

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

MARCOS TOMIO KAKITANI

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA ALGUMAS REDES
SEM FIO DE CURTO E DE LONGO ALCANCE**

TESE

CURITIBA

2014

MARCOS TOMIO KAKITANI

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA ALGUMAS REDES
SEM FIO DE CURTO E DE LONGO ALCANCE**

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 grau de “Doutor em Ciências” – Área de Concentração: Telecomunicações e Redes.

Orientador: Richard Demo Souza

Co-orientadora: Anelise Munaretto Fonseca

CURITIBA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

K13a
2014 Kakitani, Marcos Tomio
Análise de eficiência energética para algumas redes sem fio de curto e longo alcance / Marcos Tomio Kakitani.-- 2014.
86 f.: il.; 30 cm

Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2014
Bibliografia: f. 83-86

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Energia - Consumo - Análise. 3. Sistemas de telefonia celular. 4. Redes de sensores sem fio. 5. Sistemas de transmissão de dados. 6. Sistemas MIMO. 7. Análise numérica. 8. Engenharia elétrica - Teses. I. Souza, Richard Demo, orient. II. Fonseca, Anelise Munaretto, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Tese Nº. _____

Análise de Eficiência Energética Para Algumas Redes Sem Fio de Curto e de Longo Alcance.

por

Marcos Tomio Kakitani.

Orientador: Prof. Dr. Richard Demo Souza.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Anelise Munaretto Fonseca.

Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau 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 09h do dia 01 de agosto de 2014. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos doutores:

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

Prof. Dr. Gustavo Fraidenaich
(UNICAMP)

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Pellenz
(PUCPR)

Prof. Dr. Evelio Martin Garcia Fernandez
(UFPR)

Prof. Dr. Luis Henrique Assumpção Lolis
(UFPR)

Visto da Coordenação:

Prof. Emilio Carlos Gomes Wille, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

RESUMO

KAKITANI, Marcos Tomio. ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA ALGUMAS REDES SEM FIO DE CURTO E DE LONGO ALCANCE. 86 f. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Neste trabalho é realizada a análise da eficiência energética para algumas redes sem fio de curto alcance, como as redes de sensores sem fio, e algumas redes sem fio de longo alcance, como as redes de telefonia celular. Na análise de sensores sem fio são empregados esquemas de transmissão cooperativos e não-cooperativos, considerando que um canal de retorno pode estar disponível ou não. Para a análise de redes celulares, considera-se o uso de técnicas de transmissão com múltiplas antenas, modelos realistas de consumo de potência, além de um modelo de custos para a análise financeira de diferentes projetos de redes. São consideradas nas análises do desempenho de eficiência energética restrições como uma probabilidade de *outage* e uma vazão fim-a-fim alvos ao sistema. Os resultados obtidos indicam os esquemas de transmissão e projetos de redes mais eficientes para diferentes condições. Além disso, os direcionamentos para os trabalhos futuros são apresentados.

Palavras-chave: Eficiência energética, redes de sensores sem fio, comunicações cooperativas, redes celulares, múltiplas antenas

ABSTRACT

KAKITANI, Marcos Tomio. ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS FOR SOME LONG-RANGE AND SHORT-RANGE WIRELESS NETWORKS. 86 f. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

The energy efficiency analysis for some short-range wireless networks, such as wireless sensor networks, and for some long-range wireless networks, such as cellular networks is performed in this work. For the wireless sensor networks analysis, non-cooperative and cooperative transmission schemes (considering that a return channel is available or not) are employed. Multiple antennas transmission schemes, realistic power consumption models, and a cost model for different system designs are considered for the cellular networks analysis. We consider that the system is under constraints such as a target end-to-end outage probability and a target end-to-throughput. The results show the most efficient transmission schemes and network designs under different system conditions. The future works plans are also detailed.

Keywords: Energy efficiency, wireless sensor networks, cooperative communications, cellular networks, multiple antennas

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Reuso de frequências	19
FIGURA 2	– Comunicação cooperativa	22
FIGURA 3	– Consumo total de energia para $\theta^* = 10^{-3}$ e $\Delta = 2$ b/s/Hz em cenários com múltiplos nós	27
FIGURA 4	– Consumo total de energia para $\theta^* = 10^{-3}$, $\Delta = 2$ b/s/Hz e $d_r = 0,2$	32
FIGURA 5	– Consumo total de energia para $\theta^* = 10^{-3}$, $\Delta = 2$ b/s/Hz e $d_r = 0,8$	33
FIGURA 6	– Consumo total de energia para $\theta^* = 10^{-3}$, $\Delta = 2$ b/s/Hz e $d_{SD} = 50$ m ...	34
FIGURA 7	– Consumo total de energia para $\theta^* = 10^{-3}$, $d_{SD} = 50$ m e $d_r = 0,2$	35
FIGURA 8	– Consumo total de energia para $\theta^* = 10^{-3}$, $d_{SD} = 50$ m e $d_r = 0,8$	36
FIGURA 9	– Consumo total de energia para $\Delta = 6$ b/s/Hz, $d_{SD} = 50$ m e $d_r = 0,8$	37
FIGURA 10	– Cenário cooperativo com U_1 como fonte e U_2 como <i>relay</i>	38
FIGURA 11	– Cenário cooperativo com U_2 como fonte e U_1 como <i>relay</i>	39
FIGURA 12	– Caso A.	43
FIGURA 13	– Caso B.	43
FIGURA 14	– Caso C.	44
FIGURA 15	– Caso D.	44
FIGURA 16	– Contornos de eficiência energética para o Caso A com AF.	45
FIGURA 17	– Contornos de eficiência energética para o Caso A com RC.	46
FIGURA 18	– Contornos de eficiência energética para o Caso A com PC.	47
FIGURA 19	– Probabilidade de <i>outage</i> pela SNR para $\Delta = 3$ b/s/Hz.	54
FIGURA 20	– E_{bt} para macrocélula com $\theta^* = 10^{-2}$ e $\Delta = 3$ b/s/Hz	55
FIGURA 21	– E_{bt} para macrocélula com $\theta^* = 10^{-2}$ e $d = 1000$ m	56
FIGURA 22	– E_{bt} para macrocélula com $\theta^* = 10^{-1}$ e $\Delta = 3$ b/s/Hz	57
FIGURA 23	– E_{bt} para microcélula com $\theta^* = 10^{-3}$ e $\Delta = 3$ b/s/Hz	58
FIGURA 24	– E_{bt} para $\theta^* = 10^{-2}$ e $\Delta = 3$ b/s/Hz	63
FIGURA 25	– E_{bt} para $\theta^* = 10^{-3}$ e $d = 1000$ m	64
FIGURA 26	– E_{bt} para $\Delta = 3$ b/s/Hz e $d = 1000$ m	65
FIGURA 27	– Custos totais da rede em função do números de ERBs	71
FIGURA 28	– Custos totais detalhados para $B = 10$ MHz e $B = 20$ MHz	72
FIGURA 29	– Custos totais em função do número de áreas de cobertura	74
FIGURA 30	– Custos totais detalhados para $B = 10$ MHz e $B = 20$ MHz e 10 áreas de cobertura	75
FIGURA 31	– Consumo de energia em função do número de ERBs	76
FIGURA 32	– Custos de energia detalhados para $B = 10$ MHz e $B = 20$ MHz	77

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Potências de transmissão ótimas	31
TABELA 2	– Parâmetros do sistema	31
TABELA 3	– Consumo de potência dos circuitos de transmissão e recepção	32
TABELA 4	– Eficiência Energética Máxima.	42
TABELA 5	– Eficiência energética máxima com igualdade de taxas de transmissão.	46
TABELA 6	– Parâmetros do modelo de consumo de potência	53
TABELA 7	– Distâncias limiares para os quais os esquemas de transmissão são superados pelo TBF, para $\mathcal{O}^* = 10^{-4}$ e $\Delta = 3$ b/s/Hz.	66
TABELA 8	– Parâmetros do modelo de custos	71
TABELA 9	– Projetos de sistema mais eficientes dos pontos de vista financeiro e de consumo de energia.	76

LISTA DE SIGLAS

WSN	Wireless Sensor Network
ERB	Estação Rádio-Base
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
SNR	Signal-to-Noise-Ratio
SISO	Single-Input and Single-Output
V-BLAST	Vertical Bell Laboratories Space-Time
TAS	Transmit Antenna Selection
MRC	Maximum Ratio Combining
TBF	Transmit Beamforming
RF	Rádio Frequência
AF	Amplify-and-Forward
DF	Decode-and-Forward
SDF	Selective Decode-and-Forward
IDF	Incremental Decode-and-Forward
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
AWGN	Additive White Gaussian Noise
SH	Single-hop
PC	Parallel Coding
RC	Repetition Coding
MH	Multi-hop
RRH	Remote Radio Head
SIR	Signal-to-Interference-Ratio
SINR	Signal-to-Inteference plus Noise Ratio

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Número de canais disponíveis por <i>cluster</i>
ω	Número de células de um <i>cluster</i>
ε	Número de canais de cada célula
μ	Fator de reutilização de frequências
M	Número de vezes que um <i>cluster</i> é replicado
C_t	Número total de canais efetivamente disponível para uso em uma área de cobertura
S	Nó origem
D	Nó destino
R	Nó <i>relay</i>
P_{PA}	Potência consumida pelo amplificador de potência em uma transmissão entre dois nós i e j
P_{TX}	Potência de transmissão consumida pelos circuitos de radiofrequência
P_{RX}	Potência de recepção consumida pelos circuitos de radiofrequência
R_b	Taxa de <i>bits</i>
Δ	Eficiência espectral
B	Largura de banda
P_{DAC}	Potência consumida pelo conversor digital-analógico
P_{mix}	Potência consumida pelo misturador
$P_{fil,x}$	Potência consumida pelo filtro de transmissão
P_{syn}	Potência consumida pelo sintetizador de frequência
P_{LNA}	Potência consumida pelo amplificador de baixo ruído
P_{IFA}	Potência consumida pelo amplificador de frequência intermediária
P_{ADC}	Potência consumida pelo conversor analógico-digital
ξ	Razão entre a potência de pico e a potência média de um sinal
η	Eficiência de dreno do amplificador
P_t	Potência de transmissão
N_{TRX}	Número de transceptores ou cadeias de circuitos de RF
P_0	Consumo de potência não-dependente da carga do sistema
Δ_p	Taxa de consumo de potência dependente da carga do sistema
β	Valor de limiar para ocorrência de <i>outage</i>
M_t	Número de antenas transmissoras
M_r	Número de antenas receptoras
\mathbf{y}	Quadro recebido
γ	Perda de percurso
\mathbf{H}	Matriz $M_r \times M_t$ de ganhos de desvanecimento quase-estático de uma antena transmissora t para uma antena receptora r
\mathbf{x}	Quadro transmitido
\mathbf{n}	Vetor AWGN
N_0	Densidade espectral de potência de ruído térmico
d	Distância entre o transmissor e o receptor
α	Expoente de perda de percurso

