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

GUILHERME DE SANTI PERON

ESQUEMAS DE COMUNICAÇÃO COOPERATIVA COM MÚLTIPLOS *RELAYS* E MÚLTIPLAS ANTENAS VISANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

TESE

CURITIBA
2017

GUILHERME DE SANTI PERON

ESQUEMAS DE COMUNICAÇÃO COOPERATIVA COM MÚLTIPLOS *RELAYS* E MÚLTIPLAS ANTENAS VISANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de "Doutor em Ciências" – Área de Concentração: Telecomunicações e Redes.

Orientador: Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante

Coorientador: Prof. Dr. Richard Demo Souza

CURITIBA
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

P453e 2017

Peron, Guilherme de Santi
Esquemas de comunicação cooperativa com múltiplos relays e múltiplas antenas visando a eficiência energética / Guilherme de Santi Peron.-- 2017.
95 f. : il. ; 30 cm.

Texto em português com resumo em inglês
Disponível também via World Wide Web
Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2017
Bibliografia: f. 84-90

1. Energia – Consumo. 2. Redes de sensores sem fio – Consumo de energia. 3. Sistemas de comunicação sem fio – Consumo de energia. 4. Antenas (Eletrônica) – Consumo de energia – Simulação por computador. 5. Engenharia elétrica – Teses. I. Brante, Glauber Gomes de Oliveira. II. Souza, Richard Demo. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 22 – 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Câmpus Curitiba

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

Título da Tese Nº. ____

Esquemas de Comunicação Cooperativa com Múltiplos Relays e Múltiplas Antenas Visando a Eficiência Energética

por

Guilherme de Santi Peron

Orientador: Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante (UTFPR)
Coorientador: Prof. Dr. Richard Demo Souza (UFSC)

Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do título de DOUTOR EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Telecomunicações e Redes pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 09h30 do dia 26 de maio de 2017. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos doutores:

Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante
(Presidente – UTFPR)

Prof. Dr. Mário de Noronha Neto
(IFSC)

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Pellenz
(PUCPR)

Prof. Dr. André Augusto Mariano
(UFPR/ UTFPR)

Prof. Dr. Guilherme Luiz Moritz
(UTFPR)

Visto da Coordenação:

Prof. Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

Às memórias de meus avós Sílvio e Iracema, e meus tios Hélio e Gentil que tiveram suas vidas interrompidas precocemente.

Às memórias de meu avô Antenor e meu tio Laécio que infelizmente partiram há pouco tempo.

Todos estarão sempre presentes em meu coração.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela oportunidade de estudar em uma instituição de ensino da qualidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais, Antenor e Maria, por terem me incentivado a estudar por toda a minha vida e estarem sempre presentes.

Ao meu orientador, amigo e conselheiro Glauber, que sempre com muita boa vontade e com suas excelentes ideias me auxiliou em todo o processo acadêmico desde o começo até a elaboração deste trabalho. Além do seu esforço e paciência, para tornar seus alunos em ótimos pesquisadores. Sem contar as inúmeras vezes em que me deu sugestões para a carreira profissional. Agradeço ainda ao coorientador Richard que também sempre ajudou em todos os momentos necessários.

Agradeço aos colegas pesquisadores do Laboratório de Sistemas de Comunicação Sem Fio que me auxiliaram no processo de aprendizado, pelas discussões científicas, cooperação nas atividades, convivência e conversas corriqueiras.

Por fim, agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial pela oportunidade de participar deste programa de Doutorado.

Agir, eis a inteligência verdadeira. Serei o que quiser. Mas tenho que querer o que for. O êxito está em ter êxito, e não em ter condições de êxito. Condições de palácio tem qualquer terra larga, mas onde estará o palácio se não o fizerem ali?

(Fernando Pessoa)

RESUMO

PERON, Guilherme de Santi. Esquemas de Comunicação Cooperativa com Múltiplos *Relays* e Múltiplas Antenas Visando a Eficiência Energética. 95 f. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Redes de sensores sem fio geralmente são compostas por dispositivos que demandam qualidade de transmissão, porém com energia limitada. Desta condição, surge a necessidade do estudo da eficiência energética. Neste documento são apresentadas e comparadas algumas técnicas para melhorar a eficiência energética que englobam o uso da diversidade, tais como o uso de múltiplas antenas no transmissor e receptor bem como o uso de comunicação cooperativa, esta última melhor aproveitada quando um canal de retorno está disponível. São abordados dois modelos de comunicação. No primeiro cenário, apenas a camada física é levada em conta em uma rede MIMO cooperativa com múltiplos *relays*, em que é proposto um algoritmo distribuído iterativo de alocação de potência baseado no algoritmo de Dinkelbach visando a maximização da eficiência energética. Os resultados demonstram que o uso de múltiplas antenas melhora a eficiência energética, mas que dependendo da técnica MIMO utilizada, o número de *relays* e o número de antenas podem levar a efeitos diferentes em termos de eficiência energética. Em seguida, é apresentado um cenário que envolve a camada física e a camada de controle de acesso ao meio (MAC), no qual propõe-se um protocolo MAC cooperativo distribuído. Neste caso, além da energia utilizada para transmitir os pacotes de dados, também é analisado o atraso e o consumo para acessar o canal. Pelos resultados obtidos, nota-se que as técnicas MIMO aumentam a eficiência energética em relação ao caso SISO, das quais pode-se destacar a seleção de antenas. Além disso, outros parâmetros, tais como densidade de nós, eficiência espectral, número de antenas e distância entre nós, são analisados em termos de eficiência energética.

Palavras-chave: Eficiência energética, múltiplas antenas, comunicação cooperativa, redes de sensores sem fio, análise multicamadas, protocolos MAC

ABSTRACT

PERON, Guilherme de Santi. Cooperative Communication Schemes with Multiple Relays and Multiple Antennas Aiming Energy Efficiency. 95 f. Thesis – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Wireless sensor networks are usually composed of devices that require transmission quality, but with limited energy. From this condition arises the necessity of the energy efficiency study. In this document, we present and compare some techniques to improve the energy efficiency, which include the use of diversity, such as the use of multiple antennas in the transmitter and receiver as well as the use of cooperative communication. The latter has better results when a feedback channel is available. We cover two communication scenarios. In the first scenario, only the physical layer is taken into account in a MIMO cooperative network with multiple relays, where we propose a power allocation distributed iterative algorithm based on the Dinkelbach's algorithm aiming at the energy efficiency maximization. The results show that the use of multiple antennas improve the energy efficiency, but depending on the used MIMO transmission scheme, the number of relays and the number of antennas can lead to different effects with respect to the energy efficiency. In the following, we present a scenario that contains a cross-layer analysis encompassing physical and medim access control (MAC) layers in a cooperative MIMO network, where we propose a distributed cooperative MAC protocol. In this case, besides the energy used to transmit thte data packets, we also analyze the delay and energy consumption to access the channel. Results show that the MIMO techniques improve the energy efficiency when we compare to SISO, especially when employing antenna selection techniques. In addition, other parameters, such as node density, spectral efficiency, number of antennas and distance between nodes, are analyzed with respect to the energy efficiency.

Keywords: Energy efficiency, MIMO, cooperative communications, wireless sensor networks, cross-layer analysis, MAC protocols

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Modelo do sistema da Rede Sem Fio MIMO Cooperativa com Múltiplos *Relays* 23
FIGURA 2 – Probabilidade de *outage* dos esquemas cooperativos com múltiplos *relays* SISO, AS e SVD 38
FIGURA 3 – Eficiência energética dos esquemas cooperativos SISO, AS e SVD .. 39
FIGURA 4 – Número de laços de iteração do algoritmo D-IPA em função de d_{SD} 40
FIGURA 5 – Número de iterações do algoritmo D-IPA em função do número de antenas e do número de *relays* 40
FIGURA 6 – Eficiência energética dos esquemas SISO, AS e SVD para $0 \leq K \leq 10$ *relays* 42
FIGURA 7 – Eficiência energética dos esquemas SISO, AS e SVD cooperativos variando-se a posição dos *relays* 43
FIGURA 8 – Máxima eficiência energética dos esquemas AS e SVD em função do número de antenas 43
FIGURA 9 – Número ótimo de *relays* que maximiza a eficiência energética dos esquemas AS e SVD em função do número de antenas 44
FIGURA 10 – Máxima eficiência energética dos esquemas AS e SVD em função da distância otimizando o número de *relays* 44
FIGURA 11 – Eficiência energética do esquema AS em função do número de antenas e do número de *relays* 45
FIGURA 12 – Eficiência energética do esquema SVD em função do número de antenas e do número de *relays* 46
FIGURA 13 – Modelo do sistema da Rede MIMO Multicamada 53
FIGURA 14 – Modelo do protocolo MAC proposto 61
FIGURA 15 – Probabilidade de *outage* dos esquemas dos esquemas SISO, AS, SVD e SM 72
FIGURA 16 – Atraso médio dos esquemas dos esquemas SISO, AS, SVD e SM ... 73
FIGURA 17 – Gasto energético médio dos esquemas dos esquemas SISO, AS, SVD e SM 74
FIGURA 18 – Vazão fim-a-fim dos esquemas SISO, AS, SM e SVD 75
FIGURA 19 – Eficiência energética dos esquemas SISO, AS, SM e SVD em função da potência de transmissão. 76
FIGURA 20 – Eficiência energética dos esquemas SISO, AS, SM e SVD em função da densidade dos nós 77
FIGURA 21 – Eficiência energética dos esquemas SISO, AS, SM e SVD em função da eficiência espectral 77
FIGURA 22 – Eficiência energética dos esquemas SISO, AS, SM e SVD em função da distância do enlace fonte-destino e do número de antenas 78

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Parâmetros de Sistema do Cenário MIMO Cooperativo 37
TABELA 2 – Número de Passos Para Cada Algoritmo 41
TABELA 3 – Resumo dos trabalhos relacionados 51
TABELA 4 – Parâmetros de Sistema do Modelo Multicamada 71

LISTA DE SIGLAS

ALOHA	*Additive Links On-line Hawaii Area*
ARS	*Access Request Sequence*
AS	*Antenna Selection*
CDF	*Cumulative Density Function*
CDI	*Channel Direction Indicator*
CFR	*Channel Feedback Report*
CQI	*Channel Quality Indicator*
CRQ	*Contention Resolution Queue*
CSI	*Channel State Information*
CSMA-CA	*Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance*
CSMA	*Carrier Sense Multiple Access*
CTS	*Clear-To-Send*
D-IPA	*Distributed Iterative Power Allocation*
DCF	*Distributed Coordination Function*
DQ	*Distributed Queueing*
DTQ	*Data Transmission Queue*
FIFO	*First-In First-Out*
HARQ	*Hybrid Automatic Repeat Request*
hRTS	*helper Request-To-Send*
IDF	*Incremental Decode-and-Forward*
IoT	*Internet of Things*
M2M	*Machine-to-Machine*
MAC	*Medium Access Control*
MIMO	*Multiple Input Multiple Output*
MRC	*Maximal Ratio Combining*
NAV	*Network Activity Vector*
NDP	*Null Data Packet*
NDPA	*Null Data Packet Announcement*
PDF	*Probability Density Function*
PHY	*Physical Layer*
RF	Radiofrequência
RFR	*Request-For-Retransmission*
RTS	*Request-To-Send*
SC	*Selection Combining*
SISO	*Single Input Single Output*
SM	*Spatial Multiplexing*
SNR	*Signal-to-Noise Ratio*
SVD	*Singular Value Decomposition*
WSN	*Wireless Sensors Networks*

LISTA DE SÍMBOLOS

S	Nó Fonte
D	Nó Destino
R_r	Nó *Relay*
$\mathcal{N}_{\mathrm{S}}$	Número Total de Antenas na Fonte
$\mathcal{N}_{\mathrm{R}_r}$	Número Total de Antenas nos *Relays*
$\mathcal{N}_{\mathrm{D}}$	Número Total de Antenas no Destino
n_{S}	Número de Antenas Ativas na Fonte
n_{R_r}	Número de Antenas Ativas nos *Relays*
n_{D}	Número de Antenas Ativas no Destino
P_i	Potência do Nó i
κ_{ij}	Relação do *Link Budget* no Enlace i-j
$\mathbf{H}_{ij}$	Matriz dos Ganhos de Canal Quase-Estáticos
$\mathbf{x}[l]$	Vetor do Quadro Transmitido por Unidade de Energia
$\mathbf{w}_j[l]$	Vetor das Variáveis Gaussianas Aleatórias Complexas
N_0	Densidade Espectral de Potência do Ruído Térmico Unilateral
c	Velocidade da Luz no Vácuo
G	Ganho Total da Antena
f_c	Frequência da Portadora
d_{ij}	Distância entre os Nós i e j
ν	Expoente de Perda de Percurso
M_l	Margem de Enlace
N_f	Figura do Ruído no Receptor
$\|.\|_{\mathrm{F}}$	Norma de Frobenius
$\bar{\gamma}_{ij}$	SNR Média por Antena de Transmissão Ativa
N	Potência do Ruído
B	Largura de Banda
I_{ij}	Informação Mútua
ξ	Eficiência Espectral
K	Quantidade de *Relays* Disponíveis
k	Quantidade de *Relays* Que Recebem o Pacote Corretamente da Fonte
$\mathcal{R}$	Conjunto das SNRs Instantâneas dos Enlaces *Relay*-Destino
$\mathcal{H}$	Subconjunto das SNRs Instantâneas dos Enlaces *Relay*-Destino Se R_r Decodificou Corretamente
$\|.\|$	Cardinalidade do Conjunto
$\Pr\{\cdot\}$	Probabilidade de Ocorrência de um Dado Evento
P_{drop}	Probabilidade de Perda de um Pacote
$\mathcal{P}_{\mathrm{broad}}$	Consumo Total de Potência na Fase de Difusão
ψ	Energia Gasta no Amplificador de Potência
P_{TX}	Consumo dos Circuitos de Transmissão
P_{RX}	Consumo dos Circuitos de Recepção
φ	Constantes da Potência de Transmissão Direta

$\mathcal{P}_{\text{retr}}$	Potência da Retransmissão
Υ	Constante Referente à Transmissão Total
η_{E}	Eficiência Energética
$P_{\max}$	Potência de Transmissão Máxima
P_{drop}	Probabilidade de Perda do Pacote
ε	Probabilidade Alvo de Perda de Pacote
$q^{\star}$	Valor Ótimo da Função Objetivo
$\tilde{P}_{\text{S}}$	Potência Alocada na Fonte Sem Observar a Restrição de Potência Máxima
$P_{\text{S}}^{\star}$	Potência Alocada na Fonte Observando a Restrição de Potência Máxima
P_0	Mínima Potência Utilizada pelo *Relay*
$\tilde{P}_{\text{R}}$	Potência Alocada no *Relay* Sem Observar a Restrição de Potência Máxima
$P_{\text{R}}^{\star}$	Potência Alocada no *Relay* Observando a Restrição de Potência Máxima
$\mathcal{N}_{\text{R}}$	Número Total de Antenas no *Relay*
a	Nó Auxiliar
T_{hRTS}	Tempo para Transmitir o Pacote de Controle hRTS
P_{th}	Mínima Potência de Contenção
μ	Densidade de Distribuição dos Nós
n	Número de Nós Competidores com o Nó Transmissor
R_{control}	Taxa para Envio de Mensagens do Protocolo MAC
R_d	Taxa para Envio de Mensagens da Camada Física
$E[X]$	Número Médio de Contagens de *Backoff*
$E[L]$	Tempo Médio para Decrementar o Contador de *Backoff*
T_{c}	Tempo Consumido Quando Pacotes RTS Colidem
p	Probabilidade de Colisão Quando um Nó Transmite um Pacote
$T_{\text{MAC}}^{(\text{dir})}$	Sobrecarga do Protocolo MAC para a Transmissão Direta
$T_{\text{MAC}}^{(\text{coop})}$	Sobrecarga do Protocolo MAC para a Transmissão Cooperativa
T_{RTS}	Tempo para Transmitir RTS
T_{CTS}	Tempo para Transmitir CTS
T_{NDP}	Tempo para Transmitir NDP
T_{CFR}	Tempo para Transmitir CFR
T_{RFR}	Tempo para Transmitir RFR
T_{ACK}	Tempo para Transmitir ACK
T_{sACK}	Tempo para Transmitir sACK
$2T_{\text{hRTS}}$	Tempo Gasto para Seleção do Nó Auxiliar
δ	Atraso de Propagação
T_{SIFS}	Tempo Necessário para Qualquer Nó Processar um Quadro Recebido
T_{DIFS}	Tempo para Perceber o Estado do Canal Antes de Transmitir
p_{tr}	Probabilidade que Exista Pelo Menos uma Transmissão em Curso
p_{s}	Probabilidade Condicional de que uma Transmissão Ocorrendo Tenha Sucesso
τ	Probabilidade de que um Nó Transmita um Pacote em um Tempo Aleatório
$W_{\min}$	Tamanho Mínimo da Janela de Contenção
$W_{\max}$	Tamanho Máximo da Janela de Contenção
q	Razão de Saturação da Rede
W_i	Tamanho da Janela de *Backoff* Depois da i-ésima Colisão
σ	Duração de Tempo para Diminuir o Contador de *Backoff*

T_{s}	Tempo Consumido para Diminuir o Contador de *Backoff* por Um Quando Há Sucesso
T_{c}	Tempo Consumido para Diminuir o Contador de *Backoff* por Um Quando Há Colisão
$\mathrm{NDP}_{\mathrm{base}}$	Parte Fixa do Pacote NDP
$\mathrm{NDP}_{\mathrm{var}}$	Parte Variável do Pacote NDP
$\mathrm{CFR}_{\mathrm{base}}$	Parte Fixa do Pacote CFR
$\bar{D}$	Atraso Médio Total
$\mathcal{T}$	Vazão Fim-a-Fim
E_{await}	Energia Gasta para Escutar os Pacotes Transmitidos por Outros Nós Enquanto o Contador de *Backoff* Não Se Expire
E_{access}	Energia Consumida pelas Tentativas do Acesso ao Canal
E_{await}	Consumo Energético Para Espera da Camada MAC
$\cdot^*$	Matriz Conjugada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
2 ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA DISTRIBUÍDA EFICIENTE COM MÚLTIPLOS *RELAYS* E SELEÇÃO DE ANTENAS 20
2.1 MODELO DO SISTEMA 22
2.2 MÉTRICAS DE DESEMPENHO 24
2.2.1 Probabilidade de *Outage* 24
2.2.2 Vazão Fim-a-fim e Eficiência Energética 25
2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS ESQUEMAS DE TRANSMISSÃO MIMO COOPERATIVOS 27
2.3.1 Antena Única (SISO) 27
2.3.2 Seleção de Antenas (AS) 28
2.3.3 Decomposição por Valores Singulares (SVD) 29
2.4 MÉTODO PROPOSTO PARA ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA DISTRIBUÍDA PARA ESQUEMAS DE TRANSMISSÃO MIMO 30
2.4.1 Algoritmo de Alocação de Potência Iterativo Distribuído (D-IPA) 30
2.4.2 Análise de Convergência e Complexidade do Algoritmo Proposto 34
2.5 RESULTADOS NUMÉRICOS 37
2.6 COMENTÁRIOS FINAIS 46
3 ANÁLISE DE REDES MIMO VISANDO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ANALISANDO CAMADAS FÍSICA E MAC 48
3.1 MODELO DO SISTEMA 51
3.1.1 Camada Física 52
3.1.2 Protocolo MAC 53
3.1.3 Modelo de Consumo de Potência 54
3.2 PROBABILIDADE DE *OUTAGE* 55
3.3 ESQUEMAS DE TRANSMISSÃO 56
3.3.1 Antena Única (SISO) 56
3.3.2 Seleção de Antenas (AS) 57
3.3.3 Multiplexação Espacial (SM) 57
3.3.4 Decomposição Por Valores Singulares (SVD) 58
3.4 PROTOCOLO MAC COOPERATIVO PROPOSTO 59
3.4.1 Atraso do Protocolo MAC 61
3.4.2 Atraso para Estimação do Canal 64
3.4.3 Atraso da Camada Física 66
3.4.4 Atraso do Total do Pacote e Vazão fim-a-fim 66
3.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA 67
3.5.1 Consumo Energético na Camada Física 68
3.5.2 Consumo de Energia do Protocolo MAC 68
3.5.3 Energia Média Consumida e Eficiência Energética 69
3.5.4 Maximização da Eficiência Energética 70

3.6 RESULTADOS NUMÉRICOS 70
3.6.1 Potência de Transmissão Fixa 70
3.6.2 Otimização da Potência 74
3.7 COMENTÁRIOS FINAIS 76
4 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS 80
REFERÊNCIAS 85
Apêndice A – PROVA DAS EQUAÇÕES DAS PROBABILIDADES DE *OUTAGE* 92
A.1 PROVA DA PROBABILIDADE DO MRC PARA O ESQUEMA SISO ($p_{\mathrm{SRD,SISO}}(k)$) 92
A.2 PROVA DAS PROBABILIDADES DOS ENLACES FONTE-DESTINO E FONTE-*RELAY* PARA O ESQUEMA SVD ($p_{\mathrm{SD,SVD}}$ E $p_{\mathrm{SR,SVD}}$) 94
A.3 PROVA DA PROBABILIDADE DO MRC PARA O ESQUEMA SVD ($p_{\mathrm{SRD,SVD}}(k)$) 95

1 INTRODUÇÃO

Em virtude da facilidade de instalação, bem como flexibilidade e mobilidade, a comunicação sem fio é o segmento que mais cresce na indústria de telecomunicações (GOLDSMITH, 2005). Este nicho de mercado compreende tecnologias amplamente difundidas que podem ser exemplificadas por redes de celulares, transmissão de televisão e rádio digital, redes locais sem fio WiFi, redes metropolitanas sem fio WiMax, a tecnologia *Zigbee*, a tecnologia *Bluetooth*, além de satélites de comunicação. Cada vez mais os usuários demandam qualidade, cobertura e autonomia.

O modelo da comunicação sem fio se difere em relação ao modelo da comunicação com fio basicamente pela natureza do canal. O canal sem fio é um meio de comunicação imprevisível e complexo, em que o espectro é limitado e regulamentado regional e mundialmente. Além disto, o sinal pode sofrer flutuações aleatórias, podendo haver mudanças por reflexão e atenuação, uma vez que o transmissor, receptor ou objetos do meio podem se movimentar (GOLDSMITH, 2005). Estas flutuações, bem como obstáculos na linha de visada, podem causar distorções no sinal recebido, como o desvanecimento (RAPPAPORT, 2002).

Para combater os efeitos do desvanecimento, são utilizadas algumas técnicas como o uso da diversidade (GOLDSMITH, 2005). O tipo mais comum da diversidade é a espacial, cuja exploração decorre do fato de que se um sinal percorre caminhos independentes, a probabilidade de ocorrer desvanecimento simultâneo diminui. Tal diversidade pode ser alcançada tanto por meio do uso de múltiplas antenas de transmissão e recepção, do inglês *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) (ALAMOUTI, 1998; WOLNIANSKY et al., 1998; FOSCHINI, 1996; FREITAS-JR et al., 2005), quanto por esquemas de comunicação cooperativa (LANEMAN et al., 2004; SENDONARIS et al., 2003; NOSRATINIA et al., 2004).

Os sistemas MIMO podem melhorar consideravelmente a relação sinal-ruído, do inglês *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), se comparados aos sistemas de uma única antena, do

inglês *Single Input Single Output* (SISO), por causa dos ganhos de diversidade espacial (GOLDSMITH, 2005). Portanto, o uso de técnicas MIMO pode demandar menos potência de transmissão que o SISO para o mesmo requisito de desempenho. Por outro lado, apesar dos benefícios em termos de potência de transmissão, quando o número de antenas é aumentado, o número de circuitos de radiofrequência (RF) também cresce. Logo, a potência de transmissão necessária pelos sistemas MIMO pode ser reduzido, mas acompanhado por um aumento de consumo de energia dos circuitos. Como consequência, a vantagem de técnicas MIMO sobre SISO não é sempre tão evidente para comunicações de curto alcance (CUI et al., 2004).

Outra forma de melhorar a eficiência energética de redes sem fio é por meio de comunicações cooperativas (LANEMAN et al., 2004). Entretanto, tais técnicas possuem a mesma desvantagem que os esquemas MIMO em relação ao consumo dos circuitos, que também aumenta com o número de nós envolvidos no processo de comunicação. Algumas limitações de desempenho de protocolos cooperativos em relação ao consumo dos circuitos foram discutidos em (STANOJEV et al., 2009; SADEK et al., 2009; BRANTE et al., 2011). Foi mostrado que o consumo de potência pode ser maior em comunicações cooperativas, quando comparado com a transmissão direta, para pequenas distâncias de transmissão devido ao consumo dos circuitos dos nós adicionais.

Um outro fator de grande importância em redes sem fio é a redução de potência de transmissão, que reduz a interferência em estações vizinhas e diminui custos de fabricação e operação. Quando uma rede de sensores sem fio é considerada, os nós transmissores são dispositivos alimentados por meio de uma bateria, devido às limitações de tamanho e custo.

Visando buscar uma melhor qualidade de transmissão, buscam-se sistemas de comunicação com alta capacidade de transmissão consumindo a menor energia possível, ou seja, procura-se alta eficiência energética. Na literatura, a eficiência energética foi investigada extensivamente para os esquemas cooperativos e MIMO. Por exemplo, um esquema para uma seleção de *relays* energeticamente eficientes foi dado em (MADAN et al., 2008), onde os autores mostraram que o número de *relays* ativos precisa ser otimizado a fim de maximizar a eficiência energética. Além disso, (HELIOT et al., 2012) discutiu a relação de troca entre energia e eficiência espectral para um canal MIMO Rayleigh, onde foi mostrado que múltiplas antenas, quando utilizadas para prover ganhos de multiplexação espacial, podem ser menos eficientes energeticamente que transmissões SISO. Em (LI et al., 2014a, 2014b) outro esquema de alocação de potência eficiente em

relação à energia para uma rede cooperativa MIMO foi estudado. A técnica adotada foi dividir o canal MIMO em vários subcanais SISO, de modo que a alocação de potência pudesse ser realizada. Recentemente, (RAYEL et al., 2014) mostrou que o uso de seleção de antenas, do inglês *antenna selection* (AS), como uma técnica de diversidade pode produzir uma eficiência energética muito maior que a multiplexação espacial MIMO e outros esquemas de diversidade, enquanto é mais eficiente que transmissões com uma antena apenas. Já (ZHANG et al., 2015a) estabelece uma rede MIMO de rádio cognitivo, em que os usuários secundários coexistem com um usuário primário. Os autores propõem alocação de potência e *beamforming* na transmissão para maximizar a eficiência energética, através de programação fracionária. O *beamforming* é uma técnica de pré-codificação que permite combinar os elementos de fase no transmissor, tal que haja interferência construtiva na direção do receptor. Em (ROSAS; OBERLI, 2015) é comparada a eficiência energética em um enlace de comunicação MIMO utilizando *beamforming* e quando o transmissor conhece o estado instantâneo do canal. Os resultados demonstram que para grandes distâncias o sistema é mais eficiente energeticamente com grandes vetores de antenas, enquanto que para pequenas distâncias ele se comporta melhor para pequenos vetores de antenas. Uma relação de troca entre energia e eficiência da largura de banda é mostrada em (CHEN et al., 2011) para uma rede MIMO com múltiplos saltos, investigando a menor energia para *relays* igualmente espaçados, enquanto em (TANG et al., 2016) os autores propõem um algoritmo de alocação de recursos para chegar a uma relação de troca ótima entre eficiência energética e eficiência espectral. Por fim, em (LE et al., 2015) os autores estudam a eficiência energética de seleção de antenas em canais com desvanecimento Nakagami-m, onde os resultados mostram que a seleção de antenas oferece melhor desempenho quando comparada ao sistema SISO.

Assim, sob o ponto de vista MIMO, AS pode ser uma solução interessante para aumentar a eficiência energética de técnicas de diversidade MIMO. Por exemplo, em (BATABYAL; DAS, 2015) os autores desenvolveram um algoritmo para seleção de antenas com o objetivo de melhorar a eficiência energética, que fornece uma complexidade muito baixa se comparado a outros métodos na literatura. Ademais, (DENG et al., 2015) derivou expressões na forma fechada para a probabilidade de *outage*, taxa de erro de símbolo e capacidade ergótica de um esquema de seleção de antenas de transmissão operando sob um cenário cognitivo com *relay* que utiliza o método *decode-and-forward* sujeito ao desvanecimento Nakagami-m. Em (SONG et al., 2014), um esquema conjunto de seleção de *relays* e antena em canais Nakagami-m foi proposto, mostrando que o AS alcança ordem de diversidade completa. Os autores em (LE et al., 2016) comparam abordagens

diferentes de seleção de antenas em um modelo MIMO-OFDM, propondo um método de seleção de antenas adaptativo eficiente. Resumindo, a vantagem das técnicas de AS em termos de eficiência energética advém do fato de que somente um circuito de RF permanece ativo para a transmissão ou recepção, consumindo menos potência ao mesmo tempo em que a diversidade espacial é provida através das múltiplas antenas. Se somente o desempenho de *outage* é considerado, a seleção de antenas é uma estratégia subótima; entretanto, isto pode ser compensado por um consumo dos circuitos de RF menor quando a eficiência energética é levada em conta.

Nesta tese, são abordadas algumas técnicas de diversidade que visam eficiência energética em uma rede de sensores sem fio, do inglês *Wireless Sensors Networks* (WSN). Normalmente, essas redes possuem uma grande quantidade de nós com características mais restritas quanto ao consumo de energia. Nós sensores são, em geral, alimentados por uma bateria cuja recarga ou substituição é em muitos casos indesejável, inviável ou até impossível. Assim, tendo em vista que através do uso da diversidade espacial, por meio de esquemas MIMO e da comunicação cooperativa, pode-se reduzir a potência de transmissão das redes sem fio e, consequentemente, o consumo de energia, melhorando a eficiência energética. No Capítulo 2 é proposto um sistema MIMO com múltiplos *relays* utilizando um método de alocação de potência distribuído para maximizar a eficiência energética. O método de alocação de potência utiliza um algoritmo iterativo baseado em programação fracionária que sempre converge para o ponto ótimo. Neste capítulo, é levada em conta somente a camada física. O artigo (PERON et al., 2015) contempla parte do que será apresentado neste capítulo. No Capítulo 3 por sua vez, além das múltiplas antenas e comunicação cooperativa é considerado um cenário multicamada, ou seja, é realizada a análise levando-se em conta não somente a camada física mas também camada de controle de acesso ao meio, do inglês *medium access control* (MAC). Os resultados apresentados neste capítulo estão em fase final de preparação para serem submetidos. Em ambos os cenários a eficiência energética é o foco principal, mas há também outras métricas auxiliares. Já o trabalho (PERON et al., 2016) foi um estudo prévio do realizado neste capítulo. Por fim, o Capítulo 4 apresenta as propostas de trabalhos futuros e conclui a tese.

