_{\mathcal{B},j} \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$, o ruído Branco, Aditivo e Gaussiano, do inglês *Additive White Gaussian* (AWG) e $h_{\mathcal{B},j}^{\mathcal{A},i} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$, com N_0 sendo a Densidade Espectral de Potência, do inglês *Power Spectral Density* (PSD), de ruído. Considera-se, para este trabalho, que o meio sem fio não dispõe de linha de visada entre os nós. Assim, para o envelope dos coeficientes de desvanecimento do canal entre a i -ésima antena de \mathcal{A} e a j -ésima antena de \mathcal{B} , assume-se seguir uma distribuição de Rayleigh (GOLDSMITH, 2005). Também, é assumido que estes coeficientes são independentes e identicamente distribuídos no tempo e no espaço. Por fim, o termo κ em (1) representa a perda de percurso (larga escala) entre transmissor e receptor, assumida igual para todas as antenas de um mesmo par de transmissão-recepção e sendo definida como (GOLDSMITH, 2005):

$$\kappa = \frac{G_t G_r \lambda^2}{M_t N_f d^\alpha (4\pi)^2}, \quad (2)$$

em que G_t e G_r são, respectivamente, os ganhos das antenas transmissora e receptora; M_t é a margem de compensação do enlace; N_f , a figura de ruído do receptor dada por $N_f = \frac{N_r}{N_0}$, com N_r sendo a PSD do ruído efetivo total na entrada do receptor; d representa a distância entre transmissor e receptor; α , o expoente de perda de percurso e λ , o comprimento de onda definido como $3 \times 10^8 / f_c$, em que f_c é a frequência de portadora.

Devido à presença de múltiplos percursos, a Relação Sinal-Ruído, do inglês *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), instantânea no receptor apresenta flutuações em relação ao nível médio, sendo obtida como:

$$\gamma_{\mathcal{B},j}^{\mathcal{A},i} = \bar{\gamma} |h_{\mathcal{B},j}^{\mathcal{A},i}|^2, \quad (3)$$

em que $\bar{\gamma} = \frac{P_T \kappa}{N_0 B}$ é a SNR média e B , a largura de banda utilizada. A função densidade de probabilidade de γ , que descreve o comportamento estatístico do canal Rayleigh, $f_\gamma(\gamma)$, pode ser escrita como (GOLDSMITH, 2005, Eq. (3.34)):

$$f_\gamma(\gamma) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{\gamma}} e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}}, \gamma \geq 0 \\ 0, \text{ caso contrário.} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 TÉCNICAS DE COMBINAÇÃO PARA MÚLTIPLAS ANTENAS

2.2.1 Diversidade na Transmissão: Seleção de Antena de Transmissão (TAS)

Na técnica de seleção de antenas de transmissão (TAS), o transmissor adota apenas uma entre as múltiplas antenas disponíveis para realizar a transmissão dos dados. A antena escolhida é a antena que apresenta a maior SNR do ponto de vista do receptor. Logo, há a necessidade de que o receptor informe ao transmissor qual deve ser a antena adotada para a transmissão. Porém, note-se que apenas a informação do índice da antena é suficiente para que o esquema TAS possa ser implementado, sem ser necessário nenhum outro tipo de conhecimento instantâneo do canal.

Dessa forma, o esquema TAS é capaz de atingir diversidade espacial ao mesmo tempo em que utiliza apenas uma cadeia de RF, diminuindo, assim, a complexidade do *hardware* do transmissor e o seu consumo, quando comparado a esquemas mais complexos, tais como a Transmissão de Razão Máxima, do inglês *Maximum-Ratio Transmission* (MRT) (LO, 1999; RAYEL *et al.*, 2014).

A SNR instantânea vista pela j -ésima antena do receptor de um sistema operando sob a TAS pode ser escrita como (GOLDSMITH, 2005):

$$\begin{aligned} \gamma_{\mathcal{B},j}^{A,\text{TAS}} &= \max_{i \in [1, n_{\mathcal{A}}]} \left\{ \gamma_{\mathcal{B},j}^{A,i} \right\} \\ &= \bar{\gamma} \cdot \max_{i \in [1, n_{\mathcal{A}}]} \left\{ \left| h_{\mathcal{B},j}^{A,i} \right|^2 \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

em que $n_{\mathcal{A}}$ representa o número de antenas no nó \mathcal{A} , com $n_{\mathcal{A}} \in \{n_s, n_r\}$.

2.2.2 Diversidade na Recepção: Seleção de Combinação de Antena (SC)

A técnica de seleção de combinação de antena, SC, consiste em escolher, entre as antenas de um receptor, aquela com a maior SNR para uma mesma transmissão, sendo análoga

ao esquema TAS, mas realizada no receptor. Assim como a TAS, inclusive, aqui também é exigido um *hardware* com baixa complexidade por utilizar apenas uma cadeia de RF por vez.

Desta forma, a SNR instantânea do sinal proveniente da i -ésima antena de um transmissor, considerando o esquema SC, pode ser escrita como (GOLDSMITH, 2005):

$$\gamma_{\mathcal{B},\text{SC}}^{A,i} = \bar{\gamma} \cdot \max_{j \in [1, n_{\mathcal{B}}]} \left\{ \left| h_{\mathcal{B},j}^{A,i} \right|^2 \right\}, \quad (6)$$

em que $n_{\mathcal{B}}$ representa o número de antenas no nó \mathcal{B} , com $n_{\mathcal{B}} \in \{n_r, n_d\}$.

2.2.3 Diversidade na Recepção: Combinação de Razão Máxima (MRC)

É possível, além de escolher apenas a antena com a maior SNR, utilizar os sinais recebidos por todas as antenas no receptor através da técnica MRC. O resultado é uma soma ponderada de todos os sinais recebidos com o conjugado complexo dos seus respectivos coeficientes de desvanecimento, atingindo o maior valor possível da SNR instantânea na saída do combinador. Assim, considerando um sinal vindo da i -ésima antena de um transmissor, a SNR instantânea é dada por (GOLDSMITH, 2005):

$$\gamma_{\mathcal{B},\text{MRC}}^{A,i} = \bar{\gamma} \cdot \sum_{j=1}^{n_{\mathcal{B}}} \left| h_{\mathcal{B},j}^{A,i} \right|^2. \quad (7)$$

Porém, para que seja atingida a SNR de (7) na saída do combinador, o receptor necessita do conhecimento instantâneo de ganho e fase dos canais de todas as antenas, perfeitamente sincronizados, além de necessitar de uma cadeia de RF para cada antena receptora. Então, há, aqui, uma relação de compromisso entre consumo/complexidade e desempenho, quando comparado ao esquema SC.

2.3 PROBABILIDADE DE *OUTAGE*

Uma falha (do inglês *outage*) é definida como o evento em que a capacidade instantânea de canal, $C = \log_2(1 + \gamma)$, cai abaixo de uma taxa de transmissão alvo \mathcal{R}_0 (em *bits* por uso de canal). A probabilidade de ocorrência desse evento, denominada probabilidade de *outage*, depende do protocolo de transmissão utilizado e do modelo de desvanecimento adotado.

Para desvanecimento Rayleigh e considerando como referência um único enlace sem diversidade (transmissor e receptor providos de apenas uma antena), a probabilidade de *outage* é

dada por (GOLDSMITH, 2005, Eq. (6.47)):

$$\begin{aligned}
 \mathcal{O} &= \Pr \left\{ \log_2 \left(1 + \bar{\gamma} |h_{\mathcal{B},j}^{A,i}|^2 \right) < \mathcal{R}_0 \right\} \\
 &= \Pr \left\{ |h_{\mathcal{B},j}^{A,i}|^2 < \frac{2^{\mathcal{R}_0} - 1}{\bar{\gamma}} \right\} \\
 &= 1 - e^{-\frac{2^{\mathcal{R}_0} - 1}{\bar{\gamma}}}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

2.4 COMUNICAÇÃO COOPERATIVA

A Comunicação Cooperativa, CC, é uma forma de atingir diversidade espacial sem o uso de múltiplas antenas de transmissão no mesmo nó (LANEMAN *et al.*, 2004; SENDONARIS *et al.*, 2003). Aproveitando-se da natureza de difusão do meio sem fio, a ideia básica da CC é que os *relays* possam agir como um conjunto de antenas virtuais que ajudem o nó fonte na entrega da informação para um Destino (LANEMAN *et al.*, 2004; SENDONARIS *et al.*, 2003).

Assim, em redes cooperativas, os *relays* são alocados de tal forma que “escutem” os pacotes transmitidos pelas fontes para então encaminhá-los. Como múltiplas cópias do mesmo sinal são recebidas no Destino, há um ganho na confiabilidade do sistema. Se múltiplos *relays* estão disponíveis na rede e um protocolo de Seleção de *Relays*, do inglês *Relay Selection* (RS), é utilizado, pode-se atingir a diversidade total no sistema (VU *et al.*, 2015; BLETSAS *et al.*, 2006).

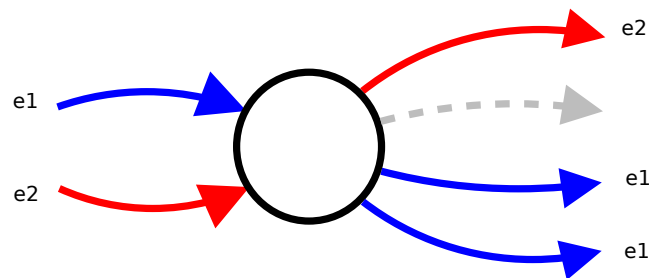
Geralmente, sistemas cooperativos requerem duas fases de transmissão: Difusão (BP) e Retransmissão (RP). Durante a primeira fase, as fontes transmitem suas próprias informações, enquanto os *relays* e o Destino apenas recebem esses pacotes. Durante a RP, um ou vários *relays* retransmitem os sinais recebidos para o Destino (HEIDARPOUR *et al.*, 2019b).

Em sistemas cooperativos convencionais com múltiplas fontes e múltiplos *relays*, cada transmissão de um *relay* deve fazer par com uma transmissão de uma fonte. Assim, cada *relay* utiliza várias vezes o canal sem fio quando opera com múltiplas fontes, resultando em uma diminuição do *throughput* do sistema. Esse é o principal fator limitante nas redes cooperativas com múltiplas fontes (HEIDARPOUR *et al.*, 2019b). Assim, tais *relays*, que operam apenas com protocolos de retransmissão, se mostram ineficientes em termos de tempo, espectro e/ou consumo, devido ao aumento no número de transmissões dos *relays*, especialmente em casos com múltiplas fontes (HEIDARPOUR *et al.*, 2019a).

2.5 CODIFICAÇÃO DE REDE

Nas redes cooperativas tradicionais, cada nó funciona como um roteador, em que uma mensagem recebida através de um canal de entrada é apenas replicada para um canal de saída, mandando, assim, essa mensagem para um conjunto de nós destino, conforme exemplificado na Figura 2.

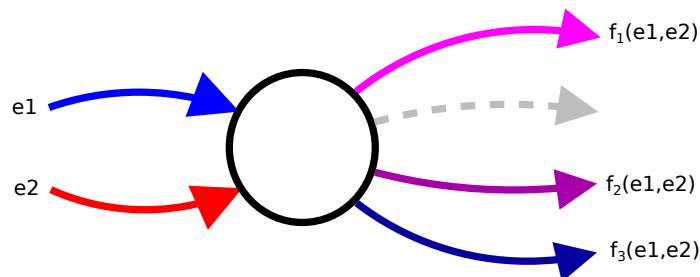
Figura 2 – Representação do nó roteador tradicional, em que as mensagens de entrada são apenas encaminhadas à frente.



Fonte: Autoria Própria, adaptado de (REBELATTO, 2010)

No entanto, não há nenhum motivo para restringir a funcionalidade de um nó a apenas essa tarefa. Em vez de somente encaminhar uma mensagem, um nó pode funcionar como um codificador, em que algumas operações são realizadas com as informações recebidas antes de encaminhá-las para os canais de saída, conforme visto na Figura 3. Essa técnica é chamada de Codificação de Rede (AHLWEDE *et al.*, 2000; KOETTER; MÉDARD, 2003). A partir desse ponto de vista, o nó roteador tradicional é apenas um caso particular do nó codificador.

Figura 3 – Representação do nó repetidor codificador, em que o que é encaminhado são funções cujos parâmetros são as mensagens de entrada.



Fonte: Autoria Própria, adaptado de (REBELATTO, 2010)

2.6 COOPERAÇÃO COM CODIFICAÇÃO DE REDE

Para que haja um ganho na eficiência espectral de um sistema enquanto ele ainda se aproveita dos ganhos de desempenho trazidos pela CC, foi proposto o uso do conceito de redes cooperativas com a técnica de codificação de rede (NCC) (HEIDARPOUR *et al.*, 2017; RENZO, 2014; RENZO *et al.*, 2013).

A ideia principal é que, ao invés de apenas retransmitir a mensagem recebida, um *relay* combine os pacotes recebidos de diversas fontes para então encaminhar o resultado para o Destino em apenas um *slot* de tempo (HEIDARPOUR *et al.*, 2017).

Assim, em redes cooperativas que também utilizam codificação de rede, ao invés de apenas retransmitir as mensagens recebidas na BP, os *relays* também são capazes de combinar linearmente as informações disponíveis, sendo essas operações realizadas sobre um campo finito. Logo, nas redes NCC, há uma melhora no *throughput* do sistema quando comparado com redes cooperativas convencionais (ZHOU *et al.*, 2018). Além disso, por utilizar, para a combinação dos pacotes, códigos de Máxima Distância de Separação, do inglês *Maximum Distance Separable* (MDS), os quais satisfazem o limitante de Singleton, pode-se atingir um ganho de diversidade total no sistema (MACWILLIAMS; SLOANE, 1977).

Desta forma, os sistemas NCC têm recebido uma atenção significativa. Vários trabalhos têm utilizado esse conceito em redes cooperativas sem fio a fim de reduzir a taxa de erro do sistema (XIAO *et al.*, 2007; XIAO; SKOGLUND, 2009; XIAO; SKOGLUND, 2010) e, também, para aumentar a segurança da rede em camada física (REBELATTO *et al.*, 2014).

Em (VU *et al.*, 2015), são propostos dois protocolos para sistemas NCC a fim de aumentar a eficiência espectral: a SRS e a MRS. Nesses protocolos, na BP, as fontes enviam seus pacotes respeitando seus *slots* de tempo; os *relays* e o Destino recebem esses pacotes. A escolha dos *relays* para SRS e MRS é feita através da SNR equivalente, a qual é calculada considerando um canal com dois saltos, $S_n \rightarrow R_m \rightarrow D$. O salto com enlace mais fraco ($S_n \rightarrow R_m$ ou $R_m \rightarrow D$) em termos de SNR determina a confiabilidade da comunicação. Dessa forma, em uma comunicação com múltiplas fontes com a NC sendo aplicada pelos *relays*, a confiabilidade também é determinada pelo enlace mais fraco entre a fonte e o *relay*. Como resultado, cada salto duplo pode ser interpretado como um único enlace com a SNR equivalente a (VU *et al.*, 2015):

$$\gamma_{R_m}^{eq} = \min \left\{ \gamma_{R_m}^{S_1}, \dots, \gamma_{R_m}^{S_{N_s}}, \gamma_D^{R_m} \right\}, \quad (9)$$

em que γ_B^A é a SNR vista por B considerando uma transmissão no canal $A \rightarrow B$.