G	Ganho total das antenas transmissoras e receptoras
λ	Comprimento de onda
L	Margem de enlace
N_f	Figura de ruído
ρ	SNR média
N	Densidade espectral de potência de ruído
\mathcal{O}	Probabilidade de <i>outage</i>
K	Número de <i>relays</i> em um esquema de múltiplos saltos
$\mathcal{W}(\cdot)$	Função W de Lambert
$\Psi(a,b)$	Função gama incompleta
$\Gamma(a)$	Função gama completa
C_0	Custos anuais gerados por cada ERB
C_1	Custo anual da energia
C_2	Custo referente a um ano de uso do espectro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	RESULTADOS E PUBLICAÇÕES	14
1.2	ORGANIZAÇÃO	16
2	CONCEITOS	17
2.1	DEFINIÇÕES BÁSICAS E MODOS DE OPERAÇÃO	17
2.2	TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO	20
2.3	MODELOS DE CONSUMO	23
3	ANÁLISE EMPREGANDO DF COM <i>REPETITION CODING</i> E <i>PARALLEL CODING</i>	26
3.1	ESQUEMAS DE TRANSMISSÃO	26
3.1.1	Single-hop	27
3.1.2	DF com Repetition Coding	28
3.1.2.1	RC Sem Canal de Retorno (RC)	28
3.1.2.2	RC Com Canal de Retorno (IRC)	29
3.1.3	DF com Parallel Coding	29
3.1.3.1	PC Sem Canal de Retorno (PC) e PC Com Canal de Retorno (IPC)	29
3.1.4	Amplifica-e-encaminha	30
3.1.4.1	AF sem canal de retorno (AF)	30
3.1.4.2	AF com canal de retorno (IAF)	30
3.2	ANÁLISE DE RESULTADOS	31
3.2.1	Impacto da posição relativa do <i>relay</i>	33
3.2.2	Impacto da vazão fim-a-fim	33
3.2.3	Impacto da probabilidade de <i>outage</i>	34
3.3	CONTRIBUIÇÕES E CONCLUSÕES	35
4	ANÁLISE DE CONTORNOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA AF E DF	38
4.1	ESQUEMAS DE TRANSMISSÃO	39
4.1.1	Amplifica e encaminha	39
4.1.1.1	AF sem canal de retorno (AF)	40
4.1.1.2	AF com canal de retorno (IAF)	40
4.1.2	DF com Repetition Coding	40
4.1.2.1	RC sem canal de retorno (RC)	40
4.1.2.2	RC com canal de retorno (IRC)	40
4.1.3	DF com Parallel Coding	41
4.1.3.1	PC sem canal de retorno (PC)	41
4.1.3.2	PC com canal de retorno (IPC)	41
4.2	ANÁLISE DE RESULTADOS	41
4.3	CONTRIBUIÇÕES E CONCLUSÕES	45
5	ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA SISTEMAS DE MÚLTIPLAS ANTENAS	48
5.1	ESQUEMAS DE TRANSMISSÃO	48
5.1.1	SISO	49

5.1.2 Alamouti 2×1	49
5.1.3 TAS 2×1	49
5.1.4 MRC 1×2	50
5.1.5 Alamouti+MRC 2×2	50
5.1.6 TAS+MRC 2×2	51
5.1.7 TBF+MRC 2×2	51
5.1.8 V-BLAST 2×2	52
5.2 ANÁLISE DE RESULTADOS	53
5.3 CONTRIBUIÇÕES E CONCLUSÕES	57
6 ANÁLISE DO IMPACTO DO NÚMERO DE ANTENAS TRANSMISSORAS NA	
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA OS ESQUEMAS TAS E TBF	59
6.1 ESQUEMAS DE TRANSMISSÃO	59
6.1.1 TAS	59
6.1.2 TBF	60
6.1.3 SISO	62
6.2 ANÁLISE DE RESULTADOS	62
6.3 CONTRIBUIÇÕES E CONCLUSÕES	67
7 ANÁLISE ENERGÉTICA E FINANCEIRA DE REDES CELULARES SOB	
INTERFERÊNCIA DE CO-CANAL	68
7.1 MODELOS DE ANÁLISE ENERGÉTICA E DE CUSTOS	69
7.1.1 Eficiência energética	69
7.1.2 Análise financeira	70
7.2 ANÁLISE DE RESULTADOS	70
7.3 CONTRIBUIÇÕES E CONCLUSÕES	77
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	79
8.1 TRABALHOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

Usualmente os grandes desafios no desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fio são o fornecimento de maiores taxas de transmissão e ampliação da área de cobertura. Porém, a eficiência energética também tem surgido como uma grande preocupação na evolução dos sistemas de comunicação sem fio modernos. Dentre os fatores que justificam tal interesse na eficiência energética, podem ser destacados interesses ecológicos e econômicos.

Com relação à questão ecológica, pode ser destacado que a indústria de tecnologia de informação e comunicação representa cerca de 2% das emissões globais de CO₂ (e com expectativa de crescimento), sendo que dentro desta parcela, as redes móveis representam uma parcela de 10% (HASAN et al., 2011). Do ponto de vista econômico, já foi reportado que o setor de tecnologia de informação e comunicação é responsável por uma significativa porção de 10% do consumo mundial de energia, com as redes móveis representando 0,5% do consumo global de energia (TOMBAZ et al., 2011a).

Considerando-se outros fatores como a crescente demanda de redes de longo alcance, tais quais os sistemas celulares por tráfego de dados, com previsões de aumento na ordem de cem a mil vezes antes de 2020 (TOMBAZ et al., 2011b), pode-se concluir que as expansões das redes de telefonia celular atuais e de um futuro próximo terão impacto relevante no aumento do consumo energético e também nas emissões de CO₂. Portanto, o uso eficiente da energia em sistemas de comunicação sem fio pode representar tanto ganhos no aspecto econômico para o setor de tecnologia de informação e comunicação, quanto redução do impacto ecológico gerado.

Além disso, a questão da eficiência energética também pode ter impacto expressivo em redes de menor alcance, como as redes de sensores sem fio. Estudos indicam que apesar do aumento na capacidade computacional nas últimas duas décadas ter sido na ordem de milhões de vezes, observou-se um aumento muito modesto no tempo de vida das baterias (DOHLER et al., 2011; PENTIKOUSIS, 2010). Assim, a eficiência energética em redes de comunicação sem fio pode proporcionar um relevante aumento no tempo de vida dos dispositivos limitados por baterias, como os nós de uma rede de sensores sem fio (WSN – do inglês *Wireless Sensor*

Network).

Este documento tem como foco principal a análise da eficiência energética em algumas redes de longo alcance, como as redes celulares, e também em algumas redes de curto alcance, como as redes de sensores sem fio. Os modelos de consumo de potência empregados neste trabalho indicam que, para uma probabilidade de *outage* alvo fim-a-fim, o consumo mínimo de energia é obtido ao minimizar a potência de transmissão. Assim, neste documento são apresentados vários esquemas de transmissão que são empregados tanto em redes celulares, quanto em redes de sensores, para posterior indicação das potências mínimas de transmissão requeridas para cada cenário. Considera-se na análise da eficiência energética em redes celulares o emprego de múltiplas antenas, além de um modelo de consumo de potência realista. Na análise da eficiência energética em redes de sensores sem fio são consideradas limitações de custo e de tamanho que impossibilitam o emprego de múltiplas antenas, sendo incluído na análise o impacto que o uso de um nó *relay* e modelos de transmissão cooperativa podem proporcionar.

1.1 RESULTADOS E PUBLICAÇÕES

A seguir estão listadas as publicações em que constam os principais resultados apresentados nesta tese, e que serão detalhados ao longo do documento:

1. KAKITANI, M.; BRANTE, G.; SOUZA, R.; MUNARETTO, A., Comparing the energy efficiency of single-hop, multi-hop and incremental decode-and-forward in multi-relay wireless sensor networks. **Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011 IEEE 22nd International Symposium on**, 2011. p. 970-974
2. KAKITANI, M.; BRANTE, G.; SOUZA, R.; IMRAN, M., Energy efficiency of amplify-and-forward, repetition coding and parallel coding in short range communications. In: **Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2012 35th International Conference on**, 2012. p. 212-216.
3. KAKITANI, M.; SOUZA, R. D.; IMRAN, M., Energy efficiency contours for amplify and- forward and decode-and-forward cooperative protocols. In: **Communication Systems, Networks Digital Signal Processing (CSNDSP), 2012 8th International Symposium on**, 2012. p. 1-5.
4. KAKITANI, M.; BRANTE, G.; SOUZA, R.; IMRAN, M., Energy efficiency of transmit diversity systems under a realistic power consumption model. **Communications Letters**,

IEEE, v. 17, n. 1, p. 119-122, January 2013. ISSN 1089-7798.

5. KAKITANI, M.; BRANTE, G.; SOUZA, R.; MUNARETTO, A., IMRAM, M., Energy efficiency of some non-cooperative, cooperative and hybrid communication schemes in multi-relay WSNs. **Springer Wireless Networks**, 2013, v. 19, issue 7, p. 1769-1781
6. KAKITANI, M.; BRANTE, G.; SOUZA, R.; IMRAN, M., Downlink energy efficiency analysis of some multiple antenna systems. In: **Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2013 IEEE 77th**, 2013. p. 1-5. ISSN 1550-2252.
7. KAKITANI, M.; BRANTE, G.; SOUZA, R.; PELLEZZI, M.; IMRAN, M., Energy and cost analysis of cellular networks under co-channel interference. In: **Communications (LATINCOM), 2013 IEEE Latin-America Conference**, 2013. p. 1-5.

Além destas publicações, são comentadas a seguir outras publicações que têm relação com os temas e resultados apresentados nesta tese, mas que não foram incluídos com o intuito de manter uma maior coesão dos resultados e análises.

Nos trabalhos (BRANTE et al., 2011a, 2011b) esquemas cooperativos e não cooperativos são comparados em termos da eficiência energética. Ao impor restrições de probabilidade de *outage* e de mesma vazão fim-a-fim a todos os esquemas, foi mostrado que apesar de empregar no mínimo um nó adicional em comparação com a transmissão direta, a transmissão cooperativa pode ser significativamente mais eficiente que os esquemas não cooperativos, mesmo a curtas distâncias, principalmente se houver um canal de retorno disponível. Foi mostrado que os esquemas cooperativos demandam uma menor potência de transmissão em comparação com os esquemas não cooperativos, tendo como consequência a maior eficiência energética.