2 ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA DISTRIBUÍDA EFICIENTE COM MÚLTIPLOS *RELAYS* E SELEÇÃO DE ANTENAS

Como redes MIMO e múltiplos *relays* foram o foco na Introdução, o foco neste capítulo é na aplicação de técnicas de alocação de potência, que também é comumente utilizada para melhorar a eficiência energética, por exemplo, como em (JUNG et al., 2012; CAO et al., 2013; NAEEM et al., 2013; BRANTE et al., 2013). Um esquema de alocação de potência de busca exaustiva foi proposto em (JUNG et al., 2012) para comunicação dispositivo-a-dispositivo. Os resultados mostram melhoras em termos de eficiência energética; entretanto, a abordagem é computacionalmente complexa, uma vez que a busca exaustiva é realizada em todos os nós e todos os modos de operação. Outro esquema de alocação de potência foi proposto em (CAO et al., 2013) empregando um método de barganha entre os múltiplos usuários a fim de estabelecer as prioridades de transmissão. Tanto a abordagem centralizada quanto a distribuída foram propostas e a solução converge para o equilíbrio de Nash, garantindo que a potência é eficientemente utilizada pelos usuários. Entretanto, tal abordagem de barganha requer uma fase adicional na qual os nós trocam informação para atingir o valor ótimo global.

Além disso, maximizar a eficiência energética envolve uma razão entre funções de mesma variável (por exemplo potência), que podem geralmente serem resolvidas por métodos de programação fracionária (ZAPPONE; JORSWIECK, 2015). Em particular, o algoritmo iterativo de Dinkelbach é um dos que melhor se encaixa para este tipo de problema (DINKELBACH, 1967). Por exemplo, (NAEEM et al., 2013) propôs um esquema de alocação de potência baseado no algoritmo de Dinkelbach para redes cooperativas de rádio cognitivo. Ainda, a eficiência energética de alguns esquemas cooperativos MIMO foi estudada em (BRANTE et al., 2013) com o auxílio do algoritmo de Dinkelbach. Se comparado com algoritmos como em (JUNG et al., 2012; CAO et al., 2013), o Dinkelbach possui menor complexidade e pode ser aplicado de forma distribuída, conforme será abordado no decorrer deste capítulo.

Neste capítulo é proposto um algoritmo iterativo de baixa complexidade, o

esquema de alocação de potência distribuída iterativa (D-IPA), baseado em programação fracionária para maximizar a eficiência energética de uma rede cooperativa MIMO com múltiplos *relays*. Diferentemente da maioria dos artigos da literatura, o foco está em um esquema completamente distribuído em que três mecanismos principais são combinados em cada nó para melhorar a eficiência energética: seleção de antenas, seleção de *relays* por meio de um esquema oportunista (BLETSAS et al., 2006) e alocação de potência utilizando um algoritmo iterativo. É importante notar que os trabalhos nos artigos (MADAN et al., 2008; HELIOT et al., 2012; RAYEL et al., 2014; BATABYAL; DAS, 2015; DENG et al., 2015; SONG et al., 2014; JUNG et al., 2012; CAO et al., 2013; NAEEM et al., 2013; BRANTE et al., 2013) já consideraram um ou dois destes aspectos, mas não todos os três em uma abordagem completamente distribuída, a qual é crítica para redes sem fio. Por esta abordagem considera-se que tanto a seleção de relays e antenas, quanto alocação de potência são decididas individualmente em cada nó, sem necessidade de um ente central para coordenação. A fim de aplicar o esquema proposto, expressões na forma fechada para a probabilidade de *outage* e eficiência energética são derivadas para cenários SISO e MIMO com múltiplos *relays*, que são então validadas por simulações de Monte Carlo. Referindo-se aos cenários MIMO, são considerados o AS, que é simples porém sub-ótimo, e uma técnica baseada na decomposição por valores singulares, do inglês *singular value decomposition* (SVD), que é consideravelmente mais complexa mas atinge máxima diversidade espacial. Os resultados mostram que o algoritmo proposto tem desempenho muito próximo a um algoritmo baseado em busca exaustiva ótima, mesmo sendo iterativo e convergindo depois de poucas iterações.

As contribuições deste capítulo correspondem às seguintes conclusões:

1. Enquanto a transmissão cooperativa SVD possui a melhor probabilidade de *outage*, o AS aplicado a uma rede cooperativa tem uma eficiência energética melhor para curtas e médias distâncias entre fonte e destino e para baixas e moderadas eficiências espectrais;

2. O número de *relays* também pode contribuir para um aumento na eficiência energética além do consumo dos circuitos de RF, especialmente para distâncias maiores. Em geral, pode-se observar que o SVD atinge eficiência energética maior em configuração não-cooperativa, enquanto alguns *relays* são necessários para maximizar a eficiência energética somente em casos com poucas antenas (não mais que três) por nó. Por outro lado, no caso do AS, exceto quando ou a distância entre os nós ou a eficiência espectral são muito baixas, configurações com mais de um

relay resultam em sistemas mais eficientes em relação à energia, independentemente do número de antenas disponíveis;

3. O número de antenas causa efeitos diferentes no AS e no SVD. Enquanto o SVD tem um número ótimo de antenas que deve ser usado para maximizar a eficiência energética, a eficiência energética do AS aumenta com o número de antenas, embora um efeito de saturação seja observado.

2.1 MODELO DO SISTEMA

Considera-se o sistema como ilustrado na Figura 1, o qual consiste de um nó fonte denotado por S, um nó destino denotado por D e K nós *relays* denotados por R_r, $1 \leq r \leq K$, cada um composto de múltiplas antenas. O número total de antenas na fonte, *relays* e destino é simbolizado por $\mathcal{N}_\mathrm{S}$, $\mathcal{N}_{\mathrm{R}_r}$ e $\mathcal{N}_\mathrm{D}$, respectivamente, ao passo que n_S, n_{R_r} e n_D expressam o número ativo de antenas em cada nó. Assume-se que todos os *relays* têm o mesmo número de antenas, tal que $\mathcal{N}_{\mathrm{R}_r} = \mathcal{N}_\mathrm{R}$ e $n_{\mathrm{R}_r} = n_\mathrm{R}$, $\forall r$. Além disso, os nós estão dispostos ao longo de uma linha, onde d_SD é a distância entre fonte e destino, com todos os *relays* permanecendo sobre uma mesma posição intermediária[1], em que d_SR é a distância entre a fonte e os *relays* e $d_\mathrm{RD} = d_\mathrm{SD} - d_\mathrm{SR}$ é a distância entre os *relays* e o destino.

Os *relays* operam de acordo com o protocolo *decode-and-forward* incremental (IDF) (LANEMAN et al., 2004), em que eles transmitem somente se requisitados pelo destino. Duas fases são consideradas: difusão e retransmissão. Na fase de difusão, a fonte envia a mensagem para o destino e todos os R_r *relays* (todos *relays* estão ativos nesta fase). Se o destino não é capaz de decodificar a mensagem corretamente, ele envia um pedido de retransmissão por meio de um canal de retorno livre de erros, o qual permite uma seleção de *relays* distribuída. Então, cada *relay* estima sua própria qualidade do canal em relação ao destino e espera por um tempo inversamente proporcional a esta qualidade do canal, garantindo que somente o *relay* em melhores condições transmita. Desta forma, a fase de retransmissão funciona como no protocolo de seleção de *relays* oportunista (BLETSAS et al., 2006), de modo que todos os outros *relays* permaneçam em repouso uma vez que transmissão do *relay* selecionado está em curso a fim evitar de colisões, de modo análogo

[1] O motivo de posicionar todos os *relays* sobre uma mesma posição é a dificuldade de resolver analiticamente caso eles fossem distribuídos. Neste caso, algumas ferramentas de processo de Poisson deveriam ser utilizadas. Optou-se então por uma análise em forma fechada em grupo, apenas como ferramenta de análise.

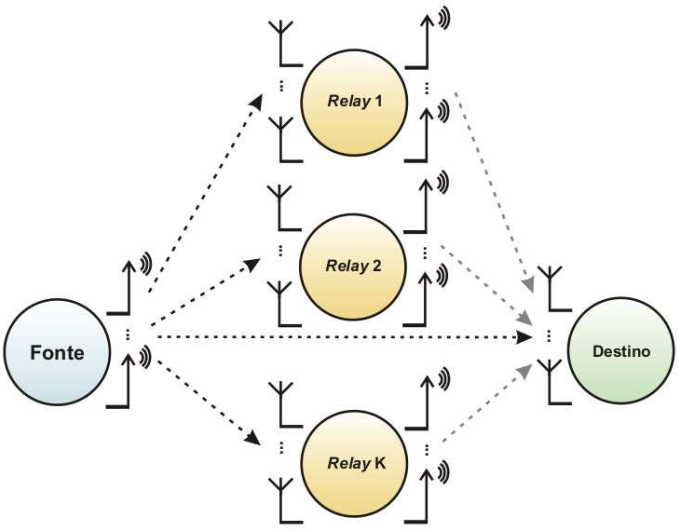


Figura 1: Rede sem fio MIMO cooperativa com múltiplos *relays*.
Fonte: Autoria própria.

a um protocolo MAC com contenção de acesso que evita colisões, como o CSMA-CA (em inglês *Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance*).

Um quadro com comprimento L recebido pelo nó $j \in \{\mathrm{R}_r, \mathrm{D}\}$ transmitido pelo nó $i \in \{\mathrm{S}, \mathrm{R}_r\}$, pode ser expresso como

$$\mathbf{y}_{ij}[l] = \sqrt{\frac{\kappa_{ij} P_i}{n_i}} \mathbf{H}_{ij} \mathbf{x}[l] + \mathbf{w}_j[l], \quad l = 1, \cdots, L, \tag{1}$$

em que P_i é o total de potência do nó i, κ_{ij} é a relação do *link budget* no enlace i-j, $\mathbf{H}_{ij}$ é a matriz de ordem $n_j \times n_i$ dos ganhos de canal quase-estáticos, cujos elementos são variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas de uma distribuição Rayleigh, $\mathbf{x}[l]$ é o vetor do símbolo de ordem $n_i \times 1$ transmitido por unidade de energia, e $\mathbf{w}_j[l]$ é o vetor das variáveis Gaussianas aleatórias complexas de ordem $n_j \times 1$ com variância $N_0/2$ por dimensão, em que N_0 é a densidade espectral de potência do ruído térmico unilateral.

A relação do *link budget* é (CUI et al., 2004)

$$\kappa_{ij} = \frac{c^2 G}{(4\pi f_c)^2 d_{ij}^{\nu} M_l N_f}, \tag{2}$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo, G é o ganho total da antena, f_c é a frequência da portadora, d_{ij} é a distância entre os nós i e j, ν é o expoente de perda de percurso, M_l é a margem de enlace utilizada para compensar atenuações no sinal entre o transmissor e o receptor por causa de fatores externos e N_f é a figura do ruído no receptor. A SNR

instantânea no nó j depois de uma transmissão do nó i é dada por

$$\gamma_{ij} = \|\mathbf{H}_{\mathrm{ij}}\|_{\mathrm{F}}^2 \cdot \bar{\gamma}_{ij}, \tag{3}$$

em que $\|.\|_{\mathrm{F}}$ é a norma de Frobenius, $\bar{\gamma}_{ij} = \frac{\kappa_{ij} P_i}{n_i N}$ é a SNR média por antena de transmissão ativa, $N = N_0 B$ é a potência do ruído e B é a largura de banda do sistema. É importante frisar que γ_{ij} é calculada em todas as n_i e n_j antenas ativas.

2.2 MÉTRICAS DE DESEMPENHO

2.2.1 Probabilidade de *Outage*

Uma falha ou *outage* ocorre quando $I_{ij} < \xi$, onde $I_{ij} = \log_2(1+\gamma_{ij})$ é a informação mútua no enlace *i-j* (GOLDSMITH, 2005), normalizada em relação à largura de banda, com ξ sendo a eficiência espectral em bits/s/Hz. Por simplicidade, denota-se este evento por $\{\gamma_{ij} < \rho\}$, em que $\rho = 2^{\xi} - 1$.

Assumindo um protocolo cooperativo IDF com código de repetição e múltiplos *relays*, um pacote é considerado perdido se um conjunto de eventos de *outage* ocorrer. Basicamente, no cenário de múltiplos *relays*, a fonte realiza uma difusão na primeira fase para o destino e os K *relays*. Entretanto, somente k *relays* recebem o pacote corretamente da fonte, onde $0 \leq k \leq K$. Além disso, define-se $\mathcal{R} = \{\gamma_{\mathrm{R}_r\mathrm{D}} : 1 \leq r \leq K\}$ como o conjunto das SNRs instantâneas de todos os enlaces *relay*-destino, de modo que $\mathcal{H} = \{\gamma_{\mathrm{R}_r\mathrm{D}} \in \mathcal{R} : \gamma_{\mathrm{SR}_r} \geq \rho\}$ é o subconjunto das SNRs instantâneas dos enlaces *relay*-destino sob a condição que o *relay* R_r decodificou corretamente a mensagem da fonte. Assim, o número de *relays* aptos a cooperar é $k = |\mathcal{H}|$, em que $|.|$ denota a cardinalidade do conjunto. Ademais, como considera-se a seleção oportunista de *relays*, somente o *relay* com a melhor condição do canal entre estes k *relays* retransmite a mensagem da fonte para o destino (BLETSAS et al., 2006).

Então, os seguintes eventos de *outage* ponto-a-ponto podem ser definidos:

i.) $\{\gamma_{\mathrm{SD}} < \rho\}$, que representa uma falha entre a fonte e o destino;

ii.) $\{\gamma_{\mathrm{SR}} < \rho\}$, que representa uma falha entre a fonte e o *relay* R_r[2];

iii.) $\{\gamma_{\mathrm{SD}} + \max \mathcal{H} < \rho\}$, que é a combinação por razão máxima, MRC, do sinal transmitido pela fonte na fase de difusão com a retransmissão do *relay* selecionado.

[2]Como assume-se que todos *relays* estão à mesma distância da fonte, omite-se o índice r em γ_{SR} por simplicidade.

Assim, encontram-se as seguintes probabilidades de *outage*:

$$p_{\mathrm{SD}} = \Pr\{\gamma_{\mathrm{SD}} < \rho\}, \tag{4}$$

$$p_{\mathrm{SR}} = \Pr\{\gamma_{\mathrm{SR}} < \rho\}, \tag{5}$$

$$p_{\mathrm{SRD}}(k) = \Pr\{\gamma_{\mathrm{SD}} + \max \mathcal{H} < \rho\}, \tag{6}$$

em que $\Pr\{\cdot\}$ é a probabilidade de ocorrência de um dado evento. É importante ressaltar que p_{SRD} é uma função de k.

Por fim, a probabilidade de perda de um pacote, P_{drop}, é

$$\begin{aligned} P_{\mathrm{drop}} = \Pr\{\gamma_{\mathrm{SD}} < \rho\} \cdot \Pr\{\gamma_{\mathrm{SR}} < \rho\}^K + \sum_{k=1}^{K} \Bigg[\binom{K}{k} \Pr\{\gamma_{\mathrm{SD}} < \rho\} \cdot \Pr\{\gamma_{\mathrm{SR}} < \rho\}^{(K-k)} \times \\ \times \Pr\{\gamma_{\mathrm{SR}} \geq \rho\}^k \cdot \Pr\{(\gamma_{\mathrm{SD}} + \max \mathcal{H} < \rho) | (\gamma_{\mathrm{SD}} < \rho)\} \Bigg], \end{aligned} \tag{7}$$

onde a primeira parte representa a probabilidade de *outage* da transmissão direta, ou seja, na fase de difusão e o termo do somatório representa a fase da retransmissão, em que todos os enlaces dos múltiplos *relays* devem ser levados em conta.

É importante notar que (7) tem uma probabilidade condicional $\Pr\{(\gamma_{\mathrm{SD}} + \max \mathcal{H} < \rho) | (\gamma_{\mathrm{SD}} < \rho)\}$, que representa a probabilidade que o MRC falhou dado que a transmissão da fonte já falhou em uma primeira tentativa. Estes dois eventos da probabilidade condicional são denotados por E_1 (falha no MRC) e E_2 (falha na fase de difusão), em que aplicando o Teorema de Bayes (HOGG et al., 2005) encontra-se $\Pr\{E_1|E_2\} = \frac{\Pr\{E_1, E_2\}}{\Pr\{E_2\}}$. Uma vez que $E_2 \subset E_1$ neste caso particular, a probabilidade condicional pode ser simplificada para $\Pr\{(\gamma_{\mathrm{SD}} + \max \mathcal{H} < \rho) \,|\, (\gamma_{\mathrm{SD}} < \rho)\} = \frac{p_{\mathrm{SRD}}(k)}{p_{\mathrm{SD}}}$. Então, depois de algumas manipulações algébricas,

$$P_{\mathrm{drop}} = p_{\mathrm{SD}} \cdot {p_{\mathrm{SR}}}^K + \sum_{k=1}^{K} \binom{K}{k} \cdot {p_{\mathrm{SR}}}^{(K-k)} \cdot (1 - p_{\mathrm{SR}})^k \cdot p_{\mathrm{SRD}}(k). \tag{8}$$

2.2.2 Vazão Fim-a-fim e Eficiência Energética

Em termos de consumo de energia, uma quantidade significante de energia é gasta pelos circuitos RF durante a transmissão e recepção. Além disso, o consumo de potência de um amplificador de potência prático é maior que a potência de transmissão requerida P_i. Logo, para modelar estes efeitos, adota-se um modelo de consumo de potência linear como em (CUI et al., 2005), de modo que o consumo total de potência na fase de difusão,

$\mathcal{P}_{\text{broad}}$, é dado por

$$\begin{aligned}\mathcal{P}_{\text{broad}} &= (1+\psi)P_{\text{S}} + n_{\text{S}}P_{\text{TX}} + (Kn_{\text{R}} + n_{\text{D}})P_{\text{RX}} \\ &= (1+\psi)P_{\text{S}} + \varphi,\end{aligned} \tag{9}$$

onde ψ representa a energia adicional gasta no amplificador de potência devido às não-linearidades, dependendo da eficiência do dreno no amplificador e no esquema de modulação empregado, P_{TX} e P_{RX} representam o consumo dos circuitos de cada antena ativa no transmissor e receptor, respectivamente. Já φ representa os termos que são constantes em respeito à potência de transmissão P_{S}.

Similarmente, o consumo total de potência da retransmissão do *relay*, $\mathcal{P}_{\text{retr}}$ é

$$\mathcal{P}_{\text{retr}} = (1+\psi)P_{\text{R}} + n_{\text{R}}P_{\text{TX}} + n_{\text{D}}P_{\text{RX}}. \tag{10}$$

Por fim o consumo total de potência é dado por

$$\begin{aligned}\mathcal{P}_{\text{coop}} =& (1+\psi)(P_{\text{S}} + P_{\text{R}}) + (n_{\text{S}} + n_{\text{R}})P_{\text{TX}} + (n_{\text{R}} + 2n_{\text{D}})P_{\text{RX}} \\ =& (1+\psi)(P_{\text{S}} + P_{\text{R}}) + \Upsilon,\end{aligned} \tag{11}$$

com Υ como uma constante.

A vazão fim-a-fim é definida como a taxa útil média observada pelo receptor. Desta forma, define-se eficiência energética, η_{E}, como a razão vazão-potência

$$\begin{aligned}\eta_{\text{E}} = \frac{\xi}{\mathcal{P}_{\text{broad}}} \cdot \Pr\{\gamma_{\text{SD}} \geq \rho\} + \frac{\xi/2}{\mathcal{P}_{\text{coop}}} \cdot \sum_{k=1}^{K} \Bigg[\binom{K}{k} \Pr\{\gamma_{\text{SD}} < \rho\} \times \Pr\{\gamma_{\text{SR}} < \rho\}^{(K-k)} \times \\ \times \Pr\{\gamma_{\text{SR}} \geq \rho\}^{k} \cdot \Pr\{(\gamma_{\text{SD}} + \max \mathcal{H} \geq \rho) | (\gamma_{\text{SD}} < \rho)\} \Bigg],\end{aligned} \tag{12}$$

da qual observa-se que se a transmissão da fonte foi bem sucedida na fase de difusão, com probabilidade $\Pr\{\gamma_{\text{SD}} \geq \rho\}$, somente um intervalo de tempo é utilizado e a eficiência espectral é ξ enquanto consome-se $(1+\psi)P_{\text{S}} + \varphi$. Entretanto, se a transmissão da fonte falha na primeira tentativa e um *relay* deve retransmitir, representado, pelo termo do somatório, dois intervalos de tempo se tornam necessários e a eficiência espectral é $\xi/2$ enquanto consome-se $(1+\psi)(P_{\text{S}} + P_{\text{R}}) + \Upsilon$. Caso contrário, se o pacote da fonte não pode ser corretamente recebido no destino nem na fase de difusão nem na fase de retransmissão, o pacote é descartado e a eficiência energética instantânea é considerada zero.

Finalmente, utilizando-se o Teorema de Bayes e algumas manipulações algébricas

$$\eta_{\mathrm{E}} = \frac{\xi}{\mathcal{P}_{\mathrm{broad}}} \cdot (1 - p_{\mathrm{SD}}) + \frac{\xi/2}{\mathcal{P}_{\mathrm{coop}}} \cdot \sum_{k=1}^{K} \left[\binom{K}{k} {p_{\mathrm{SR}}}^{(K-k)} \cdot (1 - p_{\mathrm{SR}})^{k} \cdot (p_{\mathrm{SD}} - p_{\mathrm{SRD}}(k)) \right], \quad (13)$$

expresso em bps/Hz/W, ou equivalentemente em bits/J/Hz.

2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS ESQUEMAS DE TRANSMISSÃO MIMO COOPERATIVOS

Nesta seção, as expressões fechadas são derivadas para a probabilidade de *outage* e eficiência energética de múltiplos *relays* para os cenários SISO e MIMO, que serão necessários para aplicar o esquema de alocação de potência a ser proposto na Seção 2.4.

2.3.1 Antena Única (SISO)

Assume-se primeiramente um esquema de transmissão SISO, em que $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}} = 1$. Logo, a eficiência energética pode ser escrita como

$$\begin{aligned} \eta_{\mathrm{E,SISO}} = {} & \xi \cdot \frac{(1 - p_{\mathrm{SD,SISO}})}{(1+\psi)P_{\mathrm{S}} + P_{\mathrm{TX}} + (K+1)P_{\mathrm{RX}}} + \\ & + \frac{\xi}{2} \cdot \sum_{k=1}^{K} \binom{K}{k} \frac{{p_{\mathrm{SR,SISO}}}^{(K-k)} \cdot (1 - p_{\mathrm{SR,SISO}})^{k}}{(1+\psi)(P_{\mathrm{S}} + P_{\mathrm{R}}) + 2P_{\mathrm{TX}} + 3P_{\mathrm{RX}}} \cdot (p_{\mathrm{SD,SISO}} - p_{\mathrm{SRD,SISO}}(k)), \end{aligned} \quad (14)$$

onde a probabilidades de *outage* ponto-a-ponto na fase de difusão são dadas por (GOLDSMITH, 2005)

$$p_{\mathrm{SD,SISO}} = 1 - e^{-\rho/\bar{\gamma}_{\mathrm{SD}}}, \quad (15)$$

$$p_{\mathrm{SR,SISO}} = 1 - e^{-\rho/\bar{\gamma}_{\mathrm{SR}}}, \quad (16)$$

enquanto a expressão para $p_{\mathrm{SRD,SISO}}(k)$, da probabilidade de *outage* do MRC entre a mensagem transmitida pela fonte e a retransmissão do *relay* selecionado é dada por

$$p_{\mathrm{SRD,SISO}}(k) = \sum_{l=0}^{k-1} \binom{k-1}{l} \frac{(-1)^{l} \cdot k}{(l+1)\bar{\gamma}_{\mathrm{SD}} - \bar{\gamma}_{\mathrm{RD}}} \cdot \left[\bar{\gamma}_{\mathrm{SD}} \left(1 - e^{-\frac{\rho}{\bar{\gamma}_{\mathrm{RD}}}} \right) - \frac{\bar{\gamma}_{\mathrm{RD}}}{l+1} \left(1 - e^{-\frac{(l+1)\rho}{\bar{\gamma}_{\mathrm{RD}}}} \right) \right], \quad (17)$$

na qual assume-se que $(l+1)\bar{\gamma}_{\mathrm{SD}} - \bar{\gamma}_{\mathrm{RD}} \neq 0$.

Mais detalhes sobre a prova de (17) podem ser encontrados no Apêndice A.1.

2.3.2 Seleção de Antenas (AS)

De acordo com (9) e (11), o consumo de potência aumenta com o número de antenas, de modo que os esquemas de seleção de antenas podem se tornar particularmente interessantes uma vez que eles eles reduzem o número de circuitos RF requeridos. Como o foco é reduzir o consumo de potência, assume-se que fonte, *relays* e destino são equipadas com $\mathcal{N}_{\mathrm{S}}$, $\mathcal{N}_{\mathrm{R}}$ e $\mathcal{N}_{\mathrm{D}}$ antenas, respectivamente, mas somente uma antena é selecionada em cada nó, $n_{\mathrm{S}} = n_{\mathrm{R}} = n_{\mathrm{D}} = 1$. Assim, a eficiência energética do esquema AS é

$$\begin{aligned}\eta_{\mathrm{E,AS}} = \xi \cdot \frac{(1-p_{\mathrm{SD,AS}})}{(1+\psi)P_{\mathrm{S}} + P_{\mathrm{TX}} + (K+1)P_{\mathrm{RX}}} + \\ + \frac{\xi}{2} \cdot \sum_{k=1}^{K} \binom{K}{k} \frac{{p_{\mathrm{SR,AS}}}^{(K-k)} \cdot (1-p_{\mathrm{SR,AS}})^k}{(1+\psi)(P_{\mathrm{S}}+P_{\mathrm{R}}) + 2P_{\mathrm{TX}} + 3P_{\mathrm{RX}}} \cdot (p_{\mathrm{SD,AS}} - p_{\mathrm{SRD,AS}}(k)),\end{aligned} \tag{18}$$

que é muito similar a (14), exceto que para a mesma probabilidade de *outage* o AS permite que P_{S} e P_{R} sejam muito menores que para o caso SISO, indicando que a seleção de antenas é mais eficiente em energia que o esquema SISO.

Além disso, deve-se ressaltar que a melhor antena nos receptores pode ser selecionada baseada na SNR recebida como no esquema combinação por seleção (SC) (GOLDSMITH, 2005), enquanto que nos transmissores, o esquema AS requer que o receptor informe ao transmissor sobre qual antena foi selecionada, que é feita por um canal de retorno livre de erros (PERON et al., 2015). No cenário cooperativo, a melhor antena de transmissão deve ser selecionada conforme o enlace entre fonte e um dos dois casos: *i.*) em relação ao nó destino, com retorno de D; ou *ii.*) em relação aos nós *relays* com um retorno do *relay* escolhido. Entretanto, os resultados obtidos para os cenários considerados mostram que o primeiro é sempre mais eficiente energeticamente que o último, levando-se em conta diferentes valores de distância entre os enlaces, valores diferentes de *relays*, mesmo número de antenas, de modo que considera-se neste documento que o retorno venha de D. Então, as probabilidades de *outage* para a fase de difusão são (GOLDSMITH, 2005)

$$p_{\mathrm{SD,AS}} = \left(1 - e^{-\rho/\bar{\gamma}_{\mathrm{SD}}}\right)^{\mathcal{N}_{\mathrm{S}}\mathcal{N}_{\mathrm{D}}}, \tag{19}$$

$$p_{\mathrm{SR,AS}} = \left(1 - e^{-\rho/\bar{\gamma}_{\mathrm{SR}}}\right)^{\mathcal{N}_{\mathrm{R}}}. \tag{20}$$

É importante notar que a antena selecionada é ótima apenas para o enlace S-D, significando que este enlace tem ordem de diversidade completa. Entretanto, do ponto de vista do *relay*, a seleção de antenas no receptor é aleatória, o que tem o mesmo efeito que se a fonte tivesse somente uma antena, uma vez que a antena já foi escolhida em relação ao destino. Assim, o expoente $\mathcal{N}_{\mathrm{S}}$ aparece em (19) mas não em (20) implicando em um

enlace de ordem de diversidade limitada quando comparado ao enlace S-D.

No destino, os sinais recebidos da fonte e do *relay* selecionado são combinados e a probabilidade de *outage* é dada pela aproximação do seguinte limite inferior (KARAEVLI et al., 2012)

$$p_{\mathrm{SRD,AS_D}}(k) \approx \left(\frac{\Gamma(\mathcal{N}_\mathrm{R}+1)\Gamma(\mathcal{N}_\mathrm{D}+1)}{\Gamma(\mathcal{N}_\mathrm{R}+\mathcal{N}_\mathrm{D}+1)}\right)^{\mathcal{N}_\mathrm{S}} \cdot \frac{\rho^{\mathcal{N}_\mathrm{S}(\mathcal{N}_\mathrm{R}+\mathcal{N}_\mathrm{D})}}{(2\bar{\gamma}_\mathrm{SR})^{\mathcal{N}_\mathrm{S}\mathcal{N}_\mathrm{R}}\,(2\bar{\gamma}_\mathrm{SD})^{\mathcal{N}_\mathrm{S}\mathcal{N}_\mathrm{R}}} + \\ + \left(1-2^{(\mathcal{N}_\mathrm{S}+\mathcal{N}_\mathrm{R})\mathcal{N}_\mathrm{D}}\left(\frac{\rho}{\bar{\gamma}_\mathrm{SR}}\right)^{\mathcal{N}_\mathrm{S}\mathcal{N}_\mathrm{R}}\right) \cdot \frac{\Gamma(\mathcal{N}_\mathrm{S}\mathcal{N}_\mathrm{D}+1)\Gamma(\mathcal{N}_\mathrm{R}\mathcal{N}_\mathrm{D}+1)\rho^{(\mathcal{N}_\mathrm{S}+\mathcal{N}_\mathrm{R})\mathcal{N}_\mathrm{D}}}{\Gamma(\mathcal{N}_\mathrm{S}\mathcal{N}_\mathrm{D}+\mathcal{N}_\mathrm{R}\mathcal{N}_\mathrm{D}+1)\,(2\bar{\gamma}_\mathrm{SD})^{\mathcal{N}_\mathrm{S}\mathcal{N}_\mathrm{D}}\,(2\bar{\gamma}_\mathrm{RD})^{\mathcal{N}_\mathrm{R}\mathcal{N}_\mathrm{D}}}, \tag{21}$$

uma vez que não é possível convoluir de forma fechada a MRC no destino. Além disso, este limite inferior é válido para os valores de SNR adotados na simulação.