Em relação a BP dos protocolos SRS e MRS, no primeiro protocolo, apenas o melhor *relay*, considerando a SNR equivalente do sistema, transmite e, para o outro caso, apenas um número predeterminado dos melhores *relays* entre os M_r disponíveis transmite, também considerando a mesma métrica. Assim, o caso SRS é uma particularidade do protocolo MRS, em que o conjunto que transmite na BP é composto por apenas um elemento. Desta forma, enquanto a SRS consegue atingir uma diversidade igual à 2, independentemente do número de *relays*, a MRS pode atingir ordens de diversidade maiores, dependendo da estrutura da rede e do número de *relays* que transmitem na BP (VU *et al.*, 2015).

No entanto, para ambos os protocolos, há a necessidade de conhecer a CSI global para a escolha dos melhores *relays*, o que impõe um excesso de *overhead* na rede, ou seja, uma quantidade excessiva de pacotes balizadores para se obter os parâmetros desejados. Em (HEI-DARPOUR *et al.*, 2019b), é proposta uma variação do protocolo MRS, chamada “*Strategy B*”, que considera apenas o melhor *relay* em relação à SNR do último salto $R_m \rightarrow D$, resultando em uma diminuição do *overhead*.

2.7 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A abordagem tradicional em relação à EE era minimizar o consumo energético na transmissão de um *bit*, pois a energia de uma bateria é limitada. Em outras palavras, um dispositivo sem fio alimentado por bateria conseguiria transmitir um número limitado de *bits* (CUI *et al.*, 2005). Tal parâmetro é definido como a energia total da bateria dividida pela energia necessária para transmitir um *bit*.

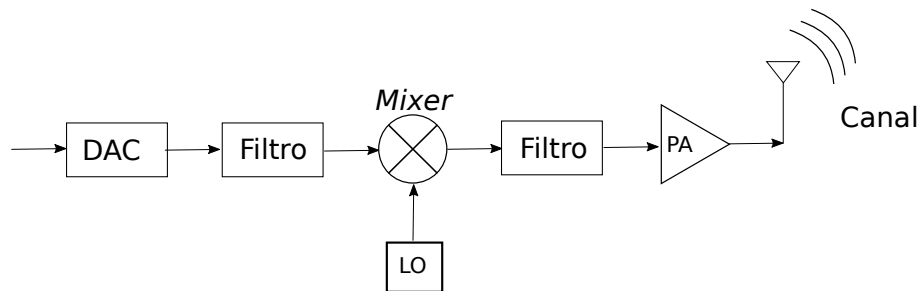
Assim, em vários trabalhos anteriores, o objetivo da otimização da EE era traduzido em minimizar a energia necessária para a transmissão (VERDU, 2002; GAMAL *et al.*, 2002; SCHURGERS; SRIVASTAVA, 2002). Essa solução sozinha é razoável apenas quando a energia para transmitir é dominante no consumo total, como, por exemplo, em cenários com comunicações entre distâncias suficientemente grandes (≥ 100 m) (CUI *et al.*, 2004).

No entanto, em cenários de curto alcance, tais como a WSN e IoT, em que, em muitos casos, a comunicação ocorre em distâncias inferiores a 10 m, tais pressupostos de consumo não são válidos, pois o gasto energético total é composto, em grande parte, pelos consumos dos circuitos internos. Além disso, com os avanços na tecnologia de semicondutores, há uma progressiva redução de tamanho dos dispositivos de rádio, sem que haja perda de funcionalidades. Tais dispositivos sem fio operam com pequenas baterias, as quais devem ter vida útil de alguns anos,

pois a manutenção de tais nós da rede pode ser uma operação difícil ou custosa financeiramente.

Em (CUI *et al.*, 2004), é proposto um modelo realista de consumo de rádio, em que a energia consumida pelos circuitos internos também é considerada. Um transmissor tem um Amplificador de Potência, do inglês *Power Amplifier* (PA), um Conversor Digital-Analógico, do inglês *Digital-to-Analog Converter* (DAC), um *mixer* e também um filtro ativo, conforme pode ser visto na Figura 4. Tanto o receptor quanto o transmissor têm um sintetizador de frequência.

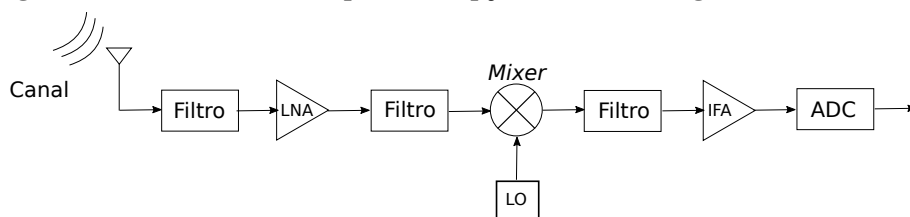
Figura 4 – Circuitos utilizados para a transmissão de uma mensagem para canal sem fio, sendo LO o Oscilador Local, do inglês *Local Oscillator*.



Fonte: Autoria Própria, adaptado de (CUI *et al.*, 2005)

Além disso, cada receptor tem um Amplificador de Baixo Ruído, do inglês *Low-Noise Amplifier* (LNA), um Amplificador de Frequência Intermediária, do inglês *Intermediate Frequency Amplifier* (IFA), um filtro ativo e um Conversor Analógico-Digital, do inglês *Analog-to-Digital Converter* (ADC), conforme exemplificado pela Figura 5 (CUI *et al.*, 2004). Assim, um projeto para EE em uma rede de curto alcance deve considerar todos esses circuitos na avaliação do consumo de uma comunicação sem fio.

Figura 5 – Circuitos utilizados para a recepção de uma mensagem do canal sem fio.



Fonte: Autoria Própria, adaptado de (CUI *et al.*, 2005)

Desta forma, a EE pode ser definida como a energia total (em Joules) necessária para transmitir dados de forma correta, ou seja, sem erros. Para o caso de um único enlace sem diversidade, se os transmissores adotarem uma taxa de transmissão (em *bits/s*) igual a $R_b = 1/T_b$, com T_b sendo o período de *bit*, a EE pode escrita como (CUI *et al.*, 2005):

$$EE = T_b (P_{tx} + P_{rx}) \quad [\text{Joules/bit}], \quad (10)$$

em que P_{tx} e P_{rx} representam a potência total consumida pelo transmissor e pelo receptor, respectivamente.

Assim, a potência total consumida pelo transmissor pode ser modelada como (CUI *et al.*, 2004):

$$P_{tx} = P_{PA} + P_{ctx} + P_{syn}, \quad (11)$$

em que $P_{ctx} = P_{DAC} + P_{mix} + P_{filt}$, com P_{DAC} , P_{mix} e P_{filt} sendo as potências consumidas pelos blocos do DAC, do *mixer* e do filtro ativo, respectivamente. Os termos P_{PA} e P_{syn} são, nessa ordem, os consumos do amplificador de potência e do sintetizador de frequência. O consumo do amplificador pode ser aproximado por (RAZAVI, 2001):

$$P_{PA} = \frac{\xi}{\eta} P_t, \quad (12)$$

em que η é a eficiência do dreno do amplificador potência, e ξ , a razão entre o pico e a média, a qual depende da técnica de modulação. Uma aproximação válida para ξ para a Modulação de Amplitude Multinível em Quadratura, do inglês *Multilevel Quadrature Amplitude Modulation* (MQAM), é (CUI *et al.*, 2005; MAJUMDAR *et al.*, 2017):

$$\xi = 3 \frac{\sqrt{m_{QAM}} - 1}{\sqrt{m_{QAM}} + 1}, \quad (13)$$

com m_{QAM} sendo a quantidade de símbolos da constelação.

A fim de garantir confiabilidade, a potência de transmissão pode ser calculada a partir de uma probabilidade de *outage* alvo do sistema (\mathcal{O}^*).

O termo P_{rx} em (10) depende do número de cadeias simultâneas de RF utilizadas no receptor. Assim, P_{rx} pode ser escrito como:

$$P_{rx}(n_{rx}) = n_{rx} P_{ctx} + P_{syn}, \quad (14)$$

em que $P_{ctx} = P_{LNA} + P_{mix} + P_{IFA} + P_{filr} + P_{ADC}$, com P_{LNA} , P_{IFA} , P_{filr} e P_{ADC} sendo os consumos para o LNA, o IFA, o filtro ativo e o ADC, respectivamente. O termo n_{rx} representa o número de cadeias de RF utilizadas na recepção com $n_{rx} \in \{1, n_r, n_d\}$ (se o esquema de recepção for a SC, esse número é 1).

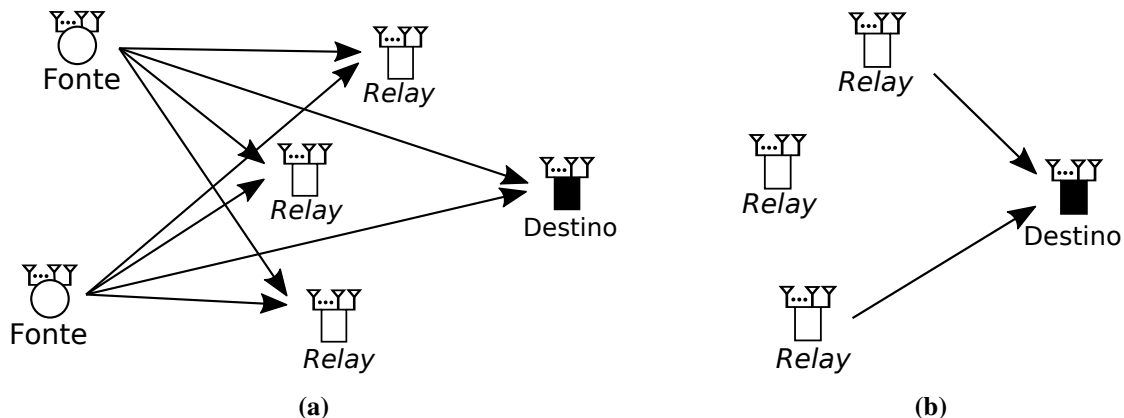
3 ANÁLISE DO ESQUEMA NCC-MIMO-MRS

3.1 PROTOCOLO DE TRANSMISSÃO MRS

Com base em (HEIDARPOUR *et al.*, 2019b), o processo de comunicação na rede NCC-MIMO-MRS utilizada ocorre em duas fases: BP e RP. Na primeira fase, cada uma das N_s fontes envia sua própria mensagem com q bits através de *slots* de tempo ortogonais, escolhendo a melhor antena de transmissão em relação ao Destino (TAS). Essas mensagens são potencialmente recebidas por este, pois assume-se a existência do canal direto $S_n \rightarrow D$, além de serem passíveis de serem recebidas pelos *relays* através dos esquemas SC ou MRC. No entanto, vale ressaltar que a técnica TAS é empregada apenas no canal entre as fontes e o Destino, a escolha da antena de transmissão não é necessariamente ótima para os *relays*. Caso fosse optado por utilizar a melhor antena também para cada *relay*, o número de transmissões aumentaria conforme o número de *relays* disponíveis.

Durante a fase de retransmissão, a MRS é realizada. Assim sendo, um conjunto de até \mathcal{L} *relays* dos M_r disponíveis são escolhidos pelo Destino para transmitir seus pacotes codificados (VU *et al.*, 2015). Os *relays* aplicam a codificação de rede em um campo finito $GF(2^q)$ e enviam suas mensagens através do esquema TAS. A MRS é exemplificado na Figura 6.

Figura 6 – Modelo do sistema: no primeiro momento (a), chamado difusão, as fontes enviam suas próprias mensagens, e os relays e o Destino as recebem utilizando a SC ou a MRC. Na fase de retransmissão (b), \mathcal{L} relays aplicam codificação de rede nos pacotes recebidos e, então, os enviam para o Destino utilizando o esquema TAS.



Fonte: Autoria Própria, adaptado de (HEIDARPOUR *et al.*, 2019b)

Em relação aos *relays*, define-se \mathcal{R}_l como o conjunto de *relays* que conseguiram decodificar corretamente todas as N_s mensagens provenientes das fontes na BP, com $|\mathcal{R}_l| = l$,

sendo $|\cdot|$ a cardinalidade do conjunto. O conjunto de *relays* transmissores na RP é um subconjunto de \mathcal{R}_l , em que são escolhidos os dispositivos com as \mathcal{L} melhores SNRs em relação aos canais entre estes e o Destino.

O número máximo de *relays* permitidos na transmissão na RP é um parâmetro a ser definido no projeto da rede. Dependendo do conjunto instantâneo de *relays* que foram capazes de decodificar as mensagens na BP, dois resultados diferentes são possíveis quanto ao desempenho da MRS:

- Se $l \geq \mathcal{L}$, apenas transmitirão na RP os \mathcal{L} melhores *relays* em relação aos canais entre os *relays* e o Destino ($R_m \rightarrow D$), ou seja, apenas aqueles com os canais com as maiores SNRs instantâneas e
- Quando $l < \mathcal{L}$, todos os l *relays* de \mathcal{R}_l transmitirão suas mensagens para D sem nenhum tipo de seleção.

Desta forma, diferentemente do esquema NCC-MIMO-MRS proposto em (HEIDARPOUR *et al.*, 2017), em que, na RP, sempre os \mathcal{L} melhores *relays* transmitem independentemente se foram capazes de receber todos os pacotes ou não; nesse caso, o número efetivo de *relays* que atuam na RP é uma variável aleatória dada por $l_{\text{eff}} = \min(l, \mathcal{L})$, em que $\min(\cdot, \cdot)$ representa a operação que retorna o menor entre dois valores.

Na RP, cada *relay* selecionado então decodifica as mensagens recebidas e as combina utilizando operações em $GF(2^q)$, como se segue (VU *et al.*, 2015):

$$b_{R_m} = \mu_{R_m}^{S_1} b_{R_m}^{S_1} \boxplus \mu_{R_m}^{S_2} b_{R_m}^{S_2} \boxplus \dots \boxplus \mu_{R_m}^{S_{N_s}} b_{R_m}^{S_{N_s}}, \quad (15)$$

com \boxplus sendo a operação soma em um campo finito $GF(2^q)$; b_{R_m} , o símbolo resultante da codificação de rede que será então modulado como \mathbf{x}_{R_m} e enviado para o Destino; $\mu_{R_m}^{S_n}$, o coeficiente da codificação de rede utilizado pelo m -ésimo *relay* no pacote recebido da n -ésima fonte e $b_{R_m}^{S_n}$, o símbolo decodificado do pacote recebido no m -ésimo *relay* proveniente da n -ésima fonte. Os coeficientes escolhidos para realizar as combinações lineares podem ser obtidos, por exemplo, a partir da matriz geradora de um código de bloco MDS, a fim de garantir a obtenção da ordem de diversidade máxima (REBELATTO *et al.*, 2012).

3.1.1 Probabilidade de *Outage* para o Esquema MRS

No que segue, apresentam-se as probabilidades de *outage* total para os cenários de rede NCC-MIMO-MRS utilizando o esquema MRC na recepção, como adotado em (HEIDARPOUR *et al.*, 2019b), bem como o cenário em que os receptores utilizam a SC.

Independentemente se os receptores operam com a MRC ou não, o Destino espera receber até $N_s + \mathcal{L}$ pacotes, sendo N_s durante a fase de difusão e \mathcal{L} na etapa de retransmissão. Desses, necessita-se que pelo menos N_s pacotes sejam corretamente decodificados pelo Destino para que todo o conjunto de mensagens originais seja recuperado. Desta forma, um evento de falha na comunicação ocorre se mais do que \mathcal{L} pacotes não forem corretamente recuperados no nó Destino (VU *et al.*, 2015; HEIDARPOUR *et al.*, 2019b).