Em (KAKITANI et al., 2013) é investigada a eficiência energética para esquemas cooperativos e não cooperativos em redes de sensores sem fio com topologias formadas por nós dispostos em uma região bidimensional. A análise do método de seleção de *relay* indica que em cenários em que não há linha de visada entre transmissor e receptor, este fator tem impacto maior na eficiência energética do que a disponibilidade de um canal de retorno. No entanto, em cenários com linha de visada, diferentes conclusões são obtidas visto que a utilização de um canal de retorno é mais relevante na análise da eficiência energética do que o emprego de um método de seleção de *relay* específico. Além disso, é demonstrado que a vantagem de desempenho com relação à eficiência energética dos esquemas de transmissão cooperativos sobre os não cooperativos cresce com o aumento da distância entre os nós e também com a densidade de nós em uma área.

Finalmente, em (BRANTE et al., 2013) é realizada a análise em termos da eficiência energética de redes de sensores sem fio com o emprego de técnicas de transmissão de múltiplas antenas. É demonstrado que para transmissões de curto alcance e taxas de transmissão relativamente baixas, quando há disponibilidade de um canal de retorno, a transmissão cooperativa com uma única antena no transmissor e no receptor pode apresentar melhor eficiência energética do que a transmissão não cooperativa mas com emprego de múltiplas antenas.

1.2 ORGANIZAÇÃO

O restante deste documento é organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 traz os principais conceitos e equações utilizados nas análises, com definições dos esquemas de transmissão e dos modelos de sistema. A análise da eficiência energética em redes de sensores sem fio com o emprego de diferentes técnicas de transmissão cooperativa e análise do impacto da posição relativa do *relay* é realizada no Capítulo 3. O Capítulo 4 expõe a análise da eficiência energética para cenários compostos por três nós sensores, em que dois deles podem agir tanto como transmissor quanto quanto *relay* para o nó destino. São empregadas técnicas de contornos de eficiência energética para indicar os pontos de máxima eficiência e as taxas de transmissão alcançadas. É realizada no Capítulo 5 a análise da eficiência energética para sistemas de longo alcance, com a transmissão de uma estação rádio-base para um usuário. São considerados variados cenários em que tanto o transmissor quanto o receptor podem estar equipados com mais de uma antena. No Capítulo 6 é analisado o impacto do aumento do número de antenas transmissoras na Estação Rádio-Base (ERB) com relação à eficiência energética. É investigada ainda a distância limite entre estação rádio-base e usuário em que um determinado esquema de transmissão é superado por outro. Além do estudo da eficiência energética, é apresentada no Capítulo 7 uma análise em termos financeiros para um determinado número de projetos de redes celulares. É utilizado um modelo econômico que engloba três fatores principais: custos da infraestrutura, do uso do espectro e da energia. Finalmente, o Capítulo 8 apresenta os comentários finais e as propostas para trabalhos a serem desenvolvidos futuramente.

2 CONCEITOS

As redes de transmissão sem fio de curto alcance e de longo alcance apresentam uma série de características, requisitos e aplicações que as diferenciam tanto com relação ao modo de operação da rede, quanto à praticidade dos esquemas de transmissão que podem ser empregados e aos modelos de consumo de energia. Assim, enquanto em redes de curto alcance como as WSNs emprega-se o modo de operação *ad hoc* (configurando uma rede auto-organizável em que os dispositivos comunicam-se diretamente entre si ou por meio de múltiplos saltos), em redes de longo alcance, como as redes celulares, predomina o modo de operação infraestruturado (que é dependente de uma infraestrutura prévia caracterizada pela presença de um elemento central coordenador das transmissões entre os dispositivos). Adicionalmente, devido a limitações de recursos e de tamanho, os dispositivos que compõem redes como as WSNs usualmente não empregam múltiplas antenas em suas transmissões, fazendo uso de outras alternativas para obter diversidade espacial, como técnicas de comunicação cooperativa. Porém, em redes como as celulares, as limitações de recursos são menos rígidas, possibilitando, por exemplo, o emprego de múltiplas antenas nas estações rádio-base ERBs para obtenção de diversidade. Além disso, os modelos e valores de consumo de energia de redes de curto e de longo alcance apresentam diferenças significativas, visto que há distintos componentes de *hardware* presentes nos equipamentos que compõem os dois tipos de rede. Em redes como as WSNs os nós sensores tipicamente operam em larguras de banda estreitas e com uma baixa taxa de transmissão, enquanto as redes celulares operam em larguras de banda maiores com taxas de transmissão consideravelmente superiores.

2.1 DEFINIÇÕES BÁSICAS E MODOS DE OPERAÇÃO

Redes de curto alcance, como as WSNs são compostas por um grande número de nós sensores, que podem ter dimensões bastante reduzidas e que são posicionados dentro ou próximos de fenômenos de interesse, havendo portanto a necessidade de muitas vezes serem localizados em áreas irregulares e de difícil acesso em que não é viável a instalação prévia de uma infraestrutura fixa. Assim, os nós sensores organizam-se em redes *ad hoc* sem

sem fio (MURTHY; MANOJ, 2004), operando sem a presença de um elemento central que coordena a rede, e se comunicando por meio de transmissões diretas ou através de múltiplos saltos com o emprego de nós intermediários que realizam o encaminhamento das mensagens. Com isso, os nós sensores devem possuir capacidades mais complexas de auto-organização e auto-configuração, permitindo que os processos de roteamento e de gerenciamento de recursos sejam realizados de maneira distribuída entre os nós da rede. Tais atributos permitem às WSNs uma grande gama de aplicações, como nas áreas médica, militar e comercial. Dentre as aplicações médicas, as redes de sensores sem fio podem ser aplicadas em sistemas de monitoramento de pacientes. Na área militar, as características de estabelecimento rápido e auto-organizável, tornam as WSNs interessantes para aplicações de comunicação, segurança e monitoramento, além de reconhecimento de terrenos. Dentre as aplicações comerciais, o uso de WSNs pode ser relacionado a gerenciamento de estoques, controle de qualidade de produto e monitoramento de áreas de desastres (AKYILDIZ et al., 2002).

Por outro lado, redes de longo alcance, como as redes de telefonia celular, usualmente apresentam um modo de operação dependente de uma infraestrutura fixa, na qual os nós ou usuários se conectam de forma direta a ERBs que centralizam os processos de roteamento e gerenciamento de recursos. Assim, a comunicação entre dois usuários sempre se dá por intermédio de uma ERB, que se responsabiliza por estabelecer e gerenciar o caminho entre dois usuários.

Além disso, as redes celulares se caracterizam por acomodar um grande número de usuários em grandes áreas de cobertura. Nos primeiros sistemas de transmissão via rádio tinha-se por objetivo o atendimento de uma grande área de cobertura por meio de um único transmissor de alta potência. Tal modelo, porém, limitava a capacidade do sistema, pois tornava impraticável a reutilização de frequências devido à grande interferência de co-canal que seria gerada. A evolução destes sistemas deu-se com a implantação do conceito de sistema celular, em que há a substituição do único transmissor de alta potência e com ampla cobertura por diversas estações de menor potência, atendendo portanto, a áreas menores. O conceito celular permite que seja utilizada uma alocação eficiente com reutilização de frequências em uma determinada área de cobertura. Cada ERB cobre uma pequena região geográfica limitada, denominada de célula. Realiza-se então a distribuição dos canais a serem utilizados em cada célula, de forma que os mesmos canais não sejam utilizados por células adjacentes. Tem-se por objetivo diminuir o impacto da interferência de co-canal ao separar os mesmos grupos de canais para reutilização em outras células localizadas a distâncias apropriadas (RAPPAPORT, 2002).

A Figura 1 representa um modelo simplificado de cobertura de uma rede celular com

reutilização de frequências. Note que cada célula é representada por um hexágono regular. A escolha por tal figura geométrica deve-se pela facilidade de análise, pela aproximação do padrão de radiação e propagação do sinal sem fio, além da possibilidade de que as células sejam posicionadas de forma adjacente sem que haja sobreposição ou áreas sem cobertura (situações estas que ocorreriam caso círculos fossem utilizados para a representação da célula). Na figura, cada célula que utiliza o mesmo conjunto de frequências ou canais (ou célula de co-canal) é representada pela mesma letra (**A**, **B** ou **C**), de forma que o número total de canais disponíveis foi dividido em cada grupo de três células, que formam um *cluster*. Portanto, para cada ERB foi designada a terça parte das frequências ou canais disponíveis. Neste exemplo, um *cluster*, que foi destacado e está delimitado pela área em negrito, foi replicado quatro vezes na área a ser coberta. É possível observar quatro *clusters* que geram interferência de co-canal entre si.

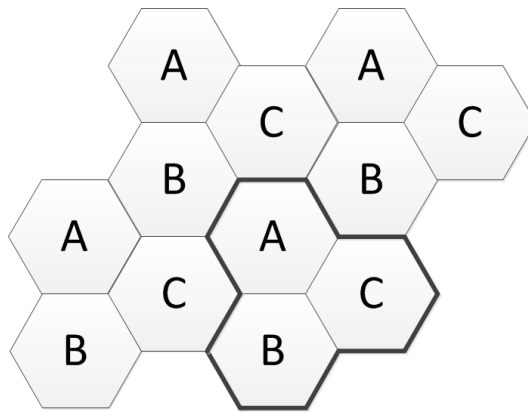


Figura 1: Reuso de frequências em um sistema celular.

Fonte: Autoria própria.

Assim, considerando-se que o operador da rede tenha à disposição C canais e que cada *cluster* do sistema seja composto por ω células, pode-se definir ε como o número de canais que cada célula de um *cluster* deve receber, dado por

$$\varepsilon = \frac{C}{\omega}. \quad (1)$$

Nota-se que cada célula que compõe um *cluster* recebe apenas a fração $1/\omega$ de C , o que define o fator de reutilização de frequências de um sistema celular como $\mu = 1/\omega$. Além disso, vale destacar que para cada célula do *cluster* é alocado $1/\omega$ do total de largura de banda disponível. Assim, pode-se observar que quanto maior o tamanho do *cluster* (ou seja, quanto maior o valor de ω), menor é a largura de banda alocada para cada célula do mesmo, mas menor será a interferência de co-canal, visto que haverá um aumento da distância entre as células de co-canal.