2.3.3 Decomposição por Valores Singulares (SVD)

Este esquema MIMO baseado em *beamforming* explora o conhecimento do canal tanto no transmissor quanto no receptor para atingir a máxima diversidade (MCKAY et al., 2006). O canal MIMO é decomposto em canais paralelos utilizando decomposição por valores singulares, em que um único caminho de dados é transmitido utilizando o mais vantajoso destes canais paralelos. Neste esquema, que atinge a máxima diversidade espacial todas as $\mathcal{N}_\mathrm{S}$, $\mathcal{N}_\mathrm{R}$ e $\mathcal{N}_\mathrm{D}$ antenas são empregadas. Ademais, assume-se que todos os k *relays* que decodificaram corretamente a mensagem da fonte transmitem simultaneamente, sendo equivalente ao cenário com um simples *relay* empregando $k\mathcal{N}_\mathrm{R}$ antenas, o que requereria não só uma sincronização severa em relação a todos os *relays* mas também uma coordenação central, sendo bem difícil de realizar na prática, mas ainda assim utilizado para fins de comparação. Além disso, como no caso da seleção de antenas, um canal de retorno também é requerido para o SVD, todavia a capacidade do canal de retorno deve ser consideravelmente maior que no caso do AS. A eficiência energética deste esquema SVD é

$$\eta_\mathrm{E,SVD} = \xi \cdot \frac{(1-p_\mathrm{SD,SVD})}{(1+\psi)P_\mathrm{S}+\mathcal{N}_\mathrm{S}P_\mathrm{TX}+(K\mathcal{N}_\mathrm{R}+\mathcal{N}_\mathrm{D})P_\mathrm{RX}} + \\ + \frac{\xi}{2}\cdot\sum_{k=1}^{K}\binom{K}{k}{p_\mathrm{SR,SVD}}^{(K-k)}\cdot(1-p_\mathrm{SR,SVD})^{k}\times \\ \times \frac{(p_\mathrm{SD,SVD}-p_\mathrm{SRD,SVD}(k))}{(1+\psi)(P_\mathrm{S}+kP_\mathrm{R})+(\mathcal{N}_\mathrm{S}+k\mathcal{N}_\mathrm{R})P_\mathrm{TX}+(k\mathcal{N}_\mathrm{R}+2\mathcal{N}_\mathrm{D})P_\mathrm{RX}}, \tag{22}$$

que apresenta o maior consumo de energia dos circuitos quando comparado aos outros esquemas considerados. Entretanto, a probabilidade de *outage* deste esquema também é a menor quando comparada aos outros esquemas.

As probabilidades de *outage* ponto-a-ponto do SVD, são

$$p_{\mathrm{SD,SVD}} \geq 1 - e^{-\rho_p/\bar{\gamma}_{\mathrm{SD}}} \sum_{m=0}^{\mathcal{N}_{\mathrm{S}}\mathcal{N}_{\mathrm{D}}-1} \frac{1}{m!} \left(\frac{\rho_p}{\bar{\gamma}_{\mathrm{SD}}} \right)^m, \tag{23}$$

$$p_{\mathrm{SR,SVD}} \geq 1 - e^{-\rho_p/\bar{\gamma}_{\mathrm{SR}}} \sum_{m=0}^{\mathcal{N}_{\mathrm{R}}-1} \frac{1}{m!} \left(\frac{\rho_p}{\bar{\gamma}_{\mathrm{SR}}} \right)^m, \tag{24}$$

onde $\rho_p = p(2^{\xi/p} - 1)$.

Mais detalhes sobre a prova de (23) e (24) podem ser encontrados no Apêndice A.2.

No destino, os sinais recebidos da fonte e todos $\mathrm{R}_r \in \mathcal{H}$ são combinados, de modo que a probabilidade de *outage* de tal combinação é dada por

$$p_{\mathrm{SRD,SVD}}(k) \simeq \frac{1}{\Gamma(m)} \cdot \gamma \left(m, \frac{\rho_p m}{(\bar{\gamma}_{\mathrm{SD}} + \bar{\gamma}_{\mathrm{RD}})} \right), \tag{25}$$

onde $m = \frac{\mathcal{N}_{\mathrm{S}} k \mathcal{N}_{\mathrm{R}} \mathcal{N}_{\mathrm{D}} (\bar{\gamma}_{\mathrm{SD}} + \bar{\gamma}_{\mathrm{RD}})^2}{k\mathcal{N}_{\mathrm{R}} \bar{\gamma}_{\mathrm{SD}}^2 + \mathcal{N}_{\mathrm{S}} \bar{\gamma}_{\mathrm{RD}}^2}$ como em (119), $\Gamma(z) = \int_0^\infty e^{-t} t^{z-1} dt$ é a função gamma completa (GRADSHTEYN et al., 2000, §8.310-1) é $\gamma(\alpha, x) = \int_0^x e^{-t} t^{\alpha-1} dt$ a função gamma incompleta (GRADSHTEYN et al., 2000, §8.350-1).

Mais detalhes sobre a prova de (25) podem ser encontrados no Apêndice A.3.

2.4 MÉTODO PROPOSTO PARA ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA DISTRIBUÍDA PARA ESQUEMAS DE TRANSMISSÃO MIMO

É proposto um algoritmo de alocação de potência iterativo e distribuído visando maximizar a eficiência energética. Além disso, embora seja uma estratégia sub-ótima, as simulações mostram que o algoritmo proposto tem desempenho muito próximo a um algoritmo de alocação de potência baseado em busca exaustiva ótima.

2.4.1 Algoritmo de Alocação de Potência Iterativo Distribuído (D-IPA)

Nesta seção é descrito o algoritmo de alocação de potência iterativo distribuído, do inglês *distributed iterative power allocation*. O problema de alocação de potência visando

maximizar a eficiência energética pode ser definido como

$$\begin{aligned} \max_{P_{\mathrm{S}},P_{\mathrm{R}}} \quad & \eta_{\mathrm{E}} \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq P_i \leq P_{\max}, \quad i \in \{\mathrm{S}, \mathrm{R}_r\}, \\ & P_{\mathrm{drop}} \leq \varepsilon, \end{aligned} \tag{26}$$

em que $P_{\max}$ é a potência de transmissão máxima que pode ser usada em qualquer nó, P_{drop} é a probabilidade de perda do pacote dado por (8), que é uma função de P_{S} e P_{R}, e ε é a probabilidade alvo de perda de pacote no receptor.

Entretanto, $p_{\mathrm{SRD}}(k)$, o qual é parte de P_{drop} nos esquemas cooperativos, é geralmente uma expressão complexa, uma vez que envolve o MRC entre as fases de difusão e retransmissão, com a última ocorrendo através de um processo de seleção de *relays*, de tal modo que a otimização em (26) se torna muito difícil de ser resolvida analiticamente. Assim, buscando resolver este problema eficientemente, recorre-se à uma classe de problemas de otimização chamada programação fracionária que começou a ser estudada inicialmente por (CHARNES; COOPER, 1962; JAGANNATHAN, 1966). Um programa fracionário não linear geral pode ser expresso na forma (ZAPPONE; JORSWIECK, 2015)

$$\max_{x \in \mathcal{S}} \quad q(x) = \frac{f_1(x)}{f_2(x)}, \tag{27}$$

com $\mathcal{S} \subseteq \mathbb{R}^n, f_1, f_2 : \mathcal{S} \to \mathbb{R}, f_1(x) \geq 0,$ e $f_2(x) > 0$. Este problema é chamado de um programa fracionário côncavo-convexo se f_1 é côncavo, f_2 é convexo e $\mathcal{S}$ é um conjunto convexo. Em outras palavras este tipo de abordagem maximiza a razão entre duas funções de mesma variável, no caso a potência. Portanto, é próprio para este tipo de cenário e tem sido aplicado em (ZAPPONE; JORSWIECK, 2015; NAEEM et al., 2013). Então, utilizando um programa convexo paramétrico (ZAPPONE; JORSWIECK, 2015), pode-se reescrever (27) como um programa fracionário equivalente

$$F(\lambda) = \max_{x \in \mathcal{S}} f_1(x) - \lambda f_2(x), \tag{28}$$

e mostrar que ele é convexo, contínuo e estritamente decrescente com λ (ZAPPONE; JORSWIECK, 2015). Além disto, como mostrado em (ZAPPONE; JORSWIECK, 2015), a afirmação a seguir é equivalente

$$F(\lambda) = 0 \Longleftrightarrow \lambda = q^{\star}, \tag{29}$$

em que $q^{\star}$ é o valor ótimo da função objetivo em (27). Portanto a solução do problema de otimização é equivalente a encontrar a raiz de $F(\lambda)$. Assim, a condição de otimalidade

é

$$F(\lambda^\star) = \max_{x \in \mathcal{S}} f_1(x) - \lambda^\star f_2(x) = 0. \tag{30}$$

Para encontrar a raiz de $F(\lambda)$, recorre-se ao algoritmo iterativo de Dinkelbach (DINKELBACH, 1967), que está baseado na aplicação do método de Newton, a fim de que cada iteração para encontrar a raiz de $F(\lambda)$ seja calculada como

$$\begin{aligned} \lambda_{n+1} &= \lambda_n - \frac{F(\lambda_n)}{F'(\lambda_n)} \\ &= \frac{f_1(x_n^\star)}{f_2(x_n^\star)}, \end{aligned} \tag{31}$$

onde $x_n^\star$ é ótimo para um dado valor de λ_n.

Além disso, o problema de otimização em (26) é uma função de duas variáveis, P_S e P_R. Como o objetivo principal é realizar um esquema de alocação de potência distribuído, divide-se a função objetivo em uma soma de dois termos: $\eta_\mathrm{E} = \eta_1 + \eta_2$, de modo que a fonte primeiramente aloca P_S para maximizar η_1 como[3]

$$\begin{aligned} \max_{P_\mathrm{S}} \quad & \eta_1 = \frac{\xi \cdot (1 - p_\mathrm{SD})}{(1+\psi)P_\mathrm{S} + \varphi} = \frac{f_1(P_\mathrm{S})}{f_2(P_\mathrm{S})}, \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq P_\mathrm{S} \leq P_\mathrm{max}, \end{aligned} \tag{32}$$

que é função de somente de P_S. Além disso, a restrição P_max é ignorada no momento e a expressão pode ser reescrita utilizando um programa convexo paramétrico

$$F_1(\lambda) = \max_{P_\mathrm{S} \geq 0} \quad f_1(P_\mathrm{S}) - \lambda f_2(P_\mathrm{S}), \tag{33}$$

cuja condição estacionária é

$$\left.\frac{\mathrm{d}f_1(P_\mathrm{S})}{\mathrm{d}P_\mathrm{S}}\right|_{P_\mathrm{S}=\tilde{P}_\mathrm{S}} - \lambda \left.\frac{\mathrm{d}f_2(P_\mathrm{S})}{\mathrm{d}P_\mathrm{S}}\right|_{P_\mathrm{S}=\tilde{P}_\mathrm{S}} = 0, \tag{34}$$

de forma que $\tilde{P}_\mathrm{S}$ pode ser encontrado utilizando o método de Dinkelbach mostrado no Algoritmo 1. Então, reincluindo a restrição P_max, a potência de transmissão ótima para a fonte é $P_\mathrm{S}^\star = \min\{\tilde{P}_\mathrm{S}, P_\mathrm{max}\}$. É importante ressaltar que o Algoritmo 1 pode ser aplicado para todos os esquemas de transmissão, apenas substituindo as expressões de *outage* correspondentes.

[3] Ao dividir a função objetivo, impõe-se uma subotimalidade à solução. Entretanto, como mostrado nos resultados numéricos, o método proposto tem desempenho muito próximo da abordagem de busca exaustiva ótima.

Algoritmo 1 O método de Dinkelbach para encontrar $\tilde{P}_{\mathrm{S}}$ de acordo com o problema de otimização em (33)

Dado: tolerância Δ

1: $n = 0$;

2: $\lambda_0 = 0$;

enquanto $|F_1(\lambda_n)| \geq \Delta$ **faça**

3: Usar $\lambda = \lambda_n$ em (34) para obter $\tilde{P}_{\mathrm{S}_n}$;

4: $\lambda_{n+1} = \frac{f_1(\tilde{P}_{\mathrm{S}_n})}{f_2(\tilde{P}_{\mathrm{S}_n})}$;

5: $n++$;

fim

Já para encontrar P_{R} o seguinte subproblema é considerado

$$\begin{aligned} \max_{P_{\mathrm{R}}} \quad \eta_2 =& \frac{\xi}{2} \cdot \sum_{k=1}^{K} \binom{K}{k} \cdot \frac{{p_{\mathrm{SR}}}^{(K-k)} \cdot (1-p_{\mathrm{SR}})^k \cdot (p_{\mathrm{SD}} - \varepsilon)}{(1+\delta)(P_{\mathrm{S}}^{\star} + P_{\mathrm{R}}) + \Upsilon} \\ =& \frac{g_1(P_{\mathrm{R}})}{g_2(P_{\mathrm{R}})}, \\ \text{s.t.} \quad & P_0 \leq P_{\mathrm{R}} \leq P_{\max}, \end{aligned} \tag{35}$$

em que P_0 é a mínima potência a ser utilizada pelo *relay* que atenda a probabilidade de perda de pacote alvo ε, ou seja, P_0 é escolhido de tal forma que $P_{\mathrm{drop}} \leq \varepsilon$ seja satisfeito com igualdade e $P_{\mathrm{S}}^{\star}$ é a potência alocada pela fonte tomada como constante nesta etapa. Além disso, assumindo que $P_{\mathrm{S}}^{\star}$ pode ser estimado nos *relays*, (35) é uma função somente de P_{R}, de modo que as restrições em P_0 e $P_{\max}$ podem ser momentaneamente desprezadas e o problema de otimização pode ser reescrito como

$$F_2(\lambda) = \max_{P_{\mathrm{R}} \geq 0} \quad g_1(P_{\mathrm{R}}) - \lambda g_2(P_{\mathrm{R}}), \tag{36}$$

onde neste caso a condição estacionária se torna $\frac{\mathrm{d}g_1(P_{\mathrm{R}})}{\mathrm{d}P_{\mathrm{R}}}\Big|_{P_{\mathrm{R}}=\tilde{P}_{\mathrm{R}}} - \lambda \frac{\mathrm{d}g_2(P_{\mathrm{R}})}{\mathrm{d}P_{\mathrm{R}}}\Big|_{P_{\mathrm{R}}=\tilde{P}_{\mathrm{R}}} = 0$. Assim, o mesmo método como no Algoritmo 1 pode ser usado para encontrar $\tilde{P}_{\mathrm{R}}$, substituindo F_1, f_1 e f_2 por F_2, g_1 e g_2. Por fim, a potência de transmissão ótima para para o *relay* é $P_{\mathrm{R}}^{\star} = \min\Big\{\max\{P_0, \tilde{P}_{\mathrm{R}}\}, P_{\max}\Big\}$.

A solução proposta acima é inspirada pelo fato de que um algoritmo de otimização exaustivo global tende a injetar mais potência na fonte, utilizando o *relay* somente quando estritamente necessário. Portanto, o método proposto primeiro aloca potência na fonte,

uma vez que a mesma domina o gasto energético, e depois o *relay* aloca potência apenas para garantir um mínimo de probabilidade de *outage* alvo ε, que aparece como uma restrição em (26).

É importante notar que este algoritmo deve ser executado após a troca de pilotos sobre as antenas. Após isto, já seria possível fazer a estimação das SNRs necessárias para o método de Dinkelbach. Entretanto, no modelo deste capítulo não são contabilizados os gastos sobre as trocas de informações das antenas.

Na sequência, são discutidas a convergência e complexidade do algoritmo D-IPA proposto.

2.4.2 Análise de Convergência e Complexidade do Algoritmo Proposto

Como mencionado anteriormente, o método D-IPA está baseado no algoritmo de Dinkelbach, cujo objetivo principal é visar um problema fracionário côncavo-convexo resolvendo uma sequência de problemas mais fáceis, indexadas por um parâmetro λ, e que converge para a solução global (DINKELBACH, 1967; ZAPPONE; JORSWIECK, 2015). Além disso, como mencionado em (DINKELBACH, 1967; ZAPPONE; JORSWIECK, 2015), o algoritmo de Dinkelbach, e consequentemente o D-IPA, apresenta uma taxa de convergência superlinear. A prova da convergência e da optimalidade advém do algoritmo de Dinkelbach, descrita em (ZAPPONE; JORSWIECK, 2015).

Em termos de complexidade computacional, o método de Newton é utilizado para atualizar o λ a cada iteração, como expresso em (31). Como consequência, a complexidade do algoritmo depende principalmente de cada subproblema sendo resolvido, que geralmente é polinomial em relação ao número de variáveis e restrições (ZAPPONE; JORSWIECK, 2015).

A seguir, visando avaliar a complexidade do cenário sob investigação, é utilizada uma medida de complexidade temporal computando o número de passos necessários para resolver um problema de acordo com o tamanho dos dados de entrada (MEYERS, 2012). Levando-se em conta que o algoritmo proposto tem duas fases independentes, analisa-se primeiramente a alocação de P_{S}. O Algoritmo 2 mostra o número de passos para o algoritmo D-IPA em relação à alocação de P_{S}. Define-se um vetor $\mathbf{P}_{\mathrm{v}}$ com tamanho p_v, representando os valores de potência possíveis (de 0 a $P_{\max}$) a serem alocados pela fonte e *relays*.

Algoritmo 2 Alocação de P_{S}: número de passos

Entrada: $\mathbf{P}_{\mathrm{v}}$

1: $n \leftarrow 0$ ▷1

2: $\lambda_0 \leftarrow 0$ ▷1

; Encontrar o menor elemento de $\mathbf{P}_{\mathrm{v}}$ que satisfaça a condição estacionária em (34)

3: [pos,val] $\leftarrow \min\left(\left|\frac{\mathrm{d}f_1(P_{\mathrm{S}})}{\mathrm{d}P_{\mathrm{S}}}\Big|_{P_{\mathrm{S}}\in\mathbf{P}_{\mathrm{v}}} - \lambda_0 \frac{\mathrm{d}f_2(P_{\mathrm{S}})}{\mathrm{d}P_{\mathrm{S}}}\Big|_{P_{\mathrm{S}}\in\mathbf{P}_{\mathrm{v}}}\right|\right)$ ▷$p_v - 1$

4: $\tilde{P}_{\mathrm{S}_0} \leftarrow \mathbf{P}_{\mathrm{v}}(\mathrm{pos})$ ▷1

; Alocação de potência para P_{S}

enquanto $|\, F_1(\lambda_n)|_{P_{\mathrm{S}}=\tilde{P}_{\mathrm{S}_n}} \,| \geq \Delta$ **faça**

5: $\lambda \leftarrow \lambda_n$ ▷1

; Encontrar o menor elemento de $\mathbf{P}_{\mathrm{v}}$ que satisfaça a condição estacionária em (34)

6: [pos,val] $\leftarrow \min\left(\left|\frac{\mathrm{d}f_1(P_{\mathrm{S}})}{\mathrm{d}P_{\mathrm{S}}}\Big|_{P_{\mathrm{S}}\in\mathbf{P}_{\mathrm{v}}} - \lambda_n \frac{\mathrm{d}f_2(P_{\mathrm{S}})}{\mathrm{d}P_{\mathrm{S}}}\Big|_{P_{\mathrm{S}}\in\mathbf{P}_{\mathrm{v}}}\right|\right)$ ▷$p_v - 1$

; Atualizar a potência ótima ($\tilde{P}_{\mathrm{S}_n}$) e o peso da otimização (λ_n)

7: $\tilde{P}_{\mathrm{S}_n} \leftarrow \mathbf{P}_{\mathrm{v}}(\mathrm{pos})$ ▷1

8: $\lambda_{n+1} \leftarrow \frac{f_1(\tilde{P}_{\mathrm{S}_n})}{f_2(\tilde{P}_{\mathrm{S}_n})}$ ▷1

9: $n{+}{+}$ ▷1

fim ▷$(\times l_1)$

De acordo com o Algoritmo 2, o número de passos necessários para alocar P_{S} é

$$\begin{aligned}\mathrm{steps}_{P_{\mathrm{S}}} &= 3+p_v-1+l_1\,(4+p_v-1)\\ &= 2+p_v+l_1\,(p_v+3),\end{aligned} \tag{37}$$

em que l_1 é o número de laços necessários para alocar P_{S}.

O número de passos necessários para alocar P_{R} é muito similar ao do Algoritmo 2. A única diferença é um passo adicional ao final do algoritmo, a fim de garantir a probabilidade de *outage* limite $P_{\mathrm{drop}} \leq \varepsilon$. O Algoritmo 3 demonstra os passos para a alocação no *relay*.

Algoritmo 3 Alocação de P_{R}: número de passos

Entrada: $\mathbf{P}_{\mathrm{v}}$

1: $n \leftarrow 0$ ▷1

2: $\lambda_0 \leftarrow 0$ ▷1

; Encontrar o menor elemento de $\mathbf{P}_{\mathrm{v}}$ que satisfaça a condição estacionária em (34)

3: [pos,val] $\leftarrow \min\left(\left|\frac{\mathrm{d}f_1(P_{\mathrm{R}})}{\mathrm{d}P_{\mathrm{R}}}\Big|_{P_{\mathrm{R}}\in\mathbf{P}_{\mathrm{v}}} - \lambda_0\,\frac{\mathrm{d}f_2(P_{\mathrm{R}})}{\mathrm{d}P_{\mathrm{R}}}\Big|_{P_{\mathrm{R}}\in\mathbf{P}_{\mathrm{v}}}\right|\right)$ ▷p_v-1

4: $\tilde{P}_{\mathrm{R}_0} \leftarrow \mathbf{P}_{\mathrm{v}}(\mathrm{pos})$ ▷1

; Alocação de potência para P_{R}

enquanto $|\,F_1(\lambda_n)|_{P_{\mathrm{R}}=\tilde{P}_{\mathrm{R}_n}}\,| \geq \Delta$ **faça**

5: $\lambda \leftarrow \lambda_n$ ▷1

; Encontrar o menor elemento de $\mathbf{P}_{\mathrm{v}}$ que satisfaça a condição estacionária em (34)

6: [pos,val] $\leftarrow \min\left(\left|\frac{\mathrm{d}f_1(P_{\mathrm{R}})}{\mathrm{d}P_{\mathrm{R}}}\Big|_{P_{\mathrm{R}}\in\mathbf{P}_{\mathrm{v}}} - \lambda_n\,\frac{\mathrm{d}f_2(P_{\mathrm{R}})}{\mathrm{d}P_{\mathrm{R}}}\Big|_{P_{\mathrm{R}}\in\mathbf{P}_{\mathrm{v}}}\right|\right)$ ▷p_v-1

; Atualizar a potência ótima ($\tilde{P}_{\mathrm{R}_n}$) e o peso da otimização (λ_n)

7: $\tilde{P}_{\mathrm{R}_n} \leftarrow \mathbf{P}_{\mathrm{v}}(\mathrm{pos})$ ▷1

8: $\lambda_{n+1} \leftarrow \frac{f_1(\tilde{P}_{\mathrm{R}_n})}{f_2(\tilde{P}_{\mathrm{R}_n})}$ ▷1

9: $n{+}{+}$ ▷1

fim ▷$(\times l_1)$

; Para satisfazer a desigualdade $P_{\mathrm{drop}} \leq \varepsilon$

11: $P_{\mathrm{R}}^{\star} \leftarrow \max(P_0, \tilde{P}_{\mathrm{R}})$ ▷ 1

Tendo em vista o Algoritmo 3, o número de passos requeridos é

$$\text{steps}_{P_\text{R}} = 3 + p_v + l_2\,(p_v + 3), \tag{38}$$

onde l_2 é o número de laços necessários para alocar P_R. Assim, o número total de passos para o algoritmo D-IPA é

$$\text{steps}_{\text{D}-\text{IPA}} = (p_v + 3)\,(l_1 + l_2) + 2p_v + 5. \tag{39}$$

Posto isso, a complexidade do D-IPA depende da quantidade de laços necessários para cada iteração. Entretanto, não é trivial estimar teoricamente o número de laços de um algoritmo iterativo, como ele depende muito do cenário específico. Não obstante, uma investigação numérica pode ser realizada, que será mostrada na Seção 2.5.

2.5 RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção os desempenhos da probabilidade de *outage* e eficiência energética são avaliados em relação aos esquemas apresentados na Seção 2.3. Para apresentar alguns exemplos numéricos, assume-se o cenário de uma rede de sensores sem fio, uma vez que devido à natureza da maioria dos sensores de aplicações geralmente operam com recursos de energia limitada, de modo que eles devem ser o mais eficientes energeticamente possíveis. Logo, considera-se os mesmos parâmetros utilizados em (CUI et al., 2004), expressos na Tabela 1. Além disso, a eficiência espectral do sistema, a menos que afirmado contrário, é $\xi = 2$ bps/Hz.

Tabela 1: Parâmetros de Sistema do Cenário MIMO Cooperativo

Parâmetro	**Valor**
Margem de Enlace (M_l)	40 dB
Figura de Ruído (N_f)	10 dB
Ganho Total de Antenas (G)	5 dBi
Frequência da Portadora (f_c)	2,5 GHz
Largura de Banda (B)	10 kHz
Densidade do Ruído (N_0)	-174 dBm/Hz
Expoente de Perda de Percurso (ν)	2,5
Consumo dos Circuitos de RF na Transmissão (P_TX)	97,9 mW
Consumo dos Circuitos de RF na Recepção (P_RX)	112 mW
Consumo Adicional Para o Amplificador de Potência (ψ)	1,86

Fonte: Obtido a partir de (CUI et al., 2004).

Primeiramente, as expressões de probabilidade de *outage* são comparadas para

cada esquema com simulações de Monte Carlo. A Figura 2 mostra o desempenho de *outage* para os esquemas SISO, AS e SVD quando $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}} = 2$ antenas e o número de *relays* é $K = 3$ em que a SNR de cada antena é combinada no eixo das abscissas. Da figura pode ser notada uma boa concordância entre a simulação e os resultados teóricos, exceto para o SVD que não tem uma forma exata, mas somente um limite baseado na desigualdade de Jensen em (110). Mesmo assim, este limite é útil já que ele é otimista em relação às simulações e porque o SVD é incluído como um esquema de referência.

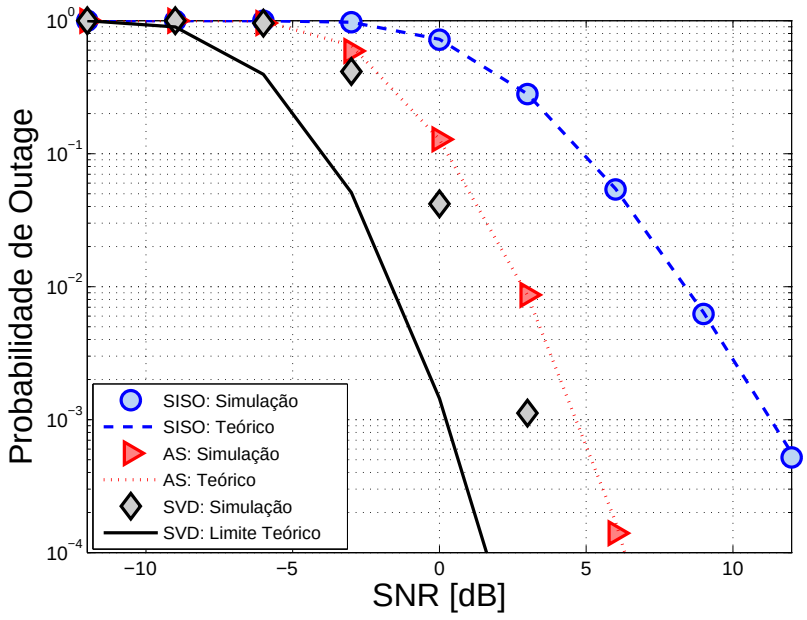


Figura 2: Probabilidade de *outage* dos esquemas cooperativos com múltiplos *relays* SISO, AS e SVD quando os $K = 3$ *relays* estão posicionados em $d_{\mathrm{SR}} = 0,5 d_{\mathrm{SD}}$. Além disso, $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}} = 2$.

Fonte: Autoria própria.

A seguir, a eficiência energética dos esquemas SISO, AS e SVD é comparada na Figura 3. É considerado que o sistema possui $K = 3$ *relays* e é empregado o esquema D-IPA proposto assim como uma alocação de potência baseada em busca exaustiva ótima, que resolve o problema de otimização encontrando as melhores potências P_{S} e P_{R}. Da figura pode-se observar que o AS tem a maior eficiência energética quando comparada aos outros esquemas. Embora o SVD tenha a menor probabilidade de *outage*, seu consumo energético é muito maior que dos outros esquemas, já que todos os *relays* ativos gastam energia na fase de retransmissão. Da figura pode-se concluir que o consumo dos circuitos de RF é mais relevante para distâncias mais curtas, e o AS alcança o melhor desempenho, especialmente quando $d_{\mathrm{SD}} < 500$ m. Para distâncias mais longas, o SVD alcança a melhor eficiência por causa de sua baixa probabilidade de *outage*. Entretanto, é importante

ressaltar que como é empregado um modelo de consumo adequado para redes de sensores sem fio (CUI et al., 2004), enlaces de comunicação mais extensos não estão no escopo desta análise. Além disso, comparando ambas estratégias de alocação de potência, pode-se verificar que embora o algoritmo D-IPA alcance desempenho levemente menor que a solução pela busca exaustiva, ele tem a vantagem de ser uma abordagem mais simples e distribuída.

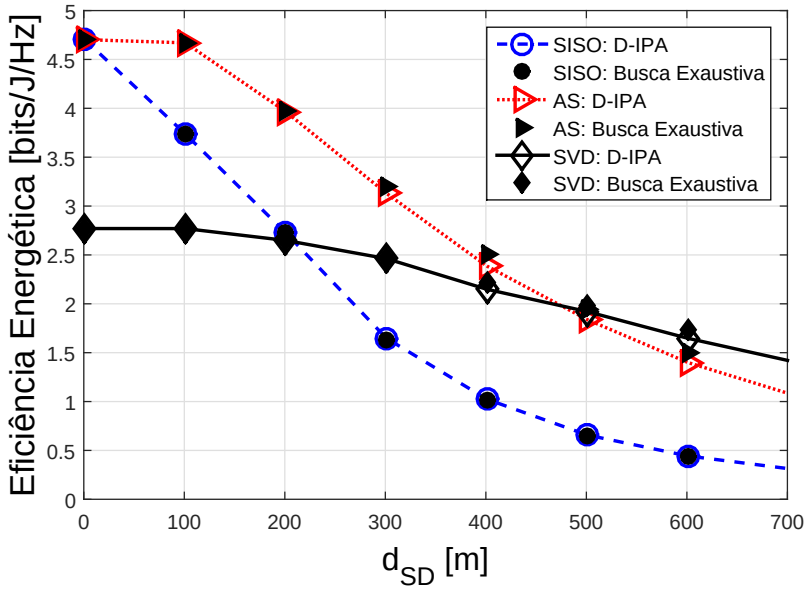


Figura 3: Eficiência energética dos esquemas cooperativos SISO, AS e SVD. $K = 3$ *relays* estão posicionados em $d_{\mathrm{SR}} = 0,5 d_{\mathrm{SD}}$, e $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}} = 2$.

Fonte: Autoria própria.