No que se segue, adotam-se as notações \mathcal{O}_S^D , \mathcal{O}_S^R e \mathcal{O}_R^D para representar as probabilidades de *outage* referentes aos canais $S_n \rightarrow D$, $S_n \rightarrow R_m$ e $R_m \rightarrow D$, respectivamente, em que, devido aos pressupostos de cenário de SNR e também para facilitar a leitura, os índices n e m foram removidos. Ademais, definiu-se como n_{sop} e l_{op} o número de pacotes corretamente recebidos por D durante a BP (vindas das fontes) e a RP (vindas dos *relays*), respectivamente, sendo que $n_{\text{sop}} \leq N_s$ e $l_{\text{op}} \leq l_{\text{eff}}$.

Tendo em mente que o Destino é capaz de recuperar todos os pacotes das fontes após decodificar corretamente quaisquer N_s pacotes entre todos os $N_s + l_{\text{eff}}$ transmitidos, não ocorrerá (*outage*) caso aconteça algum dos três eventos abaixo (HEIDARPOUR *et al.*, 2019b):

Caso 1: Todos os pacotes transmitidos na BP foram corretamente decodificados por D , isto é,

$$n_{\text{sop}} = N_s;$$

Caso 2: Houve falhas nos canais diretos entre fontes e Destino ($n_{\text{sop}} < N_s$) e a quantidade de *relays* que decodificaram todas as mensagens de BP é inferior a \mathcal{L} ($l < \mathcal{L}$), mas $n_{\text{sop}} + l_{\text{op}} \geq N_s$;

Caso 3: Houve falhas nas transmissões dos canais diretos entre fontes e Destino ($n_{\text{sop}} < N_s$) e a quantidade de *relays* que decodificaram todas as mensagens é igual ou maior do que \mathcal{L} ($l \geq \mathcal{L}$) e $n_{\text{sop}} + l_{\text{op}} \geq N_s$.

Como os três casos mencionados acima compõem todos os casos possíveis no espaço amostral dos eventos, a probabilidade de *outage* pode, então, ser obtida a partir da probabilidade

complementar, conforme se segue:

$$\mathcal{O}^{\text{sch}} = 1 - \left(\Pr \{ \text{Caso 1} \} + \Pr \{ \text{Caso 2} \} + \Pr \{ \text{Caso 3} \} \right), \quad (16)$$

em que $\text{sch} \in \{\text{MRC}, \text{SC}\}$. Dado que todas as probabilidades de *outage* neste trabalho se referem a um esquema NCC-MIMO-MRS operando sob a TAS, omitiu-se essa informação das equações para facilitar a leitura.

Teorema 1. *As probabilidades de outage do esquema NCC-MIMO-MRS com a TAS, quando estão operando sob a MRC ou a SC no receptor, dependem diretamente da relação entre N_s e \mathcal{L} . Assim, elas são:*

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{N_s \leq \mathcal{L}} = & \sum_{n_{\text{sop}}=0}^{N_s-1} \binom{N_s}{n_{\text{sop}}} \frac{(1 - \mathcal{O}_S^D)^{n_{\text{sop}}}}{(\mathcal{O}_S^D)^{n_{\text{sop}} - N_s}} \left\{ \sum_{l=0}^{N_s - n_{\text{sop}} - 1} \binom{M_r}{l} \frac{(1 - \mathcal{O}_S^R)^{N_s l}}{[1 - (1 - \mathcal{O}_S^R)^{N_s}]^{l - M_r}} \right. \\ & \left. + \sum_{\substack{l= \\ N_s - n_{\text{sop}}}}^{M_r} \binom{M_r}{l} \frac{(1 - \mathcal{O}_S^R)^{N_s l}}{[1 - (1 - \mathcal{O}_S^R)^{N_s}]^{l - M_r}} \sum_{l_{\text{op}}=0}^{N_s - n_{\text{sop}} - 1} \binom{l}{l_{\text{op}}} \frac{(1 - \mathcal{O}_R^D)^{l_{\text{op}}}}{(\mathcal{O}_R^D)^{l_{\text{op}} - l}} \right\}, \end{aligned} \quad (17a)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{N_s > \mathcal{L}} = & \sum_{\substack{n_{\text{sop}}= \\ N_s - \mathcal{L}}}^{N_s-1} \binom{N_s}{n_{\text{sop}}} \frac{(1 - \mathcal{O}_S^D)^{n_{\text{sop}}}}{(\mathcal{O}_S^D)^{n_{\text{sop}} - N_s}} \left\{ \sum_{l=0}^{N_s - n_{\text{sop}} - 1} \binom{M_r}{l} \frac{(1 - \mathcal{O}_S^R)^{N_s l}}{[1 - (1 - \mathcal{O}_S^R)^{N_s}]^{l - M_r}} \right. \\ & \left. + \sum_{\substack{l= \\ N_s - n_{\text{sop}}}}^{M_r} \binom{M_r}{l} \frac{(1 - \mathcal{O}_S^R)^{N_s l}}{[1 - (1 - \mathcal{O}_S^R)^{N_s}]^{l - M_r}} \sum_{l_{\text{op}}=0}^{N_s - n_{\text{sop}} - 1} \binom{l}{l_{\text{op}}} \frac{(1 - \mathcal{O}_R^D)^{l_{\text{op}}}}{(\mathcal{O}_R^D)^{l_{\text{op}} - l}} \right\} \\ & + \sum_{\substack{n_{\text{sop}}= \\ N_s - \mathcal{L}}}^{N_s-1} \binom{N_s}{n_{\text{sop}}} \frac{(1 - \mathcal{O}_S^D)^{n_{\text{sop}}}}{(\mathcal{O}_S^D)^{n_{\text{sop}} - N_s}} \left\{ \sum_{l=0}^{N_s - n_{\text{sop}} - 1} \binom{M_r}{l} \frac{(1 - \mathcal{O}_S^R)^{N_s l}}{[1 - (1 - \mathcal{O}_S^R)^{N_s}]^{l - M_r}} \right. \\ & + \sum_{l=L}^{M_r} \binom{M_r}{l} \frac{(1 - \mathcal{O}_S^R)^{N_s l}}{[1 - (1 - \mathcal{O}_S^R)^{N_s}]^{l - M_r}} + \sum_{\substack{l= \\ N_s - n_{\text{sop}}}}^{\mathcal{L}-1} \binom{M_r}{l} \frac{(1 - \mathcal{O}_S^R)^{N_s l}}{[1 - (1 - \mathcal{O}_S^R)^{N_s}]^{l - M_r}} \\ & \left. \cdot \sum_{l_{\text{op}}=0}^{N_s - n_{\text{sop}} - 1} \binom{l}{l_{\text{op}}} \frac{(1 - \mathcal{O}_R^D)^{l_{\text{op}}}}{(\mathcal{O}_R^D)^{l_{\text{op}} - l}} \right\}, \end{aligned} \quad (17b)$$

As probabilidades de outage \mathcal{O}_S^D , \mathcal{O}_S^R e \mathcal{O}_R^D de (17) dependem do esquema de recepção adotado no Destino. Para o canal com desvanecimento Rayleigh, elas são dadas como:

$$\mathcal{O}_S^D = \begin{cases} (1 - e^{-\Lambda})^{n_s n_d} \approx \Lambda^{n_s n_d} & \text{TAS/SC} \\ \left[1 - \frac{\Gamma(\Lambda, n_d)}{\Gamma(n_d)} \right]^{n_s} \approx \frac{\Lambda^{n_s n_d}}{n_d!^{n_s}} & \text{TAS/MRC} \end{cases} \quad (18)$$

$$\mathcal{O}_S^R = \begin{cases} (1 - e^{-\Lambda})^{n_r} \approx \Lambda^{n_r} & \text{SC} \\ 1 - \frac{\Gamma(\Lambda, n_r)}{\Gamma(n_r)} \approx \frac{\Lambda^{n_r}}{n_r!} & \text{MRC} \end{cases} \quad (19)$$

e

$$\mathcal{O}_R^D = \begin{cases} (1 - e^{-\Lambda})^{n_r n_d} \approx \Lambda^{n_r n_d} & \text{TAS/SC} \\ \left[1 - \frac{\Gamma(\Lambda, n_d)}{\Gamma(n_d)} \right]^{n_r} \approx \frac{\Lambda^{n_r n_d}}{n_d!^{n_r}} & \text{TAS/MRC} \end{cases} \quad (20)$$

em que as aproximações são referentes ao regime de alta-SNR, em que é considerado $\gamma_{S_n}^D \approx \gamma_{S_n}^{R_m} \approx \gamma_{R_m}^D$. $\Gamma(n)$ é a função gama completa e $\Gamma(\Lambda, n) = \Gamma(n) e^{-\Lambda} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\Lambda^k}{k!}$, a função gama incompleta (GRADSHTEYN; RYZHIK, 2007, Eq. (8.352.4)). Além disso, $\Lambda \triangleq (2^{\mathcal{R}_0} - 1)/\bar{\gamma}$, \mathcal{R}_0 é a eficiência espectral desejada (em bits por uso de canal), e $\binom{a}{b} = \frac{a!}{b!(a-b)!}$, o coeficiente binomial.

Demonstração. A demonstração pode ser encontrada no Apêndice A. □

Note-se, em (19), que a diversidade atingida pelos *relays* é menor que a diversidade atingida pelo Destino, uma vez que a melhor antenna de transmissão da TAS é escolhida a partir da perspectiva do Destino, sendo aleatória do ponto de vista dos *relays*, devido à suposição de desvanecimento independente em todos os enlaces da rede.

Corolário 1. As probabilidades de outage para o esquema NCC-MIMO-MRS, utilizando a TAS nos transmissores e com receptores operando sob a MRC e a SC, no cenário em que $n_d > 1$ e $n = n_s = n_r$ podem ser aproximadas na região de alta-SNR como:

$$\mathcal{O}^{\text{MRC}} \approx \begin{cases} \frac{\binom{N_s}{N_s - \mathcal{L} - 1}}{(n_d!)^{n(\mathcal{L}+1)}} \Lambda^{n_d n(\mathcal{L}+1)} + \frac{N_s^{M_r+1}}{(n!)^{M_r} (n_d!)^n} \Lambda^{n(M_r+n_d)} & N_s > \mathcal{L} \\ \frac{N_s^{M_r+1}}{(n!)^{M_r} (n_d!)^n} \Lambda^{n(M_r+n_d)} & N_s \leq \mathcal{L} \end{cases}, \quad (21)$$

e

$$\mathcal{O}^{\text{SC}} \approx \begin{cases} \binom{N_s}{N_s - \mathcal{L} - 1} \Lambda^{n_d n(\mathcal{L}+1)} + N_s^{M_r+1} \Lambda^{n(M_r+n_d)} & N_s > \mathcal{L} \\ N_s^{M_r+1} \Lambda^{n(M_r+n_d)} & N_s \leq \mathcal{L} \end{cases}. \quad (22)$$

Demonstração. A prova segue aproximando $\gamma_{S_n}^D \approx \gamma_{S_n}^{R_m} \approx \gamma_{R_m}^D$ para alta-SNR e então aplicando a aproximação binomial para os termos $(1 - \mathcal{O})^x \approx 1 - x\mathcal{O}$, com x , em (17). Após, aproxima-se o resultado para o termo com menor expoente, o mais relevante na expansão. □

Tabela 2 – Número de transmissões (# TX) e recepções (# RX) do esquema NCC-MIMO-MRS.

	BP		RP	
	# TX	# RX	# TX	# RX
Fontes	N_s			
Relays		$N_s M_r$	l_{eff}	
Destino		N_s		l_{eff}

Fonte: Autoria Própria

Para efeitos de comparação, vale mencionar que a probabilidade de *outage* apresentada em (17) se reduz à probabilidade de *outage* da chamada “Strategy \mathcal{B}_2 ” do esquema NCC-MIMO-MRS de (HEIDARPOUR *et al.*, 2019b), quando opera sob a MRC com a condição de $n_s = 1$.

3.1.2 Eficiência Energética do Esquema NCC-MIMO-MRS

A Eficiência Energética de uma rede está relacionado ao número total de transmissões e de recepções realizadas pelo protocolo, somando os consumos individuais de cada transmissão e recepção (CUI *et al.*, 2005; RAYEL *et al.*, 2013). No esquema NCC-MIMO-MRS, cada fonte realiza uma transmissão na BP, sendo que tanto o Destino quanto cada *relay* devem abrir a janela de recepção para potencialmente receber cada um desses pacotes. Logo, há N_s transmissões provenientes das fontes, $N_s M_r$ recepções nos *relays* e N_s recepções em D . Já durante a RP, apenas l_{eff} *relays* são escolhidos. Desta forma, há l_{eff} transmissões e também l_{eff} recepções. A quantidade de transmissões e recepções do esquema NCC-MIMO-MRS está resumida na Tabela 2.

Entretanto, devido à aleatoriedade de \mathcal{R}_l , o número efetivo de transmissões e recepções na RP também é uma variável aleatória, sendo que $l_{\text{eff}} = \min(l, \mathcal{L})$.

Ademais, quando estão operando sob o esquema SC, os receptores adotam apenas uma única antena, enquanto, em modo MRC, os *relays* e o Destino utilizam, respectivamente, todas as suas n_r e n_d antenas para receber os $N_s M_r$ e $(N_s + l_{\text{eff}})$ pacotes. Assim, com a ajuda da Tabela 2, a EE média quando a MRC e a SC são adotadas pode ser escrita, respectivamente, como:

$$EE^{\text{MRC}} = T_b \left[(N_s + \mathbb{E}[l_{\text{eff}}]) (P_{\text{tx}} + P_{\text{rx}}(n_d)) + N_s M_r P_{\text{rx}}(n_r) \right] \quad (23a)$$

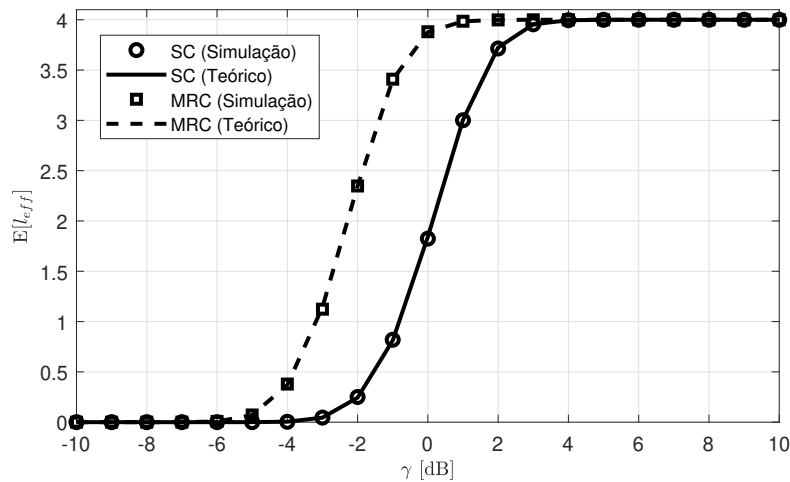
e

$$EE^{\text{SC}} = T_b \left[(N_s + \mathbb{E}[l_{\text{eff}}]) (P_{\text{tx}} + P_{\text{rx}}(1)) + N_s M_r P_{\text{rx}}(1) \right], \quad (23b)$$

em que $\mathbb{E}[\cdot]$ corresponde ao operador de valor esperado (média). Mesmo que l_{eff} varie entre l (quando $l < \mathcal{L}$) e \mathcal{L} (quando $l \geq \mathcal{L}$), é possível demonstrar que, em regime de alta-SNR,

$\mathbb{E}[l_{\text{eff}}] \rightarrow \mathcal{L}$. A demonstração se encontra no Apêndice B. A Figura 7 traz o exemplo do valor esperado do número efetivo de transmissões dos *relays* na RP, $\mathbb{E}[l_{\text{eff}}]$, em função da SNR do canal.