Considerando ainda que cada *cluster* é replicado M vezes a fim de prover cobertura a uma determinada área, o número total de canais C_t efetivamente disponível para uso na área de cobertura é dado por

$$C_t = M \cdot \varepsilon \cdot \omega = M \cdot C. \quad (2)$$

Devido à geometria adotada para a representação das células, ω pode assumir uma quantidade limitada de valores, representada por $\omega \in \{1,3,4,7,9,12,13,16,19,21,25,\dots\}$.

2.2 TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO

Tendo em vista a crescente importância da eficiência energética em sistemas de comunicação sem fio, o emprego de técnicas de transmissão tais como a utilização de múltiplas antenas e a comunicação cooperativa mostra-se de bastante interesse devido à potencial redução da potência de transmissão requerida.

O emprego de múltiplas antenas transmissoras e/ou receptoras por nó da rede (BIGLIERI et al., 2007), caracterizando sistemas MIMO, provê diversidade espacial (reduzindo os adversos efeitos de desvanecimento por meio da transmissão de dados através de múltiplos caminhos independentes, e proporciona um considerável ganho na relação sinal-ruído (SNR) quando comparado a sistemas SISO, que empregam uma única antena na transmissão e na recepção. Assim, para uma mesma taxa de vazão de dados, como apresentado em (PAULRAJ et al., 2003), um sistema com múltiplas antenas pode requerer menos energia do que um sistema SISO.

Diferentes técnicas de transmissão podem ser adotadas de acordo com a forma de utilização e o número de antenas disponíveis no transmissor e no receptor. Dentre as técnicas, podem ser destacadas: *Vertical Bell Laboratories Space-Time (V-BLAST)*, *transmit antenna selection (TAS)*, *maximum ratio combining (MRC)*, esquema de Alamouti, e *transmit beamforming (TBF)*, conforme descrito a seguir.

- V-BLAST: nesta estratégia a informação é dividida em sub-fluxos de dados, que são transmitidos em paralelo por meio de múltiplas antenas transmissoras. Múltiplas antenas recebem estes dados, que são processados de forma a permitir a identificação e recuperação dos sub-fluxos transmitidos. São obtidos assim múltiplos canais virtuais paralelos e independentes (GOLDEN et al., 1999; LOYKA; GAGNON, 2004).
- TAS: considera-se nesse esquema que embora o transmissor possua múltiplas antenas, durante uma transmissão apenas uma porção destas antenas são ativas, enquanto as

demais permanecem inativas. Considerando-se que apenas uma antena permanece ativa em uma transmissão, há um dispositivo que seleciona a antena que provê a maior potência de sinal recebido, exigindo dessa forma no elemento transmissor apenas uma cadeia de circuitos de RF (CHEN et al., 2005).

- MRC: neste método os sinais de cada uma das múltiplas antenas receptoras recebem um peso de acordo com a qualidade individual dos sinais recebidos. Os sinais ponderados são posteriormente somados. Obtém-se assim por este método uma SNR que é igual à soma das SNRs individuais dos sinais recebidos. Portanto, mesmo que as SNRs individualmente recebidas não apresentem um nível aceitável, é possível obter uma SNR de saída que apresente um nível satisfatório (RAPPAPORT, 2002).
- Esquema de Alamouti: trata-se de uma estratégia de codificação espaço-temporal projetada para dispositivos equipados com duas antenas transmissoras. O esquema faz uso de dois períodos de símbolo para a transmissão de dois símbolos. No primeiro período de símbolo cada uma das antenas transmite de forma simultânea um símbolo diferente. No segundo período de símbolo versões modificadas dos mesmos símbolos são transmitidas simultaneamente pelas antenas (ALAMOUTI, 1998).
- TBF: objetiva-se maximizar a SNR recebida por meio do direcionamento da transmissão. Nesta técnica mais potência é alocada para as antenas transmissoras com melhor ganho, além de providenciar que os sinais recebidos das múltiplas antenas transmissoras estejam alinhados em fase (TSE; VISWANATH, 2005).

Deve-se destacar que enquanto os esquemas MRC, Alamouti e TBF obtêm melhor desempenho quanto à probabilidade de erro de transmissão por meio de ganhos de diversidade, o V-BLAST apresenta ganhos de desempenho devido a ganhos de multiplexação.

No entanto, redes como as WSNs apresentam componentes com restrições de tamanho e de custo mais rígidas quando comparadas a redes de maior porte, como as celulares. Enquanto em redes celulares o uso de múltiplas antenas tem aplicação viável, em WSNs esta solução mostra-se mais restritiva e menos aplicável. Assim, o uso de esquemas de transmissão cooperativos apresenta-se como uma alternativa que provê diversidade espacial mesmo com o emprego de dispositivos dotados de uma única antena. As técnicas de comunicação cooperativa (SENDONARIS et al., 2003; LANEMAN et al., 2004) aproveitam-se da natureza *broadcast* do meio de transmissão sem fio para permitir que diferentes nós da rede possam cooperar em uma comunicação, retransmitindo mensagens para seu destino. Conforme ilustrado na Figura 2, em uma transmissão *broadcast* de um nó origem (*S*) para um nó

destino (D), um nó *relay* (R) intermediário também pode receber a mensagem e posteriormente retransmiti-la para D . O nó *relay* age então como um parceiro na transmissão principal de S para D . Com isso, a comunicação cooperativa, mesmo com a utilização de nós equipados com uma única antena, proporciona diversidade espacial por meio da utilização da antena de um nó parceiro.

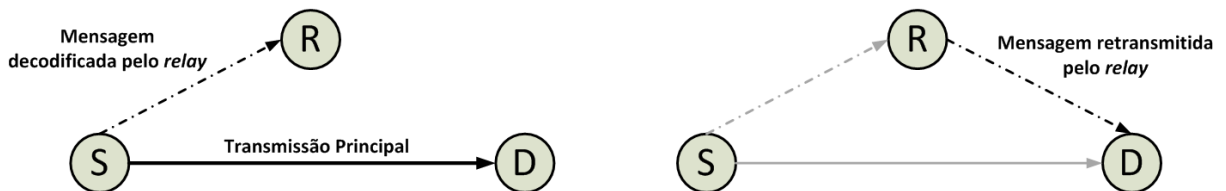


Figura 2: Comunicação cooperativa.

Fonte: Autoria própria.

O nó *relay* pode ter diversos comportamentos e utilizar variadas estratégias ao receber e posteriormente retransmitir uma mensagem para D , definindo os diferentes protocolos cooperativos. Basicamente, os dois protocolos mais analisados na literatura são: amplifica-e-encaminha (AF) e decodifica-e-encaminha (DF).

- AF: trata-se da estratégia mais simples que pode ser adotada, em que o *relay* simplesmente amplifica o sinal recebido de S e transmite para D , sem realizar nenhum tipo de decodificação. Porém, a principal desvantagem desta estratégia é que além do sinal de S , o *relay* amplifica também o ruído recebido (HOSSAIN et al., 2011).
- DF: nesta estratégia há um aumento na complexidade do *relay*, pois ao receber a mensagem de S , esta é decodificada, recodificada e então retransmitida pelo *relay* para D . Há duas variantes do protocolo cooperativo que devem ser destacadas: decodifica-e-encaminha seletivo (SDF) e decodifica-e-encaminha incremental (IDF):
 - SDF: neste esquema, caso o *relay* consiga decodificar a mensagem, ele a recodifica e encaminha para D . Caso contrário, o *relay* permanece em silêncio. Portanto, no esquema SDF toda mensagem decodificada com sucesso pelo *relay* é retransmitida para D .
 - IDF: assume-se neste esquema a disponibilidade de um canal de retorno, que provê para o nó D um mecanismo para informar para o nó *relay* o sucesso ou o fracasso de uma transmissão de S . Por meio do canal de retorno, o nó D pode enviar uma mensagem de confirmação para o *relay* caso a transmissão de S tenha sido bem

sucedida. Assim, o *relay* apenas realizará uma retransmissão caso a mensagem tenha sido decodificada com sucesso e D tenha requerido.

2.3 MODELOS DE CONSUMO

A análise da eficiência energética é realizada com relação ao consumo de energia por *bit* de cada esquema de transmissão considerado. Em WSNs, além da potência de transmissão requerida, que é dependente da distância, a energia consumida pelos circuitos de transmissão e recepção dos nós sensores também são considerados. Com base no modelo proposto em (CUI et al., 2005), a energia total consumida por *bit* em uma transmissão de um nó i para um nó j (enlace $i - j$) é

$$E_{bt,ij} = \frac{P_{PA} + P_{TX} + P_{RX}}{R_b}, \quad (3)$$

onde P_{PA} representa a potência consumida pelo amplificador de potência, P_{TX} e P_{RX} são respectivamente as potências de transmissão e recepção consumidas pelos circuitos de radiofrequência e R_b corresponde à taxa de *bits* em *bits/s*. A taxa de *bits* é definida como: $R_b = \Delta \cdot B$, onde Δ é a eficiência espectral e B é a largura de banda do sistema, em Hz. Para o circuito de radiofrequência é considerado o diagrama de blocos introduzido em (CUI et al., 2005), um modelo bastante utilizado na literatura. Os seguintes componentes compõem o circuito de transmissão: conversor digital-analógico, misturador, filtro de transmissão e sintetizador de frequência, com as respectivas potências de consumo P_{DAC} , P_{mix} , P_{filTx} e P_{syn} , totalizando a potência de consumo do circuito de transmissão como

$$P_{TX} = P_{DAC} + P_{mix} + P_{filTx} + P_{syn}. \quad (4)$$

Com relação ao circuito de recepção, os seguintes componentes são considerados: sintetizador de frequência, amplificador de baixo ruído, misturador, amplificador de frequência intermediária, filtro de recepção e conversor analógico-digital. Os respectivos consumos de potência são P_{syn} , P_{LNA} , P_{mix} , P_{IFA} , P_{filRx} , P_{ADC} , enquanto o consumo total de potência pelo circuito de recepção é dado por

$$P_{RX} = P_{syn} + P_{LNA} + P_{mix} + P_{IFA} + P_{filRx} + P_{ADC}. \quad (5)$$

O consumo do amplificador de potência depende da sua eficiência (CUI et al., 2005), tal que

$$P_{PA} = \frac{\xi}{\eta} P_t, \quad (6)$$

onde $\xi = 3 \left(\frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}+1} \right)$ representa a razão entre a potência de pico e a potência média para uma

modulação M -QAM, η é a eficiência de dreno do amplificador e P_t é a potência de transmissão do nó i .