Em termos de complexidade do D-IPA, a Figura 4 mostra o número de laços de iteração em função de d_{SD} para o esquema AS, onde pode-se ver um pequeno aumento no número de iterações com o aumento de d_{SD}. Este comportamento é principalmente causado por uma probabilidade de *outage* menor nas pequenas distâncias, o que torna a convergência do algoritmo mais rápida. Da figura pode-se concluir que P_{S} utiliza um passo adicional quando comparado ao P_{R}, no pior caso. Quando a distância é maior que 300 m tem-se $l_1 = 3$ e $l_2 = 2$, com as quais $7p_v + 20$ passos requeridos para o D-IPA, no pior caso, produzindo uma ordem de complexidade de $\mathcal{O}(p_v)$.

Como uma comparação, um algoritmo baseado em busca exaustiva ótima requer uma abordagem diferente. Geralmente, este tipo de algoritmo requer uma busca global nos vetores para P_{S} e P_{R}, o que é traduzido em um algoritmo de laço duplo. Portanto, pode-se mostrar que a complexidade de um algoritmo de busca exaustiva é da ordem

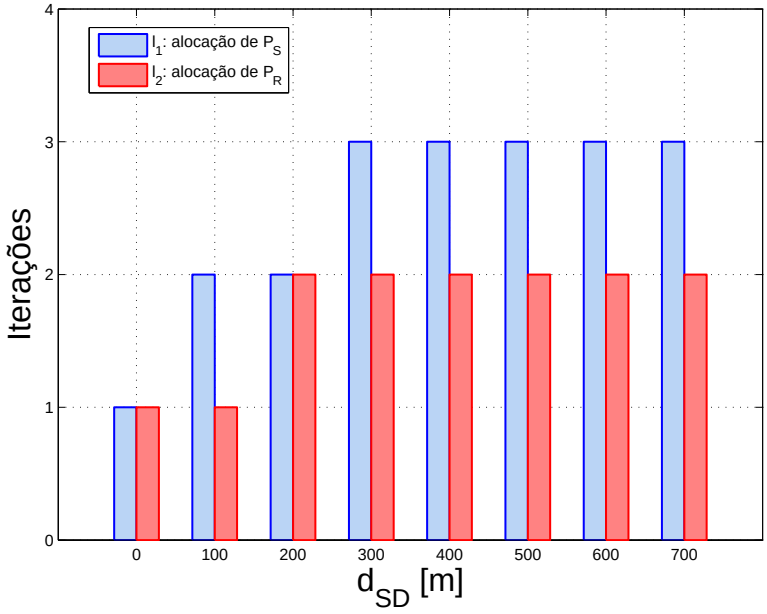


Figura 4: Número de laços de iteração do algoritmo D-IPA em função de d_{SD} quando o número de *relays* é $K = 3$, o número de antenas é $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}} = 2$, $d_{\mathrm{SR}} = 0,5d_{\mathrm{SD}}$ e $\Delta = 10^{-3}$ para o esquema AS.

Fonte: Autoria própria.

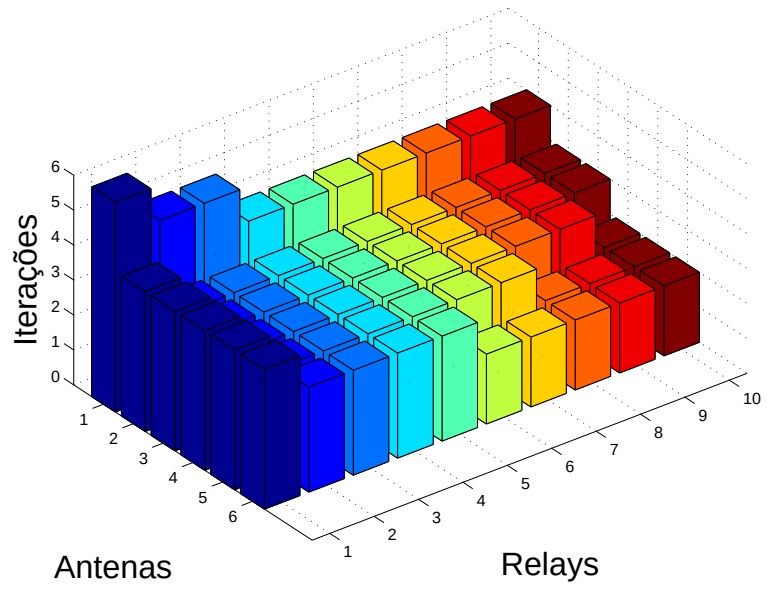


Figura 5: Número de iterações do algoritmo D-IPA em função do número de antenas e do número de *relays* quando $d_{\mathrm{SD}} = 100$ m, $d_{\mathrm{SR}} = 0,5d_{\mathrm{SD}}$ e $\Delta = 10^{-3}$.

Fonte: Autoria própria.

de $\mathcal{O}(p_v^2)$. Além disso, deve-se ressaltar que, para alcançar eficiência energética mais próxima da ótima, é importante que p_v seja grande. Nas simulações utilizou-se $p_v = 1000$, uma vez que se notou que utilizando $p_v < 800$, a eficiência energética atingível decai consideravelmente. A Tabela 2 compara o número de iterações e a ordem de complexidade entre o D-IPA e o algoritmo baseado em busca exaustiva ótima.

Tabela 2: Número de Passos Para Cada Algoritmo

Algoritmo	**Número de Passos**	**Ordem de Complexidade**
D-IPA	$7p_v + 20$	$\mathcal{O}(p_v)$
Busca Exaustiva	$6p_v^2 + 3$	$\mathcal{O}(p_v^2)$

Fonte: Autoria própria.

Já a Figura 5 mostra o número total de iterações necessárias em função do número de antenas e do número de *relays*. É muito curioso que a convergência se torna mais rápida quando o sistema é mais complexo (por exemplo, o sistema tem mais antenas ou mais *relays*). Este comportamento interessante pode ser explicado analisando-se as funções individuais inseridas no algoritmo. Pode ser observado que, quando o número de antenas ou *relays* aumenta, o valor da função $f_1(x)$ decresce, enquanto $f_2(x)$ permanece constante. Então, uma vez que o critério de parada é estabelecido quando $f_1(x) - \lambda f_2(x) < \Delta$, quanto menor $f_1(x)$ mais rapidamente o algoritmo converge.

A eficiência energética é mostrada para cada esquema, quando o número de *relays* é aumentado, na Figura 6. Como pode-se observar, o esquema que atinge a maior eficiência é o AS, seguido pelo SVD e depois pelo SISO. Também é possível notar que cada esquema possui sua melhor eficiência energética com um número ótimo diferente de *relays*. A eficiência energética do AS é maximizada com $K = 2$, SVD tem seu melhor desempenho com $K = 1$ *relays*, enquanto SISO é otimizado com $K = 4$ *relays*. É interessante notar que o número ótimo de *relays* está diretamente relacionado à probabilidade de *outage* dos esquemas. Como o SVD tem probabilidade de *outage* reduzida, o número ótimo de *relays* também é pequeno, enquanto o SISO, o qual se desempenha pior em termos de *outage*, tem sua eficiência energética maximizada com mais *relays*.

A Figura 7 mostra a eficiência energética dos esquemas em função de d_{SR}. A distância d_{SD} está fixa em 300 m e consideram-se quatro cenários, com $K \in [0, 3]$. Da figura pode-se observar que para $K = 0$ o melhor esquema é o SVD, enquanto a eficiência energética do AS é menor que a metade do SVD. O SISO, por sua vez, possui probabilidade de *outage* muito alta neste cenário, de tal forma que a eficiência energética é muito próxima de zero. Quando o número de *relays* é aumentado, o AS atinge maiores valores de eficiência

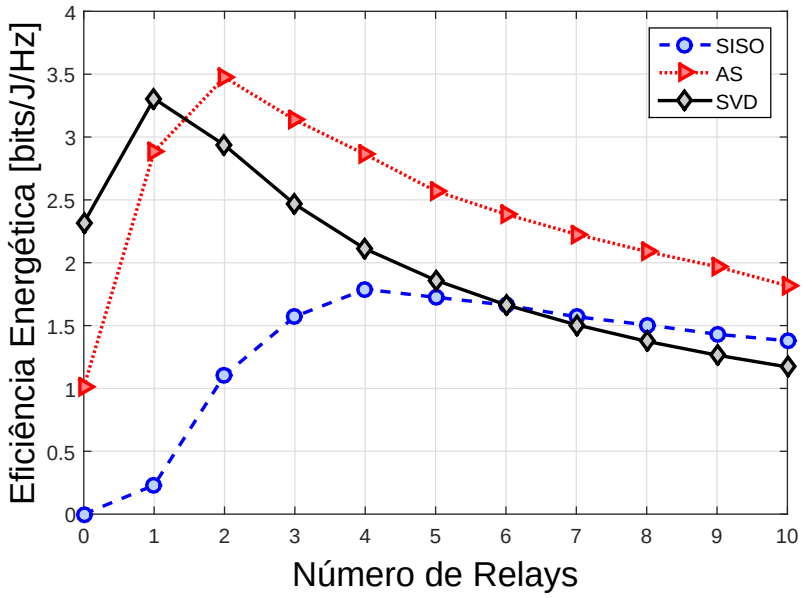


Figura 6: Eficiência energética dos esquemas SISO, AS e SVD para $0 \leq K \leq 10$ *relays*. A distância entre fonte e destino é $d_{\mathrm{SD}} = 300$ m e $d_{\mathrm{SR}} = 0,5 d_{\mathrm{SD}}$. Além disso, $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}} = 2$.

Fonte: Autoria própria.

energética, dependendo da posição do *relay*, que deve estar mais próximo da fonte quando $K = 1$ mas que pode ser movido para longe quando o número de K aumenta.

A seguir, na Figura 8 é plotada a eficiência energética dos esquemas AS e SVD em função do número de antenas, com $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}}$. Para cada barra na figura, o número de *relays* também é otimizado para maximizar a eficiência energética, a qual é mostrada na Figura 9 para o mesmo cenário. Dois cenários são considerados para comparar o AS com o SVD, com $d_{\mathrm{SD}} \in \{100, 500\}$ m. Da Figura 8 pode-se observar que a eficiência energética do AS aumenta com o número de antenas, mas tal aumento no desempenho satura depois de um dado número de antenas. Por outro lado, o SVD possui um número ótimo de antenas que maximiza a eficiência energética, e se o número de antenas aumentar para além do número ótimo, a eficiência energética diminui. Além disso, pela Figura 9, que indica o número de *relays* que resulta na eficiência energética da Figura 8, pode-se notar que em geral o número ótimo de *relays* diminui quando o número de antenas aumenta. O número ótimo de *relays* é uma função da distância entre os nós, de modo que ter mais *relays* é mais importante para distâncias maiores. Adicionalmente, a Figura 10 mostra a eficiência energética em função da distância otimizando o número de *relays*, da qual pode-se notar que para distâncias de até aproximadamente 500 m o AS ainda é o melhor esquema de transmissão, enquanto que para distâncias acima deste valor o SVD é mais

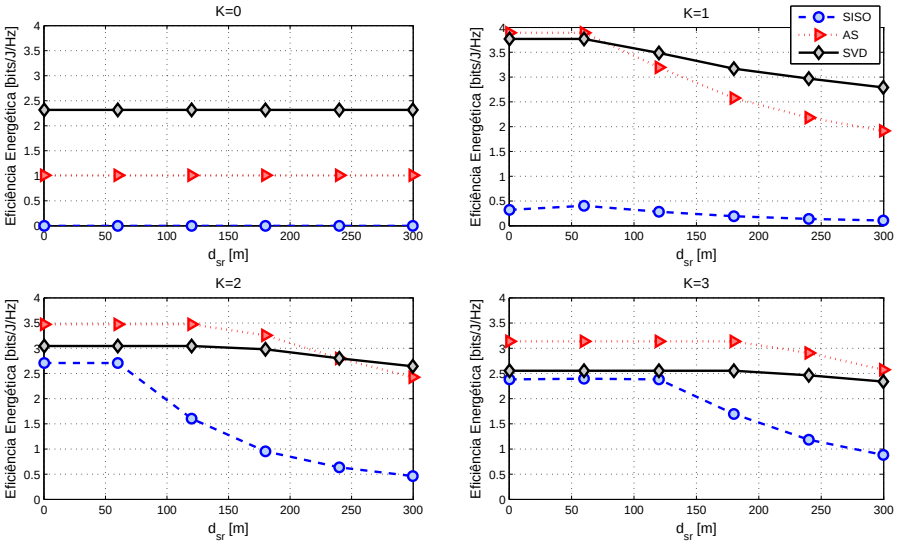


Figura 7: Eficiência energética dos esquemas SISO, AS e SVD cooperativos variando-se a posição dos *relays* para $K \in [0,3]$. A distância entre fonte e destino é $d_{\mathrm{SD}} = 300$ m e $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}} = 2$.

Fonte: Autoria própria.

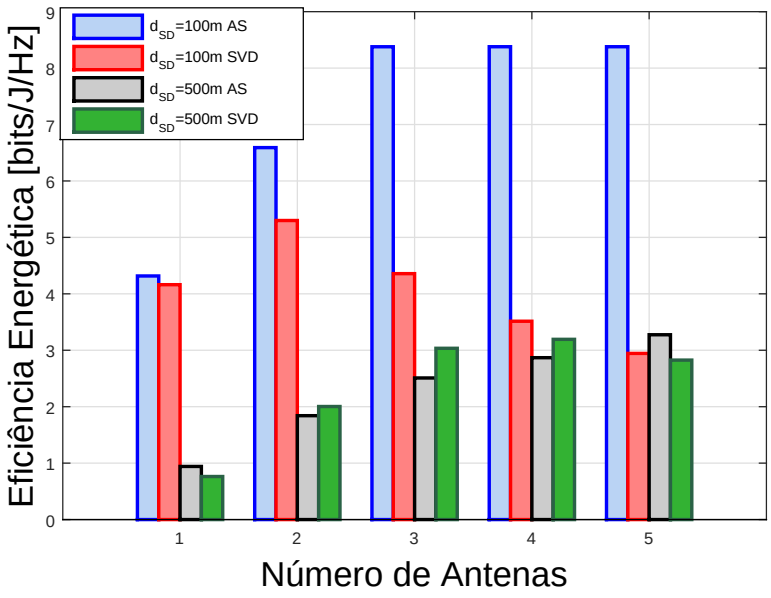


Figura 8: Máxima eficiência energética dos esquemas AS e SVD em função do número de antenas, com $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}}$. O número de *relays* está otimizado para cada ponto para maximizar a eficiência energética.

Fonte: Autoria própria.

eficiente energeticamente.

Por fim, a eficiência energética é avaliada combinando diferentes parâmetros,

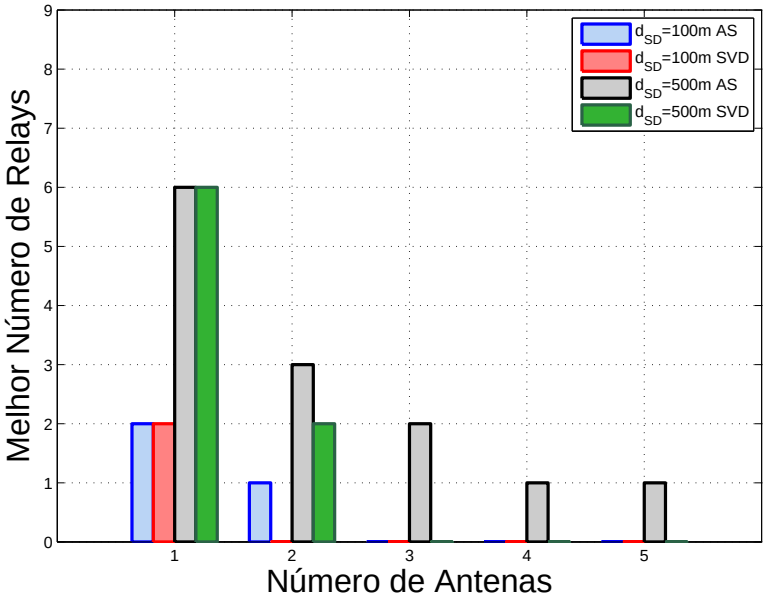


Figura 9: Número ótimo de *relays* que maximiza a eficiência energética dos esquemas AS e SVD em função do número de antenas, com $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}}$.

Fonte: Autoria própria.

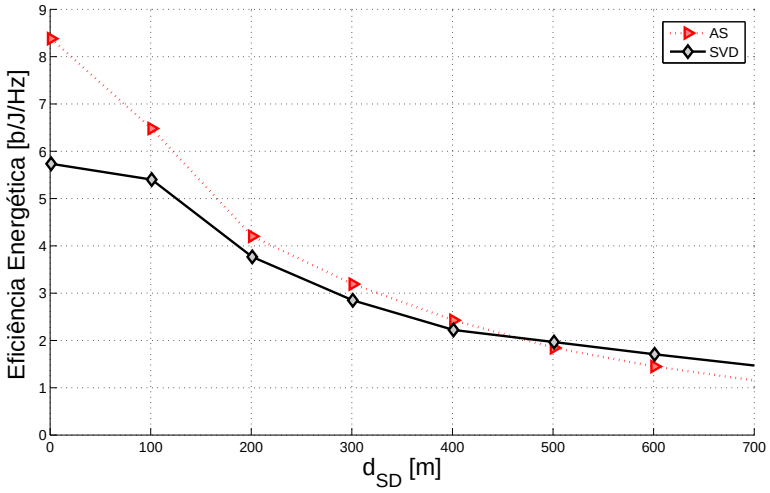
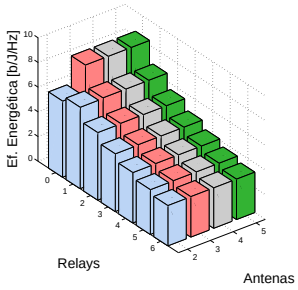


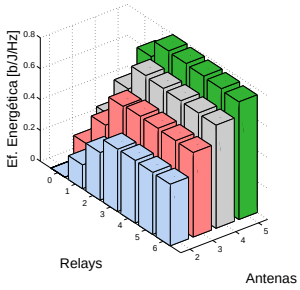
Figura 10: Máxima eficiência energética dos esquemas AS e SVD em função da distância entre fonte e destino, com $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}} = 2$. O número de *relays* está otimizado para cada ponto para maximizar a eficiência energética.

Fonte: Autoria própria.

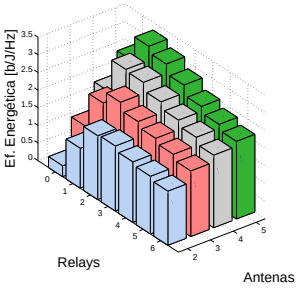
como a distância entre fonte e destino e eficiência espectral, para ter um melhor entendimento em como o número de antenas e o número de *relays* afetam a máxima eficiência energética. A Figura 11 (para o esquema AS) e Figura 12 (para o esquema



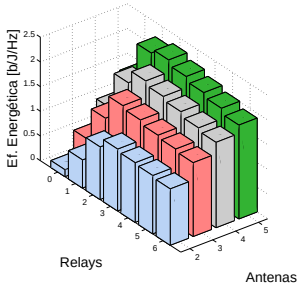
(a) $\xi = 2$ bps/Hz, $d_{\mathrm{SD}} = 100$ m



(b) $\xi = 5$ bps/Hz, $d_{\mathrm{SD}} = 100$ m



(c) $\xi = 2$ bps/Hz, $d_{\mathrm{SD}} = 500$ m

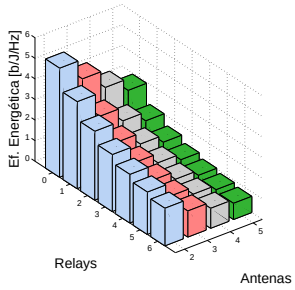


(d) $\xi = 5$ bps/Hz, $d_{\mathrm{SD}} = 500$ m

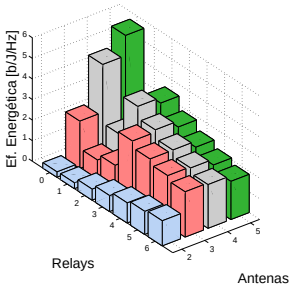
Figura 11: Eficiência energética do esquema AS em função do número de antenas e do número de *relays*, com $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}}$ e $d_{\mathrm{SR}} = 0{,}5 d_{\mathrm{SD}}$ para diferentes ξ e d_{SD}.

Fonte: Autoria própria.

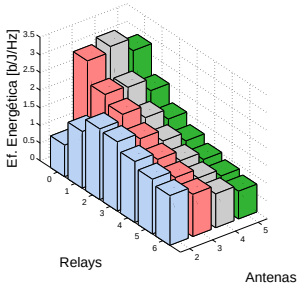
SVD) mostram a influência do número de antenas e do número de *relays* na eficiência energética para dois valores de eficiência espectral $\xi = 2$ bits/s/Hz e $\xi = 5$ bits/s/Hz, e quando a distância entre fonte e destino é $d_{\mathrm{SD}} = 100$ m e $d_{\mathrm{SD}} = 500$ m. Destas figuras pode-se observar que o SVD geralmente requer uma configuração não-cooperativa ($K = 0$) para maximizar a eficiência energética, enquanto os *relays* são necessários pelo SVD somente em casos com poucas antenas (três ou menos) por nó. Por outro lado, o AS requer cooperação para eficiência energética máxima em várias situações. Como a Figura 11 mostra, $K = 0$ é a melhor escolha para o AS somente quando ou ξ ou d_{SD} são muito baixos, de modo que o enlace direto já está em excelentes condições. Se a taxa ou a distância aumenta, configurações com $K > 0$ resultam em sistemas mais eficientes energeticamente, independentemente do número de antenas disponíveis. O efeito da posição relativa dos *relays* também é investigado, onde é notado que ela só tem impacto quando a distância entre os nós é grande, e quando o número de antenas é pequeno (duas antenas). Nestes cenários, o número ótimo de *relays* tende a aumentar para ambos AS e SVD quando os *relays* ficam mais próximos do destino. Caso contrário, o impacto da posição dos *relays* em seu número ótimo, é mínimo.



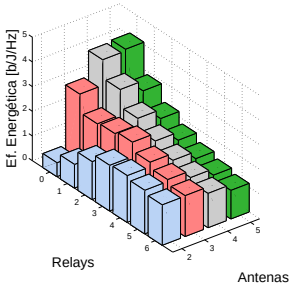
(a) $\xi = 2$ bps/Hz, $d_{\mathrm{SD}} = 100$ m



(b) $\xi = 5$ bps/Hz, $d_{\mathrm{SD}} = 100$ m



(c) $\xi = 2$ bps/Hz, $d_{\mathrm{SD}} = 500$ m



(d) $\xi = 5$ bps/Hz, $d_{\mathrm{SD}} = 500$ m

Figura 12: Eficiência energética do esquema SVD em função do número de antenas e do número de *relays*, com $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}}$ e $d_{\mathrm{SR}} = 0,5 d_{\mathrm{SD}}$ para diferentes ξ e d_{SD}.

Fonte: Autoria própria.

2.6 COMENTÁRIOS FINAIS

Neste capítulo foi comparado o desempenho dos esquemas de transmissão SISO, AS e SVD cooperativos e com múltiplos *relays* em termos de probabilidade de *outage* e eficiência energética, além de derivar as expressões fechadas. Além disso, é proposto um esquema de alocação de potência iterativo distribuído (D-IPA) baseado no algoritmo de Dinkelbach, que alcança desempenho muito similar quando comparado com a alocação de potência baseada em busca exaustiva ótima. Os resultados mostram que, embora não tenha o melhor desempenho de *outage*, AS é a melhor opção para eficiência energética em uma grande variedade de cenários práticos. O SVD, por outro lado, se torna a melhor opção em cenários onde a distância e a eficiência espectral aumentam. Também pode-se notar que para cada cenário há um número específico de *relays* que maximiza a eficiência energética. Em geral, o número ótimo de *relays* é geralmente maior para a seleção de antenas que para o SVD. Ademais, o número de antenas implica em diferentes efeitos nos esquemas AS e SVD. Como os resultados obtidos mostram, o SVD apresenta um número ótimo de antenas que deve ser levado em conta na construção do sistema, uma vez que a eficiência energética decresce se o número de antenas é maior que este número ótimo. Por

outro lado, a eficiência energética da seleção de antenas sempre aumenta com o número de antenas, ainda que este aumento sature em um certo ponto. Por fim, pode-se observar que quando o número de antenas cresce, o número de *relays* necessário para maximizar a eficiência energética diminui tanto para o esquema AS quanto para o esquema SVD.

3 ANÁLISE DE REDES MIMO VISANDO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ANALISANDO CAMADAS FÍSICA E MAC

A maior parte dos artigos na literatura sobre eficiência energética, como em (MADAN et al., 2008; HELIOT et al., 2012; LI et al., 2014a, 2014b; RAYEL et al., 2014; ZHANG et al., 2015a; ROSAS; OBERLI, 2015; CHEN et al., 2011; TANG et al., 2016; LE et al., 2015; BRANTE et al., 2013; PERON et al., 2015; BATABYAL; DAS, 2015; DENG et al., 2015; LE et al., 2016), compreende somente a camada física, do inglês *physical layer* (PHY), ignorando o consumo requerido pela camada (MAC) para comunicar. Entretanto, quando o número de nós se comunicando em uma mesma rede sem fio é muito grande, tal como em cenários emergentes como Internet das Coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT), ou comunicação Máquina-a-Máquina, do inglês *Machine-to-Machine* (M2M), a importância dos protocolos MAC também cresce significativamente, uma vez que o MAC controla "quem", "quando" e "como" o canal sem fio é acessado (LAYA et al., 2016).

Dentre os principais protocolos MAC existentes na literatura, o protocolo ALOHA é um dos mais utilizados (ABRAMSON, 1970). Desenvolvido na Universidade do Havaí, o ALOHA (em inglês *Additive Links On-line Hawaii Area*) foi um dos primeiros protocolos MAC a serem utilizados. Sua primeira versão, chamada de ALOHA Puro, dizia que se um nó tem dados a transmitir, basta enviar. Se o receptor estiver ocupado quando for receber os dados, ele pede uma retransmissão. Neste caso, a forma de identificar se o canal está ocupado é depois da transmissão. Outro protocolo MAC largamente implantado é o CSMA (em inglês *Carrier Sense Multiple Access*), cujas implementações mais conhecidas são as normas IEEE 802.11, um conjunto de especificações que definem as camadas PHY e MAC para redes sem fio (IEEE, 2003), e que são baseadas no DCF (em inglês *Distributed Coordination Function*). Este mecanismo é responsável pelas mensagens de controle entre fonte e destino para reduzir as colisões, iniciando com um RTS (em inglês *Request-To-Send*) por parte da fonte, sendo respondido por um CTS (em inglês *Clear-To-Send*) pelo destino. Outro protocolo relevante é o DQ (em inglês *Distributed Queueing*), proposto inicialmente em (XU; CAMPBELL, 1993). O DQ opera em uma topologia estrela, na qual

é necessário um nó coordenador, embora possa também operar em redes *ad hoc* por meio de uma arquitetura mestre-escravo. O coordenador é responsável somente por transmitir informação mínima de sensibilização da rede, enquanto os dispositivos executam as regras do protocolo e decidem por eles mesmos quando transmitir. Antes de transmitir um pacote, os dispositivos enviam um ARS (em inglês *Access Request Sequence*). Depois disto, os dispositivos são organizados em duas filas: *(i.)* CRQ (em inglês *Contention Resolution Queue*), que contém todos os nós que sofreram colisão e é resolvida por meio de um algoritmo de divisão de árvores; *(ii.)* DTQ (em inglês *Data Transmission Queue*) para dispositivos sem colisão, representando uma FIFO (em inglês *First-In First-Out*) (LAYA et al., 2016). Neste capítulo, é considerado o protocolo CSMA como em (TAY et al., 2004; BURATTI; VERDONE, 2016), que empregam o CSMA em aplicações como economia de potência em redes *ad hoc*, sistemas de localização em interiores, monitoramento de salas e redes de sensores sem fio, cenários semelhantes aos que são analisados nesta tese.

O impacto do protocolo IEEE 802.11 CSMA na vazão fim-a-fim do sistema foi considerado primeiramente em (BIANCHI, 2000), sendo estendido posteriormente em (CHATZIMISIOS et al., 2003b). Ambos os trabalhos consideram o desempenho de uma rede sem fio de um único salto e fornecem expressões analíticas para o atraso adicional imposto pela camada MAC, que depende do número de nós que competem pelo acesso do canal. Mais tarde, baseando-se em (BIANCHI, 2000; CHATZIMISIOS et al., 2003b), uma análise multicamada do consumo energético foi executada por (KIM; STARK, 2012, 2014), que investigam uma relação de troca entre energia e vazão fim-a-fim em redes de salto único e duplo. As camadas física e MAC são levadas em conta em um cenário com única antena e desvanecimento rápido, de modo que o sistema seja avaliado considerando que é possível transmitir com taxa de transmissão equivalente à capacidade do canal, claramente apresentando um limiar superior ao desempenho do sistema. Recentemente (PERON et al., 2016) propõe um cenário com desvanecimento lento, que analisa a eficiência energética de algumas técnicas MIMO. Neste modelo, não há cooperação, mas somente a transmissão direta. Além disso, (ZOGOVIC et al., 2013) analisa uma relação de troca entre eficiência energética e perda de pacotes considerando as camadas física e MAC em canais com desvanecimento por bloco, do inglês *block fading*. A relação de troca pode ser considerada uma decisão de três pontos: tamanho do pacote, potência de transmissão e máximo número de tentativas de transmissão permitidas.

Protocolos MAC para redes cooperativas também podem ser encontrados na literatura, por exemplo em (LIU et al., 2007; OH; LEE, 2011; JIBUKUMAR et al., 2010; ZHU; CAO, 2006; KIM; STARK, 2013). No protocolo CoopMAC (LIU et al., 2007) cada

transmissor atualiza uma tabela chamada *CoopTable* a cada tentativa de transmissão. Então, se o transmissor tem um enlace direto em más condições, ele seleciona o *relay* que fornece a maior vazão a partir *CoopTable*. Com uma abordagem diferente (OH; LEE, 2011; JIBUKUMAR et al., 2010) propõe algoritmos MAC cooperativos para reduzir a sobrecarga causada quando o número de nós é alto. Outro protocolo, denominado rDCF em (ZHU; CAO, 2006) delega a seleção do *relay* para o receptor, que decide empregar ou não um *relay* pré-selecionado de acordo com a informação do estado do canal, do inglês *channel state information* (CSI). Recentemente, (KIM; STARK, 2013) propõe o protocolo SRMAC estendendo (BIANCHI, 2000) para uma cooperação com um único *relay*. Entretanto, o modelo não evita colisões se mais de um nó tenta retransmitir a informação da fonte.