Figura 7 – Valor esperado do número efetivo de transmissões dos *relays* na RP, $\mathbb{E}[l_{\text{eff}}]$, em função da SNR do canal. Consideram-se os cenários em que os transmissores operam com a SC e com a MRC, sendo que $N_s = 5$, $M_r = 8$, $\mathcal{L} = 4$, $n_s = 2$ e $n_r = 3$.



Fonte: Autoria Própria

Assim, nota-se que, mais do que apenas considerar o consumo dos circuitos envolvidos no transmissor e no receptor (CUI *et al.*, 2005), o modelo do consumo adotado neste trabalho também engloba o número total de transmissões e recepções previstas no protocolo.

Como o consumo dos circuitos é normalmente fixo, ou seja, depende exclusivamente do *hardware* utilizado, pode-se adequar a potência de transmissão P_t adotada em (23) a fim de atingir uma probabilidade de *outage* alvo \mathcal{O}^* . Assim, para uma dada \mathcal{O}^* , o valor de P_t é isolado de (21) e de (22) para os esquemas MRC e SC, respectivamente. É possível observar que a SC requer um valor de P_t maior do que a MRC para atingir a mesma probabilidade alvo de *outage*; por outro lado, o esquema utiliza apenas uma cadeia de RF no receptor, reduzindo, assim, o consumo energético. Uma abordagem prática seria escolher um esquema de combinação que, dada um objetivo de confiabilidade, consumisse o mínimo possível de energia.

Embora aumentar n implique em uma alta confiabilidade em (21), isso também piora a EE^{MRC} em (23a). Em contrapartida, a EE^{SC} em (23b) não é influenciada por n , pois, no receptor, apenas uma antena por vez é utilizada. Pode-se observar, em (23), que a EE piora quando l_{eff} (ou mesmo \mathcal{L}) sofre um aumento. Entretanto, a confiabilidade também aumenta, como apresentado em (21) e em (22), de modo que a potência de transmissão necessária para atingir o requisito de confiabilidade seja também reduzida. Assim, espera-se que a EE em função de \mathcal{L} seja convexa,

existindo, então, um número ótimo de *relays* \mathcal{L} que otimiza (23), como se segue na discussão.

3.1.3 Número Ótimo de *Relays* Seleccionados que Minimiza a EE

Como discutido anteriormente, no esquema MRC, a EE depende tanto do número de antenas utilizadas na recepção tanto quanto do número de *relays* seleccionados, enquanto, na SC, apenas o último influencia a EE. Uma vez que otimizar analiticamente de forma conjunta ambos os parâmetros para a MRC é uma tarefa árdua (se possível), nesta seção, obtêm-se o valor ótimo de \mathcal{L} considerando n fixo.

Teorema 2. *O valor ótimo de \mathcal{L} que otimiza a EE pode ser aproximado como:*

$$\mathcal{L}^* = \left\lceil \frac{\log\left(\frac{\zeta}{\mathcal{O}^*}\right)}{n n_d W\left(-\frac{\Theta(n_{rx})}{\delta}\right)} \right\rceil - 1, \quad (24)$$

$\lceil \cdot \rceil$ sendo a operação de arredondamento para cima, $W(\cdot)$ a função Lambert-W (CORLESS et al., 1996) e \mathcal{O}^* a probabilidade de outage alvo. Os parâmetros δ , ζ e $\Theta(n_{rx})$ são definidos como:

$$\delta = \frac{\sum_{l=1}^{N_s-1} \left(\frac{1}{l+1}\right)^2}{\sum_{l=1}^{N_s-1} \left(\frac{1}{l+1}\right)}, \quad (25a)$$

$$\zeta = \frac{\sum_{m_i=1}^{M_r} \left[\left(\frac{N_s}{N_s - m_i - 1} \right)^{\frac{N_s - m_i - 1}{m_i + 1}} \right]^2}{\sum_{m_i=1}^{M_r} \left(\frac{N_s}{N_s - m_i - 1} \right)^{\frac{N_s - m_i - 1}{m_i + 1}}}, \quad (25b)$$

e

$$\Theta(n_{rx}) = -\frac{(2P_{syn} + n_{rx}P_{ctx} + P_{ctx})(n_{rx}!)^{1/n_{rx}} \kappa \eta}{N_0 B \xi (2^{\mathcal{R}_0} - 1)}, \quad (25c)$$

com n_{rx} sendo o número de cadeias de RF ativas no Destino, em que $n_{rx} = 1$ para a SC e $n_{rx} = n_d$ para a MRC.

Demonstração. A prova é apresentada no Apêndice C. □

Pode-se notar que a influência do esquema de combinação no número ótimo de *relays* de (24) vem do parâmetro $\Theta(n_{rx})$ em (25c).

3.2 RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção, apresentam-se alguns resultados numéricos a fim de validar a análise matemática apresentada nas seções anteriores, bem como comparar o desempenho do esquema MRS em termos de EE em relação aos dois métodos de recepção estudados. A menos que seja afirmado o contrário, os parâmetros adotados nesta seção são os apresentados na Tabela 3, os quais estão de acordo com (CUI *et al.*, 2004; CUI *et al.*, 2005).

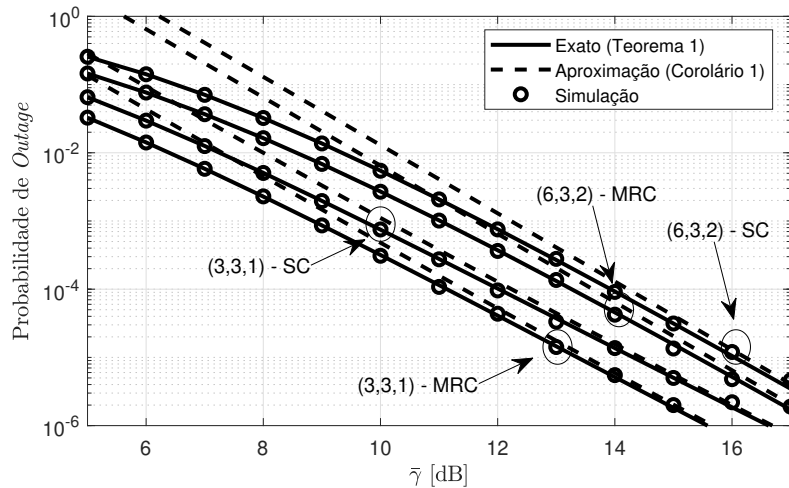
Tabela 3 – Parâmetros do sistema

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
f_c	2,5 GHz	η/ξ	0,35
$G_t^*G_r$	5 dB	P_{syn}	50 mW
B	10 kHz	P_{LNA}	20 mW
\mathcal{O}^*	10^{-4}	M_t	40 dB
$P_{\text{filt}} = P_{\text{filr}}$	2,5 mW	\mathcal{R}_0	1 bpcu
N_0	-171 dBm	α	4
d	40 m	N_f	10 dB

Fonte: Autoria Própria

A Figura 8 apresenta a probabilidade de *outage* versus a SNR para ambos os esquemas NCC-MIMO-MRS quando são utilizadas as técnicas de recepção SC e MRC para diferentes conjuntos de valores, em um cenário com $n = n_s = n_r$. Nela, a linha cheia representa a probabilidade de *outage* exata, como apresentado em (17), enquanto a linha tracejada é a aproximação para alta-SNR de (21) e (22) (Corolário 1). O marcador redondo se refere ao resultado da simulação obtido por Monte Carlo.

Figura 8 – Probabilidade de *outage* versus SNR para $n_d = 2$ e $n = 1$. Os números entre parênteses representam (N_s, M_r, \mathcal{L}) .

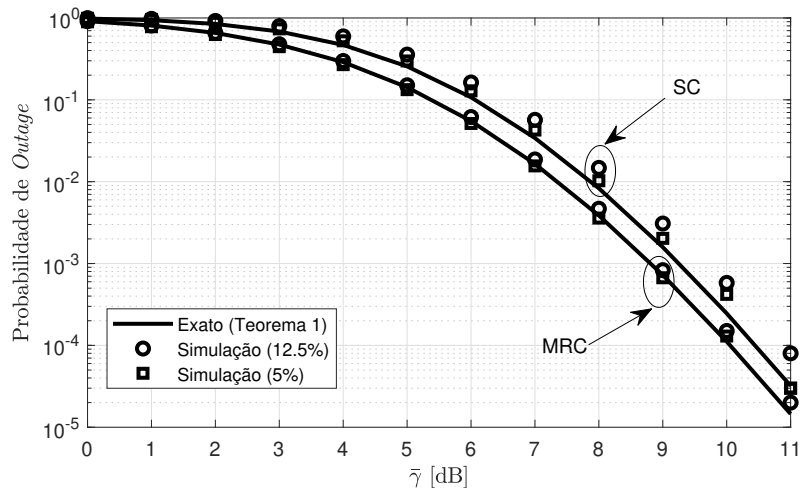


Fonte: Autoria Própria

Pode-se observar que a equação completa representa, com boa precisão, os resultados da simulação, enquanto a precisão das aproximações do Corolário 1 aumenta juntamente com o aumento da SNR. Além disso, é possível também observar que, como esperado, o esquema baseado na MRC apresenta uma menor probabilidade de *outage* do que o esquema baseado na SC.

A Figura 9 apresenta os resultados da probabilidade de *outage* a fim de realizar a validação para um cenário prático, em que as distâncias entre os nós não são iguais. Nela, a curva teórica do Teorema 1 é comparada às simulações para dois cenários específicos em que os nós estão dispersos aleatoriamente, seguindo uma distribuição uniforme, com variação máxima de 12,5% e 5% em relação à distância média d . Nota-se que, ambas os resultados simulados têm comportamento similar a curva teórica, mesmo com variações nas distâncias.

Figura 9 – Probabilidade de *outage* versus SNR para $N_s = 8$, $M_r = 10$, $\mathcal{L} = 7$, $n_d = 2$ e $n = 1$, considerando um cenário com variação nas distâncias entre os nós de 5% e 12.5% em relação à distância média $d = 40m$.

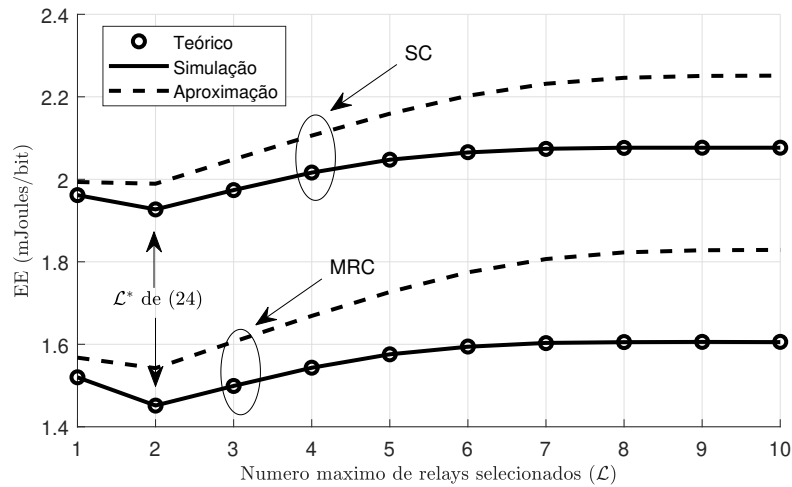


Fonte: Autoria Própria

A EE geral do sistema como função de \mathcal{L} é avaliada na Figura 10, em que ambos os métodos de recepção foram utilizados. Para os esquemas MRC e SC, foram utilizadas as equações (23a) e (23b). O termo “Simulação” se refere ao resultado obtido pela média através da simulação de Monte Carlo; “Teórico” indica a EE obtida de (23) e de (26) pela média da probabilidade de *outage* de (17), enquanto “Aproximação” alude à EE obtida também de (23), mas adotando a aproximação para alta-SNR do Corolário 1.

Embora o cenário com a MRC necessite de menos potência de transmissão para atingir um alvo predefinido de probabilidade de *outage*, o consumo dos circuitos internos do receptor compromete à EE quando comparada ao esquema baseado na SC. Além disso, é possível notar

Figura 10 – EE como função de \mathcal{L} , para $N_s = 8$, $M_r = 10$, $n_d = 2$ e $n = 2$.



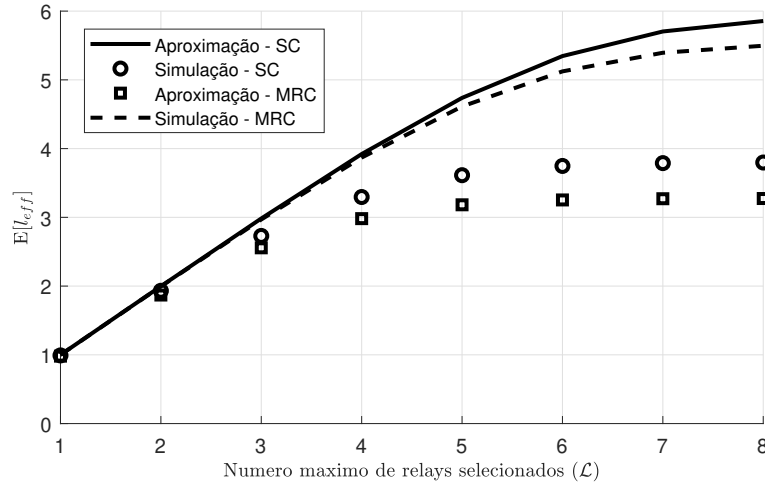
Fonte: Autoria Própria

que a EE obtida da probabilidade de *outage* exata do Teorema 1 corresponde precisamente aos valores da simulação. Mesmo que a EE obtida da probabilidade de *outage* aproximada do Corolário 1 não tenha a mesma precisão nessa configuração em particular, ela ainda é útil para encontrar \mathcal{L}^* , o valor de \mathcal{L} que otimiza a EE total do sistema.

Para ambos os casos, nota-se que a taxa de variação da EE diminui a partir de um certo valor de \mathcal{L} , apresentando, assim, um limitante superior. Isso ocorre quando a potência de transmissão adotada para atingir uma determinada probabilidade de *outage* não é suficiente para aumentar o número de *relays* no conjunto \mathcal{R}_l . Com isso, o número de *relays* que transmitirão na RP e, conseqüentemente, o número de transmissões e recepções nessa mesma fase permanecem estáveis, limitando, assim, a EE; a Figura 11 ilustra esse efeito. Deve-se observar, também, que, à medida que \mathcal{L} aumenta, a SNR necessária para atingir a probabilidade de *outage* alvo do sistema diminui, comprometendo, assim, a precisão da aproximação, a qual é válida no cenário de alta-SNR.

A Tabela 4 apresenta alguns valores de \mathcal{L} que otimizam a EE da rede para diferentes quantidades de *relays*. Nota-se que, mesmo que diversos *relays* estejam disponíveis na rede, de fato, é necessário apenas que alguns transmitam durante a RP para que a EE seja otimizada. Obviamente, o aumento do número de *relays* acarreta uma melhora na disponibilidade dos nós que poderão ser selecionados para transmitir. É possível notar que, para pequenos valores de M_r , existe um erro na estimativa de \mathcal{L}^* , isto ocorre, pois, para esses casos, a componente da probabilidade de *outage* que depende de M_r tem valor próximo à componente que depende apenas de \mathcal{L} . A medida que M_r aumenta, o seu efeito sobre a probabilidade de *outage* tende a

Figura 11 – Número médio de *relays* que transmitem na RP em função de \mathcal{L} para $N_s = 8$, $M_r = 10$, $n_d = 3$ e $n = 2$. Note-se que um aumento em \mathcal{L} reduz a SNR alvo do sistema e que a aproximação utilizada tem como melhor cenário o de alta-SNR.