Considerando a análise da eficiência energética na transmissão de uma ERB para um usuário (*downlink*) em um cenário celular, e com base no modelo de consumo proposto em (AUER et al., 2011), pode-se generalizar a energia total consumida por *bit* para o modelo linear como

$$E_{bt} = \frac{N_{\text{TRX}} \cdot P_0 + \Delta_p \cdot P_t}{R_b}, \quad (7)$$

onde N_{TRX} representa o número de transceptores ou cadeias de circuito de RF (com cada um servindo uma antena transmissora) da ERB, P_0 corresponde ao consumo de potência não-dependente da carga ou potência de transmissão do sistema, Δ_p é a taxa de consumo de potência dependente da carga do sistema, e P_t representa a potência de saída nas antenas transmissoras. Deve-se ressaltar que apenas a potência consumida pela ERB foi incluída, visto que nesta análise a potência consumida pelo receptor não é relevante em comparação com a potência da ERB.

Nos cenários analisados, é imposta ainda a limitação de uma probabilidade de *outage* alvo. Apesar da probabilidade de *outage* ser definida para um código de comprimento de bloco infinito, tal suposição não é um fator que invalida a análise, visto que há vários trabalhos encontrados na literatura mostrando que a probabilidade de *outage* pode prever de forma satisfatória a taxa de erro de quadro de bons códigos práticos com comprimentos de blocos relativamente curtos (MALKAMAKI; LEIB, 1999; KNOPP; HUMBLET, 2000; BIGLIERI et al., 2001). Uma *outage* ocorre quando, na transmissão de um quadro, a relação SNR no receptor atinge um valor abaixo do valor de limiar $\beta = 2^\Delta - 1$ (GOLDSMITH, 2005). Para um sistema composto por M_t antenas transmissoras e M_r antenas receptoras, o quadro \mathbf{y} complexo de dimensão M_r recebido é dado por

$$\mathbf{y} = \sqrt{P_t} \gamma \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (8)$$

onde γ representa a perda de percurso entre o transmissor e o receptor, \mathbf{H} é uma matriz $M_r \times M_t$ de ganhos de desvanecimento h_{rt} representando o desvanecimento de uma antena transmissora t para uma antena receptora r , \mathbf{x} corresponde ao quadro transmitido de dimensão $M_t \times 1$, e \mathbf{n} representa o vetor AWGN de dimensão $M_r \times 1$, com variância $N_0/2$ por dimensão, onde N_0 é a densidade espectral de potência de ruído térmico por Hz. A perda de percurso entre o transmissor e o receptor é dada por (GOLDSMITH, 2005)

$$\gamma = \frac{G\lambda^2}{(4\pi)^2 d^\alpha L N_f}, \quad (9)$$

onde d é a distância em metros entre o transmissor e o receptor, α representa o expoente de perda de percurso, G é o ganho total das antenas transmissoras e receptoras, λ corresponde ao comprimento de onda, L representa a margem de enlace e N_f é a figura de ruído no receptor. A SNR instantânea é

$$SNR = \|\mathbf{H}\|_F^2 \cdot \rho, \quad (10)$$

onde $\rho = \frac{\gamma P_t}{N}$, com $N = N_0 \cdot B$ sendo a densidade espectral de potência de ruído e

$$\|\mathbf{H}\|_F = \sqrt{\sum_{r=1}^{M_R} \sum_{t=1}^{M_t} |h_{rt}|^2} \quad (11)$$

é a norma de Frobenius de \mathbf{H} .

A probabilidade de *outage* \mathcal{O} para $M_t = M_r = 1$ e considerando canais com desvanecimento Rayleigh é dada por (GOLDSMITH, 2005)

$$\mathcal{O} = 1 - \exp\left(\frac{-\beta}{\rho}\right). \quad (12)$$

3 ANÁLISE EMPREGANDO DF COM *REPETITION CODING* E *PARALLEL CODING*

São avaliadas neste capítulo transmissões em WSNs envolvendo três nós (fonte (S), *relay* (R) e destino (D)) dispostos em uma linha. Os nós são equipados com uma única antena, portanto $M_t = M_r = 1$. É analisada a eficiência energética do esquema não-cooperativo *single-hop* (SH) e dos esquemas cooperativos AF e DF, considerando que um canal de retorno pode estar disponível ou não, com canal de desvanecimento Rayleigh. Considera-se ainda que nos esquemas cooperativos tanto o nó fonte quanto o *relay* empregam a mesma potência de transmissão. Além disso, no esquema DF diferentes códigos de canal podem ser usados nos nós S e R, caracterizando a estratégia *Parallel Coding* (PC). Caso o mesmo código de canal seja utilizado tanto na fonte quanto no *relay*, a estratégia *Repetition Coding* (RC) é caracterizada (KHORMUJI; LARSSON, 2009). As análises expostas nesse capítulo foram apresentadas em (KAKITANI et al., 2012).

3.1 ESQUEMAS DE TRANSMISSÃO

São consideradas as restrições de uma probabilidade de *outage* e de uma vazão fim-a-fim alvos na análise da eficiência energética dos seguintes esquemas de transmissão: SH, AF e DF empregando as estratégias RC e PC. Esquemas de transmissão por múltiplos saltos não foram incluídos nas análises devido ao seu degradado desempenho em termos de eficiência energética com a imposição de uma vazão fim-a-fim alvo, como mostrado em (KAKITANI et al., 2011, 2013b). Nestes trabalhos foi realizada a análise da eficiência energética de esquemas cooperativos e não cooperativos de transmissão em WSNs compostas por múltiplos nós. Como pode ser observado na Figura 3, apresentada em (KAKITANI et al., 2013b), para uma probabilidade de *outage* alvo $\mathcal{O}^* = 10^{-3}$, eficiência espectral $\Delta = 2$ b/s/Hz e imposição de mesma vazão fim-a-fim a todos os esquemas, conforme o número de *relays* K aumenta para os esquemas de múltiplos saltos (MH), o consumo de energia por *bit* também aumenta. Assim, enquanto o esquema cooperativo de transmissão apresenta a maior eficiência energética, pode-se observar que os esquemas MH apresentam o pior desempenho, sendo superados inclusive

pelo esquema SH.

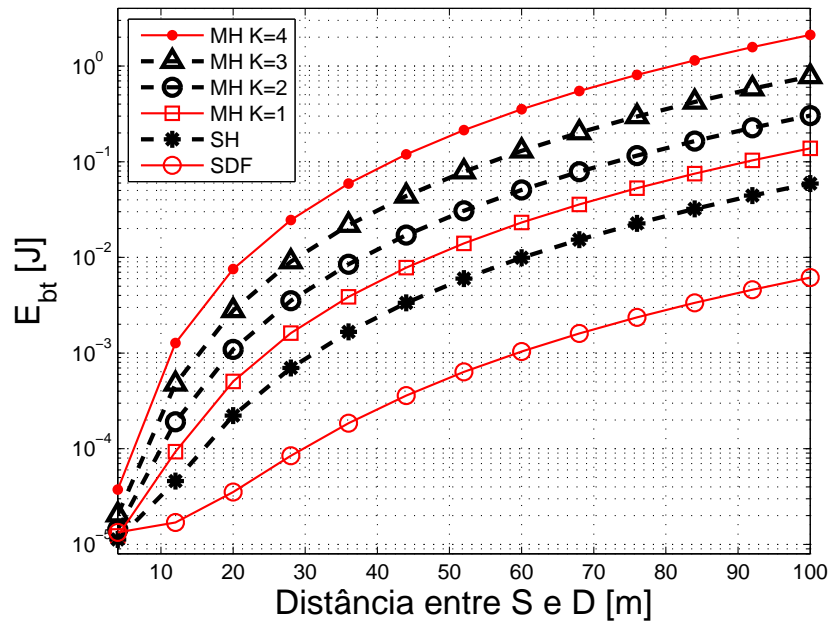


Figura 3: Consumo total de energia por *bit* para $\hat{\mathcal{O}}^* = 10^{-3}$ e $\Delta = 2$ b/s/Hz em cenários com múltiplos nós.

Fonte: Autoria própria

3.1.1 SINGLE-HOP

O esquema SH envolve apenas dois nós na comunicação, S e D , com uma transmissão direta do nó S para o nó D . O consumo total de energia por *bit* da transmissão SH pode ser obtido substituindo i e j por S e D em (3)

$$E_{bt,SH} = E_{bt,SD} = \frac{P_{PA,SH} + P_{TX} + P_{RX}}{R_b}. \quad (13)$$

Visto que P_{TX} e P_{RX} não podem ser ajustados e são dependentes da tecnologia específica considerada, o consumo mínimo de energia é obtido minimizando-se $P_{PA,SH}$. A potência de transmissão ótima do esquema SH, considerando uma probabilidade de *outage* alvo $\hat{\mathcal{O}}^*$, pode ser obtida a partir de (12) com $P_i = P_{SH}^*$ como

$$P_{SH}^* = \frac{-N\beta}{\gamma_{SD} \ln(1 - \hat{\mathcal{O}}^*)}. \quad (14)$$

3.1.2 DF COM REPETITION CODING

No esquema DF utilizando a estratégia RC se a mensagem de S é decodificada com sucesso pelo *relay*, este recodifica a transmissão recebida utilizando o mesmo código de canal. Assim, quando o *relay* coopera, D recebe duas cópias da mensagem. Visto que dois intervalos de tempo são necessários para a transmissão, cada transmissão deste esquema deve requerer o dobro da eficiência espectral em comparação com o esquema SH, com o intuito de obter a mesma vazão fim-a-fim. Considerando que a técnica MRC é empregada em D , a probabilidade de *outage* fim-a-fim inclui a probabilidade de *outage* dos três enlaces (S - D , S - R e R - D) e é dada por

$$\mathcal{O}_{RC} = p_{SD} \cdot p_{SR} + (1 - p_{SR}) \cdot p_{SD,RD}, \quad (15)$$

onde $p_{SD,RD}$ representa a probabilidade de *outage* considerando MRC no destino. Além disso, em (KHORMUJI; LARSSON, 2009), (15) foi mostrado poder ser suficientemente aproximado por¹

$$\mathcal{O}_{RC} \simeq \frac{(N\beta')^2}{\gamma_{SD}(P_{RC})^2} \cdot \left[\frac{1}{\gamma_{SR}} + \frac{1}{2\gamma_{RD}} \right], \quad (16)$$

onde $\beta' = 2^{2\Delta} - 1$.