Neste capítulo, é realizada uma análise da eficiência energética multicamada entre as camadas PHY e MAC em redes MIMO cooperativas. Ademais, o foco é no desvanecimento quase-estático, que é mais prático para muitos cenários reais de redes sem fio com tempo de coerência relativamente mais alto. Então, um protocolo MAC cooperativo distribuído é proposto, baseado no IEEE 802.11 CSMA, o qual evita que tabelas devam ser mantidas atualizadas e que pode ser facilmente estendido para múltiplos *relays*, empregando algoritmos de seleção de *relays*. Além disso, o suporte ao canal de retorno para estimação de canal utilizando múltiplas antenas também é modelado para lidar com requerimentos aplicados a esquemas MIMO. A análise na camada física considera um limiar máximo para a probabilidade *outage*, que deve ser atendido como um requerimento de qualidade de serviço. Por fim, três esquemas MIMO diferentes são comparados: seleção de antenas (AS), e o *beamforming* com decomposição por valores singulares (SVD), que já foram apresentados no capítulo anterior, além do esquema de multiplexação espacial, do inglês *spatial multiplexing* (SM), cuja diferença em relação ao SVD é aumentar a taxa de transmissão ao transmitir informações diferentes pelos múltiplos feixes paralelos gerados pelas múltiplas antenas, ao passo que o SVD transmite o mesmo símbolo por todas as antenas do transmissor, com foco em ganho de diversidade espacial.

Em suma, para resumir a revisão da literatura e ressaltar a novidade desta parte do trabalho, alguns artigos citados neste documento são listados na Tabela 3, que enfatiza alguns aspectos tais como camadas PHY e MAC consideradas, utilização de MIMO, *relays* e desvanecimento lento ou não. É mister notar que muitos desses aspectos já foram considerados em outros trabalhos da literatura, porém não de forma conjunta como se é proposto aqui.

Tabela 3: Resumo dos trabalhos relacionados

Trabalho	PHY	MAC	MIMO	*Relay*	Canal Lento
(MADAN et al., 2008)	✓		✓	✓	✓
(HELIOT et al., 2012)	✓		✓	✓	✓
(LI et al., 2014a)	✓		✓	✓	✓
(STANOJEV et al., 2009)	✓			✓	✓
(BRANTE et al., 2011)	✓			✓	✓
(ZHANG et al., 2015a)	✓		✓		
(RAYEL et al., 2014)	✓		✓		
(BATABYAL; DAS, 2015)	✓		✓		
(ROSAS; OBERLI, 2015)	✓		✓		
(TANG et al., 2016)	✓		✓		
(LE et al., 2016)	✓		✓		
(LE et al., 2015)	✓		✓		✓
(BRANTE et al., 2013)	✓		✓	✓	✓
(PERON et al., 2015)	✓		✓	✓	✓
(DENG et al., 2015)	✓		✓	✓	✓
(BIANCHI, 2000)	✓	✓			
(CHATZIMISIOS et al., 2003b)	✓	✓			
(KIM; STARK, 2014)	✓	✓			
(KIM; STARK, 2012)	✓	✓		✓	
(PERON et al., 2016)	✓	✓	✓		✓
(ZOGOVIC et al., 2013)	✓	✓			✓
(LIU et al., 2007)	✓	✓		✓	
(OH; LEE, 2011)		✓		✓	
(JIBUKUMAR et al., 2010)		✓		✓	
(ZHU; CAO, 2006)	✓	✓		✓	✓
(KIM; STARK, 2013)	✓	✓		✓	✓
Esta proposta	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Autoria própria.

3.1 MODELO DO SISTEMA

Neste capítulo considera-se o sistema como ilustrado na Figura 13, o qual consiste de um nó fonte denotado por S, um nó *relay* denotado por R e um nó destino denotado por D, equipados com múltiplas antenas. Além disso, há também outros nós competindo para o acesso do canal, os quais utilizam a mesma potência de transmissão, esquema de transmissão e protocolo MAC. Da mesma forma que o capítulo anterior utiliza-se $\mathcal{N}_{\mathrm{S}}$ para denotar o número total de antenas na fonte, $\mathcal{N}_{\mathrm{R}}$ no *relay* e $\mathcal{N}_{\mathrm{D}}$ no destino, assim como n_{S}, n_{R} e n_{D} representam o número de antenas ativas em cada respectivo nó, os quais dependem de cada esquema MIMO empregado.

O sistema opera também de acordo com o protocolo IDF (LANEMAN et al.,

2004), tal que a retransmissão funciona de forma similar aos protocolos de seleção de *relays* oportunista (BLETSAS et al., 2006), em que o nó com a melhor SNR é escolhido para retransmitir. Entretanto, visando um entendimento mais pontual do sistema, opta-se por considerar um único *relay* na análise deste capítulo. Além disto, a fonte também faz parte do processo de retransmissão, podendo retransmitir a sua mensagem no segundo instante de tempo se necessário. Assim, a fonte primeiramente envia a mensagem para o destino e *relay* por difusão, do inglês *broadcast*. Se o destino não for capaz de decodificar a mensagem corretamente, então ele envia um pedido de retransmissão utilizando-se de um canal de retorno livre de erros. Durante a fase de retransmissão, fonte e *relay* estimam suas SNRs instantâneas em relação ao destino e esperam por um tempo inversamente proporcional a elas antes de transmitir, garantindo que o nó com a melhor CSI atue como um auxiliar[1]. Portanto, assume-se que:

- A fonte sempre pode ser um auxiliar;
- Se o *relay* foi capaz de decodificar a mensagem da fonte, então ele também pode ser um auxiliar.

Considera-se ainda que o destino realiza MRC entre as transmissões da fonte e do nó auxiliar.

3.1.1 Camada Física

O equacionamento dos quadros na camada física segue o mesmo modelo do capítulo anterior em que um quadro transmitido por um nó pode ser expresso por (1), o *link-budget* por (2) e a SNR instantânea por (3).[2]

Em relação à fase de retransmissão assume-se uma estratégia similar a (BLETSAS et al., 2006), em que cada nó auxiliar $a \in \{\mathrm{S}, \mathrm{R}\}$ estima a SNR instantânea $\gamma_{a\mathrm{D}}$ utilizando um conjunto de pilotos enviados por D e espera um tempo

$$t_a \propto T_{\mathrm{hRTS}} \cdot e^{-\gamma_{a\mathrm{D}}} \tag{40}$$

antes de transmitir, em que T_{hRTS} é o tempo gasto para enviar um pedido de

[1] O termo auxiliar, ou *helper* mais comum na literatura em inglês, é adotado no modelo deste capítulo uma vez que a fonte também faz parte do conjunto de nós que pode retransmitir.

[2] A notação do Capítulo 2 será mantida neste Capítulo sempre que possível. Para as equações que são exatamente iguais em ambos capítulos, a numeração correspondente será referenciada. Entretanto, para definições em que haja alguma alteração em função das mudanças de cenários de análise, mantém-se a mesma notação, mas a expressão é redefinida neste capítulo conforme necessário.

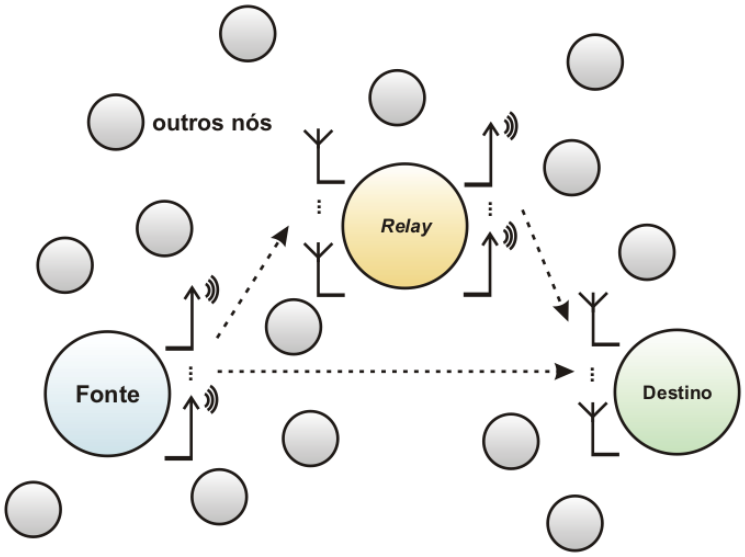


Figura 13: Rede sem fio MIMO composta por fonte, *relay* e destino, se comunicando entre outros nós que competem pelo acesso ao canal.

Fonte: Autoria própria.

retransmissão. Além disso, assume-se que o tamanho total da janela para a seleção do nó auxiliar é $2T_{\text{hRTS}}$, conforme será melhor detalhado na descrição do protocolo MAC na seção 3.4.

3.1.2 Protocolo MAC

O protocolo MAC cooperativo proposto se baseia na norma IEEE 802.11 RTS/CTS, a qual define que a fonte envia primeiramente um pacote RTS, seguido pelo destino replicando com um CTS, de modo que a comunicação seja estabelecida. Depois de os dados serem transmitidos pela fonte, o destino responde com um ACK ou RFR (em inglês *request-for-retransmission*), indicando a correta recepção dos dados ou não. No caso de um RFR, um novo pacote de controle chamado hRTS (*helper* RTS) é proposto para permitir a cooperação, que é enviado pelo nó auxiliar selecionado para estabelecer a transmissão.

Além disso, é importante ressaltar que, pela virtude do protocolo MAC, quando a fonte obtém o acesso ao canal, todos os outros nós dentro do alcance de transmissão de S e D têm a transmissão bloqueada. Ainda, se o *relay* for selecionado para retransmitir, os nós dentro do alcance de transmissão de R também têm a transmissão bloqueada. Tal bloqueio ocorre quando os nós competidores nestas áreas escutam os pacotes RTS, CTS e hRTS ou quando eles detectam alguma transmissão em curso (BIANCHI, 2000).

Portanto, há uma relação dinâmica entre potência de transmissão, que determina o raio de alcance e o número de nós que competem pelo acesso ao canal.

A mínima potência do sinal recebido que os nós podem detectar é denotada por P_{th}, também chamada de Potência de Contenção Mínima. A partir disto, o raio de reserva do canal, ou seja, o raio que outros nós podem competir com o transmissor para o acesso do canal é

$$d_{\text{resv}} = \left(\frac{P}{P_{\text{th}}}\right)^{\frac{1}{\nu}}, \tag{41}$$

em que $P = P_i$, $\forall i$, é a potência de transmissão, considerada neste capítulo igual para todos os nós das rede.

Além disso, assume-se que além de S, R e D os outros nós são uniformemente distribuídos com densidade μ, de forma que o número n de nós competidores com o nó transmissor é

$$n = \mu\pi d_{\text{resv}}^2 = \mu\pi \left(\frac{P}{P_{\text{th}}}\right)^{\frac{2}{\nu}}. \tag{42}$$

Por fim, assume-se taxa fixa tanto para as camadas física e MAC. As mensagens do protocolo MAC são enviadas com a taxa R_{control}, que assume-se a ser baixa o bastante para fornecer transmissão de mensagens de controle livre de erros, enquanto a camada PHY pode empregar uma taxa maior R_d para a transmissão de dados.

3.1.3 Modelo de Consumo de Potência

Assim como no capítulo anterior, utiliza-se o modelo de consumo de potência linear como em (CUI et al., 2005), de forma que o consumo total de potência nas fases de difusão ($\mathcal{P}_{\text{broad}}$) e de retransmissão ($\mathcal{P}_{\text{retr}}$) são dadas respectivamente por (9) e (10). Entretanto, como $\mathcal{P}_{\text{retr}}$ depende agora do nó auxiliar $a \in \{\text{S}, \text{R}\}$, redefine-se esta expressão como sendo

$$\mathcal{P}_{\text{retr}} = (1+\psi)P_a + n_a P_{\text{TX}} + n_{\text{D}} P_{\text{RX}}. \tag{43}$$

Assim, o consumo de potência total durante o processo de cooperação $\mathcal{P}_{\text{coop}}$ é

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{\text{coop}} =& \mathcal{P}_{\text{broad}} + \mathcal{P}_{\text{retr}} \\ =& (1+\psi)(P_{\text{S}} + P_a) + (n_{\text{S}} + n_a)P_{\text{TX}} + (n_{\text{R}} + 2n_{\text{D}})P_{\text{RX}}. \end{aligned} \tag{44}$$

3.2 PROBABILIDADE DE *OUTAGE*

Como foi visto no capítulo anterior, uma falha ocorre quando $I_{ij} < \xi$, onde I_{ij} é a informação mútua normalizada pela largura de banda no enlace *i-j* (GOLDSMITH, 2005). Assim, um evento de *outage* ocorre quando $\{\gamma_{ij} < \rho\}$, em que $\rho = 2^{\xi} - 1$.

Um pacote é considerado perdido se um conjunto de eventos de falha ocorrem. Antes de definir a probabilidade de perda de pacote, define-se as seguintes probabilidades de *outage*:

i.) $p_{\mathrm{SD}} = \Pr\{\gamma_{\mathrm{SD1}} < \rho\}$, a probabilidade de *outage* entre a fonte e o destino na fase de difusão;

ii.) $p_{\mathrm{SR}} = \Pr\{\gamma_{\mathrm{SR}} < \rho\}$, a probabilidade de *outage* entre fonte e o *relay*;

iii.) $p_{\mathrm{SS}} = \Pr\{\gamma_{\mathrm{SD1}} + \gamma_{\mathrm{SD2}} < \rho \,|\, \gamma_{\mathrm{SD1}} < \rho, \gamma_{\mathrm{SR}} < \rho\}$, a probabilidade de *outage* entre a fonte e o destino depois do MRC dos sinais recebidos das fases de difusão e de retransmissão, dado que houve uma falha na fase da difusão entre a fonte e o *relay* e entre a fonte e o destino;

iv.) $p_{\mathrm{SSD}} = \Pr\{\gamma_{\mathrm{SD1}} + \gamma_{\mathrm{SD2}} < \rho \bigcap \gamma_{\mathrm{SD2}} > \gamma_{\mathrm{RD}} \,|\, \gamma_{\mathrm{SD1}} < \rho\}$, a probabilidade de *outage* depois do MRC dos sinais recebidos das fases de difusão e retransmissão, combinada com a probabilidade que a fonte foi o nó auxiliar, dado que houve uma falha entre a fonte e o destino na fase de difusão;

v.) $p_{\mathrm{SRD}} = \Pr\{\gamma_{\mathrm{SD1}} + \gamma_{\mathrm{RD}} < \rho \bigcap \gamma_{\mathrm{RD}} \geq \gamma_{\mathrm{SD2}} \,|\, \gamma_{\mathrm{SD1}} < \rho\}$, a probabilidade de *outage* depois do MRC dos sinais recebidos das fases de difusão e retransmissão, combinada com a probabilidade que o *relay* foi o nó auxiliar, dado que houve uma falha entre a fonte e o destino na fase de difusão.

Por fim, após as manipulações apropriadas das probabilidades de *outage* acima, a probabilidade de perda de pacote é

$$P_{\mathrm{drop}} = p_{\mathrm{SD}} p_{\mathrm{SR}} p_{\mathrm{SS}} + p_{\mathrm{SD}} \left(1 - p_{\mathrm{SR}}\right) \left(p_{\mathrm{SSD}} + p_{\mathrm{SRD}}\right), \tag{45}$$

onde o primeiro termo representa as chances de falha na fase de difusão e depois da retransmissão quando a fonte atua como nó auxiliar, uma vez que neste caso também a fonte não consegue realizar uma transmissão bem sucedida para o *relay*. O segundo termo, por sua vez, define as chances de ocorrer uma falha na fase de difusão e depois da

retransmissão quando fonte ou *relay* atuam como nó auxiliares, se houve uma transmissão bem sucedida da fonte para o *relay*. É importante ressaltar que a probabilidade de *outage* é válida somente para a camada física neste trabalho, uma vez que é considerado que a camada MAC é livre de erros. Entretanto, considera-se possibilidade de colisões na camada MAC.

3.3 ESQUEMAS DE TRANSMISSÃO

Nesta seção serão descritos os esquemas MIMO adotados neste capítulo em termos de SNR instantânea e consumo energético. Muito embora a maior parte dos esquemas já foram definidos no capítulo anterior, o foco deste capítulo não é encontrar expressões fechadas para a camada física, mas um modelo de eficiência energética multicamada. Para isso são realizadas simulações Monte Carlo, a partir das definições de informação mútua, tendo em vista que as aproximações para as equações de probabilidade *outage* do Capítulo 2 poderiam causar pequenas distorções em relação à interação entre as camadas PHY e MAC, que são foco dessa presente análise. A título de comparação, primeiramente é descrito o esquema de transmissão SISO.

3.3.1 Antena Única (SISO)

Primeiramente assume-se o esquema de transmissão SISO, de modo que $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}} = 1$. Os consumo de potência nas fases de difusão e cooperação são respectivamente

$$\mathcal{P}_{\mathrm{broad,SISO}} = (1+\psi)P_{\mathrm{S}} + P_{\mathrm{TX}} + 2P_{\mathrm{RX}}, \tag{46}$$

$$\mathcal{P}_{\mathrm{retr,SISO}} = (1+\psi)P_a + P_{\mathrm{TX}} + P_{\mathrm{RX}}. \tag{47}$$

A SNR instantânea no enlace $i-j$ é denotada por (GOLDSMITH, 2005)

$$\gamma_{ij,\mathrm{SISO}} = |h_{ij}|^2 \bar{\gamma}_{ij}, \tag{48}$$

em que as informações mútuas para um enlace ponto-a-ponto e após o MRC entre dois enlaces são, respectivamente,

$$I_{ij,\mathrm{SISO}} = \log_2(1+\gamma_{ij,\mathrm{SISO}}), \tag{49}$$

$$I_{\mathrm{MRC,SISO}} = \log_2(1+\gamma_{\mathrm{SD1,SISO}} + \gamma_{a\mathrm{D,SISO}}). \tag{50}$$

3.3.2 Seleção de Antenas (AS)

Assume-se que fonte, *relays* e destinos estão equipados com $\mathcal{N}_{\mathrm{S}}$, $\mathcal{N}_{\mathrm{R}}$ e $\mathcal{N}_{\mathrm{D}}$ antenas, respectivamente, mas somente uma única antena é selecionada em cada nó, $n_{\mathrm{S}} = n_{\mathrm{R}} = n_{\mathrm{D}} = 1$. Desta forma, os consumos de difusão e cooperação no esquema AS são respectivamente

$$\mathcal{P}_{\mathrm{broad,AS}} = (1+\psi)P_{\mathrm{S}} + P_{\mathrm{TX}} + 2P_{\mathrm{RX}}, \tag{51}$$

$$\mathcal{P}_{\mathrm{retr,AS}} = (1+\psi)P_a + P_{\mathrm{TX}} + P_{\mathrm{RX}}. \tag{52}$$

É importante ressaltar que a melhor antena nos receptores pode ser selecionada baseada na SNR recebida, enquanto nos transmissores o esquema AS requer um retorno do receptor para informar o índice da antena selecionada, que assume-se ser feito através de um canal de retorno livre de erros. Além disto, assume-se que o índice da antena selecionada é enviado pela camada MAC por um pacote específico.

A SNR instantânea no enlace $i-j$ é denotada por (GOLDSMITH, 2005)

$$\gamma_{ij,\mathrm{AS}} = \max_{i,j} \left(|h_{ij}|^2 \right) \bar{\gamma}_{ij}, \tag{53}$$

em que a seleção é realizada pelas melhores antenas de transmissão e recepção. Ademais, a informação mútua é similar à da SISO, mas substituindo pela SNR instantânea e a informação mútua segue o mesmo procedimento que o esquema SISO.

3.3.3 Multiplexação Espacial (SM)

Neste esquema, todas as $\mathcal{N}_{\mathrm{S}}$, $\mathcal{N}_{\mathrm{R}}$ e $\mathcal{N}_{\mathrm{D}}$ antenas são empregadas, tendo em vista que o foco é maximizar a taxa de transmissão explorando os caminhos paralelos proporcionados pelas múltiplas antenas. Neste caso, ganhos de diversidade são deixados de lado. Em termos de consumo de potência tem-se

$$\mathcal{P}_{\mathrm{broad,SM}} = (1+\psi)P_{\mathrm{S}} + \mathcal{N}_{\mathrm{S}}P_{\mathrm{TX}} + (\mathcal{N}_{\mathrm{R}} + \mathcal{N}_{\mathrm{D}})P_{\mathrm{RX}}, \tag{54}$$

$$\mathcal{P}_{\mathrm{retr,SM}} = (1+\psi)P_a + \mathcal{N}_a P_{\mathrm{TX}} + \mathcal{N}_{\mathrm{D}}P_{\mathrm{RX}}. \tag{55}$$

As informações mútuas para um enlace ponto-a-ponto e para o MRC podem ser

escritas, respectivamente, conforme (RAYEL et al., 2014; TSE; VISWANATH, 2005)

$$I_{ij,\mathrm{SM}} = \log_2\left(\det\left[\mathbf{I}_{\varpi} + \frac{\bar{\gamma}_{ij}}{\mathcal{N}_i}\mathbf{\Xi}_{ij}\right]\right), \tag{56}$$

$$I_{\mathrm{MRC,SM}} = \log_2\left(\det\left[\mathbf{I}_{\varpi} + \frac{\bar{\gamma}_{\mathrm{SD1}}}{\mathcal{N}_{\mathrm{S}}}\mathbf{\Xi}_{\mathrm{SD1}} + \frac{\bar{\gamma}_{a\mathrm{D}}}{\mathcal{N}_a}\mathbf{\Xi}_{a\mathrm{D}}\right]\right), \tag{57}$$

onde ϖ denota o número de caminhos paralelos da comunicação, representado pelo mínimo número de antenas entre o transmissor e o receptor e $\mathbf{I}_{\varpi}$ corresponde a uma matriz identidade de ordem $\varpi \times \varpi$, tal que

$$\begin{cases} \mathbf{\Xi} = \mathbf{H}\mathbf{H}^{\dagger} & \text{se} \quad \mathcal{N}_{\mathrm{i}} \geq \mathcal{N}_{\mathrm{j}}, \\ \mathbf{\Xi} = \mathbf{H}^{\dagger}\mathbf{H} & \text{se} \quad \mathcal{N}_{\mathrm{i}} < \mathcal{N}_{\mathrm{j}}, \end{cases} \tag{58}$$

com $\mathbf{H}^{\dagger}$ representando a transposta Hermitiana de $\mathbf{H}$. Uma condição operacional básica para o SM é que o número de antenas de recepção deve ser pelo menos tão grande quanto o número de caminhos paralelos (ou do número de antenas de transmissão). Em geral, uma *outage* acontece quando qualquer destes ϖ caminhos paralelos falha.

3.3.4 Decomposição Por Valores Singulares (SVD)

Como no SM, todas as antenas $\mathcal{N}_{\mathrm{S}}$, $\mathcal{N}_{\mathrm{R}}$ e $\mathcal{N}_{\mathrm{D}}$ também estão empregadas. Entretanto, neste caso um vetor de *beamforming* é utilizado no transmissor para maximizar a (MCKAY et al., 2006) SNR. Assim, o canal MIMO é decomposto em canais paralelos e o mesmo vetor de dados, sendo transmitido utilizando o caminho mais vantajoso, diferentemente do SM que utiliza canais paralelos para aumentar a taxa de dados sacrificando a probabilidade de *outage*. Em termos de consumo de potência,

$$\mathcal{P}_{\mathrm{broad,SVD}} = (1+\psi)P_{\mathrm{S}} + \mathcal{N}_{\mathrm{S}}P_{\mathrm{TX}} + (\mathcal{N}_{\mathrm{R}} + \mathcal{N}_{\mathrm{D}})P_{\mathrm{RX}}, \tag{59}$$

$$\mathcal{P}_{\mathrm{retr,SVD}} = (1+\psi)P_a + \mathcal{N}_a P_{\mathrm{TX}} + \mathcal{N}_{\mathrm{D}}P_{\mathrm{RX}}, \tag{60}$$

que são muito similares às expressões do SM, exceto pelo fato de que para a mesma probabilidade de *outage* SVD e SM requerem potências de transmissão diferentes, gerando consumo de potência e desempenho geral também diferentes.

A SNR instantânea em um enlace SVD é (TSE; VISWANATH, 2005)

$$\gamma_{ij,\mathrm{SVD}} = \bar{\gamma}_{ij}\,\lambda_{\max}, \tag{61}$$

onde $\lambda_{\max}$ é o máximo autovalor de $\mathbf{\Xi}$. A informação mútua pode ser expressa do mesmo modo que a (49) e (50), com a correspondente troca da SNR.

3.4 PROTOCOLO MAC COOPERATIVO PROPOSTO

O protocolo MAC cooperativo proposto neste trabalho, que se baseia no IEEE 802.11 RTS/CTS, é ilustrado na Figura 14 e resumido a seguir.

1. Quando o nó fonte tem um pacote para transmitir, primeiramente ele escuta o canal por um tempo denotado por DIFS;

2. Se o canal está livre durante este período, ele então inicia um contador aleatório de *backoff*, caso contrário a transmissão é adiada;

3. Assim que o contator de *backoff* expira, o nó fonte transmite um pacote de controle RTS;

4. Ao receber o pacote RTS, o nó destino espera por um tempo denotado por SIFS e então responde com um CTS;

5. Depois de receber o CTS, a fonte espera por um intervalo SIFS e então transmite um NDP (em inglês *null data packet*)[3], contendo os símbolos pilotos, que são utilizados pelo destino (e qualquer *relay* possível) para estimar a CSI entre todas as antenas de transmissão e recepção;

6. O receptor espera por um SIFS e envia um pacote de retorno denominado CFR (em inglês *channel feedback report*)[4];

7. Depois desta fase inicial de *handshake*, a fonte espera por um SIFS e começa uma transmissão de um pacote de dados para os nós destino e *relay*;

8a. Se o pacote de dados foi corretamente decodificado, então:
o destino espera por um SIFS e envia um pacote ACK. Neste caso, a transmissão é considerada bem sucedida e o nó fonte finaliza a comunicação com um pacote sACK. O mecanismo até este passo é ilustrado pela Figura 14a;

8b. Caso contrário, se o pacote de dados não foi corretamente decodificado, então:
o destino espera por um intervalo SIFS e responde com um pacote RFR, requerendo uma retransmissão, seguindo a Figura 14b;

[3] O NDP possui tamanho variável, uma vez que ele depende do esquema MIMO empregado.

[4] O CFR também possui tamanho variável, uma vez que ele depende do esquema MIMO empregado, podendo ser o índice da antena selecionada ou o relatório do *beamforming*, que compreende a matriz de direção das antenas.

9. Assim, o processo de seleção do nó auxiliar começa. O pacote RFR é estruturado de maneira similar ao NDP, de modo que cada *relay* potencial (incluindo a fonte) utiliza estes símbolos pilotos para estimar seu CSI em relação ao destino para estabelecer um contador de tempo definido por (40) antes de transmitir um hRTS. Então, o nó com a melhor SNR instantânea em relação ao destino informa o destino (e os demais nós) que ele irá retransmitir os dados[5];

10. Então, o nó auxiliar espera por outro intervalo SIFS antes de começar a retransmitir;

11. Se o pacote de dados for decodificado com sucesso após a retransmissão no destino, ele então responde com um ACK;

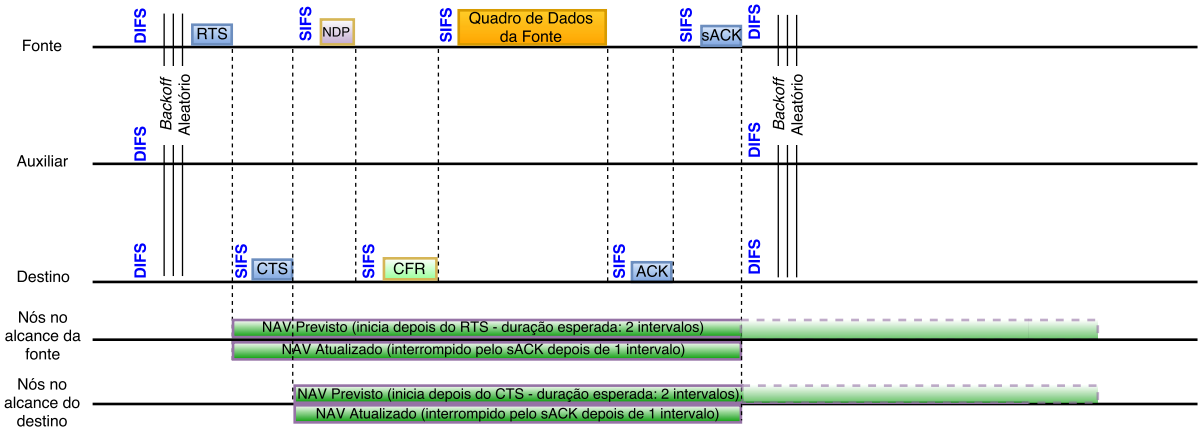
12. No caso de falha, assume-se que a fonte deve reagendar a transmissão para um instante futuro.

É importante ressaltar que o esquema proposto pode ser facilmente estendido para incluir múltiplas retransmissões, assim como múltiplos *relays*. No entanto, a análise para este trabalho restringe-se ao caso de um único *relay* e uma única retransmissão, focando no melhor entendimento da interação entre as camadas PHY e MAC neste contexto cooperativo.