Fonte: Autoria Própria

diminuir.

Tabela 4 – Valores ótimos de \mathcal{L} em função do número de *relays* disponíveis na rede para o cenário $N_s = 5$, $n_d = 2$, $n = 1$.

M_r	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\mathcal{L}^{*,SC}$ de (24)	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$\mathcal{L}^{*,SC}$ simulado	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
$\mathcal{L}^{*,MRC}$ de (24)	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$\mathcal{L}^{*,MRC}$ simulado	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2

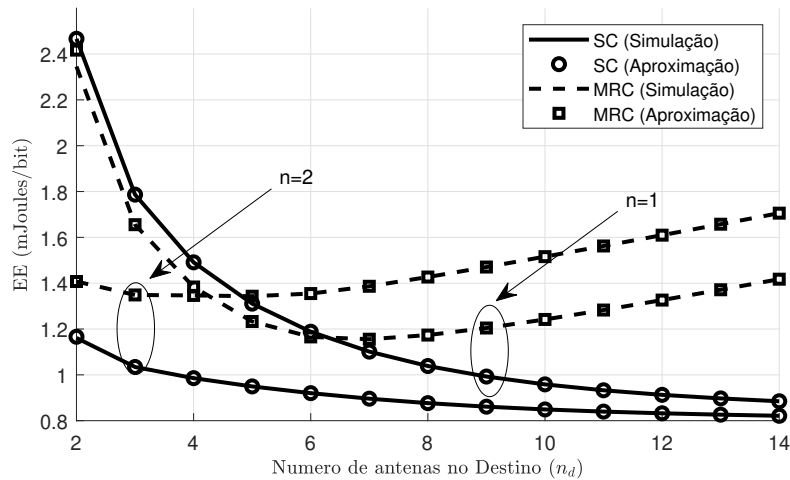
Fonte: Autoria Própria

Nas Figuras 12 e 13, foi avaliada a EE como função de n_d e M_r , respectivamente. Nelas, já se considera o valor ótimo de \mathcal{L} . Para o cenário avaliado, pode-se verificar a precisão dos valores aproximados de \mathcal{L} ótimo obtidos analiticamente a partir do Teorema 2 (“Aproximação”) em relação aos valores exatos obtidos através do valor esperado nas simulações numéricas (“Simulação”).

Pode-se ver claramente, a partir da Figura 12, que, para um dado valor de \mathcal{L} , existe um valor ótimo de n_d que otimiza a EE no esquema MRC. Entretanto, para o esquema SC, a EE é uma função decrescente em relação a n_d . Como resultado, embora a MRC possa representar um esquema mais eficiente para um número pequeno de antenas (como para $n = 1$ e $n_d < 6$), o esquema SC tende a ser mais eficiente energeticamente quando o número de antenas aumenta.

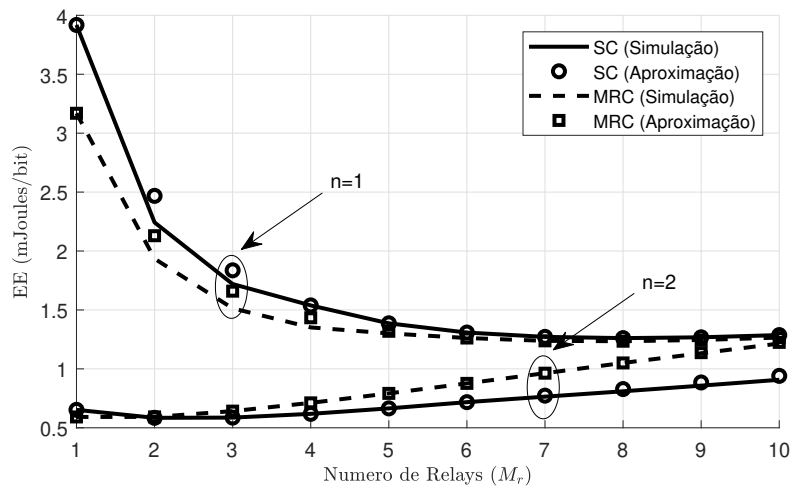
A influência do número de *relays* na EE geral é avaliada na Figura 13, adotando o número ótimo de *relays* selecionados \mathcal{L}^* . Para $n = 1$, a SC é ligeiramente pior do que a MRC, posto que o ganho de confiabilidade provido pela MRC, nesse cenário, compensa o aumento de

Figura 12 – Comparação da EE para os cenários com a SC e a MRC versus n_d , com $N_s = 8$, $M_r = 6$, $n \in \{1, 2\}$ e adotando o valor exato de \mathcal{L}^* e o aproximado de \mathcal{L}^* a partir de (24).



Fonte: Autoria Própria

Figura 13 – EE versus M_r , com $N_s = 5$, $n_d = 2$, $n \in \{1, 2\}$ e adotando o valor exato de \mathcal{L}^* e o aproximado de \mathcal{L}^* a partir de (24).



Fonte: Autoria Própria

consumo imposto pelo uso simultâneo de n_d cadeias de RF no Destino. Pode-se notar que, nesse caso, a EE de ambos os esquemas varia de maneira semelhante quando M_r aumenta, desde que uma única antena seja adotada nos relays.

Entretanto, para $n = 2$, pode-se perceber que há um ponto de cruzamento entre as curvas, quando a SC se torna mais eficiente em termos de EE do que a MRC. Aqui, está claro que o ganho de confiabilidade obtido com o esquema MRC não compensa o aumento no consumo energético requerido pelos M_r relays que utilizam todas as cadeias de RF ao mesmo tempo.

É válido mencionar que a pequena diferença entre as curvas para pequenos valores de M_r acontece devido ao fato de que o \mathcal{L}^* aproximado obtido analiticamente do Teorema 2 não é

igual ao valor exato em tais casos, embora tenha uma aproximação razoável para o resultado final de EE.

3.3 COMENTÁRIOS

Neste capítulo, foi avaliada a EE de um esquema NCC-MIMO-MRS, em um cenário com múltiplas fontes, múltiplos *relays* e apenas um Destino, todos equipados com múltiplas antenas. A EE da rede foi avaliada sob a perspectiva de dois esquemas de combinação diferentes no lado do receptor, a saber, MRC e SC. Os resultados matemáticos e de simulação, os quais também englobam o consumo dos circuitos de todos os nós, mostram que o esquema MRC, o qual é ótimo da perspectiva de confiabilidade, pode ser ultrapassado pelo esquema SC em termos de EE.

Ademais, um limitante superior foi encontrado para esse tipo de rede NCC-MIMO-MRS, em que o aumento no número máximo de *relays* que podem transmitir na RP, \mathcal{L} , não implica no aumento do número efetivo de transmissões dos *relays*, l_{eff} , limitando, assim, o número de transmissões e recepções nessa última fase. Por fim, o número de *relays* que otimiza a EE também foi deduzido analiticamente a partir da aproximação para alta-SNR e comparado com a simulação, em função do número de antenas no Destino, n_d , e também do número de *relays* na rede, M_r .

Mesmo otimizando o número máximo de transmissões na RP, esse parâmetro ainda é fixo, ou seja, mesmo que o Destino não esteja em falha, as transmissões ocorrerão de forma desnecessária. Assim, teoricamente, é possível otimizar ainda mais a EE do sistema ao melhorar o gerenciamento das transmissões na RP através de um canal de *feedback* entre o Destino e os *relays*, conforme será visto no Capítulo 4.

4 PROPOSTA DE ESQUEMA NCC-MIMO-MRS: MRS INCREMENTAL (INC-MRS)

4.1 PROTOCOLO DE TRANSMISSÃO PROPOSTO

Como apresentado no Capítulo 3, a EE total da rede é impactada de forma considerável pela variação da quantidade de *relays* que transmitem para o Destino durante a RP, isto é, valores grandes de l_{eff} tendem a acarretar consumos elevados.

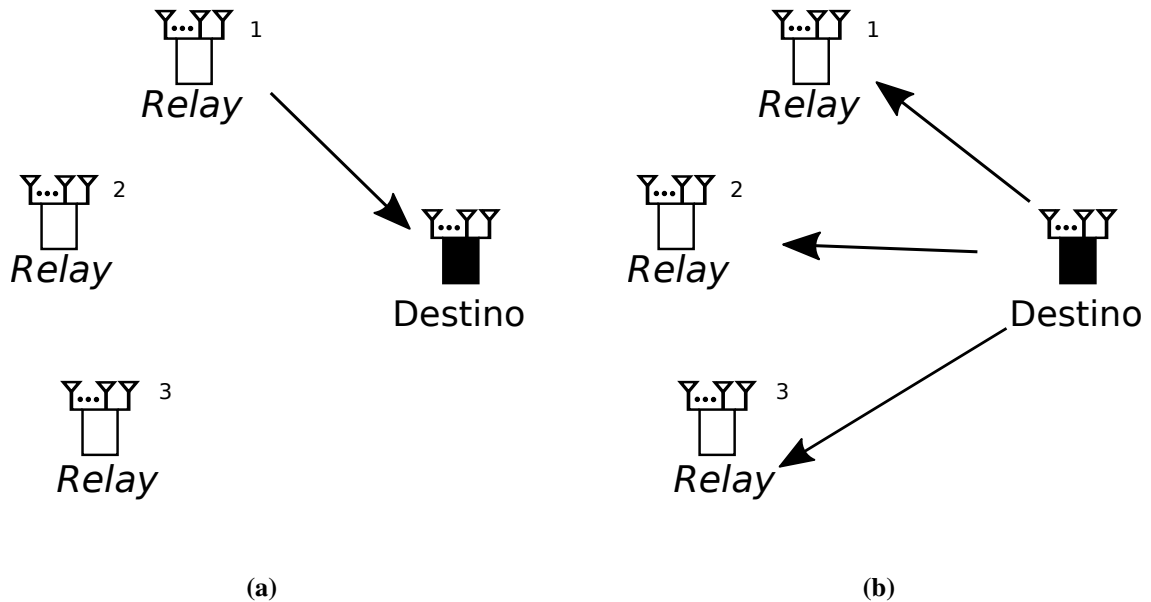
Uma alternativa para reduzir o valor de l_{eff} e, conseqüentemente, otimizar a EE da rede é considerar que o Destino seja capaz de, ao fim da BP, informar às fontes e aos *relays* se conseguiu recuperar todas as mensagens difundidas pelas fontes na BP¹. Caso esse *feedback* indique sucesso no recebimento das mensagens das fontes por parte do Destino, não há necessidade das transmissões da RP, diminuindo o número médio de transmissões dos *relays*.

No entanto, caso alguma das mensagens das fontes não tenha sido corretamente recebida pelo Destino, a RP é iniciada, mas agora sendo dividida em duas etapas, a saber:

- E1.** Na primeira etapa, da mesma forma que o esquema NCC-MIMO-MRS apresentado no Capítulo 3, são selecionados os melhores *relays* em termos de SNR dos canais $R_m \rightarrow D$, que transmitirão na RP, entre aqueles que foram capazes de decodificar todas as mensagens das fontes na BP.
- E2.** Já na segunda etapa, ocorrem as transmissões ordenadas do melhor *relay* para o pior entre os nós do conjunto de melhores *relays*. Essa ordenação é feita pelo Destino através de *beacons* periódicos. No entanto, após cada transmissão, o Destino deve informar, através desse canal de *feedback* utilizado para a coordenação das transmissões, se ele já possui pacotes suficientes para decodificar as mensagens das fontes, sendo esse processo ilustrado na Figura 14. Caso essa informação de retorno indique que o Destino ainda necessita de paridades, as transmissões continuam, agora com o próximo *relay*. Esse processo ocorre até que o Destino recupere todas as mensagens das fontes ou até que ocorram todas as \mathcal{L} transmissões. Além disso, desta forma, é possível apenas ignorar a RP caso o Destino já tenha decodificado todos os pacotes das fontes ou não tenha recebido pacotes suficientes para que seja possível sair do estado de falha. Um resumo desse protocolo INC-MRS pode ser visto no fluxograma da Figura 15.

¹Note-se que essa informação pode ser realizada através da transmissão de um único *bit* de *feedback*, o qual é assumido ser livre de erros e cuja influência na EE da rede é desprezada.

Figura 14 – Nova Fase de Retransmissão (a): no primeiro momento, o melhor *relay* realiza uma transmissão, e o Destino a recebe utilizando a SC ou a MRC. No próximo momento (b), o Destino se aproveita da característica de difusão do meio sem fio e informa as *relays* se ele foi capaz de decodificar as mensagens das fontes. Caso não tenha conseguido, o próximo melhor *relay* dá continuidade ao processo.



Fonte: Autoria Própria

Desta forma, os pressupostos do modelo INC-MRS são:

- O canal de *feedback* é livre de erros;
- Os pacotes de *feedback* do canal $D \rightarrow R_m$ são muito menores do que os demais da rede, a fim de serem negligenciados no cálculo energético.

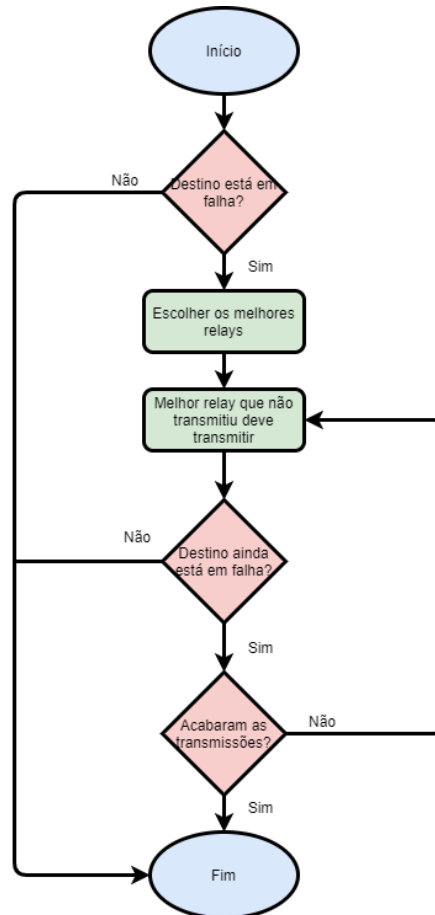
A probabilidade de *outage* do sistema INC-MRS é igual à do esquema NCC-MIMO-MRS apresentado em (17b), pois as condições de ocorrência de um evento de *outage*, como apresentado na Seção 3.1.1, permanecem inalteradas.

4.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO ESQUEMA INC-MRS

As expressões para a EE do esquema INC-MRS considerando os cenários com a MRC e a SC podem ser escritas baseadas nas equações (23a) e (23b), respectivamente.

No entanto, a diferença na EE entre ambos os esquemas se encontra no número efetivo de *relays* que transmitem na RP (l_{eff}). Já que, agora, o Destino pode interromper a RP a qualquer

Figura 15 – Fluxograma da Fase de Retransmissão do esquema INC-MRS.



Fonte: Autoria Própria

momento, $l_{\text{eff}}^{\text{INC-MRS}}$ é menor ou igual a $l_{\text{eff}}^{\text{MRS}}$. Ademais, $l_{\text{eff}}^{\text{INC-MRS}}$ para o cenário de alta-SNR tende a zero, conforme demonstrado no Apêndice D.