A potência de transmissão ótima P_{RC}^* pode ser obtida de (16) substituindo \mathcal{O}_{RC} por \mathcal{O}^* . Assim

$$P_{RC}^* = N\beta' \cdot \sqrt{\frac{1}{\gamma_{SD}\mathcal{O}^*} \cdot \left[\frac{1}{\gamma_{SR}} + \frac{1}{2\gamma_{RD}} \right]}. \quad (17)$$

Visto que o consumo total de energia por *bit* dos esquemas cooperativos depende da disponibilidade de um canal de retorno, a análise é realizada de forma separada, como segue.

3.1.2.1 RC SEM CANAL DE RETORNO (RC)

Caso um canal de retorno não esteja disponível, o consumo total de energia por *bit* é

$$E_{bt,RC} = \frac{P_{PA,RC} + P_{TX} + 2P_{RX}}{2R_b} + (1 - p_{SR}) \cdot \frac{P_{PA,RC} + P_{TX} + P_{RX}}{2R_b}, \quad (18)$$

onde o primeiro termo representa a transmissão de S , e o segundo termo representa a transmissão de R , que é ponderado pela probabilidade $(1 - p_{SR})$ de que R decodifique com sucesso a mensagem de S . Note que todos os termos são divididos por $2R_b$ visto que neste cenário cada nó opera com o dobro da eficiência espectral em comparação com a transmissão SH. Deve ainda ser destacado que embora seja analisado o emprego de códigos *capacity achieving* (em geral

¹Todos os limites considerados neste trabalho foram verificados por simulações de Monte Carlo, mostrando serem bastante próximos dos valores reais desde que $\mathcal{O}^* \leq 10^{-2}$.

complexos), o consumo de energia com o processamento de banda base pode ser considerado significativamente inferior ao consumo dos circuitos de RF (CUI et al., 2005) nos cenários WSNs analisados, assim a energia consumida por R e D para decodificação não foi incluída nas análises deste trabalho.

3.1.2.2 RC COM CANAL DE RETORNO (IRC)

O consumo total de energia por *bit* do esquema RC quando um canal de retorno está disponível² (IRC) é

$$E_{bt,IRC} = \frac{P_{PA,RC} + P_{TX} + 2P_{RX}}{2R_b} + p_{SD} \cdot (1 - p_{SR}) \cdot \frac{P_{PA,RC} + P_{TX} + P_{RX}}{2R_b}, \quad (19)$$

onde o primeiro termo da equação corresponde à transmissão de S , e o segundo termo representa uma falha na decodificação por D , porém com uma decodificação correta executada pelo *relay*, resultando na cooperação de R com uma transmissão adicional de R para o nó D .

3.1.3 DF COM PARALLEL CODING

Considerando o uso da estratégia PC, os nós fonte e *relay* utilizam diferentes códigos de canal. Assim, ao decodificar com sucesso uma mensagem de S , o *relay* primeiro recodifica a mensagem utilizando um código que é diferente do código utilizado em S , a nova mensagem é então retransmitida para D . A probabilidade de *outage* fim-a-fim pode ser aproximada por (KHORMUJI; LARSSON, 2009)

$$\mathcal{O}_{PC} \simeq \frac{(N\beta')^2}{\gamma_{SD}\gamma_{SR}P_{PC}^2} + \frac{N^2 [2\Delta \ln(2)(\beta' + 1) - \beta']}{\gamma_{SD}\gamma_{RD}P_{PC}^2}, \quad (20)$$

onde a potência de transmissão ótima P_{PC}^* pode ser obtida substituindo \mathcal{O}_{PC} por \mathcal{O}^* , tal que

$$P_{PC}^* = N \cdot \sqrt{\frac{1}{\mathcal{O}^*} \left[\frac{(\beta')^2}{\gamma_{SD}\gamma_{SR}} + \frac{[2\Delta \ln(2)(\beta' + 1) - \beta']}{\gamma_{SR}\gamma_{RD}} \right]}. \quad (21)$$

3.1.3.1 PC SEM CANAL DE RETORNO (PC) E PC COM CANAL DE RETORNO (IPC)

O consumo total de energia por *bit* para as estratégias PC sem canal de retorno e PC com canal de retorno (IPC) podem ser obtidas ao substituir $P_{PA,RC}$ por $P_{PA,PC}$ em (18) e (19)

²Visto que as mensagens de ACK/NACK enviadas por D pelo canal de retorno geralmente possuem um número consideravelmente menor de *bits* em comparação com a transmissão de S , a energia consumida por estas mensagens não foi incluída na análise dos esquemas cooperativos (BRANTE et al., 2011a).

respectivamente, de modo que

$$E_{bt,PC} = \frac{P_{PA,PC} + P_{TX} + 2P_{RX}}{2R_b} + (1 - p_{SR}) \cdot \frac{P_{PA,PC} + P_{TX} + P_{RX}}{2R_b}, \quad (22)$$

e

$$E_{bt,IPC} = \frac{P_{PA,PC} + P_{TX} + 2P_{RX}}{2R_b} + p_{SD} \cdot (1 - p_{SR}) \cdot \frac{P_{PA,PC} + P_{TX} + P_{RX}}{2R_b}. \quad (23)$$

3.1.4 AMPLIFICA-E-ENCAMINHA

No esquema AF, a mensagem de S recebida pelo *relay* é amplificada para compensar os efeitos de desvanecimento do enlace $S - R$. Em (LANEMAN et al., 2004), mostrou-se que a probabilidade de *outage* fim-a-fim do modelo AF pode ser aproximada por

$$\mathcal{O}_{AF} \simeq \left(\frac{1}{2\gamma_{SD}} \cdot \frac{\gamma_{SR} + \gamma_{RD}}{\gamma_{SR}\gamma_{RD}} \right) \cdot \left(\frac{N\beta'}{P_{AF}} \right)^2, \quad (24)$$

e a potência de transmissão ótima P_{AF}^* pode ser obtida de (24) substituindo \mathcal{O}_{AF} por \mathcal{O}^* , tal que

$$P_{AF}^* = N\beta' \cdot \sqrt{\frac{\gamma_{SR} + \gamma_{RD}}{2\gamma_{SD}\gamma_{SR}\gamma_{RD}\mathcal{O}^*}}. \quad (25)$$

3.1.4.1 AF SEM CANAL DE RETORNO (AF)

Considerando que não há um canal de retorno disponível, o consumo total de energia por *bit* do AF é

$$E_{bt,AF} = \frac{P_{PA,AF} + P_{TX} + 2P_{RX}}{2R_b} + \frac{P_{PA,R} + P_{TX} + P_{RX}}{2R_b}, \quad (26)$$

onde $P_{PA,R} = \xi/\eta \cdot [P_{AF} - (P_{AF} \cdot \gamma_{SR} + N)]$ é a potência consumida pelo *relay* no protocolo AF.

3.1.4.2 AF COM CANAL DE RETORNO (IAF)

Dado que no modelo IAF o *relay* retransmite com uma probabilidade p_{SD} , o consumo total de energia por *bit* é

$$E_{bt,IAF} = \frac{P_{PA,AF} + P_{TX} + 2P_{RX}}{2R_b} + p_{SD} \cdot \frac{P_{PA,R} + P_{TX} + P_{RX}}{2R_b}. \quad (27)$$

A Tabela 1 relaciona os esquemas analisados com as respectivas potências de transmissão ótimas.

Tabela 1: Potências de transmissão ótimas

Esquema de transmissão	Potência ótima
<i>Single-hop</i>	$P_{SH}^* = \frac{-N\beta}{\gamma_{SD} \ln(1-\mathcal{O}^*)}$
DF com <i>Repetition Coding</i>	$P_{RC}^* = N\beta' \cdot \sqrt{\frac{1}{\gamma_{SD}\mathcal{O}^*} \cdot \left[\frac{1}{\gamma_{SR}} + \frac{1}{2\gamma_{RD}} \right]}$
DF com <i>Parallel Coding</i>	$P_{PC}^* = N \cdot \sqrt{\frac{1}{\mathcal{O}^*} \left[\frac{(\beta')^2}{\gamma_{SD}\gamma_{SR}} + \frac{[2\Delta \ln(2)(\beta'+1) - \beta']}{\gamma_{SR}\gamma_{RD}} \right]}$
Amplifica-e-encaminha	$P_{AF}^* = N\beta' \cdot \sqrt{\frac{\gamma_{SR} + \gamma_{RD}}{2\gamma_{SD}\gamma_{SR}\gamma_{RD}\mathcal{O}^*}}$

Fonte: Autoria própria

3.2 ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção é analisada a eficiência energética dos esquemas de transmissão SH, AF, RC e PC. Os parâmetros do sistema foram configurados de acordo com os valores da Tabela 2 e os parâmetros de consumo dos circuitos de transmissão e recepção seguem os valores apresentados em (CUI et al., 2005), sendo listados na Tabela 3.

Tabela 2: Parâmetros do sistema

Margem de enlace	$L = 40$ dB
Figura de ruído	$N_f = 10$ dB
Ganho das antenas	$G = 5$ dBi
Frequência de portadora	$f_c = 2,5$ GHz
Densidade espectral de potência de ruído térmico	$N_0 = -174$ dBm
Largura de banda	$B = 10$ kHz
Expoente de perda de percurso	$\alpha = 3,5$

Fonte: Autoria própria

A Figura 4 ilustra o consumo de energia por *bit* considerando uma probabilidade máxima de *outage* de $\mathcal{O}^* = 10^{-3}$ e $\Delta = 2$ b/s/Hz, com o nó *relay* posicionado em $d_r = 0,2$, onde $d_r = d_{SR}/d_{SD}$, assim *R* está posicionado mais próximo de *S*. Deve-se notar que a transmissão SH tem seu desempenho superado pelos esquemas cooperativos para qualquer d_{SD} , enquanto os modelos AF e RC, assim como IAF e IRC, apresentam desempenhos bastante similares. Além disso, o esquema IPC é o que apresenta a maior eficiência energética para qualquer d_{SD} ,

Tabela 3: Consumo de potência dos circuitos de transmissão e recepção

Misturador	$P_{mix} = 30,0$ mW
Filtros de transmissão e recepção	$P_{filTx} = P_{filRx} = 2,5$ mW
Sintetizador de frequência	$P_{syn} = 50$ mW
Amplificador de baixo ruído	$P_{LNA} = 20$ mW
Amplificador de frequência intermediária	$P_{IFA} = 3$ mW
Conversor analógico-digital	$P_{ADC} = 6,7$ mW
Conversor digital-analógico	$P_{DAC} = 15,4$ mW
Eficiência de dreno do amplificador	$\eta = 0,35$

Fonte: Autoria própria

enquanto o modelo de transmissão PC (portanto, sem um canal de retorno) supera IRC e IAF, que fazem uso de um canal de retorno. Ainda, para distâncias de transmissão bastante curtas, tanto RC, PC e AF, ou IRC, IPC e IAF apresentam desempenhos bastante próximos devido à relevância do consumo dos circuitos de transmissão e recepção³.