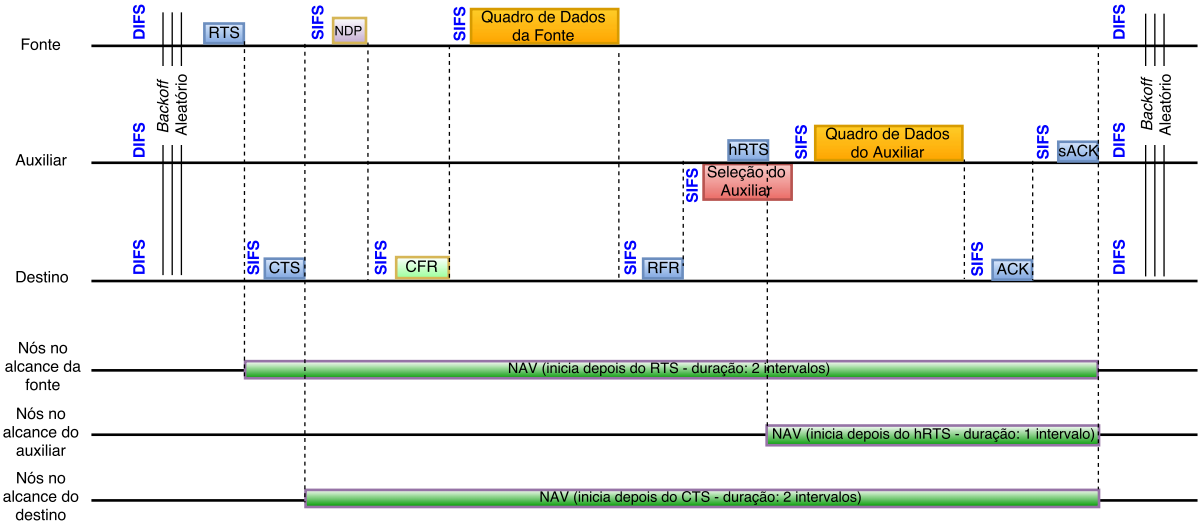
Outrossim, para evitar colisões de pacotes é utilizado vetor de atividade de rede, do inglês *network activity vector* (NAV), como a Figura 14 ilustra embaixo de cada diagrama. Como pode ser observado, os pacotes RTS, CTS e hRTS sempre configuram o NAV de modo que os outros nós na vizinhança devem permanecer inativos por um período de tempo estabelecido pelo NAV. Por padrão, neste modelo assume-se que o NAV dura dois intervalos de tempo, já levando-se em conta para uma possível retransmissão. Logo, os pacotes de controle ACK e sACK são utilizados para limpar o NAV, habilitando o acesso ao canal. É mister ressaltar que o NAV apenas é limpo totalmente após o sACK, visto que o canal ainda está ocupado até aquele ponto. No caso de uma falha depois de uma retransmissão, o destino permanece em silêncio. Desta forma, se fonte não receber nenhum ACK durante um tempo esperado, ela considera que o pacote foi perdido e deve reagendar a transmissão. Neste caso, o NAV é limpo automaticamente depois de dois intervalos de tempo. Além disso, assume-se que cada nó congela seu contador de *backoff*

[5] O comprimento total para a seleção do nó auxiliar é considerado fixo em $2T_{\mathrm{hRTS}}$, de modo que t_a em (40) é o tempo em que cada nó candidato a ser auxiliar espera dentro desta janela de tempo para enviar a mensagem hRTS. Este tempo varia de 0 a T_{hRTS}, sendo que nó que estiver na pior condição irá esperar por um tempo $t_a = T_{\mathrm{hRTS}}$, para iniciar a transmissão do pacote hRTS informando os nós vizinhos que houve um auxiliar selecionado.

quando o canal é percebido que estiver ocupado, sendo reativado quando o canal está livre por uma duração de tempo denotada por DIFS.



(a) Transmissão direta



(b) Transmissão cooperativa

Figura 14: Modelo do protocolo MAC proposto com o NAV.

Fonte: Autoria própria.

3.4.1 Atraso do Protocolo MAC

Portanto, o atraso para o protocolo cooperativo MAC proposto quando a transmissão direta é bem sucedida e quando a cooperação ocorre pode ser escrito respectivamente como (KIM; STARK, 2014)

$$D_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{dir})} = E[X]\cdot E[L] + T_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{dir})} + \frac{pT_{\mathrm{c}}}{1-p}, \tag{62}$$

$$D_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{coop})} = E[X]\cdot E[L] + T_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{coop})} + \frac{pT_{\mathrm{c}}}{1-p}, \tag{63}$$

onde $E[X]$ é o número médio de contagens de *backoff* até que o nó fonte receba o acesso ao canal e $E[L]$ é o comprimento médio de tempo para decrementar o contador de *backoff*, que será matematicamente formalizado adiante. Ademais, T_{c} é o tempo consumido quando pacotes RTS colidem e p é a probabilidade de colisão quando um nó transmite um pacote. Por fim, $T_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{dir})}$ e $T_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{coop})}$ representam a sobrecarga do protocolo MAC das transmissões direta e cooperativa dadas por

$$T_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{dir})} = T_{\mathrm{RTS}} + T_{\mathrm{CTS}} + T_{\mathrm{NDP}} + T_{\mathrm{CFR}} + T_{\mathrm{ACK}} + T_{\mathrm{sACK}} + 7\delta + 6T_{\mathrm{SIFS}} + T_{\mathrm{DIFS}}, \tag{64}$$

$$T_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{coop})} = T_{\mathrm{RTS}} + T_{\mathrm{CTS}} + T_{\mathrm{NDP}} + T_{\mathrm{CFR}} + T_{\mathrm{RFR}} + 2T_{\mathrm{hRTS}} + T_{\mathrm{ACK}} + T_{\mathrm{sACK}} + 10\delta + \\ + 9T_{\mathrm{SIFS}} + T_{\mathrm{DIFS}}, \tag{65}$$

em que T_{RTS}, T_{CTS}, T_{NDP}, T_{CFR}, T_{RFR}, T_{ACK} e T_{sACK} representam o tempo utilizado para transmitir os pacotes de controle RTS, CTS, NDP, CFR, RFR, ACK e sACK, respectivamente, calculados pela razão entre o tamanho de cada pacote e a taxa fixa de transmissão dos pacotes de controle, R_{control}. Além disso, $2T_{\mathrm{hRTS}}$ denota o tempo gasto durante a seleção do nó auxiliar, enquanto o atraso de propagação depende da distância entre os nós i e j, de forma que $\delta = d_{ij}/(3 \cdot 10^8)$. Além disso, o T_{SIFS} é o tempo necessário para qualquer nó processar um quadro recebido e responder com um quadro de resposta, enquanto T_{DIFS} é o intervalo de tempo utilizado para perceber o estado do canal antes de transmitir.

A probabilidade de que exista pelo menos uma transmissão em curso em um dado tempo é definida por p_{tr}, enquanto a probabilidade condicional de que uma transmissão ocorrendo no canal tenha sucesso, dado que há pelo menos uma transmissão ocorrendo no canal, é denotada por p_{s}. Como uma transmissão bem sucedida acontece somente quando um nó transmite em um canal, p_{tr} e p_{s} são definidas de acordo com (BIANCHI, 2000) como

$$p_{\mathrm{tr}} = 1 - (1-\tau)^n, \tag{66}$$

$$p_{\mathrm{s}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1-(1-\tau)^n}, \tag{67}$$

onde τ é a probabilidade de que um nó transmita um pacote em um tempo aleatório, o

qual pode ser determinado pelas seguintes equações não-lineares (DUFFY et al., 2005)

$$\tau = b_{(0,0)} \cdot \frac{q^2}{1-q}\left[\frac{W_{\min}}{(1-p)\left[1-(1-q)^{W_{\min}}\right]} - (1-p)\right], \tag{68}$$

$$\frac{1}{b_{(0,0)}} = (1-q) + \frac{q^2 W_{\min}(W_{\min}+1)}{2\left[1-(1-q)^{W_{\min}}\right]} + \frac{q(W_{\min}+1)}{2(1-q)} \cdot \left[\frac{q^2 W_{\min}}{1-(1-q)^{W_{\min}}} + p(1-q) - q(1-p)^2\right] + \frac{pq^2}{2(1-q)(1-p)} \cdot \left[\frac{W_{\min}}{1-(1-q)^{W_{\min}}} - (1-p)^2\right]\left(2W_{\min}\frac{1-p-p(2p)^{m-1}}{1-2p} + 1\right), \tag{69}$$

$$p = 1-(1-\tau)^{n-1}, \tag{70}$$

onde $W_{\min}$ é o tamanho mínimo da janela de contenção, $W_{\max} = 2^m W_{\min}$ é o tamanho máximo da janela de contenção e m é o expoente que satisfaz esta igualdade. Ademais, $q \in [0,1]$ representa a razão de saturação da rede, que modela uma condição de tráfego não-saturado. O cenário em que os nós sempre têm pacotes para transmitir pode ser obtido utilizando-se $q = 1$, como em (BIANCHI, 2000; KIM; STARK, 2014), enquanto que este trabalho assume uma condição mais usual onde os pacotes chegam com uma certa taxa $q < 1$. Este sistema não-linear pode ser resolvido utilizando qualquer método numérico, como algoritmos não-lineares de mínimos quadrados (STIGLER, 1981) disponíveis em implementações em *softwares* de simulação como MATLAB e Mathematica.

Em seguida, o número médio de contagens de *backoff* para um acesso ao canal bem sucedido é dado por (CHATZIMISIOS et al., 2003a; KIM; STARK, 2014)

$$E[X] = \sum_{i=0}^{m-1}\left(p^i \frac{W_i - 1}{2}\right) + \frac{p^m}{1-p} \cdot \frac{W_{\max}-1}{2}, \tag{71}$$

onde W_i é o tamanho da janela de *backoff* depois da i-ésima colisão, enquanto o tamanho médio de tempo para diminuir o contador de *backoff* por um é (CHATZIMISIOS et al., 2003a)

$$E[L] = (1-p_{\mathrm{tr}})\sigma + p_{\mathrm{tr}} p_{\mathrm{s}} T_{\mathrm{s}} + p_{\mathrm{tr}}(1-p_{\mathrm{s}}) T_{\mathrm{c}}, \tag{72}$$

onde σ é a duração de tempo para diminuir o contador de *backoff* por um quando nenhuma transmissão está em curso. T_{s} é o tempo consumido para diminuir o contador de *backoff* por um quando há uma transmissão de pacote com sucesso entre outros dois nós expresso por

$$\begin{aligned} T_{\mathrm{s}} &= (1-p_{\mathrm{SD}}) \cdot (T_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{dir})} + D_{\mathrm{PHY}}) + \\ &\quad + p_{\mathrm{SD}} \cdot (1-p_{\mathrm{SR}}) \cdot (T_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{coop})} + 2D_{\mathrm{PHY}}) + p_{\mathrm{SD}} \cdot p_{\mathrm{SR}} \cdot (T_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{coop})} + 2D_{\mathrm{PHY}}) \\ T_{\mathrm{s}} &= D_{\mathrm{PHY}} + (1-p_{\mathrm{SD}}) \cdot T_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{dir})} + p_{\mathrm{SD}} \cdot (T_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{coop})} + D_{\mathrm{PHY}}), \end{aligned} \tag{73}$$

e T_{c} é o tempo consumido para diminuir o contador de *backoff* por um quando há uma colisão entre outros nós pode ser expresso como

$$T_{\mathrm{c}} = T_{\mathrm{RTS}} + \delta + T_{\mathrm{DIFS}}. \tag{74}$$

Além do mais, é importante ressaltar que de acordo com (42) o número de nós competidores pelo acesso ao canal aumenta com a potência de transmissão. Como consequência, o tempo consumido pela reserva do canal também aumenta ao mesmo passo.

Por fim, é importante notar que a escolha pelo esquema MIMO impacta o atraso na camada MAC diferentemente da camada física. De (62) e (63), pode-se observar que somente os termos $E[X]$, $E[L]$ e $\frac{pT_{\mathrm{c}}}{1-p}$ são afetados pela potência de transmissão. Conforme a potência de transmissão aumenta, o número médio de contagens de *backoff* ($E[X]$) e o consumo de tempo médio para transmissões mal sucedidas dos pacotes de controle RTS ($\frac{pT_{\mathrm{c}}}{1-p}$) aumentam graças ao maior número de nós concorrentes. Por outro lado, o tempo médio para diminuir o contador de *backoff* ($E[L]$) diminui com o aumento da potência de transmissão, uma vez que a transmissão de pacotes por outros nós concorrentes se torna mais frequente, visto que o MAC também é afetado pela camada física, já que com potência mais alta o atraso da camada física diminui, reduzindo o consumo de tempo durante o processo de *backoff* ($E[L]$), o que causa uma diminuição no atraso da camada MAC. Portanto, um comportamento diferente do atraso entre a camada física e a camada MAC são esperados de acordo com a potência de transmissão empregada e o esquema MIMO empregado.

3.4.2 Atraso para Estimação do Canal

A estimação do canal é realizada por por meios do pacote NDP (enviado pelo transmissor), do CFR (respondido pelo destino) e do RFR (utilizado na fase da retransmissão), cujos comprimentos são variáveis de acordo com o esquema MIMO empregado. De acordo com a norma IEEE 802.11ac (GAST, 2015), o NDP é composto pelo pacote de anúncio NDPA (em inglês *null data packet announcement*) e o NDP propriamente dito. Entretanto, para explicitar o comprimento variável do pacote, é considerado que a combinação do NDPA e NDP é composta por uma parte fixa, denotada por $\mathrm{NDP}_{\mathrm{base}}$ e uma parte variável $\mathrm{NDP}_{\mathrm{var}}$ que depende do número de antenas de transmissão, de modo que

$$\mathrm{NDP} = \mathrm{NDP}_{\mathrm{base}} + \mathrm{NDP}_{\mathrm{var}} \cdot n_i, \quad i \in \{\mathrm{S}, \mathrm{R}\}. \tag{75}$$

Logo, no caso do SISO e AS há um NDP menor já que $n_i = 1$ nestes casos, enquanto SVD e SM geram pacotes NDP mais longos dependendo do número de antenas nos transmissores. Além disso, assume-se que a estrutura do pacote RFR é muito similar ao NDP, tal que

$$\mathrm{RFR} = \mathrm{RFR}_{\mathrm{base}} + \mathrm{RFR}_{\mathrm{var}} \cdot n_a, \quad a \in \{\mathrm{S}, \mathrm{R}\}. \tag{76}$$

Em relação ao pacote CFR, não somente o número de antenas deve ser levado em conta, mas também o nível do CSI que deve ser realimentado para o transmissor dependendo de cada esquema MIMO. Tipicamente, o retorno é dividido em duas partes: CQI (em inglês *channel quality indicator*) e CDI (em inglês *channel direction indicator*) (ZHANG et al., 2015b). O CQI carrega a informação da SNR, a qual pode ser quantificada utilizando poucos bits (ZHANG et al., 2015b), que é o requerimento usual para os esquemas AS e SM. Por outro lado, o CDI contém a informação da fase da estimação do canal, que requer muito mais bits de quantização (ZHANG et al., 2015b) e é requerida pelo esquema SVD para projetar os vetores *beamforming* (GAST, 2015). Portanto, para levar estas características em conta, considera-se que o CFR contém um comprimento fixo $\mathrm{CFR}_{\mathrm{base}}$, representando a informação básica MAC, enquanto bits adicionais são inseridos dependendo dos requerimentos de retorno de cada esquema MIMO.

Por exemplo, o esquema SISO leva em conta somente a informação básica do MAC, a fim de que

$$\mathrm{CFR}_{\mathrm{SISO}} = \mathrm{CFR}_{\mathrm{base}}. \tag{77}$$

No caso do AS, o receptor deve informar somente o índice da antena selecionada, de modo que

$$\mathrm{CFR}_{\mathrm{AS}} = \mathrm{CFR}_{\mathrm{base}} + \log_2(\mathcal{N}_i), \quad i \in \{\mathrm{S}, \mathrm{R}\}. \tag{78}$$

Seguindo (LOVE; HEATH, 2005), tem-se que o SM exibe bom desempenho sob um canal de retorno limitado. Portanto, assume-se a mesma quantidade de bits que o esquema AS, tal que

$$\mathrm{CFR}_{\mathrm{SM}} = \mathrm{CFR}_{\mathrm{base}} + \log_2(\mathcal{N}_i), \quad i \in \{\mathrm{S}, \mathrm{R}\}. \tag{79}$$

Por fim, para o esquema SVD a matriz completa do canal incluindo CQI e CDI precisa ser realimentada para o transmissor. Para simplificar a análise, assume-se que o número de antenas no transmissor é o mesmo que no receptor ($\mathcal{N}_i = \mathcal{N}_j$), de modo que o

número de bits para o CFR é dado por (GAST, 2015)

$$\mathrm{CFR}_{\mathrm{SVD}} = \mathrm{CFR}_{\mathrm{base}} + \binom{\mathcal{N}_{\mathrm{i}}}{2} \cdot 10, \quad i \in \{\mathrm{S}, \mathrm{R}\}, \tag{80}$$

onde $\binom{\mathcal{N}_{\mathrm{i}}}{2}$ é o número total de ângulos de fase, enquanto 10 bits são usados na quantização da informação de cada ângulo (GAST, 2015).

3.4.3 Atraso da Camada Física

A taxa de pacotes na camada física é fixa e definida por

$$R_d = \xi \cdot B. \tag{81}$$

Logo, ao assumir que os nós transmitem a uma taxa de R_d bits/s, o atraso dos pacotes na camada PHY é

$$D_{\mathrm{PHY}} = \frac{H + L}{R_d}, \tag{82}$$

em que H é o tamanho do cabeçalho e L é o tamanho útil da palavra, do inglês *payload*, o qual neste trabalho assume-se ser o mesmo para fonte e *relay*.

3.4.4 Atraso do Total do Pacote e Vazão fim-a-fim

O atraso de um pacote corretamente enviado durante a fase de difusão é

$$D_{\mathrm{dir}} = D_{\mathrm{PHY}} + D_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{dir})}, \tag{83}$$

e durante a fase de retransmissão é

$$D_{\mathrm{coop}} = 2D_{\mathrm{PHY}} + D_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{coop})}. \tag{84}$$

Por conseguinte, levando-se em conta de a probabilidade da transmissão direta ser bem sucedida ou não, pode-se definir o atraso médio total $\bar{D}$ expresso por

$$\bar{D} = (1 - p_{\mathrm{SD}}) \cdot D_{\mathrm{dir}} + p_{\mathrm{SD}} \cdot D_{\mathrm{coop}}. \tag{85}$$

A seguir, define-se a vazão $\mathcal{T}$ como o comprimento somente da parte do *payload* do pacote dividido pelo tempo consumido. A vazão instantânea da transmissão direta e

da transmissão cooperativa podem ser expressas respectivamente como

$$\mathcal{T}_{\text{dir}} = \frac{L}{D_{\text{dir}}}, \tag{86}$$

$$\mathcal{T}_{\text{coop}} = \frac{L}{D_{\text{coop}}}. \tag{87}$$

Finalmente, a vazão total é definida como

$$\begin{aligned}\mathcal{T} = {} & \mathcal{T}_{\text{dir}} \cdot \Pr\{\gamma_{\text{SD1}} \geq \rho\} + \mathcal{T}_{\text{coop}} \cdot \Pr\{\gamma_{\text{SD1}} < \rho\} \times \\ & \times \Big[\Pr\{\gamma_{\text{SR}} \geq \rho\} \cdot \Big(\Pr\{\gamma_{\text{SD1}} + \gamma_{\text{SD2}} \geq \rho \bigcap \gamma_{\text{SD2}} > \gamma_{\text{RD}} \,|\, \gamma_{\text{SD1}} < \rho\} + \\ & + \Pr\{\gamma_{\text{SD1}} + \gamma_{\text{RD}} \geq \rho \bigcap \gamma_{\text{RD}} \geq \gamma_{\text{SD2}} \,|\, \gamma_{\text{SD1}} < \rho\}\Big) + \\ & + \Pr\{\gamma_{\text{SR}} < \rho\} \cdot \Pr\{\gamma_{\text{SD1}} + \gamma_{\text{SD2}} \geq \rho \,|\, \gamma_{\text{SD1}} < \rho, \gamma_{\text{SR}} < \rho\}\Big],\end{aligned} \tag{88}$$

que é expressa em bits/s. Depois de algumas manipulações algébricas

$$\begin{aligned}\mathcal{T} = {} & \mathcal{T}_{\text{dir}} \cdot (1 - p_{\text{SD}}) + \\ & + \mathcal{T}_{\text{coop}} \cdot p_{\text{SD}} \cdot [(1 - p_{\text{SR}}) \cdot (1 - p_{\text{SSD}} - p_{\text{SRD}}) + p_{\text{SR}} \cdot (1 - p_{\text{SS}})].\end{aligned} \tag{89}$$

É importante notar que o primeiro termo (multiplicado por $\mathcal{T}_{\text{dir}}$) representa a vazão instantânea direta em uma dada probabilidade da transmissão direta funcionar, enquanto o segundo termo (multiplicado por $\mathcal{T}_{\text{coop}}$) representa a vazão instantânea cooperativa em uma dada probabilidade da transmissão direta falhar mas a retransmissão funcionar. O segundo termo é dividido em duas parcelas. O primeiro representa o nó fonte atuando como nó auxiliar e o segundo representa o caso do *relay* ser selecionado para retransmitir. Caso nenhuma das transmissões funcionem, então a vazão instantânea é zero.

3.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética, assim como definida no Capítulo 2, é dada pela razão entre a vazão do sistema e o consumo de energia. Para o cenário aqui analisado, a energia consumida deve levar em conta as camadas PHY e MAC, conforme segue.

3.5.1 Consumo Energético na Camada Física

Na camada física, a energia consumida para transmitir um pacote pode ser expressa como o produto da potência e o tempo de transmissão, de modo que

$$E_{\mathrm{PHY}}^{(\mathrm{dir})} = \mathcal{P}_{\mathrm{broad}} \cdot D_{\mathrm{PHY}}, \tag{90}$$

$$E_{\mathrm{PHY}}^{(\mathrm{coop})} = (\mathcal{P}_{\mathrm{broad}} + \mathcal{P}_{\mathrm{retr}}) \cdot D_{\mathrm{PHY}}, \tag{91}$$

para a transmissão direta e cooperativa, respectivamente. Além disso, deve-se ressaltar que $E_{\mathrm{PHY}}^{(\mathrm{dir})}$ e $E_{\mathrm{PHY}}^{(\mathrm{coop})}$ variam de acordo com o esquema MIMO empregado devido às probabilidades de *outage* $\mathcal{P}_{\mathrm{broad}}$ e $\mathcal{P}_{\mathrm{retr}}$ definidas na Seção 3.2. Entretanto, como não é objetivo complicar a notação, omite-se o índice sch para uma visualização mais fácil.

3.5.2 Consumo de Energia do Protocolo MAC

Na camada MAC, o consumo de energia pode ser dividido em duas partes: A primeira é o consumo de energia para escutar os pacotes transmitidos por outros nós enquanto espera-se para que o contador de *backoff* se expire, que é denotado por E_{await}. A segunda parte é a energia consumida pelas tentativas do acesso ao canal, denotada por E_{access}. Portanto, o consumo de energia total na camada MAC é

$$E_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{dir})} = E_{\mathrm{await}} + E_{\mathrm{access}}^{(\mathrm{dir})}, \tag{92}$$

$$E_{\mathrm{MAC}}^{(\mathrm{coop})} = E_{\mathrm{await}} + E_{\mathrm{access}}^{(\mathrm{coop})}, \tag{93}$$

para transmissões direta e cooperativa, respectivamente.

Quando um nó está em processo de *backoff*, ele escuta as tentativas de acesso ao canal dos outros nós, de modo que há três casos possíveis:

1. Não há transmissão em curso;
2. Uma transmissão bem sucedida ocorreu entre dois nós;
3. Ocorreu uma colisão.

Portanto, o consumo energético para espera, E_{await}, é

$$\begin{aligned} E_{\mathrm{await}} &= [(1-p_{\mathrm{tr}})P_{\mathrm{RX}}\sigma + p_{\mathrm{tr}}p_{\mathrm{s}}P_{\mathrm{RX}}T_{\mathrm{RTS}} + p_{\mathrm{tr}}(1-p_{\mathrm{s}})P_{\mathrm{RX}}T_{\mathrm{RTS}}]\,E[X] \\ &= [(1-p_{\mathrm{tr}})\sigma + p_{\mathrm{tr}}T_{\mathrm{RTS}}]\,P_{\mathrm{RX}}E[X], \end{aligned} \tag{94}$$

onde o primeiro termo representa o caso sem transmissão, o segundo representa uma transmissão bem sucedida entre dois outros nós e o terceiro termo representa uma colisão. Novamente, a potência de transmissão afeta o consumo energético para escutar. Com potências de transmissão maiores, p_{tr} e $E[X]$ aumentam devido ao número maior de nós concorrentes, aumentando assim o consumo energético.

Além disso, o nó fonte transmite um pacote RTS quando o contador de *backoff* expira. No caso de uma colisão, o pacote RTS necessita ser retransmitido depois de um novo tempo de *backoff* aleatório. Então, o consumo energético para as tentativas de acesso do canal por transmissão de pacote é dado por

$$\begin{aligned} E_{\text{access}}^{(\text{dir})} &= \frac{p}{1-p}((1+\psi)P_{\text{S}}+P_{\text{TX}})T_{\text{RTS}}+ \\ &+\mathcal{P}_{\text{broad}}\left(T_{\text{RTS}}+T_{\text{CTS}}+T_{\text{ACK}}+T_{\text{NDP}}+T_{\text{CFR}}+T_{\text{sACK}}\right), \end{aligned} \tag{95}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{access}}^{(\text{coop})} &= \frac{p}{1-p}((1+\psi)P_{\text{S}}+P_{\text{TX}})T_{\text{RTS}}+ \\ &+\left[\mathcal{P}_{\text{broad}}\left(T_{\text{RTS}}+T_{\text{CTS}}+T_{\text{NDP}}+T_{\text{CFR}}+T_{\text{RFR}}+T_{\text{hRTS}}\right)+\mathcal{P}_{\text{retr}}\left(T_{\text{ACK}}+T_{\text{sACK}}\right)\right], \end{aligned} \tag{96}$$

respectivamente para a transmissão direta e cooperativa. O primeiro termo em ambas (95) e (96) é a energia consumida por transmissões sem sucesso do pacote RTS e o segundo é a energia consumida pelo último *handshake* RTS/CTS bem sucedido. É importante notar que a potência P_{RX}, que de fato está embutida em $\mathcal{P}_{\text{broad}}$ e $\mathcal{P}_{\text{retr}}$, é multiplicada pelo número ativo de nós que escutam os pacotes.

3.5.3 Energia Média Consumida e Eficiência Energética

O consumo de energia total, dado respectivamente para os casos de transmissão direta e cooperativa, é dado por

$$E_{\text{dir}} = E_{\text{PHY}}^{(\text{dir})} + E_{\text{MAC}}^{(\text{dir})}, \tag{97}$$

$$E_{\text{coop}} = E_{\text{PHY}}^{(\text{coop})} + E_{\text{MAC}}^{(\text{coop})}. \tag{98}$$

O consumo médio energético médio de um dado esquema de transmissão, que depende com que frequência a comunicação direta e a cooperativa ocorrem, pode ser escrito

$$\bar{E} = (1-p_{\text{SD}})\cdot E_{\text{dir}} + p_{\text{SD}}\cdot E_{\text{coop}}. \tag{99}$$

Portanto a eficiência energética do sistema expressa em bits/s/J é

$$\begin{aligned}\eta_E = &\frac{\mathcal{T}_{\text{dir}}}{E_{\text{dir}}} \cdot (1 - p_{\text{SD}}) + \\ &+ \frac{\mathcal{T}_{\text{coop}}}{E_{\text{coop}}} \cdot p_{\text{SD}} \cdot [(1 - p_{\text{SR}}) \cdot (1 - p_{\text{SSD}} - p_{\text{SRD}}) + p_{\text{SR}} \cdot (1 - p_{\text{SS}})] .\end{aligned} \tag{100}$$

3.5.4 Maximização da Eficiência Energética

O problema da alocação de potência para maximizar a eficiência energética similar a (26) pode ser definido como

$$\begin{aligned} \max_{P_{\text{S}}, P_{\text{R}}} \quad & \eta_E \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq P_i \leq P_{\max}, \quad i \in \{\text{S}, \text{R}\}, \\ & P_{\text{drop}} \leq \varepsilon, \end{aligned} \tag{101}$$

em que $P_{\max}$ é a potência máxima de transmissão que pode ser usada em qualquer nó e ε é a probabilidade de *outage* máxima admitida.

3.6 RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção são avaliados o desempenho de *outage* e a eficiência energética dos esquemas apresentados na Seção 3.3. Para apresentar alguns exemplos numéricos, assume-se um cenário de redes de sensores sem fio cujos parâmetros do sistema aqui utilizados são resumidos na Tabela 4. Na sequência, primeiramente o desempenho do sistema é investigado em função da potência de transmissão na Seção 3.6.1, considerando que $P_{\text{S}} = P_{\text{R}}$, enquanto a alocação de potência é empregada na Seção 3.6.2.

Além disso, assume-se que os nós fonte, *relay* e destino são dispostos ao longo de uma linha, em que $d_{\text{SD}} = 100$ m é a distância entre fonte e destino, enquanto o *relay* está em uma posição intermediária com $d_{\text{SR}} = 0,5 d_{\text{SD}}$ e $d_{\text{RD}} = d_{\text{SD}} - d_{\text{SR}}$ é a distância entre o *relay* e o destino. Ademais, a menos que declarado contrário, utiliza-se $\mathcal{N}_{\text{S}} = \mathcal{N}_{\text{R}} = \mathcal{N}_{\text{D}} = 2$ antenas, $d_{\text{SD}} = 100$ m, $d_{\text{SR}} = 0,5 d_{\text{SD}}$ e $\xi = 2$ bps/Hz.

3.6.1 Potência de Transmissão Fixa

A Figura 15 mostra o desempenho de *outage* dos esquemas SISO, AS, SM e SVD de onde pode ser verificado que o SVD tem o melhor desempenho, respectivamente seguido

Tabela 4: Parâmetros de Sistema do Modelo Multicamada

Parâmetro	Valor
Margem de Enlace (M_l)	30 dB *
Figura de Ruído (N_f)	4,4 dB *
Ganho Total de Antenas (G)	5 dBi §
Frequência da Portadora (f_c)	2,5 GHz §
Largura de Banda (B)	10 kHz §
Densidade do Ruído (N_0)	-174 dBm/Hz *
Expoente de Perda de Percurso (ν)	3,2 *
Consumo dos Circuitos de RF na Transmissão (P_TX)	25 mW †
Consumo dos Circuitos de RF na Recepção (P_RX)	99 mW †
Consumo Adicional do Amplificador de Potência (ψ)	1 ‡
Probabilidade de *outage* alvo (ε)	0,01
Payload (L) / Cabeçalho (H)	2000 / 36 bytes ||
RTS / CTS / hRTS / ACK / sACK	15 / 15 / 20 / 16 / 20 bytes ||
$\mathrm{NDP_{base}}$ / $\mathrm{NDP_{var}}$ / $\mathrm{CFR_{base}}$	35 / 1 / 5 bytes ††
$\mathrm{RFR_{base}}$ / $\mathrm{RFR_{var}}$	36 / 1 bytes ††
Slot Time (σ) / T_DIFS / T_SIFS	3 / 8 / 1 ms ||
W_min / W_max	32 / 1024 slots ||
Densidade de nós (μ)	0,05 nós/m^2
Razão de Saturação da Rede (q)	0,2
Taxa Para Envio de Mensagens MAC (R_control)	1 kbps
Potência de Contenção Mínima (P_th)	-30 dBm ||

Fonte: Obtido a partir de (ROSAS et al., 2016)*, (CUI et al., 2004)§, (BENALI et al., 2016)†, (HE et al., 2009)‡, (KIM; STARK, 2012)\|\| e (GAST, 2015)††

pelo SM, AS e SISO (que não fornece diversidade espacial). Além disso, considerando que a probabilidade de *outage* alvo é $\varepsilon = 0,01$, pode-se observar a potência mínima necessária para cada esquema, que está em torno de -2 dBm (para o SVD) a 7 dBm (para o SISO). Como consequência, as figuras seguintes mostram resultados somente para os casos de P_S maior que o mínimo necessário para cada esquema de modo que o máximo ε não seja violado.