Assim, substituindo $\mathbb{E}[l_{\text{eff}}]$ por 0 para o cenário de alta-SNR, (23a) e (23b) podem ser reescritas como:

$$EE_{\text{INC}}^{\text{MRC}} = T_b \left[N_s (P_{\text{tx}} + P_{\text{rx}}(n_d)) + N_s M_r P_{\text{rx}}(n_r) \right] \quad (26a)$$

e

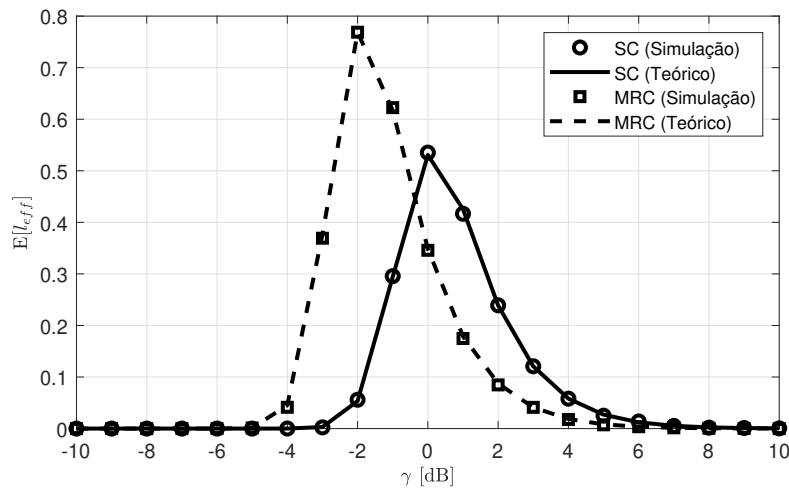
$$EE_{\text{INC}}^{\text{SC}} = T_b \left[N_s (P_{\text{tx}} + P_{\text{rx}}(1)) + N_s M_r P_{\text{rx}}(1) \right], \quad (26b)$$

4.3 RESULTADOS NUMÉRICOS

Os parâmetros utilizados nesta seção são os mesmos apresentados na Tabela 3, a não ser que seja dito o contrário.

A Figura 16 ilustra o valor esperado do número efetivo de transmissões dos *relays* na

Figura 16 – Valor esperado do número efetivo de transmissões dos *relays* na RP, $\mathbb{E}[l_{\text{eff}}]$, em função da SNR do canal. Consideram-se os cenários em que os transmissores operam com a SC e com a MRC, sendo que $N_s = 5$, $M_r = 8$, $\mathcal{L} = 4$, $n_s = 2$, $n_r = 3$ e $n_d = 2$.



Fonte: Autoria Própria

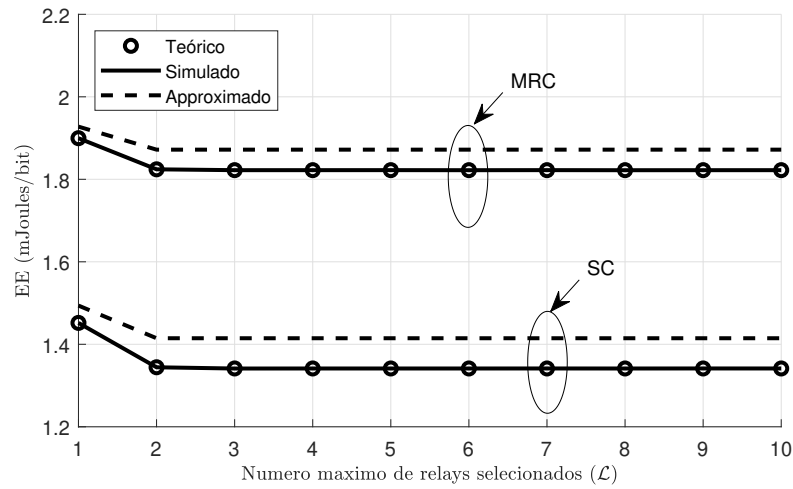
RP, $\mathbb{E}[l_{\text{eff}}]$, em função da SNR do canal. Nela, é possível observar três aspectos importantes em relação ao valor de $\mathbb{E}[l_{\text{eff}}]$ do caso MRS. Primeiramente, para o caso de alta-SNR, o número médio de transmissões na RP é nulo, porque o Destino já consegue recuperar todas as mensagens das fontes na BP. Da mesma forma, para um cenário com a SNR muito baixa, $\mathbb{E}[l_{\text{eff}}]$ também tende a 0. Isso indica que o Destino não recuperou um número suficiente de pacotes para que as retransmissões dos *relays* façam diferença. Por fim, o número máximo de transmissões na RP, que, neste caso, é inferior a 1 para a SC e a MRC, é muito inferior ao caso MRS, comparando-o à Figura 7. Isso ocorre justamente pelo término antecipado da RP.

A Figura 17 apresenta a EE em função do número máximo de *relays* que podem transmitir na RP. A partir de (26a) e (26b), é possível verificar que, diferentemente do esquema MRS original, para o esquema INC-MRS não há mais um número ótimo de \mathcal{L} . Isso ocorre devido à redução do número de transmissões na RP. Agora, na INC-MRS, após atingir o valor ótimo de EE, o aumento de \mathcal{L} não influencia na EE da comunicação.

De forma similar ao caso MRS do Capítulo 3, aqui, a EE geral permanece invariável a partir de um determinado valor de \mathcal{L} por dois motivos. Primeiramente, ao observar (21) e (22), a partir de um determinado valor de \mathcal{L} , o termo dependente de \mathcal{L} deixa de ser relevante para o cálculo da SNR, pois, para $N_s \leq \mathcal{L}$, a probabilidade de *outage* deixa de ser função de \mathcal{L} . O outro motivo se encontra em l_{eff} , em que esse valor tende a 0 para o cenário de alta-SNR. Assim, ao atingir o valor mínimo, o sistema tende a permanecer estável em relação a \mathcal{L} .

É possível analisar o ganho de eficiência cotejando a INC-MRS com a MRS conven-

Figura 17 – EE como função de \mathcal{L} , para $N_s = 8$, $M_r = 10$, $n_d = 2$ e $n = 2$.



Fonte: Autoria Própria

cional sem utilizar o número ótimo de *relays* que transmitem na RP. Obviamente, para esse caso, a INC-MRS será mais eficiente com relação ao gasto energético, pois, tendo os mesmos parâmetros de rede, a INC-MRS terá menos transmissões e recepções em média. Para o cenário mostrado na Figura 18, nota-se que, para o caso com *relays* e fontes equipados com apenas uma antena cada um, há um aumento de eficiência de aproximadamente 25% apenas reduzindo o número de transmissões na RP.

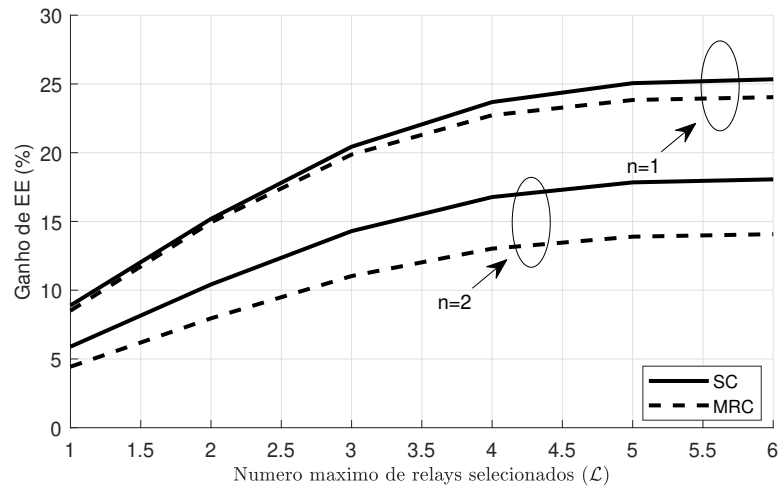
A Figura 19 apresenta o ganho de EE para o esquema INC-MRS em função de \mathcal{L} em relação à EE ótima do caso MRS, encontrando \mathcal{L}^* para a configuração $(N_s, M_r, n_d) = (8, 10, 2)$. Nessa situação, observa-se que o caso INC-MRS utilizando todos os *relays* disponíveis pode ter uma melhora até 15% na EE para o caso com apenas uma antena nos *relays* e fontes.

Nota-se também que, para os cenários das Figuras 18 e 19, o aumento no número de antenas diminui a diferença entre os casos INC-MRS e MRS. Isso se deve ao fato de que um número maior de antenas proporciona uma potência de transmissão menor, aproximando as EEs para transmitir de ambos os sistemas, deixando os valores fixos de ambos os casos mais proeminentes.

A Figura 20 compara a EE da INC-MRS com o valor ótimo de EE do cenário MRS em função do número de *relays* da rede. É interessante notar que, a partir de um determinado valor de M_r , a melhora na EE tende a diminuir, mesmo que a INC-MRS seja sempre mais energeticamente eficiente do que a MRS.

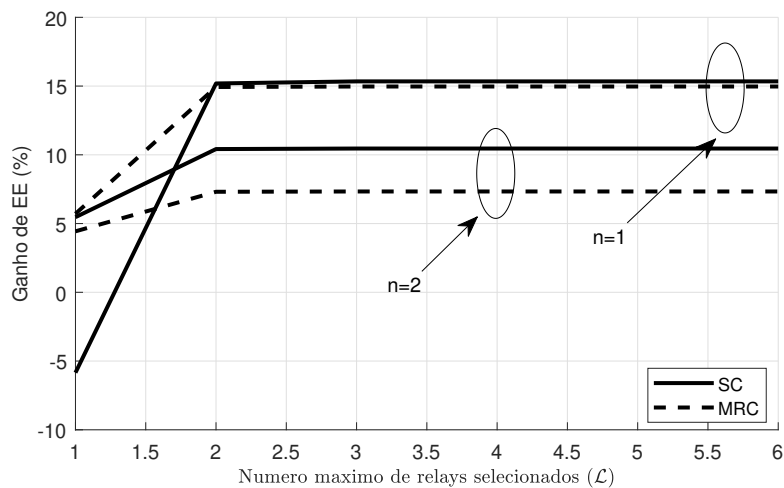
Esse efeito ocorre, pois, conforme demonstrado na Tabela 4, o número de *relays* que de fato precisam transmitir na RP é baixo quando comparado com a disponibilidade de nós.

Figura 18 – Ganho de EE como função de \mathcal{L} em relação à INC-MRS e à EE da MRS, para $N_s = 8$, $M_r = 10$, $n_d = 2$ e $n \in \{1,2\}$.



Fonte: Autoria Própria

Figura 19 – Ganho de EE como função de \mathcal{L} em relação à INC-MRS e à melhor EE da MRS considerando \mathcal{L}^* , para $N_s = 8$, $M_r = 10$, $n_d = 2$ e $n \in \{1,2\}$.



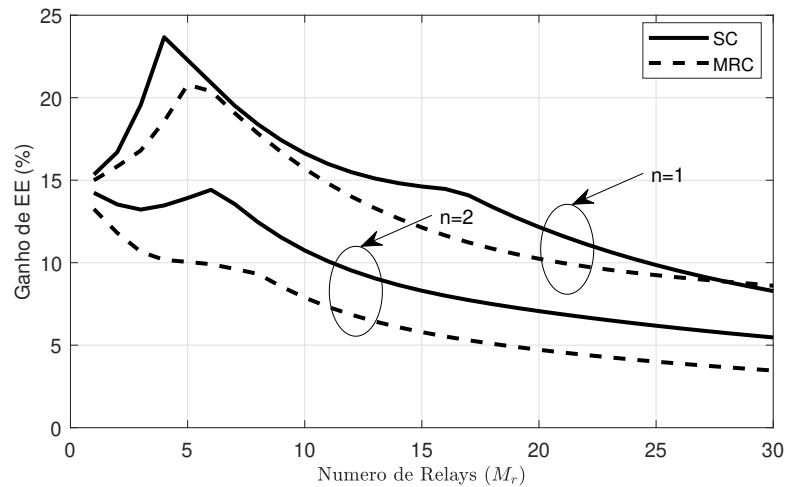
Fonte: Autoria Própria

Além disso, examinando (24), nota-se que \mathcal{L}^* diminui com o aumento do número de antenas disponíveis no sistema, aproximando (23) de (26) e, conseqüentemente, diminuindo a economia de energia da INC-MRS em relação à MRS ótima. O mesmo efeito pode ser encontrado no aumento do número de antenas no Destino, conforme mostra a Figura 21.

4.4 COMENTÁRIOS

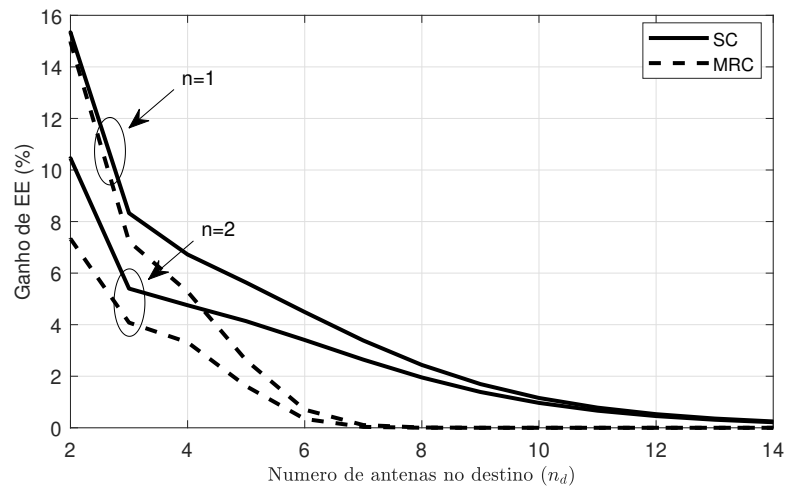
Neste capítulo, o esquema de rede INC-MRS foi avaliado sob a ótica de sua EE, sendo comparado com a EE para um cenário que utiliza apenas o esquema MRS. Em ambos

Figura 20 – Comparação da melhora da EE como função de M_r em relação à INC-MRS e à melhor EE da MRS, para $N_s = 5$, $M_r \in [1,10]$, $n_d = 2$ e $n = \{1,2\}$.



Fonte: Autoria Própria

Figura 21 – Comparação da melhora da EE como função de n_d em relação à INC-MRS e à melhor EE da MRS, para $N_s = 8$, $M_r = 6$, $n_d = [1,14]$ e $n = \{1,2\}$.



Fonte: Autoria Própria

os cenários, há múltiplas fontes, múltiplos relays e apenas um Destino, todos equipados com múltiplas antenas.

Assim, a EE da rede INC-MRS foi deduzida e avaliada, levando em consideração diferentes esquemas de combinação no lado do receptor: SC e MRC. Além disso, também foi examinada a economia energética proporcionada pelo uso do esquema INC-MRS em relação à MRS sob alguns parâmetros de rede, tais como o número de antenas nos nós e no Destino.

Os resultados matemáticos e de simulação, os quais também englobam o consumo geral de todos os nós, demonstram que o uso do esquema INC-MRS provê à rede uma economia significativa de energia, pois há um melhor gerenciamento na RP, sendo que, em alguns casos,

nenhum *relay* precisa transmitir.