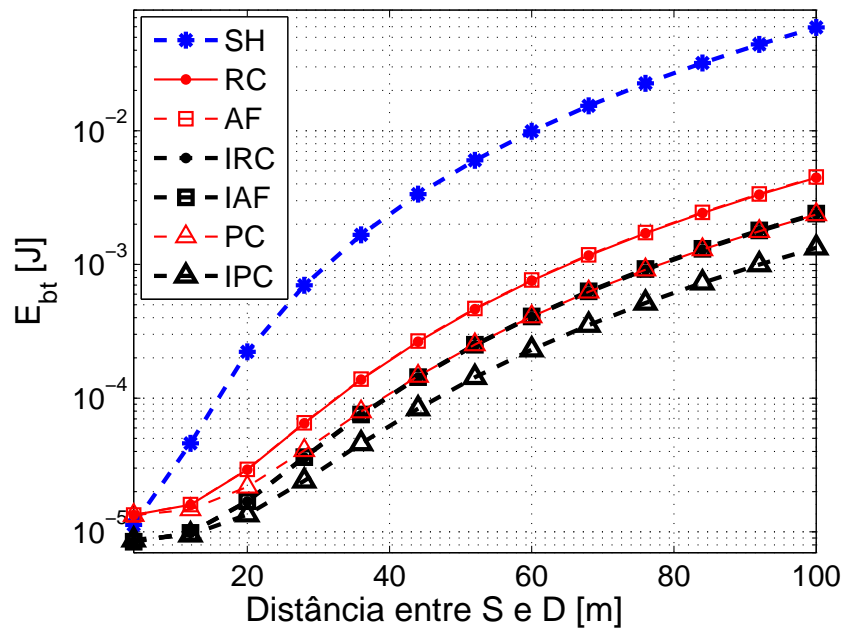


Figura 4: Consumo total de energia por *bit* para $\mathcal{O}^* = 10^{-3}$, $\Delta = 2$ b/s/Hz e $d_r = 0,2$.

Fonte: Autoria própria

Na Figura 5 o consumo total de energia por *bit* é comparado para $\mathcal{O}^* = 10^{-3}$, $\Delta = 2$ b/s/Hz, e $d_r = 0,8$, portanto R está posicionado mais próximo de D . Neste cenário, há um acréscimo de p_{SR} , e portanto R é capaz de decodificar a mensagem de S com menor frequência.

³A maior eficiência do PC com relação ao RC pode ser evidenciada com a análise da informação mútua destes esquemas. Considerando que ρ_{SR} e ρ_{RD} são respectivamente as SNRs entre S e R , e entre R e D para o esquema RC a informação mútua é $I_{RC} = \log_2(1 + \rho_{SR} + \rho_{RD})$, enquanto para PC temos $I_{PC} = \log_2(1 + \rho_{SR}) + \log_2(1 + \rho_{RD})$.

Com isso, os esquemas DF necessitam de uma potência de transmissão maior se comparado com AF para alcançar a mesma probabilidade de *outage*, o que reflete na eficiência energética, de modo que o AF passa a ser o esquema mais eficiente.

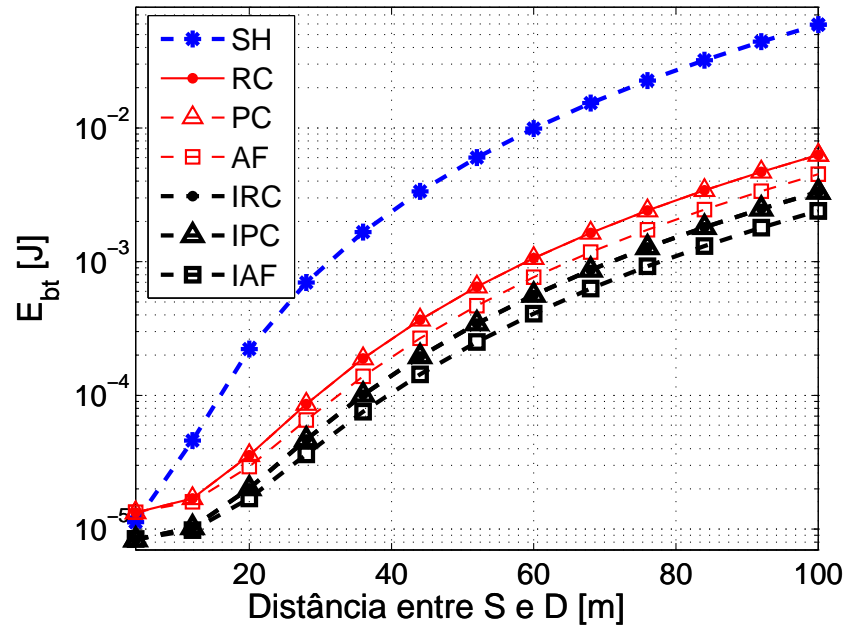


Figura 5: Consumo total de energia por *bit* para $\theta^* = 10^{-3}$, $\Delta = 2$ b/s/Hz e $d_r = 0,8$.

Fonte: Autoria própria

3.2.1 IMPACTO DA POSIÇÃO RELATIVA DO RELAY

A Figura 6 ilustra o impacto da posição de R com relação a S , $d_r = d_{SR}/d_{SD}$, no consumo total de energia por *bit* para $\theta^* = 10^{-3}$, $\Delta = 2$ b/s/Hz, e $d_{SD} = 50$ m. Deve-se notar que quando R está próximo de S , a estratégia PC tem uma grande vantagem sobre os outros esquemas. Caso R esteja em $d_r = 0,5$, os métodos apresentam desempenhos bastante similares, enquanto para $d_r > 0,5$, os métodos AF superam os esquemas DF.

3.2.2 IMPACTO DA VAZÃO FIM-A-FIM

A Figura 7 compara a eficiência energética dos esquemas de transmissão para valores de Δ de 1 b/s/Hz a 10 b/s/Hz com $\theta^* = 10^{-3}$, $d_{SD} = 50$ m e $d_r = 0,2$. Deve-se notar que para curtas distâncias $S - R$, os esquemas PC são os modelos de transmissão mais eficientes para a maioria dos valores de Δ considerados. Ambos, PC e IPC apenas são superados por SH para $\Delta \geq 9$ b/s/Hz, enquanto a estratégia PC não-incremental apresenta maior eficiência energética que IRC e IAF para $\Delta > 2$ b/s/Hz.

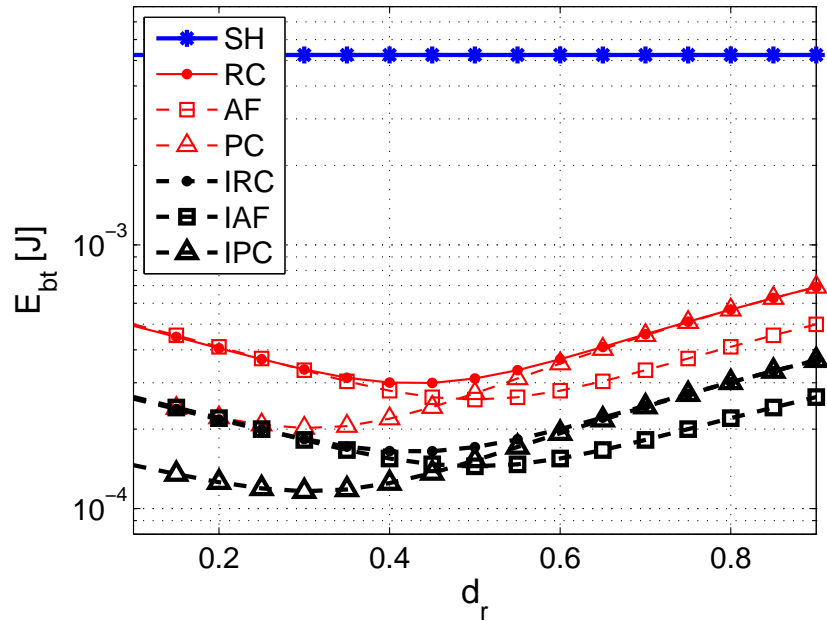


Figura 6: Consumo total de energia por *bit* para $\theta^* = 10^{-3}$, $\Delta = 2$ b/s/Hz e $d_{SD} = 50$ m.

Fonte: Autoria própria

Na Figura 8 a eficiência energética é comparada para o mesmo cenário da Figura 7, mas com $d_r = 0,8$. Para maiores distâncias $S-R$, como p_{SR} aumenta, os esquemas cooperativos apresentam uma vantagem menor sobre a transmissão SH. A partir de $\Delta = 7$ b/s/Hz SH é o mais eficiente. Além disso, IAF supera IRC e IPC, assim como AF tem desempenho superior que RC e PC para qualquer Δ .

3.2.3 IMPACTO DA PROBABILIDADE DE *OUTAGE*

O impacto da probabilidade de *outage* alvo para $\Delta = 6$ b/s/Hz, $d_{SD} = 50$ m e $d_r = 0,8$ é ilustrado na Figura 9. Enquanto IAF é o esquema com maior eficiência energética para a maioria dos valores de θ^* , deve-se notar que conforme θ^* aumenta, com o sistema se tornando mais tolerante a erros, SH supera cada um dos esquemas de transmissão cooperativa devido à menor potência de transmissão requerida e maior relevância do consumo de energia dos circuitos de transmissão e recepção dos *relays*. Vários outros valores de Δ e d_r foram analisados, apresentando porém comportamentos similares.