A seguir, uma comparação do atraso médio entre as camadas física e MAC pode ser vista na Figura 16. O atraso médio do SVD é levemente menor que o dos outros esquemas, devido ao melhor desempenho de *outage*. Além disso, pode-se observar também que o atraso na camada física é uma função decrescente da potência de transmissão, enquanto ele aumenta na camada MAC. Além disso, também pode ser notado que nas baixas potências o MAC é menos dominante quando comparado com a camada física que nas altas potências. O atraso na camada MAC aumenta porque a potência de transmissão determina o número de nós competidores para o acesso ao canal, que também é indicado

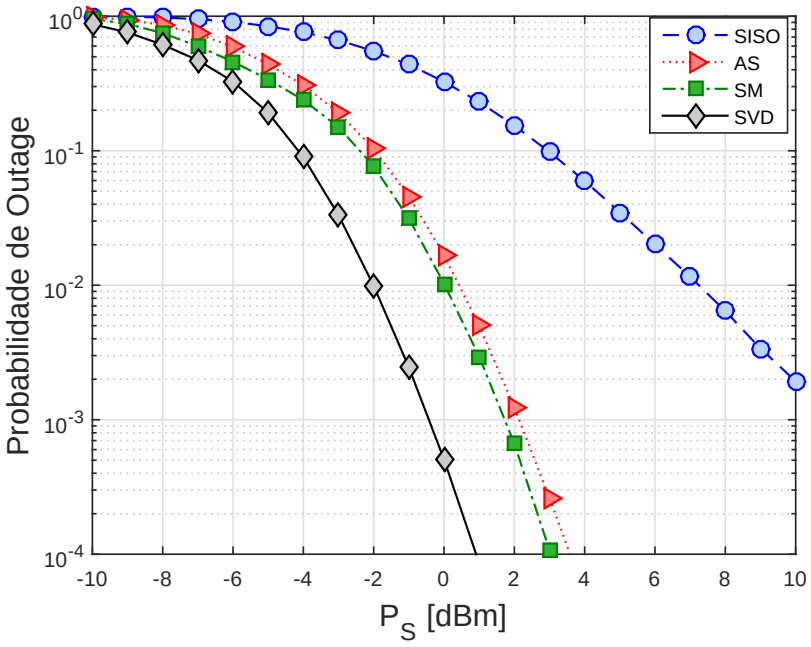


Figura 15: Probabilidade de *outage* dos esquemas cooperativos SISO, AS, SM e SVD quando $d_{SD} = 100$ m, $\xi = 2$ bps/Hz e $\mathcal{N}_S = \mathcal{N}_R = \mathcal{N}_D = 2$ em função da potência de transmissão.

Fonte: Autoria própria.

pelo eixo das ordenadas à direita da mesma figura. Com mais nós, a probabilidade de colisão (p) também aumenta resultando em um aumento das contagens de *backkoff*, que resulta em um aumento do atraso na camada MAC. Por outro lado, o MAC também é afetado pela camada física, uma vez que com potência mais alta o atraso da camada física diminui, reduzindo o consumo de tempo durante o processo de *backoff* ($E[L]$), o que causa uma diminuição no atraso da camada MAC.

O gasto energético médio das camadas física e MAC dos mesmos esquemas é ilustrado na Figura 17, de onde pode ser observado que o desempenho elevado do SVD e do SM em termos de atraso médio leva a um custo alto para a energia. Como todas as antenas estão ativas nestes esquemas, o consumo energético é consideravelmente mais alto que para o AS e o SISO. Ademais, o SVD é o esquemas que consome a maior quantidade de energia devido ao elevado número de bits no pacote CFR. Além disso, pode ser verificado que na região de baixas potências, onde o número de nós concorrentes é pequeno, as camadas física e MAC gastam quase a mesma quantidade de energia uma vez que o consumo energético para transmitir e receber praticamente iguala-se ao consumo do acesso ao canal. Contudo, o consumo energético da camada MAC torna-se dominante à medida que a potência aumenta, visto que a contenção do canal também aumenta. Este

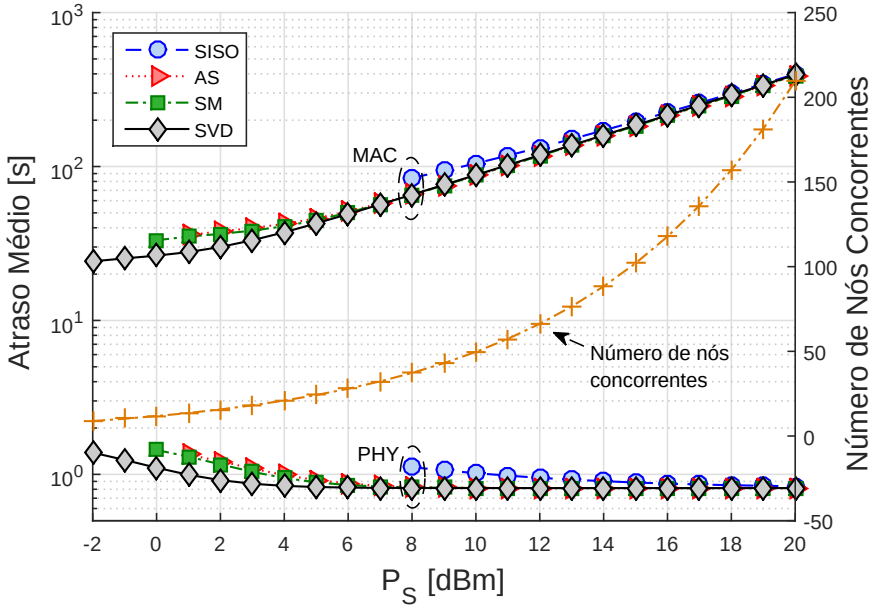


Figura 16: Atraso médio dos esquemas SISO, AS, SVD e SM quando $d_{\mathrm{SD}} = 100$ m, $\xi = 2$ bps/Hz e $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}} = 2$ em função da potência de transmissão.

Fonte: Autoria própria.

efeito também pode ser observado em (94), (95) e (96), uma vez que tanto E_{await}, $E_{\mathrm{access}}^{(\mathrm{dir})}$ e $E_{\mathrm{access}}^{(\mathrm{coop})}$ são funções monotonicamente crescentes em relação à potência. Comparando-se os esquemas de transmissão, o AS apresenta o consumo de energia médio mais baixo entre os esquemas considerados, sendo o mesmo que o SISO devido à menor quantidade de antenas de ativas.

Em seguida, a vazão fim-a-fim do sistema é representada na Figura 18, onde pode ser observado que o SVD tem o melhor desempenho, seguido pelo SM, que por sua vez tem uma ligeira vantagem sobre o AS. Já o SISO como esperado possui a pior vazão, uma vez que possui não possui diversidade espacial e, por consequência, probabilidade de *outage* mais alta. É interessante ressaltar que todos os esquemas teriam a vazão fim-a-fim máxima ao redor do mesmo valor de potência, entre $-4 \leq P_{\mathrm{S}} \leq 1$ dBm, no entanto como a figura está incompleta devido à probabilidade de *outage* alvo, torna-se um pouco difícil de observar esta conclusão.

Como um complemento à Figura 18, a eficiência energética dos esquemas pode ser analisada na Figura 19. Pode-se notar que o AS domina a eficiência energética na maioria das situações devido a seu baixo consumo de energia, que compensa o atraso maior médio comparado ao SVD, por exemplo. Rigorosamente, o SVD somente tem desempenho melhor na região onde a potência de transmissão é mais baixa que 1 dBm,

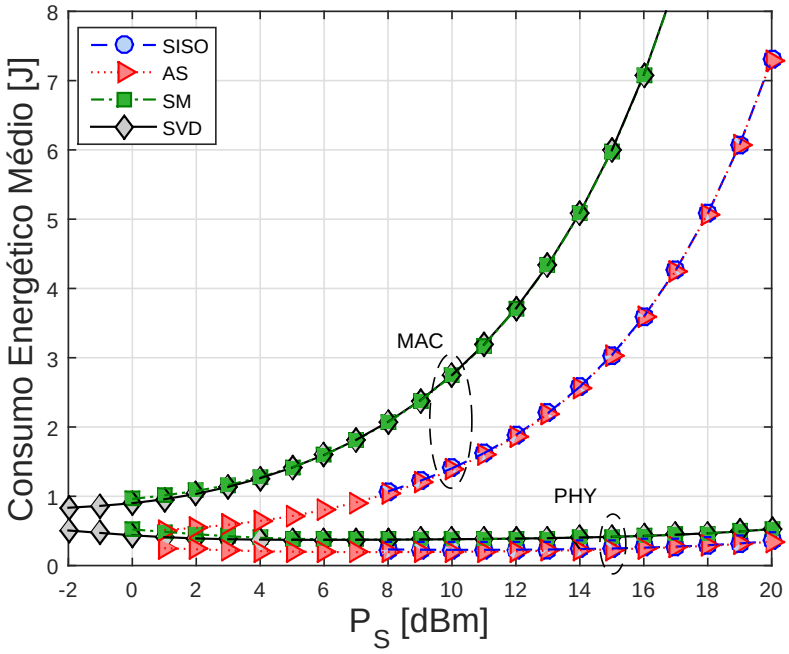


Figura 17: Gasto energético médio dos esquemas SISO, AS, SVD e SM quando $d_{\mathrm{SD}} = 100$ m, $\xi = 2$ bps/Hz e $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}} = 2$ em função da potência de transmissão.

Fonte: Autoria própria.

devido à restrição imposta de probabilidade de *outage* alvo, significando que o AS não pode operar naquela região. Em tese, o AS tem melhor eficiência energética porque embora ele não seja o esquema que tenha a melhor vazão (o SVD de fato possui a melhor vazão), o consumo energético do AS é muito pequeno, já que somente uma antena permanece ativa no transmissor e no receptor, enquanto os esquemas SVD e SM possuem todas as antenas ativas. Logo, a relação da eficiência energética pode ser vista como uma relação de custo-benefício. Pode ser verificado ainda que nas altas potências até mesmo o esquema SISO tem desempenho melhor em relação à eficiência energética do que o SVD e SM, uma vez que aquele também possui apenas uma antena ativa de transmissão e consequentemente baixo consumo, mesmo tendo a pior vazão fim-a-fim.

3.6.2 Otimização da Potência

Nesta seção, a análise é concentrada na eficiência energética dos esquemas considerando que a potência é otimizada de acordo com (101) para maximizar η_E, além de garantir que a restrição ε seja alcançada.

Primeiramente, a Figura 20 mostra a eficiência energética em função da densidade

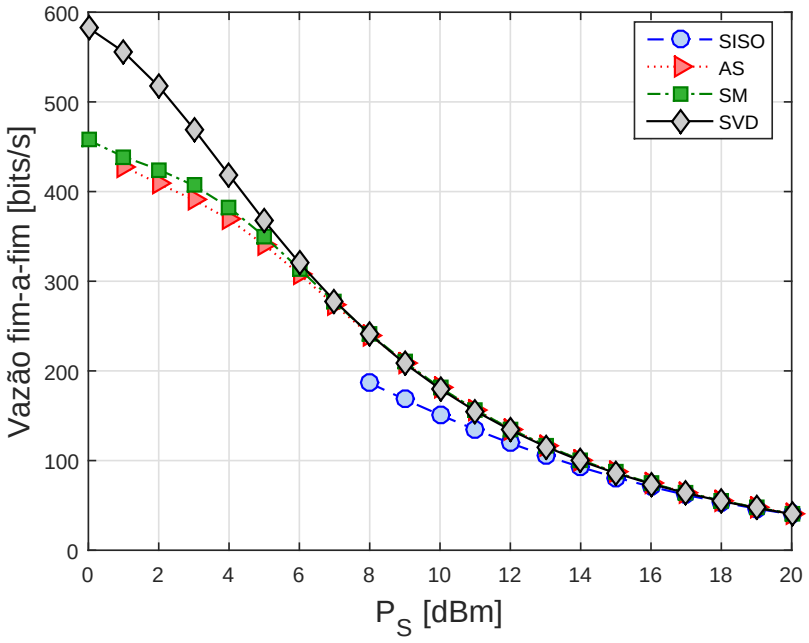


Figura 18: Vazão fim-a-fim dos esquemas SISO, AS, SM e SVD quando $d_{SD} = 100$ m, $\xi = 2$ bps/Hz e $\mathcal{N}_S = \mathcal{N}_R = \mathcal{N}_D = 2$ em função da potência de transmissão.

Fonte: Autoria própria.

de nós. Pela figura, pode-se verificar que o AS é o esquema mais eficiente energeticamente em quase toda a região de densidade de nós. Um fato interessante é que quando a densidade de nós é mais baixa (em torno de 10^{-3}), os esquemas mais complexos como SM e SVD são superados pelo SISO em termos de eficiência energética. Ademais, SM é levemente melhor que SVD para baixa densidade de nós, mas conforme a densidade de nós cresce o desempenho do SVD ultrapassa o SM. Quando a densidade de nós é alta, todos os esquemas têm eficiência energética tendendo a zero uma vez que há muitos nós concorrendo ao acesso pelo canal.

Por fim, na Figura 21 os esquemas são avaliados quando se varia a eficiência espectral, considerando $\mathcal{N}_S = \mathcal{N}_R = \mathcal{N}_D = 3$. Pode-se observar que o esquema AS domina os outros esquemas de transmissão na região de baixas eficiências espectrais. Conforme ξ aumenta, SVD tem a melhor eficiência energética em um primeiro momento, sendo superado pelo SM quando $\xi > 5{,}5$ bps/Hz. Ademais, a Figura 22, compara os esquemas em termos de número de antenas e distância entre fonte e destino, ao passo que se assume que $\xi = 5$ bps/Hz. O esquema SISO, representado pelas barras azuis escuras (quando $\mathcal{N}_S = \mathcal{N}_R = \mathcal{N}_D = 1$) é eficiente somente quando fonte e destino estão muito próximos. Além disso, a Figura 22(a) mostra que a eficiência energética do AS sempre aumenta

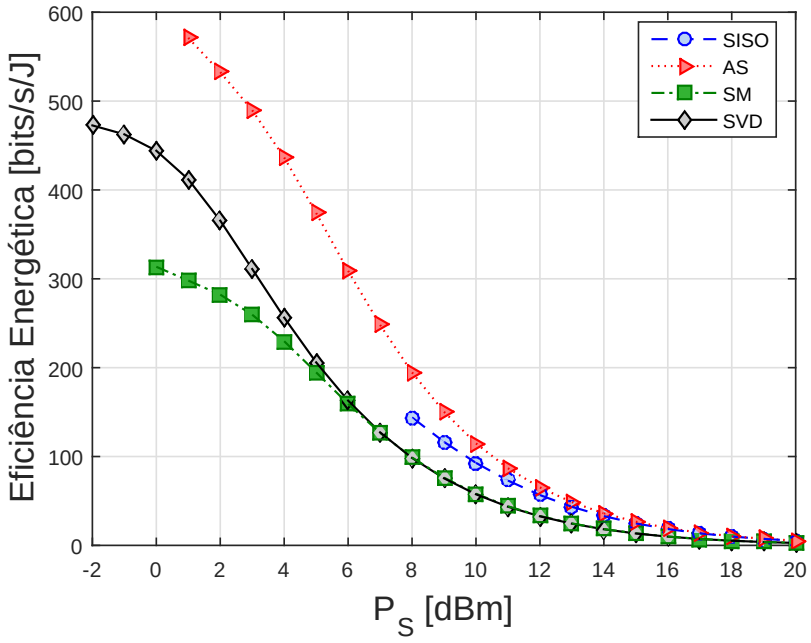


Figura 19: Eficiência energética dos esquemas SISO, AS, SM e SVD quando $d_{SD} = 100$ m, $\xi = 2$ bps/Hz e $\mathcal{N}_S = \mathcal{N}_R = \mathcal{N}_D = 2$ em função da potência de transmissão.

Fonte: Autoria própria.

com o número de antenas, enquanto para os esquemas SM e SVD (Figuras 22 (b) e (c), respectivamente) existe um ponto ótimo que tende a ser bem pequeno, na ordem de duas ou três antenas em todos os casos.

3.7 COMENTÁRIOS FINAIS

Neste capítulo foi proposto um protocolo MAC cooperativo com foco em cenários quase-estáticos, que também leva em conta os bits de retorno necessários para fazer a estimação da CSI das antenas. Para avaliar o desempenho do sistema, foi adotada uma abordagem multicamada, que engloba tanto a camada física quanto a camada MAC. São investigados a probabilidade de *outage* do sistema, o atraso médio, a energia consumida, a vazão do sistema e a eficiência energética de diferentes esquemas de transmissão MIMO. A análise mostra que o esquema SVD é melhor em termos de probabilidade de *outage* e atraso médio, enquanto o AS exibe o menor consumo energético entre os esquemas considerados.

Além disso, pode-se apontar as seguintes conclusões em termos da eficiência

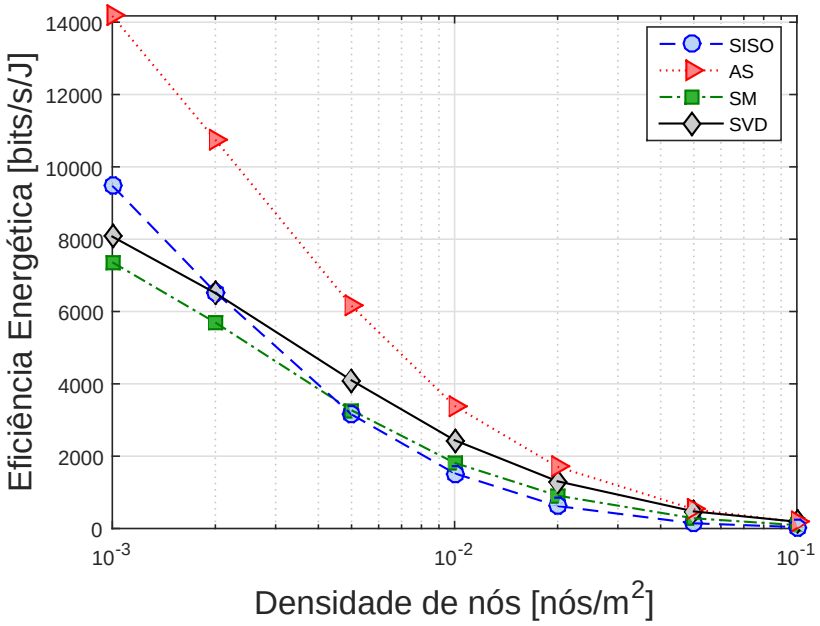


Figura 20: Eficiência energética dos esquemas SISO, AS, SM e SVD quando $d_{\mathrm{SD}} = 100$ m, $\xi = 2$ bps/Hz e $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}} = 2$ em função da densidade dos nós.

Fonte: Autoria própria.

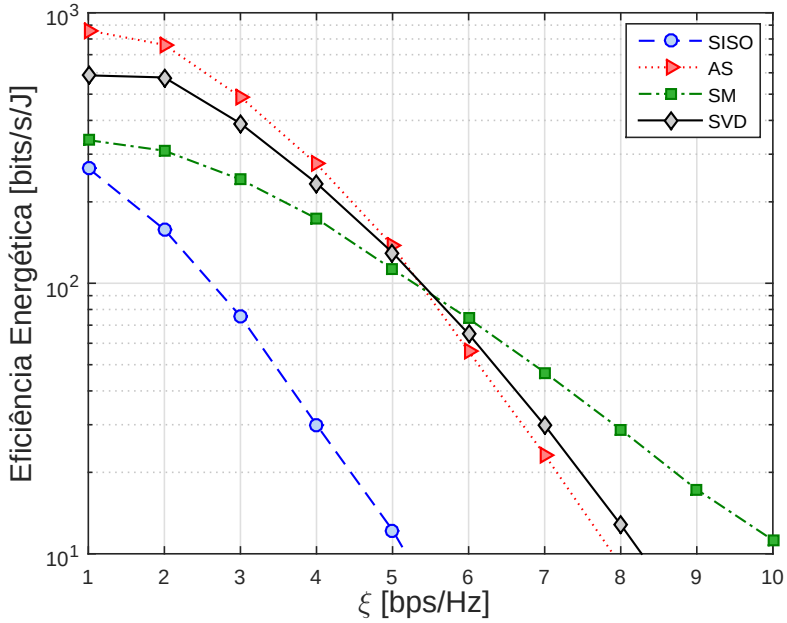
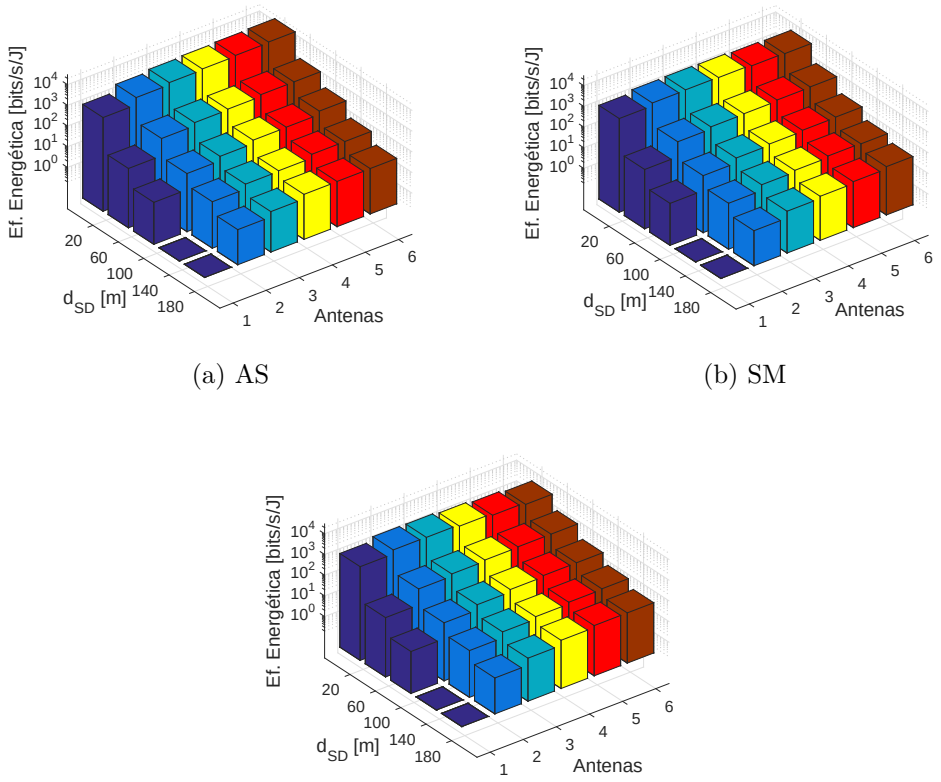


Figura 21: Eficiência energética dos esquemas SISO, AS, SM e SVD quando $d_{\mathrm{SD}} = 100$ m e $\mathcal{N}_{\mathrm{S}} = \mathcal{N}_{\mathrm{R}} = \mathcal{N}_{\mathrm{D}} = 3$ em função da eficiência espectral.

Fonte: Autoria própria.



(a) AS

(b) SM

(c) SVD

Figura 22: Eficiência energética dos esquemas SISO, AS, SM e SVD quando $\xi = 5$ bps/Hz em função da distância do enlace fonte-destino e do número de antenas.

Fonte: Autoria própria.

energética dos esquemas MIMO considerados:

- O esquema AS supera os outros esqemas em baixas eficiências espectrais, enquanto SVD desempenha melhor entre as médias e altas e o SM nas altas eficiências espectrais;
- A eficiência energética diminui com um aumento na densidade dos nós tendendo a zero para alta densidade de nós. Para baixos valores de densidade de nós o esquema SISO é melhor que os esquemas SM e SVD por seus baixíssimo consumo;
- A eficiência energética de todos os esquemas diminui quando ora a densidade dos nós aumenta ora quando a distância de transmissão aumenta, devido ao aumento no número dos nós concorrentes;
- A eficiência energética do esquema AS é uma função crescente do número de antenas,

enquanto os esquemas SM e SVD têm um número ótimo de antenas que otimiza a eficiência energética para cada eficiência espectral e distância de transmissão;

- A análise multicamada indica que para cenários muito densos, como por exemplo implantações M2M e IoT o atraso médio e o consumo energético deve ser fortemente dominado pela camada MAC. Isto implica em eficiência energética baixa a menos que novos esquemas de acesso ao canal sejam previstos.

4 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido nesta tese tem como objetivo principal o estudo de redes de sensores sem fio com muitos nós equipados com múltiplas antenas. O sinal percorre um canal modelado pela distribuição Rayleigh quase-estática, ou seja, o canal é do tipo lento. O foco se baseia em métricas que exploram em diversidade e capacidade, como probabilidade de *outage*, vazão fim-a-fim, além de visar sobretudo a eficiência energética. Uma transmissão mais eficiente em relação à energia pode estar relacionado diretamente a um aumento significativo no tempo de vida dos dispositivos de uma rede, reduzindo custos com reposição e manutenção. Para tanto são utilizadas e comparadas técnicas MIMO diversas, tais como seleção de antenas, decomposição por valores singulares e multiplexação espacial, bem como a cooperação através do canal *relay*.

No Capítulo 2 são analisadas as métricas de uma rede sem fio em um cenário restrito somente à camada física que engloba múltiplas antenas, múltiplos *relays* e um algoritmo iterativo totalmente distribuído para seleção de *relays* e alocação de potência. Estas variáveis já são estudadas na literatura, no entanto são normalmente encontradas isoladamente como em (STANOJEV et al., 2009; SADEK et al., 2009; GUAN et al., 2012; MADAN et al., 2008; ZHOU et al., 2010), por isso torna-se importante analisar os efeitos que elas causam em uma rede quando são agrupadas. Foi verificado que embora o esquema de SVD *beamforming* possua o melhor desempenho em termos de probabilidade de *outage*, a seleção de antenas tanto no transmissor quanto no receptor torna-se um esquema interessante quando a razão vazão pelo gasto energético é comparada representada pela eficiência energética. Ademais, é de grande valia ressaltar que o comportamento de cada esquema de transmissão diferencia-se quanto ao aumento no número de antenas em relação à eficiência energética. Enquanto a eficiência energética aumenta com um aumento no número de antenas do AS, o SVD possui um número ótimo de antenas que maximiza a eficiência energética. Já levando-se em conta os *relays*, cada esquema possui seu número ótimo, ou seja, a partir de uma quantidade de *relays*, a eficiência energética começa a diminuir.

Como sugestão de trabalhos futuros envolvendo essa linha de estudo, pode-se remodelar o Capítulo 2 para um cenário com desvanecimento Nakagami-m, que engloba uma quantidade maior de casos, uma vez que esta distribuição pode compreender situações com ou sem linha de visada, incluindo o desvanecimento Rayleigh que não possui linha de visada. As dificuldades seriam reescrever as equações de probabilidade de *outage*, já que as SNRs apresentam um outro tipo de distribuição, do tipo Gamma, mais complexa que distribuição exponencial que surge dos canais Rayleigh. Um outro ponto a ser abordado é o *composite fading* que é um modelo mais geral, o qual pode ser feito combinando o desvanecimento Nakagami-m com o sombreamento, do inglês *shadowing*, o qual se comporta como uma variável aleatória (VA) cuja distribuição é Log-Normal. A combinação do desvanecimento Nakagami-m com o sombreamento resulta em um envelope global para a SNR com uma VA Gamma-Log-Normal (ILOW; HATZINAKOS, 1998). Em (HO; STUBER, 1995), a VA Gamma-LogNormal é aproximada para uma VA Log-Normal para facilitar os cálculos. Assim, o cenário MIMO cooperativo poderia ser estendido para este esquema mais geral e, possivelmente mais complexo do ponto de vista matemático. Neste contexto, há algumas proposições que poderiam ser investigadas, como por exemplo, analisar se seria melhor ter múltiplos *relays* SISO distribuídos no ambiente ou um único *relay* MIMO. Além disso, verificar o que mudaria com o posicionamento dos *relays*, bem como averiguar se haveria alguma forma ótima de posicioná-los. Os vários tipos de diversidade devem ajudar a mitigar os efeitos do *composite fading*, então talvez a seleção de antenas perca vantagem em relação a MIMO tradicional, dada a robustez dos esquemas MIMO.

Uma outra possibilidade de extensão seria aplicar uma análise semelhante em um cenário com contexto de segurança em camada física, introduzido por (WYNER, 1975), baseado no modelo do canal de escuta, o qual estabelece que uma informação transmitida por dois pares legítimos, denotados por Alice e Bob, não possa ser corretamente decodificada por uma escuta passiva, denotada por Eve. Neste caso, tanto Alice como Bob poderiam ter múltiplas antenas, bem como Eve, além de múltiplos *relays* para auxiliar na transmissão segura de Alice para Bob. O cenário não seria mais investigado em termos de vazão fim-a-fim e eficiência energética, mas em função de vazão fim-a-fim segura e eficiência energética segura, que levam em conta a quantidade de bits transmitidos de forma segura, além de probabilidade de *outage* com de segurança (WANG et al., 2015; FARHAT et al., 2016). Por fim, uma outra possibilidade interessante seria considerar que o algoritmo iterativo converge em apenas uma iteração para a alocação da potência fonte e em apenas uma iteração para a alocação da potência do *relay*. Neste caso, o problema

deixaria de ser iterativo e passaria a ser analítico, no entanto aproximado. Assim, as potências a serem alocadas para a fonte e para o *relay* poderiam ser calculadas através da derivada primeira das expressões da eficiência energética. Entretanto, ao ignorar as outras iterações para atingir a convergência, o desvio em relação à eficiência energética ótima deveria ser investigado. Além disso, como foi visto nesta tese, o número de iterações para se atingir o ponto ótimo varia, o que pode causar algumas distorções ao se comparar o caso iterativo com o caso aproximado.

Já no Capítulo 3, onde somente a camada física é analisada, é realizada uma análise multicamada entre as camadas física e MAC em um cenário com um nó fonte, um destino e um *relay*. Além destes nós, há os nós que competem pelo acesso ao canal. Neste contexto, é proposto um protocolo MAC cooperativo distribuído baseado no IEEE 802.11 CSMA. Este modelo multicamada se baseia principalmente no modelo de proposto inicialmente por (KIM; STARK, 2012, 2014), no entanto estes trabalhos se aplicam apenas para cenários de canal rápido. Uma outra característica da análise realizada neste capítulo é incluir o gasto com a comunicação entre os símbolos pilotos das antenas, ou seja, o tempo necessário para selecionar a melhor antena de transmissão ou para se alinhar as antenas no método de *beamforming*. A camada física tem o canal modelado assim como o Capítulo 2 na distribuição Rayleigh quase-estática. A probabilidade de *outage* apresenta algumas diferenças porque só há um *relay* e a fonte também pode auxiliar na retransmissão, se esta estiver em melhores condições que o *relay*. Além disto, o consumo de potência despendido na camada física também segue o mesmo modelo de consumo do capítulo anterior que é bastante utilizado em redes de sensores sem fio (CUI et al., 2004) fazendo pequenas alterações quanto aos valores utilizados (ROSAS et al., 2016; BENALI et al., 2016). A camada MAC por sua vez segue o modelo proposto inicialmente por (BIANCHI, 2000), baseado no método probabilístico de cadeias de Markov. O esquema é semelhante, com exceção de que se considera há uma certa taxa de chegada de pacotes nos nós, ou seja, é um cenário mais prático. É esta camada a responsável por controlar qual nó e como este nó irá acessar ao canal, por isso é acrescentado um atraso decorrente da competição entre os nós, além do gasto energético utilizado para este fim. Os resultados comparam o atraso médio e o gasto energético entre as duas camadas, levando a concluir que quanto maior a potência de transmissão mais nós competem pelo meio e maior é o atraso e o gasto energético. Em relação à eficiência energética, foram testados alguns parâmetros como densidade de nós, eficiência espectral, número de antenas e distância entre fonte e destino. O AS é eficiente energeticamente para baixas eficiências espectrais e aumenta com o número de antenas. Já os esquemas SVD e SM têm eficiência energética

um pouco melhor para altas eficiências espectrais, mas também têm valores ótimos de antenas que maximizam a eficiência energética. Além disso, a principal diferença na inclusão da camada MAC diz respeito à densidade de nós, uma que vez que para baixa densidade de nós o AS tem o melhor desempenho. No entanto, conforme a densidade de nós aumenta, os esquemas SVD e SM desempenham melhor.