5 COMENTÁRIOS FINAIS

Inicialmente, alguns esquemas de diversidades foram apresentados no Capítulo 2, seguidos pelos principais conceitos relacionados à EE. O primeiro modelo primeiramente utilizado para este trabalho é uma extensão do esquema NCC-MIMO-MRS proposto inicialmente em (HEIDARPOUR; ARDAKANI, 2017), a fim de trabalhar com nós com restrição de *hardware* e de custo, conforme as tendências para WSNs e IoT.

No Capítulo 3, foi descrito o modelo desse esquema e foram derivadas as expressões analíticas para a otimização da EE geral da rede. Em seguida, resultados numéricos que validam as análises do trabalho foram apresentadas.

Para tal esquema NCC-MIMO-MRS, foi determinado o número ótimo de *relays* a ser utilizado em uma rede com múltiplas fontes, múltiplos *relays* e com apenas um Destino, utilizando a MRS, a fim de otimizar a EE da rede. Foi demonstrado que o esquema MRS com a TAS utilizando a SC é mais eficiente energeticamente do que aquele que utiliza a MRC, mesmo que este tenha uma maior confiabilidade e, assim, utilize menos energia para a transmissão. Foi também investigada a relação da EE considerando os parâmetros da rede, como o número de antenas no Destino e o número de *relays* disponíveis para a cooperação.

Finalmente, no Capítulo 4, foi proposta uma alteração no esquema NCC-MIMO-MRS utilizado a fim de prover uma melhora ainda maior na EE da rede: o esquema INC-MRS. Através de simulações e comparações entre a INC-MRS e a MRS, demonstrou-se que esse novo esquema consegue ter uma economia de energia considerável, que pode, em alguns casos, chegar a 25%.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho tem como premissa o uso de pacotes formados por blocos de tamanho infinito, usando, assim, métricas baseadas na capacidade de canal de Shannon. Desta forma, foram desconsiderados, no cálculo da EE os pacotes de *feedback* no cenário para a INC-MRS, por exemplo, os quais foram considerados com tamanho muito inferior ao pacotes que contêm informação. Assim, primeiramente, pode-se adotar como métrica a probabilidade de *outage* para bloco finito (DEVASSY *et al.*, 2014; LOPEZ *et al.*, 2017) para, então, considerar os pacotes de manutenção da rede, os *beacons* e, também, os pacotes de *feedback*.

Ademais, pode-se utilizar modelos de consumo mais recentes, como o descrito em

(ROSAS *et al.*, 2016) ou ainda outros que sejam voltados para redes de IoT e considerem o *duty cycle* do sensor, como é caso do modelo proposto em (ZHANG; LI, 2019). Nestes são incluídas mais variáveis do que o modelo atual, tais como a energia gasta para o rádio passar do estado de baixo consumo (cadeia de RF desligada) para o modo ativo e a energia gasta na decodificação do pacote recebido.

Por fim, diversos trabalhos mais recentes têm utilizado a Decomposição em Valores Singulares, do inglês *Singular Value Decomposition* (SVD) da matriz complexa que representa o desvanecimento do canal para um sistema MIMO, caso exista a CSI no transmissor e no receptor. Assim, há ganho de diversidade ao utilizar o melhor ou os melhores canais entre os canais paralelos resultantes da decomposição (MOLISCH *et al.*, 2017).

REFERÊNCIAS

- AHLSWEDE, R.; CAI, Ning; LI, S.-Y.R.; YEUNG, R.W. Network information flow. **IEEE Trans. Inf. Theory**, v. 46, n. 4, p. 1204 – 1216, 2000.
- ALKHAWATRAH, M.; GONG, Y.; CHEN, G.; LAMBOTHARAN, S.; CHAMBERS, J. A. Buffer-aided relay selection for cooperative NOMA in the internet of things. **IEEE Inter. of Things J.**, v. 6, n. 3, p. 5722–5731, Jun. 2019. ISSN 2372-2541.
- BLETSAS, A.; KHISTI, A.; REED, D. P.; LIPPMAN, A. A simple cooperative diversity method based on network path selection. **IEEE J. Sel. Areas Commun.**, v. 24, n. 3, p. 659–672, 2006.
- CHIODI, M. A.; REBELATTO, J. L.; RAYEL, O. K.; SOUZA, R. D. Energy-Efficiency of Selective Relaying in a MIMO Network-Coded Cooperative System. **IEEE Access**, v. 8, p. 92322–92331, 2020.
- CORLESS, R. M.; GONNET, G. H.; HARE, D. E. G.; JEFFREY, D. J.; KNUTH, D. E. 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, Sep. 2005.
- CUI, Shuguang; GOLDSMITH, A. J.; BAHAI, A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks. **IEEE J. Sel. Areas Commun.**, v. 22, n. 6, p. 1089–1098, Aug. 2004. ISSN 0733-8716.
- DEVASSY, R.; DURISI, G.; POPOVSKI, P.; STRÖM, E. G. Finite-blocklength analysis of the arq-protocol throughput over the gaussian collision channel. *In: 2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 173–177.
- ESKANDARI, M.; DOOST-HOSEINI, A. M.; JUNG, J.; LEE, I. Antenna selection and power allocation for energy efficient MIMO systems. **Journal of Communications and Networks**, v. 20, n. 6, p. 546–553, Dec. 2018. ISSN 1229-2370.
- GAMAL, A. El; NAIR, C.; PRABHAKAR, B.; UYSAL-BIYIKOGLU, E.; ZAHEDI, S. Energy-efficient scheduling of packet transmissions over wireless networks. *In: Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 3, p. 1773–1782 vol.3.
- GOLDSMITH, Andrea. **Wireless Communications**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.

GRADSHTEYN, I.S.; RYZHIK, I. M. **Table of Integrals, Series, and Products**. 7th. ed. [S.l.]: Academic Press - Elsevier, 2007.

HEIDARPOUR, A. R.; ARDAKANI, M. Diversity analysis of MIMO network coded cooperation systems with relay selection. *In: 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

HEIDARPOUR, A. R.; ARDAKANI, M.; TELLAMBURA, C. Generalized relay selection for network-coded cooperation systems. **IEEE Commun. Lett.**, v. 21, n. 12, p. 2742–2745, Dec. 2017. ISSN 1089-7798.

HEIDARPOUR, A. R.; ARDAKANI, M.; TELLAMBURA, C. Multiuser diversity in network-coded cooperation: Outage and diversity analysis. **IEEE Commun. Lett.**, v. 23, n. 3, p. 550–553, Mar. 2019. ISSN 1089-7798.

HEIDARPOUR, A. R.; ARDAKANI, M.; TELLAMBURA, C.; RENZO, M. Di. Relay selection in network-coded cooperative MIMO systems. **IEEE Trans. Commun.**, v. 67, n. 8, p. 5346–5361, Aug. 2019. ISSN 0090-6778.

IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. **IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011)**, p. 1–709, April 2016.

KHAN, I.; BELQASMI, F.; GLITHO, R.; CRESPI, N.; MORROW, M.; POLAKOS, P. Wireless sensor network virtualization: early architecture and research perspectives. **IEEE Netw.**, v. 29, n. 3, p. 104–112, May 2015. ISSN 0890-8044.

KIM, J.; KIM, K.; LEE, J. Energy-efficient relay selection of cooperative harq based on the number of transmissions over rayleigh fading channels. **IEEE Trans. Veh. Technol.**, v. 66, n. 1, p. 610–621, Jan. 2017. ISSN 0018-9545.

KOETTER, R.; MÉDARD, M. An algebraic approach to network coding. **IEEE/ACM Trans. Netw.**, v. 11, n. 5, p. 782 – 795, Oct. 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, Dec. 2004.

LIMA, C. H. M. de; ALVES, H.; NARDELLI, P. H. J.; LATVA-AHO, M. Effects of relay selection strategies on the spectral efficiency of wireless systems with half- and full-duplex nodes. **IEEE Trans. Veh. Technol.**, v. 66, n. 8, p. 7578–7583, Aug. 2017.

LO, T. K. Y. Maximum ratio transmission. **IEEE Transactions on Communications**, v. 47, n. 10, p. 1458–1461, 1999.

LOPEZ, O. L. A.; SOUZA, R. Demo; ALVES, H.; FERNANDEZ, E. M. G. Ultra reliable short message relaying with wireless power transfer. *In: 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

MA, C.; LIANG, W.; ZHENG, M.; YANG, B. Relay node placement in wireless sensor networks with respect to delay and reliability requirements. **IEEE Syst. J.**, v. 13, n. 3, p. 2570–2581, Sep. 2019. ISSN 2373-7816.

MACWILLIAMS, F.J.; SLOANE, N.J.A. **The Theory of Error Correcting Codes**. Amsterdam: North Holland, 1977.

MAJUMDAR, C.; LEE, D.; PATEL, A. A.; MERCHANT, S. N.; DESAI, U. B. Packet size optimization for cognitive radio sensor networks aided internet of things. **IEEE Access**, v. 5, p. 6325–6344, 2017.

MOLISCH, A. F.; RATNAM, V. V.; HAN, S.; LI, Z.; NGUYEN, S. L. H.; LI, L.; HANEDA, K. Hybrid beamforming for massive MIMO: A survey. **IEEE Commun. Mag.**, v. 55, n. 9, p. 134–141, Sep. 2017. ISSN 0163-6804.

MUSA, M.; ELGORASHI, T.; ELMIRGHANI, J. Bounds for energy-efficient survivable ip over wdmnetworks with network coding. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, v. 10, n. 5, p. 471–481, May 2018. ISSN 1943-0620.

NA, W.; PARK, J.; LEE, C.; PARK, K.; KIM, J.; CHO, S. Energy-efficient mobile charging for wireless power transfer in internet of things networks. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 5, n. 1, p. 79–92, Feb. 2018. ISSN 2327-4662.

NOMIKOS, N.; MICHAELIDIS, E. T.; TRAKADAS, P.; VOUYIOUKAS, D.; ZAHARIADIS, T.; KRIKIDIS, I. Flex-NOMA: Exploiting buffer-aided relay selection for massive connectivity in the 5G uplink. **IEEE Access**, v. 7, p. 88743–88755, 2019. ISSN 2169-3536.

PROAKIS, J.G. **Digital Communications**. McGraw-Hill, 2001. (Electrical engineering series). ISBN 9780072321111. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=sbr8QwAACAAJ>.

RAULT, T.; BOUABDALLAH, A.; CHALLAL, Y. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey. **Comput. Networks**, v. 67, p. 104–122, 2014.

RAYEL, O. K.; BRANTE, G.; REBELATTO, J. L.; SOUZA, R. D.; IMRAN, M. A. Energy efficiency-spectral efficiency trade-off of transmit antenna selection. **IEEE Transactions on Communications**, v. 62, n. 12, p. 4293–4303, 2014.

RAYEL, Ohara K.; REBELATTO, João Luiz; SOUZA, Richard Demo; UCHOA-FILHO, Bartolomeu F.; LI, Yonghui. Energy efficiency of network coded cooperative communications in

nakagami-m fading. **IEEE Signal Process. Lett.**, v. 20, n. 10, p. 960–963, Oct. 2013. ISSN 1070-9908.

RAZAVI, B. **Design of Analog CMOS Integrated Circuits**. McGraw-Hill, 2001. (McGraw-Hill series in electrical and computer engineering). ISBN 9780072822588. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=FkMCjwEACAAJ>.

REBELATTO, João Luiz. **Codificação de rede baseada em códigos corretores de erros clássicos**. 2010. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

REBELATTO, João Luiz; SOUZA, Richard Demo; KAIDO, Rodrigo Tsuneyoshi; RAYEL, Ohara Kerasauskas; FILHO, Bartolomeu F. Uchôa. Secrecy outage probability of network-coded cooperative communication. **CoRR**, abs/1406.7858, 2014. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1406.7858>.

REBELATTO, João Luiz; UCHOA-FILHO, Bartolomeu F.; LI, Yonghui; VUCETIC, Branka. Multi-user cooperative diversity through network coding based on classical coding theory. **IEEE Trans. Signal Process.**, v. 60, n. 2, p. 916–926, Feb. 2012.

REDHU, S.; ANUPAM, M.; HEGDE, R. M. Optimal relay node selection for robust data forwarding over time-varying IoT networks. **IEEE Trans. Veh. Technol.**, v. 68, n. 9, p. 9178–9190, Sep. 2019. ISSN 1939-9359.

RENZO, M. Di. On the achievable diversity of repetition-based and relay selection network-coded cooperation. **IEEE Trans. Commun.**, v. 62, n. 7, p. 2296–2313, 2014.

RENZO, M. Di; IEZZI, M.; GRAZIOSI, F. On diversity order and coding gain of multisource multirelay cooperative wireless networks with binary network coding. **IEEE Trans. Veh. Technol.**, v. 62, n. 3, p. 1138–1157, 2013.

ROSAS, F.; SOUZA, R. D.; PELLEZZI, M. E.; OBERLI, C.; BRANTE, G.; VERHELST, M.; POLLIN, S. Optimizing the code rate of energy-constrained wireless communications with harq. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, v. 15, n. 1, p. 191–205, Jan. 2016. ISSN 1536-1276.

RUAN, T.; CHEW, Z. J.; ZHU, M. Energy-aware approaches for energy harvesting powered wireless sensor nodes. **IEEE Sensors J.**, v. 17, n. 7, p. 2165–2173, 2017.

RUIZ, M.; ALVAREZ, E.; SERRANO, A.; GARCIA, E. The convergence between wireless sensor networks and the internet of things; challenges and perspectives: a survey. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 10, p. 4249–4254, Oct. 2016. ISSN 1548-0992.

SCHURGERS, C.; SRIVASTAVA, M. B. Energy efficient wireless scheduling: adaptive loading in time. *In: 2002 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Record. WCNC 2002 (Cat. No.02TH8609). [S.l.: s.n.], 2002. v. 2, p. 706–711 vol.2.*

SENDONARIS, A.; ERKIP, E.; AAZHANG, B. User cooperation diversity: Part I and Part II. **IEEE Trans. Commun.**, v. 51, n. 11, p. 1927–1948, Nov. 2003.

SHENG, Z.; FAN, J.; LIU, C. H.; LEUNG, V. C. M.; LIU, X.; LEUNG, K. K. Energy-efficient relay selection for cooperative relaying in wireless multimedia networks. **IEEE Trans. Veh. Technol.**, v. 64, n. 3, p. 1156–1170, Mar. 2015. ISSN 0018-9545.

SISINNI, E.; SAIFULLAH, A.; HAN, S.; JENNEHAG, U.; GIDLUND, M. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. **IEEE Trans. Ind. Informat.**, v. 14, n. 11, p. 4724–4734, 2018.

STANKOVIC, J. A. Research directions for the internet of things. **IEEE Inter. of Things J.**, v. 1, n. 1, p. 3–9, Feb. 2014. ISSN 2372-2541.

STRANG, G. **Álgebra linear e suas aplicações**. CENGAGE DO BRASIL, 2010. ISBN 9788522107445. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=T8QGAAACAAJ>.

VAEZI, Mojtaba; DING, Zhiguo; POOR, H. Vincent. **Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond**. 1st. ed. [S.l.]: Springer Publishing Company, Incorporated, 2018. ISBN 3319920898.

VERDU, S. Spectral efficiency in the wideband regime. **IEEE Trans. Inf. Theory**, v. 48, n. 6, p. 1319–1343, 2002.

VU, T. X.; DUHAMEL, P.; RENZO, M. Di. On the diversity of network-coded cooperation with decode-and-forward relay selection. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, v. 14, n. 8, p. 4369–4378, Aug. 2015. ISSN 1536-1276.

WANG, Z.; VANDENDORPE, L. Antenna selection for energy efficient MISO systems. **IEEE Commun. Lett.**, v. 21, n. 12, p. 2758–2761, Dec. 2017. ISSN 1089-7798.

XIAO, L.; FUJA, T.; KLIEWER, J.; COSTELLO, D. A network coding approach to cooperative diversity. **IEEE Trans. Inf. Theory**, v. 53, n. 10, p. 3714–3722, Oct. 2007.

XIAO, Ming; SKOGLUND, Mikael. Design of network codes for multiple-user multiple-relay wireless networks. *In: Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory. ISIT'09. [S.l.: s.n.], 2009. p. 2562 – 2566.*

XIAO, Ming; SKOGLUND, Mikael. Multiple-user cooperative communications based on linear network coding. **IEEE Trans. Commun.**, v. 58, n. 12, p. 3345–3351, Dec. 2010.

Y.; CHEN, J.; QIAN, L. P.; HUANG, J.; SHEN, X. S. Energy-aware cooperative traffic offloading via device-to-device cooperations: An analytical approach. **IEEE Trans. Mobile Comput.**, v. 16, n. 1, p. 97–114, Jan. 2017. ISSN 1536-1233.

YETGIN, H.; CHEUNG, K. T. K.; EL-HAJJAR, M.; HANZO, L. H. A survey of network lifetime maximization techniques in wireless sensor networks. **IEEE Commun. Surveys Tuts.**, v. 19, n. 2, p. 828–854, 2017.

ZHANG, Y.; LI, W. W. Energy consumption analysis of a duty cycle wireless sensor network model. **IEEE Access**, v. 7, p. 33405–33413, 2019. ISSN 2169-3536.

ZHOU, Q. F.; ZHAO, L.; PENG, M.; LIU, X.; FAN, L. Tdma-based cooperative nc mac scheme for two-way relaying networks. **IEEE Access**, v. 6, p. 7123–7133, 2018.

APÊNDICES

**APÊNDICE A – PROVA DO TEOREMA 1: DEMONSTRAÇÃO DAS
PROBABILIDADES DE *OUTAGE* PARA O CENÁRIO NCC-MIMO-MRS PARA
ALTA- SNR**

Primeiramente, é obtida a probabilidade dos três casos mencionados em (16), seguindo uma abordagem similar à utilizada na obtenção da probabilidade de *outage* da “estratégia \mathcal{B}_2 ” em (HEIDARPOUR *et al.*, 2019b, Eqs. (69)-(74)).

A.1 PROBABILIDADE DO CASO 1

A probabilidade que todos os N_s pacotes transmitidos por *broadcast* na BP sejam corretamente decodificados pelo Destino é:

$$\begin{aligned} \Pr \{ \mathbf{Caso\ 1} \} &= \Pr \{ n_{\text{sop}} = N_s \} \\ &= \left(1 - \mathcal{O}_S^D \right)^{N_s}, \end{aligned} \quad (27)$$

em que \mathcal{O}_S^D corresponde à probabilidade de *outage* no *link* entre as fontes e o Destino, a qual, para o canal Rayleigh que utiliza a TAS/sch é dada por (18), com $\text{sch} \in \{ \text{MRC}, \text{SC} \}$.

A.2 PROBABILIDADE DO CASO 2

Neste caso, o sistema não estará em falha se o número de pacotes corretamente recebidos no Destino durante a BP, n_{sop} , for menor do que N_s , mas ainda assim o Destino for capaz de receber um número suficiente de pacotes dos *relays* na RP, tal como $l_{\text{op}} \geq N_s - n_{\text{sop}}$ com $l < \mathcal{L}$. A probabilidade desse evento é:

$$\Pr \{ \mathbf{Caso\ 2} \} = \sum_{n_{\text{sop}}=0}^{N_s-1} \Pr \{ \mathcal{E}_{n_{\text{sop}}} \} \sum_{l=0}^{\mathcal{L}-1} \Pr \{ \mathcal{E}_l \} \sum_{l_{\text{op}}=N_s-n_{\text{sop}}}^l \Pr \{ \mathcal{E}_{l_{\text{op}}} \}, \quad (28)$$

em que $\mathcal{E}_{n_{\text{sop}}}$ é o evento em que n_{sop} pacotes são corretamente recuperados pelo Destino após a BP, cuja probabilidade de ocorrência é dada por

$$\Pr \{ \mathcal{E}_{n_{\text{sop}}} \} = \binom{N_s}{n_{\text{sop}}} \left(1 - \mathcal{O}_S^D \right)^{n_{\text{sop}}} \left(\mathcal{O}_S^D \right)^{N_s-n_{\text{sop}}}, \quad (29)$$

enquanto \mathcal{E}_l e $\mathcal{E}_{l_{\text{op}}}$ correspondem, respectivamente, aos eventos $|\mathcal{R}_l| = l$ e o número de pacotes recuperados pelo Destino na RP é igual a l_{op} , cujas probabilidades são obtidas como

$$\Pr \{ \mathcal{E}_l \} = \binom{M_r}{l} \left[\left(1 - \mathcal{O}_S^R \right)^{N_s} \right]^l \left[1 - \left(1 - \mathcal{O}_S^R \right)^{N_s} \right]^{M_r-l} \quad (30)$$

$$\Pr \{ \mathcal{E}_{l_{\text{op}}} \} = \binom{l}{l_{\text{op}}} \left(1 - \mathcal{O}_R^D \right)^{l_{\text{op}}} \left(\mathcal{O}_R^D \right)^{l - l_{\text{op}}}, \quad (31)$$

em que \mathcal{O}_S^R e \mathcal{O}_R^D são obtidas, respectivamente, de (19) e (20). Novamente, pode-se observar que os *relays* não experimentam a diversidade proporcionada pela TAS, pois a melhor antena de transmissão é escolhida a partir da perspectiva do Destino.

A.3 PROBABILIDADE DO CASO 3

Aqui, o sistema não estará em falha se $n_{\text{sop}} < N_s$ e $l_{\text{op}} \geq N_s - n_{\text{sop}}$ com $l \geq \mathcal{L}$. Por conveniência, este caso pode ser dividido em dois subcasos, para $N_s > \mathcal{L}$ e $N_s \leq \mathcal{L}$:

$$\Pr \{ \mathbf{Caso\ 3} \} = \begin{cases} \sum_{n_{\text{sop}}=N_s-\mathcal{L}}^{N_s-1} \Pr \{ \mathcal{E}_{n_{\text{sop}}} \} \sum_{l=\mathcal{L}}^{M_r} \Pr \{ \mathcal{E}_l \} \times \sum_{l_{\text{op}}=N_s-n_{\text{sop}}}^l \Pr \{ \mathcal{E}_{l_{\text{op}}} \}, & N_s > \mathcal{L} \\ \sum_{n_{\text{sop}}=0}^{N_s-1} \Pr \{ \mathcal{E}_{n_{\text{sop}}} \} \sum_{l=\mathcal{L}}^{M_r} \Pr \{ \mathcal{E}_l \} \times \sum_{l_{\text{op}}=N_s-n_{\text{sop}}}^l \Pr \{ \mathcal{E}_{l_{\text{op}}} \}, & N_s \leq \mathcal{L} \end{cases} \quad (32)$$

Assim, a equação da probabilidade de *outage* de (17) é obtida realizando a troca dos termos por (27), (28) e (32) em (16), concluindo a prova.

**APÊNDICE B – NÚMERO EFETIVO DE *RELAYS* SELECIONADOS PARA UM
CENÁRIO DE REGIME EM ALTA-SNR**

O número esperado de *relays* que transmitem na RP pode ser obtido pela média de (30), como

$$\mathbb{E} \{l_{\text{eff}}\} = \sum_{l=0}^{\mathcal{L}-1} l \Pr \{|\mathcal{R}_l| = l\} + \mathcal{L} \overbrace{\sum_{l=\mathcal{L}}^{M_r} \Pr \{|\mathcal{R}_l| = l\}}^{\Pr \{l_{\text{eff}} = \mathcal{L}\}}, \quad (33)$$

em que

$$\Pr \{|\mathcal{R}_l| = l\} = \binom{M_r}{l} \left(1 - \mathcal{O}_S^R\right)^{N_s l} \left[1 - \left(1 - \mathcal{O}_S^R\right)^{N_s}\right]^{M_r - l} \quad (34)$$

é a probabilidade de que o número de *relays* pertencentes ao conjunto \mathcal{R}_l seja igual a l . Depois da expansão de (34), demonstra-se que $\Pr \{|\mathcal{R}_l| = l\} \approx \binom{M_r}{l} \left(N_s \mathcal{O}_S^R\right)^{M_r - l}$ em regime de alta-SNR, o qual, após ser substituído em (33), revela que o termo mais relevante de (33) é $l = M_r$, conduzindo para $\Pr \{l_{\text{eff}} = \mathcal{L}\} = 1$ e, assim, concluindo a prova que $\mathbb{E} \{l_{\text{eff}}\} \approx \mathcal{L}$.

APÊNDICE C – PROVA DO TEOREMA 2

As derivadas da EE em relação a \mathcal{L} para ambos os esquemas, MRC e SC, são:

$$\frac{\partial EE^{\text{MRC}}}{\partial \mathcal{L}} \approx \frac{\partial \Delta}{\partial \mathcal{L}} \frac{N_0 B \xi (2^{\mathcal{R}_0} - 1)}{(n_d!)^{1/n_d} \kappa \eta R_b} + \frac{2P_{\text{syn}} + P_{\text{ctx}} + n_d P_{\text{crx}}}{R_b} \quad (35a)$$

e

$$\frac{\partial EE^{\text{SC}}}{\partial \mathcal{L}} \approx \frac{\partial \Delta}{\partial \mathcal{L}} \frac{N_0 B \xi (2^{\mathcal{R}_0} - 1)}{\kappa \eta R_b} + \frac{2P_{\text{syn}} + P_{\text{ctx}} + P_{\text{crx}}}{R_b}, \quad (35b)$$

em que $\Delta = \left[\frac{1}{\mathcal{O}^*} \left(\frac{N_s}{N_s - \mathcal{L} - 1} \right)^{N_s - \mathcal{L} - 1} \right]^{\frac{1}{n n_d (\mathcal{L} + 1)}}$, sendo $\left(\frac{N_s}{N_s - \mathcal{L} - 1} \right)^{N_s - \mathcal{L} - 1}$ o limitante inferior do termo binominal presente em (21) e (22).

Assim, pode-se escrever $\frac{\partial EE}{\partial \mathcal{L}} = 0$ a fim de encontrar \mathcal{L}^* que minimiza (35a) e (35b).

Simplificando estas equações, obtêm-se

$$\Delta \left[\frac{1 - \log \left| \frac{N_s}{N_s - \mathcal{L} - 1} \right|}{n n_d (\mathcal{L} + 1)} - \frac{1}{\mathcal{L} + 1} \log |\Delta| \right] = -\Theta(n_{rx}). \quad (36)$$

Com o objetivo de simplificar a solução e considerando $N_s > \mathcal{L}$, é possível fazer $\log \left| \frac{N_s}{N_s - \mathcal{L} - 1} \right| \approx 0$. Além disso, pode-se considerar $\frac{1}{n n_d} \ll \log |\Delta|$ para o caso de uma baixa probabilidade de *outage*, juntamente com pequenos valores para \mathcal{L} . Por fim, pode-se aproximar $\frac{1}{\mathcal{L} + 1}$ para uma constante utilizando o método dos mínimos quadrados (STRANG, 2010). Logo, tem-se:

$$\frac{\Delta}{\mathcal{L} + 1} \left[\frac{1}{n n_d} - \log |\Delta| \right] \approx -\Delta \delta \log |\Delta|, \quad (37)$$

de tal modo que o erro quadrático médio é minimizado no intervalo $\mathcal{L} \in [1, N_s - 1]$, pois a probabilidade de *outage* depende apenas do parâmetro \mathcal{L} nesse intervalo.

Solucionando (37), tem-se:

$$\log \left| \left[\frac{1}{\mathcal{O}^*} \left(\frac{N_s}{N_s - \mathcal{L} - 1} \right)^{N_s - \mathcal{L} - 1} \right]^{\frac{1}{n n_d (\mathcal{L} + 1)}} \right| = W \left(-\frac{\Theta(n_{rx})}{\delta} \right). \quad (38)$$

Assim, aproximando $\left(\frac{N_s}{N_s - \mathcal{L} - 1} \right)^{\frac{N_s - \mathcal{L} - 1}{\mathcal{L} + 1}}$ para uma constante pelo mesmo processo utilizado para obter (37), pode-se encontrar o valor ótimo de \mathcal{L} como escrito em (24), concluindo, desta forma, a prova.

APÊNDICE D – NÚMERO EFETIVO DE *RELAYS* SELECIONADOS PARA UM CENÁRIO DE REGIME EM ALTA-SNR CONSIDERANDO A INC-MRS

Considerando o caso INC-MRS, conforme descrito na Seção 4.1, a probabilidade de l_{eff} *relays* transmitirem na RP depende das seguintes condições:

1. O Destino não foi capaz de recuperar as N_s mensagens das fontes na BP. O número de falhas deve ser condizente com l_{eff} , ou seja, $n_{\text{sop}} = N_s - l_{\text{eff}}$;
2. O número de *relays* que conseguiram decodificar todos os pacotes das fontes na BP não pode ser menor que l_{eff} , $|\mathcal{R}_l| \geq l_{\text{eff}}$;
3. Por fim, o número de mensagens que devem ser recebidas corretamente vindas dos *relays* para que o Destino não esteja mais em falha deve ser igual ou superior a l_{eff} , assim $l_{\text{op}} \geq l_{\text{eff}}$;

Portanto, a probabilidade de ocorrência de que l_{eff} mensagens sejam transmitidas pelos *relays* na RP ($\Pr \{l_{\text{eff}}\}$) pode ser escrita a partir de (29), (30) e (31). O resultado é:

$$\Pr \{ \mathcal{E}_{l_{\text{eff}}} \}_{l_{\text{eff}} \leq N_s} = \Pr \{ \mathcal{E}_{n_{\text{sop}}} \}_{n_{\text{sop}} = N_s - l_{\text{eff}}} \cdot \sum_{l=l_{\text{eff}}}^{M_r} \Pr \{ \mathcal{E}_l \} \cdot \sum_{l_{\text{op}}=l_{\text{eff}}}^l \Pr \{ \mathcal{E}_{l_{\text{op}}} \} \quad (39a)$$

e

$$\Pr \{ \mathcal{E}_{l_{\text{eff}}} \}_{l_{\text{eff}} > N_s} = \Pr \{ \mathcal{E}_{n_{\text{sop}}} \}_{n_{\text{sop}} = 0} \cdot \sum_{l=l_{\text{eff}}}^{M_r} \Pr \{ \mathcal{E}_l \} \cdot \sum_{l_{\text{op}}=l_{\text{eff}}}^l \Pr \{ \mathcal{E}_{l_{\text{op}}} \}, \quad (39b)$$

em que $\mathcal{E}_{l_{\text{eff}}}$ é o evento de que o número de pacotes efetivamente enviados para o Destino na RP seja l_{eff} .

Logo, o número esperado de *relays* pode ser deduzido a partir de (39) como

$$\mathbb{E} \{ l_{\text{eff}} \} = \sum_{l_{\text{eff}}=0}^{\mathcal{L}} l_{\text{eff}} \cdot \Pr \{ \mathcal{E}_{l_{\text{eff}}} \}. \quad (40)$$

Por fim, para o caso de alta-SNR, a tendência é que, ao final da BP, o Destino não esteja mais em falha, logo, $\mathbb{E} \{ l_{\text{eff}} \} \approx 0$, concluindo, assim, a prova.