Diferentemente do Capítulo 2 que possui equações fechadas ou aproximadas para a probabilidade de *outage*, neste capítulo a probabilidade de *outage* é encontrada numericamente através de Monte Carlo. Como o foco nesta parte do trabalho não era encontrar as equações analíticas e sim estudar um modelo multicamada, já que o modelo MAC também se baseia em uma solução numérica, isto não traz consequências maiores. No entanto como uma extensão do trabalho, estas equações analíticas poderiam ser encontradas ou, se não fossem possíveis, pelo menos limites teóricos poderiam ser definidos para cada esquema de transmissão. Ademais, um trabalho futuro seria considerar ao invés de apenas um *relay* múltiplos *relays*. O que deveria ser analisado seria onde estes *relays* seriam distribuídos, da forma de um *cluster* como no modelo do capítulo anterior ou aleatoriamente sobre um espaço bidimensional. Ainda dentro do cenário cooperativo, os nós poderiam seguir um modelo para atuar com múltiplos saltos. Como uma métrica a ser analisada, o número de saltos ótimos poderia ser calculado para cada esquema a fim de atingir a máxima eficiência energética. Além disso, pode-se incluir o estudo da técnica de Requisição Automática Repetida Híbrida, inglês *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ) que foi considerada em um contexto similar em (BURICH et al., 2017). O uso do HARQ pode melhorar a eficiência energética uma vez que ele demanda potência de transmissão reduzida para uma dada probabilidade de *outage* alvo, diminuindo o número de nós concorrentes. Todavia, isto tem a contrapartida de requerer mais acessos ao canal. Ademais, a combinação do HARQ com esquemas MIMO e múltiplos *relays* é um tópico interessante de ser analisado.

Além disso, o desempenho do modelo também poderia ser testado em algum simulador computacional como em (FONSECA et al., 2015) que utilizou NS-3 para simulação de tráfego real do protocolo CSMA. O NS-3 é um ambiente de simulação aberto e extensível com alvo principalmente em pesquisa e educação. Portanto, para o protocolo MAC cooperativo proposto em que alguns pacotes MAC foram adaptados e criados, a implementação em NS-3 exigiria algumas alterações nas bibliotecas do simulador para que o cenário seja estudado utilizando um tráfego de dados real.

Por fim, outra extensão interessante seria para o caso M2M ou IoT, em que

o número de nós é bastante elevado, tornando ainda mais necessária a otimização dos protocolos MAC. Um protocolo MAC recentemente proposto na literatura para tais cenários é o *Distrubuted Queueing*, já descrito brevemente no início do capítulo anterior, que funciona como uma espécie de organizador em duas filas de prioridade. De forma resumida, a fila denominada CRQ é utilizada para aqueles nós que apresentam colisão e a fila denominada DTQ é utilizada para aqueles que não apresentam colisão. Neste contexto, surge uma oportunidade de trabalho futuro de modelar formas de contenção e acesso distribuído ao meio, tal qual o protocolo CSMA, dentro do contexto do DQ, o que poderia trazer conclusões novas sob o ponto de vista de vazão fim-a-fim e eficiência energética.

REFERÊNCIAS

ABRAMSON, N. The ALOHA system - another alternative for computer communications. In: . [S.l.]: University of Hawaii, 1970.

ALAMOUTI, S. A simple transmit diversity technique for wireless communications. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 16, n. 8, p. 1451 – 1458, October 1998.

BATABYAL, S.; DAS, S. Signal to interference ratio based antenna selection for spatial multiplexing. **Wireless Pers. Commun.**, Springer US, p. 1–19, 2015. ISSN 0929-6212.

BENALI, W.; BOT, M. L.; LANGLAIS, C.; KEROUEDAN, S. Power consumption of Wi-Fi transceivers. In: **Int. Symp. Wireless Commun. Syst. (ISWCS)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 213–217.

BIANCHI, G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. **Selected Areas in Communications, IEEE Journal on**, v. 18, n. 3, p. 535–547, March 2000. ISSN 0733-8716.

BLETSAS, A.; KHISTI, A.; REED, D.; LIPPMAN, A. A simple cooperative diversity method based on network path selection. **IEEE J. Sel. Areas Commun.**, v. 24, n. 3, p. 659 – 672, Mar 2006. ISSN 0733-8716.

BRANTE, G.; KAKITANI, M.; SOUZA, R. Energy efficiency analysis of some cooperative and non-cooperative transmission schemes in wireless sensor networks. **IEEE Trans. Commun.**, v. 59, n. 10, p. 2671–2677, Oct 2011. ISSN 0090-6778.

BRANTE, G.; STUPIA, I.; SOUZA, R. D.; VANDENDORPE, L. Outage probability and energy efficiency of cooperative MIMO with antenna selection. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, v. 12, n. 11, p. 5896–5907, Nov 2013. ISSN 1536-1276.

BURATTI, C.; VERDONE, R. L-CSMA: A MAC protocol for multihop linear wireless (sensor) networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 65, n. 1, p. 251–265, Jan 2016. ISSN 0018-9545.

BURICH, M. E.; SOUZA, R. D.; BRANTE, G.; ONIRETIY, O.; IMRAN, M. A. On the impact of HARQ on the throughput and energy efficiency using cross-layer analysis. In: **Wireless Days**. [S.l.: s.n.], 2017.

CAO, Q.; JING, Y.; ZHAO, H. Power allocation in multi-user wireless relay networks through bargaining. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, v. 12, n. 6, p. 2870–2882, Jun 2013. ISSN 1536-1276.

CHARNES, A.; COOPER, W. W. Programming with linear fractional functionals. **Naval Research Logistics Quarterly**, Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company, v. 9, n. 3-4, p. 181–186, 1962. ISSN 1931-9193. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/nav.3800090303>.

CHATZIMISIOS, P.; BOUCOUVALAS, A.; VITSAS, V. IEEE 802.11 packet delay-a finite retry limit analysis. In: **Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE**. [S.l.: s.n.], 2003. v. 2, p. 950–954 Vol.2.

CHATZIMISIOS, P.; BOUCOUVALAS, A.; VITSAS, V. Packet delay analysis of IEEE 802.11 MAC protocol. **Electronics Letters**, v. 39, n. 18, p. 1358–1359, Sept 2003. ISSN 0013-5194.

CHEN, C.-L.; STARK, W.; CHEN, S.-G. Energy-bandwidth efficiency tradeoff in MIMO multi-hop wireless networks. **IEEE J. Sel. Areas Commun.**, v. 29, n. 8, p. 1537–1546, Sep 2011. ISSN 0733-8716.

CUI, S.; GOLDSMITH, A.; 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.

CUI, S.; GOLDSMITH, A.; BAHAI, A. Energy-constrained modulation optimization. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, v. 4, n. 5, p. 2349–2360, Sep 2005. ISSN 1536-1276.

DENG, Y.; WANG, L.; ELKASHLAN, M.; KIM, K. J.; DUONG, T. Generalized selection combining for cognitive relay networks over Nakagami-m fading. **IEEE Trans. Signal Process.**, v. 63, n. 8, p. 1993–2006, Apr 2015. ISSN 1053-587X.

DINKELBACH, W. On nonlinear fractional programming. **Management Science**, v. 13, n. 7, p. 492–498, Mar 1967.

DUFFY, K.; MALONE, D.; LEITH, D. J. Modeling the 802.11 distributed coordination function in non-saturated conditions. **IEEE Commun. Lett.**, v. 9, n. 8, p. 715–717, Aug 2005. ISSN 1089-7798.

FARHAT, J.; BRANTE, G.; SOUZA, R. D.; REBELATTO, J. L. Energy efficiency of repetition coding and parallel coding relaying under partial secrecy regime. **IEEE Access**, v. 4, p. 7275–7288, 2016. ISSN 2169-3536.

FILHO, J.; YACOUB, M. Nakagami-m approximation to the sum of m non-identical independent Nakagami-m variates. **Electron. Lett.**, v. 40, n. 15, p. 951–952, Jul 2004. ISSN 0013-5194.

FONSECA, M.; MUNARETTO, A.; MENDES, C.; CHAOUCHI, H. A resource management framework for 802.11 wireless access networks. **Wireless Networks (10220038)**, v. 21, n. 6, p. 1891 – 1898, 2015. ISSN 10220038.

FOSCHINI, G. J. Layered space-time architecture for wireless communication in fading environment when using multi-element antennas. **Bell Labs Technical Journal**, v. 2, p. 41–59, Autumn 1996.

FREITAS-JR, W. C.; CAVALCANTI, F. R. P.; LOPES, R. R. Hybrid transceiver schemes for spatial multiplexing and diversity in MIMO systems. **SBrT/IEEE Journal of Communication and Information Systems**, v. 20, n. 3, p. 63–76, 2005.

GAST, M. S. **802.11ac A Survival Guide**. [S.l.: s.n.], 2015.

GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. 1st. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.

GRADSHTEYN, I.; RYZHIK, I.; JEFFREY, A. **Table of Integrals, Series, and Products**. 7th. ed. [S.l.]: Academic Press, 2000. ISBN 9780122947575.

GUAN, Q.; JIANG, S.; XIE, W.; YU, F. Energy efficiency in reliable cooperative communications with retransmissions. In: **IEEE Online Conf. Green Commun. (GreenCom)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 62–67.

HE, A.; SRIKANTESWARA, S.; BAE, K. K.; NEWMAN, T. R.; REED, J. H.; TRANTER, W. H.; SAJADIEH, M.; VERHELST, M. System power consumption minimization for multichannel communications using cognitive radio. In: **IEEE Int. Conf. Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS)**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5.

HELIOT, F.; IMRAN, M.; TAFAZOLLI, R. On the energy efficiency-spectral efficiency trade-off over the MIMO rayleigh fading channel. **IEEE Trans. Commun.**, v. 60, n. 5, p. 1345–1356, May 2012. ISSN 0090-6778.

HO, M. J.; STUBER, G. L. Capacity and power control for CDMA microcells. **Wireless Networks**, v. 1, p. 355–363, 1995.

HOGG, R.; MCKEAN, J.; CRAIG, A. **Introduction to Mathematical Statistics**. [S.l.: s.n.], 2005.

IEEE. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. **IEEE Standard 802.11**, 2003.

ILOW, J.; HATZINAKOS, D. Analytic alpha-stable noise modeling in a poisson field of interferers or scatterers. **Signal Processing, IEEE Transactions on**, v. 46, n. 6, p. 1601–1611, Jun 1998. ISSN 1053-587X.

JAGANNATHAN, R. On some properties of programming problems in parametric form pertaining to fractional programming. **Management Science**, v. 12, n. 7, p. 609–615, Mar 1966.

JIBUKUMAR, M. G.; DATTA, R.; BISWAS, P. K. Coopmaca: a cooperative MAC protocol using packet aggregation. **Wireless Networks**, v. 16, p. 1865–1883, 2010.

JUNG, M.; HWANG, K.; CHOI, S. Joint mode selection and power allocation scheme for power-efficient device-to-device (D2D) communication. In: **IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–5. ISSN 1550-2252.

KARAEVLI, I. L.; KURT, G. K.; ALTUNBAS, I. Analysis of cooperative MIMO transmission system with transmit antenna selection and selection combining. **Wireless Communications and Mobile Computing**, v. 12, n. 14, p. 1266–1275, 2012. ISSN 1530-8677. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/wcm.1054>.

KIM, S.; STARK, W. On the energy-throughput tradeoffs for relay networks with transmit power control. In: **Communication, Control, and Computing (Allerton), 2012 50th Annual Allerton Conference on**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 2088–2095.

KIM, S.; STARK, W. Cross-layer analysis of energy-throughput tradeoff for relay networks. **Wireless Communications, IEEE Transactions on**, v. 13, n. 12, p. 6716–6726, Dec 2014. ISSN 1536-1276.

KIM, S.; STARK, W. E. Simple relay enabled MAC (SRMAC) protocol for cooperative communication. In: **Military Communications Conference, MILCOM 2013 - 2013 IEEE**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 175–180.

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.

LAYA, A.; KALALAS, C.; VAZQUEZ-GALLEGO, F.; ALONSO, L.; ALONSO-ZARATE, J. Goodbye, ALOHA! **IEEE Access**, v. 4, p. 2029–2044, 2016. ISSN 2169-3536.

LE, N. P.; SAFAEI, F.; TRAN, L. C. Maximising energy efficiency in antenna selection MIMO wireless systems subject to qos constraints. **Electronics Letters**, v. 51, n. 16, p. 1290–1292, 2015. ISSN 0013-5194.

LE, N. P.; SAFAEI, F.; TRAN, L. C. Antenna selection strategies for MIMO-OFDM wireless systems: An energy efficiency perspective. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 65, n. 4, p. 2048–2062, April 2016. ISSN 0018-9545.

LI, C.; SUN, F.; CIOFFI, J.; YANG, L. Energy efficient MIMO relay transmissions via joint power allocations. **IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Briefs**, v. 61, n. 7, p. 531–535, Jul 2014. ISSN 1549-7747.

LI, C.; YANG, H. J.; SUN, F.; CIOFFI, J.; YANG, L. Approximate closed-form energy efficient PA for MIMO relaying systems in the high SNR regime. **Communications Letters, IEEE**, v. 18, n. 8, p. 1367–1370, Aug 2014. ISSN 1089-7798.

LIU, P.; TAO, Z.; NARAYANAN, S.; KORAKIS, T.; PANWAR, S. S. CoopMAC: A cooperative MAC for wireless LANs. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 25, n. 2, p. 340–354, February 2007. ISSN 0733-8716.

LOVE, D. J.; HEATH, R. W. Limited feedback unitary precoding for spatial multiplexing systems. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 51, n. 8, p. 2967–2976, Aug 2005. ISSN 0018-9448.

MADAN, R.; MEHTA, N.; MOLISCH, A.; ZHANG, J. Energy-efficient cooperative relaying over fading channels with simple relay selection. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, v. 7, n. 8, p. 3013–3025, Aug 2008. ISSN 1536-1276.

MCKAY, M.; COLLINGS, I.; SMITH, P. Capacity and SER analysis of MIMO beamforming with MRC. In: **Communications, 2006. ICC '06. IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2006. v. 3, p. 1326–1330. ISSN 8164-9547.

MEYERS, R. A. (Ed.). **Computational Complexity: Theory, Techniques, and Applications**. [S.l.]: Springer-Verlag New York, 2012.

NAEEM, M.; ILLANKO, K.; KARMOKAR, A.; ANPALAGAN, A.; JASEEMUDDIN, M. Power allocation in decode and forward relaying for green cooperative cognitive radio systems. In: **IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 3806–3810. ISSN 1525-3511.

NOSRATINIA, A.; HUNTER, T. E.; HEDAYAT, A. Cooperative communication in wireless networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 42, n. 10, p. 74–80, October 2004.

OH, C. Y.; LEE, T. J. Cooperative mac protocol using active relays for multi-rate WLANs. **Journal of Communications and Networks**, v. 13, n. 5, p. 463–471, Oct 2011. ISSN 1229-2370.

PAPOULIS, A.; PILLAI, S. U. **Probability, Random Variables and Stochastic Processes**. [S.l.: s.n.], 2002.

PERON, G.; BRANTE, G.; SOUZA, R. D. Physical and MAC cross-layer analysis of energy-efficient mimo networks. In: **2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.

PERON, G. S.; BRANTE, G.; SOUZA, R. D. Energy-efficient distributed power allocation with multiple relays and antenna selection. **Communications, IEEE Transactions on**, v. 63, n. 12, p. 4797–4808, Dec 2015. ISSN 0090-6778.

RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. 2nd. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 2002.

RAYEL, O.; BRANTE, G.; REBELATTO, J.; SOUZA, R.; IMRAN, M. Energy efficiency-spectral efficiency trade-off of transmit antenna selection. **IEEE Trans. Commun.**, v. 62, n. 12, p. 4293–4303, Dec 2014. ISSN 0090-6778.

ROSAS, F.; OBERLI, C. Impact of the channel state information on the energy-efficiency of MIMO communications. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 14, n. 8, p. 4156–4169, Aug 2015. ISSN 1536-1276.

ROSAS, F.; SOUZA, R. D.; PELLENZ, 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.

SADEK, A. K.; YU, W.; LIU, K. J. R. On the energy efficiency of cooperative communications in wireless sensor networks. **ACM Trans. Sensor Netw.**, v. 6, n. 1, p. 1–21, 2009.

SENDONARIS, A.; ERKIP, E.; AAZHANG, B. User cooperation diversity - part I: System description. **IEEE Transactions on Communications**, v. 51, n. 11, p. 1927–1938, Nov. 2003.

SONG, K.; JI, B.; HUANG, Y.; XIAO, M.; YANG, L. Performance analysis of antenna selection in two-way decode-and-forward relay networks. In: **IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC Fall)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5.

STANOJEV, I.; SIMEONE, O.; BAR-NESS, Y.; KIM, D. H. Energy efficiency of non-collaborative and collaborative hybrid-ARQ protocols. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, v. 8, n. 1, p. 326–335, Jan 2009. ISSN 1536-1276.

STIGLER, S. M. Gauss and the invention of least squares. **Ann. Statist.**, The Institute of Mathematical Statistics, v. 9, n. 3, p. 465–474, 05 1981.

TANG, J.; SO, D. K. C.; ALSUSA, E.; HAMDI, K. A.; SHOJAEIFARD, A. On the energy efficiency-spectral efficiency tradeoff in MIMO-OFDMA broadcast channels. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 65, n. 7, p. 5185–5199, July 2016. ISSN 0018-9545.

TAY, Y. C.; JAMIESON, K.; BALAKRISHNAN, H. Collision-minimizing CSMA and its applications to wireless sensor networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 22, n. 6, p. 1048–1057, Aug 2004. ISSN 0733-8716.

TSE, D.; VISWANATH, P. **Fundamentals of Wireless Communication**. [S.l.: s.n.], 2005.

WANG, D.; BAI, B.; CHEN, W.; HAN, Z. Energy efficient secure communication over decode-and-forward relay channels. **IEEE Transactions on Communications**, v. 63, n. 3, p. 892–905, March 2015. ISSN 0090-6778.

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

WYNER, A. D. The wire-tap channel. **The Bell System Technical Journal**, v. 54, n. 8, p. 1355–1387, Oct 1975. ISSN 0005-8580.

XU, W.; CAMPBELL, G. A distributed queueing random access protocol for a broadcast channel. In: **Conference Proceedings on Communications Architectures, Protocols and Applications**. New York, NY, USA: ACM, 1993. (SIGCOMM '93), p. 270–278. ISBN 0-89791-619-0. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/166237.166263>.

ZAPPONE, A.; JORSWIECK, E. Energy efficiency in wireless networks via fractional programming theory. **Foundations and Trends in Communications and Information Theory**, v. 11, p. 185–396, 2015.

ZHANG, X.; LI, H.; LU, Y.; ZHOU, B. Distributed energy efficiency optimization for MIMO cognitive radio network. **IEEE Communications Letters**, v. 19, n. 5, p. 847–850, May 2015. ISSN 1089-7798.

ZHANG, X.; MCKAY, M. R.; ZHOU, X.; HEATH, R. W. Artificial-noise-aided secure multi-antenna transmission with limited feedback. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 14, n. 5, p. 2742–2754, May 2015. ISSN 1536-1276.

ZHOU, M.; CUI, Q.; JANTTI, R. High energy efficiency schemes in multiple relays cooperative network with analog network coding. In: **IEEE Int. Conf. Broadband Netw. Multimedia Technol. (IC-BNMT)**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 263–267.

ZHU, H.; CAO, G. rdcf: A relay-enabled medium access control protocol for wireless ad hoc networks. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 5, n. 9, p. 1201–1214, Sept 2006. ISSN 1536-1233.

ZOGOVIC, N.; DIMIC, G.; BAJIC, D. PHY-MAC cross-layer approach to energy-efficiency and packet-loss trade-off in low-power, low-rate wireless communications. **IEEE Communications Letters**, v. 17, n. 4, p. 661–664, April 2013. ISSN 1089-7798.

APÊNDICE A – PROVA DAS EQUAÇÕES DAS PROBABILIDADES DE *OUTAGE*

A.1 PROVA DA PROBABILIDADE DO MRC PARA O ESQUEMA SISO ($p_{\mathrm{SRD,SISO}}(k)$)

Reescrevendo $p_{\mathrm{SRD,SISO}}$ como um somatório de duas variáveis aleatórias, de modo que

$$p_{\mathrm{SRD,SISO}}(k) = \Pr\{X + Y < \rho\}, \tag{102}$$

onde $X = \gamma_{\mathrm{SD}}$ e $Y = \max \mathcal{H}$.

Então, assumindo desvanecimento Rayleigh, X é uma variável aleatória exponencialmente distribuída com média $\bar{\gamma}_{\mathrm{SD}}$, em que a função de densidade de probabilidade, do inglês *probability density function* (PDF), de X é

$$f_X(x) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{\mathrm{SD}}} e^{-x/\bar{\gamma}_{\mathrm{SD}}}. \tag{103}$$

Além disso, como $\gamma_{\mathrm{R}_r\mathrm{D}}$ são independentes e igualmente distribuídas, pode-se escrever a função de densidade cumulativa, do inglês *cumulative density function* (CDF), de Y como

$$F_Y(y) = \Pr\{\max \mathcal{H} < y\} = \prod_k \Pr\{\gamma_{\mathrm{RD}} < y\} = \left(1 - e^{-y/\bar{\gamma}_{\mathrm{RD}}}\right)^k, \tag{104}$$

de tal forma que a PDF de Y é a derivada primeira de $F_Y(y)$,

$$f_Y(y) = \frac{k}{\bar{\gamma}_{\mathrm{RD}}} \cdot e^{-y/\bar{\gamma}_{\mathrm{RD}}} \cdot \left(1 - e^{-y/\bar{\gamma}_{\mathrm{RD}}}\right)^{k-1}. \tag{105}$$

Então, se $Z = X + Y$, f_Z pode ser obtida pela convolução de f_X e f_Y

$$f_Z(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(z-y) f_Y(y)\,\mathrm{d}y = \sum_{l=0}^{k-1} \binom{k-1}{l} \cdot \frac{(-1)^l \cdot e^{\left(-\frac{z}{\bar{\gamma}_{\mathrm{SD}}}\right)} \cdot k \cdot \left(1 - e^{z\left(-\frac{l+1}{\bar{\gamma}_{\mathrm{RD}}} + \frac{1}{\bar{\gamma}_{\mathrm{SD}}}\right)}\right)}{(l+1)\bar{\gamma}_{\mathrm{SD}} - \bar{\gamma}_{\mathrm{RD}}}. \tag{106}$$

Neste caso, como a integral resulta em uma expressão não trivial, aplicou-se uma transformação binomial em um dos termos da exponencial. Assim, a solução da integral resulta num somatório.

Por fim, $p_{\mathrm{SRD,SISO}}$ pode ser obtida como a CDF de Z no limiar de ρ, como por exemplo,

$$p_{\mathrm{SRD,SISO}}(k) = F_Z(\rho) = \int_0^{\rho} f_Z(z)\mathrm{d}z, \tag{107}$$

cuja solução produz (17), concluindo a prova.

A.2 PROVA DAS PROBABILIDADES DOS ENLACES FONTE-DESTINO E FONTE-*RELAY* PARA O ESQUEMA SVD ($p_{\mathrm{SD,SVD}}$ E $p_{\mathrm{SR,SVD}}$)

Para encontrar as expressões para o esquema SVD, primeiramente define-se a informação mútua em um dado enlace i-j, normalizado pela largura de banda do sistema, como (TSE; VISWANATH, 2005)

$$I_{ij,\mathrm{SVD}} = \sum_{l=1}^{p} \log_2(1+\bar{\gamma}_{ij}\omega_l^2), \tag{108}$$

onde $p = \min\{\mathcal{N}_i, \mathcal{N}_j\}$ e ω_l^2 é um autovalor da matriz $\mathbf{H}_{ij}\mathbf{H}_{ij}^*$, onde $\cdot^*$ representa a matriz conjugada. Então, utilizando-se a desigualdade de Jensen, pode-se escrever (TSE; VISWANATH, 2005)

$$\frac{1}{p}\sum_{l=1}^{p} \log_2\left(1+\bar{\gamma}_{ij}\omega_l^2\right) \leq \log_2\left(1+\bar{\gamma}_{ij}\left(\frac{1}{p}\sum_{l=1}^{p}\omega_l^2\right)\right), \tag{109}$$

que gera

$$I_{ij,\mathrm{SVD}} \leq k\log_2\left(1+\bar{\gamma}_{ij}\left(\frac{1}{p}\sum_{l=1}^{p}\omega_l^2\right)\right). \tag{110}$$

Logo, como $\sum_{l=1}^{p}\omega_l^2 = \sum_{i,j}|h_{ij}|^2$, onde h_{ij} é um elemento da matriz de canal $\mathbf{H}_{ij}$ de ordem $\mathcal{N}_j \times \mathcal{N}_i$, representando o ganho de canal entre a j-ésima antena de transmissão e a i-ésima antena de recepção, as probabilidades de *outage* podem ser limitadas superiormente por

$$p_{\mathrm{SD,SVD}} \geq \Pr\left\{\sum_{i=1}^{\mathcal{N}_\mathrm{S}}\sum_{j=1}^{\mathcal{N}_\mathrm{D}} \gamma_{\mathrm{S}_i\mathrm{D}_j} < \rho_p\right\}, \tag{111}$$

$$p_{\mathrm{SR,SVD}} \geq \Pr\left\{\sum_{l=1}^{\mathcal{N}_\mathrm{R}} \gamma_{\mathrm{SR}_l} < \rho_p\right\}, \tag{112}$$

cuja solução leva a (23) e (24), respectivamente.

A.3 PROVA DA PROBABILIDADE DO MRC PARA O ESQUEMA SVD ($p_{\mathrm{SRD,SVD}}(k)$)

Seguindo os limites derivados no Apêndice A.2 utilizando a desigualdade de Jensen, pode-se escrever

$$p_{\mathrm{SRD,SVD}}(k) \geq \Pr\left\{ \underbrace{\sum_{i=1}^{\mathcal{N}_\mathrm{S}} \sum_{j=1}^{\mathcal{N}_\mathrm{D}} \gamma_{\mathrm{S}_i\mathrm{D}_j}}_{\varphi} + \underbrace{\sum_{l=1}^{\mathcal{N}_\mathrm{R}} \sum_{m=1}^{k} \sum_{j=1}^{\mathcal{N}_\mathrm{D}} \gamma_{\mathrm{R}_{m_l}\mathrm{D}_j}}_{\phi} < \rho \right\}. \tag{113}$$

Então, utilizando-se do fato que o somatório de n variáveis aleatórias exponenciais idênticas e igualmente distribuídas com parâmetro $1/\lambda$ é uma variável aleatória de distribuição Gamma com parâmetros n e $1/\lambda$, pode-se definir (HOGG et al., 2005)

$$\begin{cases} \varphi \sim \mathrm{Gamma}(\mathcal{N}_\mathrm{S}\mathcal{N}_\mathrm{D}, \bar{\gamma}_\mathrm{SD}) \\ \phi \sim \mathrm{Gamma}(k\mathcal{N}_\mathrm{R}\mathcal{N}_\mathrm{D}, \bar{\gamma}_\mathrm{RD}) \end{cases} \tag{114}$$

Além disso, foi mostrado em (FILHO; YACOUB, 2004) que a PDF de um somatório de variáveis aleatórias com distribuição Gamma idênticas e não igualmente distribuídas pode ser aproximada precisamente por outra variável aleatória Gamma $\Phi \sim \mathrm{Gamma}(m, \frac{\Omega}{m})$, onde $\Omega = \mathbb{E}[\Phi]$ e $m = \frac{\Omega^2}{\mathbb{E}[\Phi^2]-\Omega^2}$.

Para alcançar os momentos exatos de Φ, pode-se utilizar a expansão multinomial (PAPOULIS; PILLAI, 2002) para escrever $\mathbb{E}[\Phi^n]$ em termos dos momentos individuais das parcelas. No caso de duas parcelas, γ_SD e γ_RD,

$$\mathbb{E}[\Phi^n] = \sum_{n_1=0}^{n} \binom{n}{n_1} \mathbb{E}\left[\gamma_\mathrm{SD}^{(n-n_1)}\right] \mathbb{E}\left[\gamma_\mathrm{RD}^{n_1}\right], \tag{115}$$

gerando

$$\mathbb{E}[\Phi] = \bar{\gamma}_\mathrm{SD} + \bar{\gamma}_\mathrm{RD}, \tag{116}$$

$$\mathbb{E}[\Phi^2] = \frac{\mathcal{N}_\mathrm{S}\mathcal{N}_\mathrm{D}-1}{\mathcal{N}_\mathrm{S}\mathcal{N}_\mathrm{D}}(\bar{\gamma}_\mathrm{SD}^2 + \frac{k\mathcal{N}_\mathrm{R}\mathcal{N}_\mathrm{D}-1}{k\mathcal{N}_\mathrm{R}\mathcal{N}_\mathrm{D}}\bar{\gamma}_\mathrm{RD}^2) + 2\bar{\gamma}_\mathrm{SD}\bar{\gamma}_\mathrm{RD}, \tag{117}$$

$$\Omega = \bar{\gamma}_\mathrm{SD} + \bar{\gamma}_\mathrm{RD}, \tag{118}$$

$$m = \frac{\mathcal{N}_\mathrm{S}k\mathcal{N}_\mathrm{R}\mathcal{N}_\mathrm{D}(\bar{\gamma}_\mathrm{SD} + \bar{\gamma}_\mathrm{RD})^2}{k\mathcal{N}_\mathrm{R}\bar{\gamma}_\mathrm{SD}^2 + \mathcal{N}_\mathrm{S}\bar{\gamma}_\mathrm{RD}^2}. \tag{119}$$

Por fim, $p_{\mathrm{SRD,SVD}}(k) \simeq \Pr\{\Phi < \rho\}$, gerando (25).