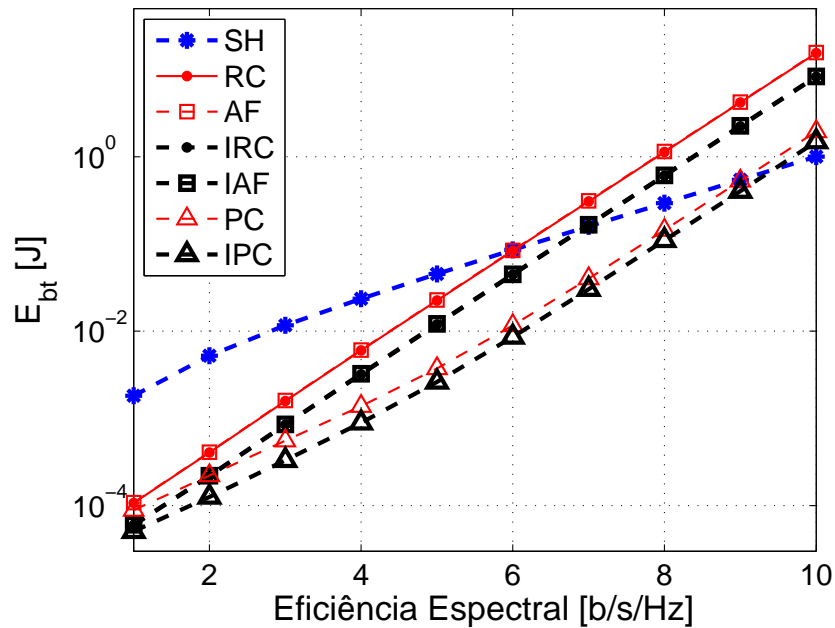


Figura 7: Consumo total de energia por bit para $\mathcal{O}^* = 10^{-3}$, $d_{SD} = 50$ m e $d_r = 0,2$.

Fonte: Autoria própria

3.3 CONTRIBUIÇÕES E CONCLUSÕES

A eficiência energética das transmissões direta, decodifica-e-encaminha utilizando os esquemas *repetition coding* e *parallel coding*, além do amplifica-e-encaminha em cenários WSNs são comparadas, considerando restrições de uma probabilidade de *outage* alvo e vazão fim-a-fim em condições de canal com desvanecimento Rayleigh. Os resultados obtidos indicam que em cenários nos quais o nó *relay* está mais próximo da fonte, o esquema de transmissão IPC apresenta a maior eficiência energética. Além disso, mesmo sem um canal de retorno disponível, PC supera ou tem um desempenho próximo aos esquemas IAF e IRC, que fazem uso de um canal de retorno. Entretanto, para distâncias maiores entre os nós fonte e *relay*, o modelo AF mostra-se mais eficiente, seja com um canal de retorno disponível ou não. Ainda, a transmissão SH pode superar as técnicas cooperativas para valores mais elevados de eficiência energética e também de probabilidades de *outage* alvo.

Assim, as principais contribuições desta análise foram mostrar que:

- quando o nó *relay* está mais próximo da fonte, os esquemas AF e RC apresentam desempenhos com relação à eficiência energética bastante próximos, enquanto o desempenho do modelo PC é significativamente superior;

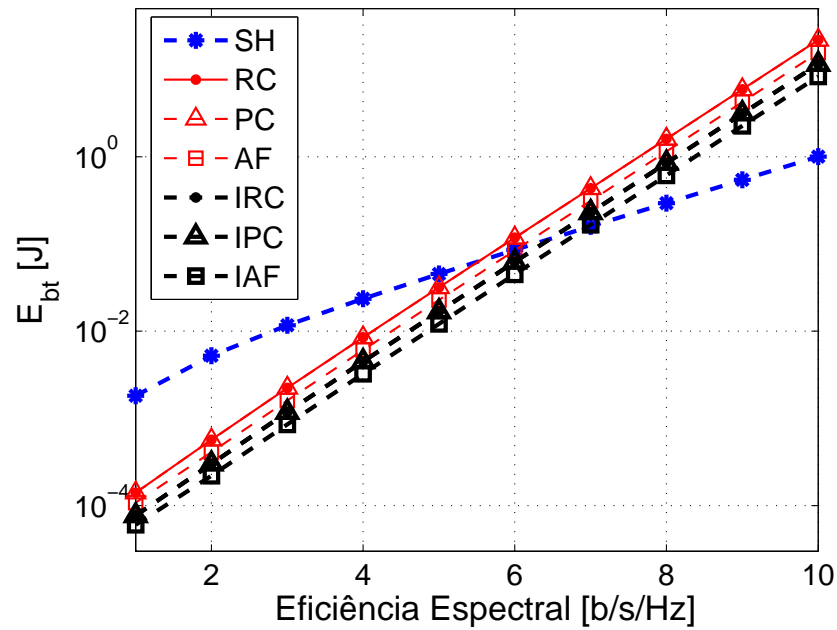


Figura 8: Consumo total de energia por *bit* para $\mathcal{O}^* = 10^{-3}$, $d_{SD} = 50$ m e $d_r = 0,8$.

Fonte: Autoria própria

- para o mesmo cenário, com o *relay* mais próximo da fonte e quando o sistema opera a taxas de transmissão mais altas, PC mesmo com indisponibilidade de um canal de retorno é capaz de superar os esquemas AF e RC com canal de retorno disponível;
- em um cenário oposto, quando o *relay* está mais próximo do destino, o desempenho dos protocolos DF são prejudicados devido à degradação da qualidade do enlace $S - R$ e o esquema AF apresenta os melhores desempenhos, considerando que um canal de retorno possa estar disponível ou não.

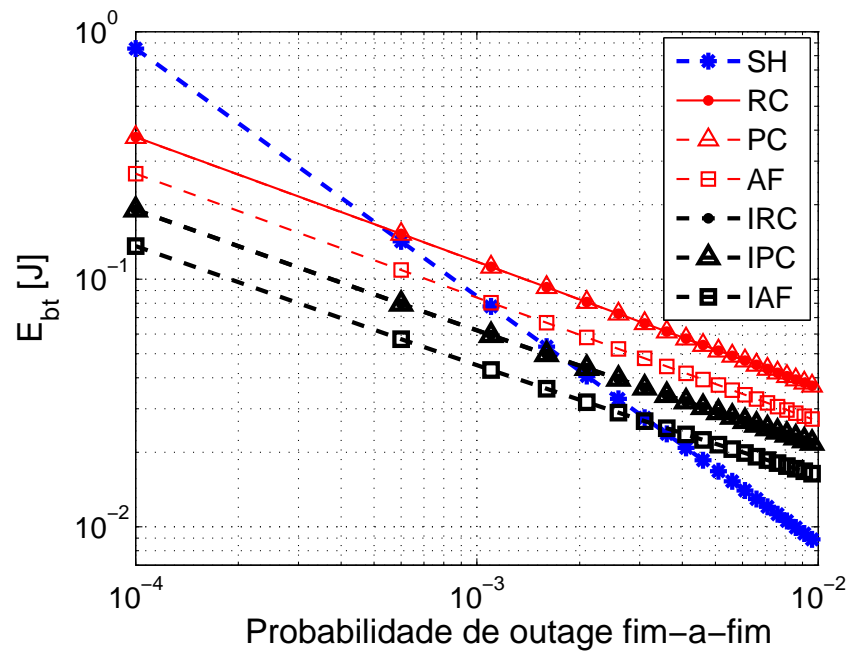


Figura 9: Consumo total de energia por *bit* para $\Delta = 6$ b/s/Hz, $d_{SD} = 50$ m e $d_r = 0,8$.

Fonte: Autoria própria

4 ANÁLISE DE CONTORNOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA AF E DF

Considera-se também neste capítulo um cenário WSN, com canal de desvanecimento Rayleigh, composto por três nós: fonte (S), *relay* (R) e destino (D), que possuem uma única antena. Porém, diferentemente da análise do Capítulo 3, dois nós (U_1 e U_2) cooperam na transmissão, podendo agir tanto como fonte quanto como *relay*. Assim, quando o nó U_1 está transmitindo ($U_1 = S$), U_2 age como um nó *relay* ($U_2 = R$) e a taxa de transmissão é R_1 . É considerado que ambos nós transmitem com a mesma potência P_1 , que a distância entre o nó fonte U_1 e o *relay* U_2 é $d_{SR} = d_0$, a distância entre U_1 e D é $d_{SD} = d_1$, e a distância entre U_2 e D é $d_{RD} = d_2$. Esta configuração é definida como “Cenário 1”. No denominado “Cenário 2”, U_2 transmite seus dados, agindo portanto como fonte, com o nó U_1 funcionando como *relay*, podendo cooperar na transmissão. É assumido que ambos os nós transmitem com a mesma potência p_2 , com taxa de transmissão R_2 . Assim, $U_2 = S$, $U_1 = R$, com as distâncias entre os nós definidas como $d_{SR} = d_0$, $d_{SD} = d_2$ e $d_{RD} = d_1$. As Figuras 10 e 11 ilustram ambos cenários.

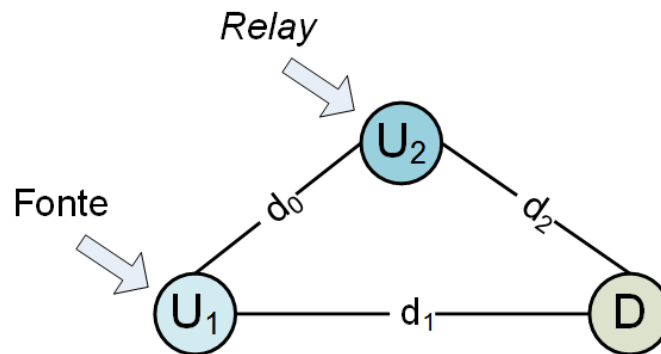


Figura 10: Cenário cooperativo com o nó U_1 como fonte e transmitindo para D com U_2 como *relay*.

Fonte: Autoria própria

A eficiência energética para um “Cenário k ” é definido como

$$EE_k = \frac{R_k}{\text{Pot}_k}, \quad (28)$$

para $k = 1, 2$, onde $R_k = \Delta \cdot B$ corresponde à taxa de transmissão em bps e $\text{Pot}_k = P_{PA} + P_{TX} + P_{RX}$

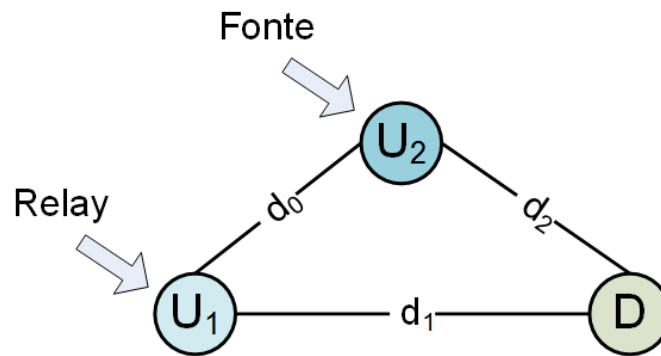


Figura 11: Cenário cooperativo com o nó U_2 como fonte e transmitindo para D com U_1 como relay.

Fonte: Autoria própria

representa o consumo total de potência na comunicação.

Além disso, pode-se definir a média da eficiência energética levando em consideração ambos cenários como

$$EE_{av} = \frac{EE_1 + EE_2}{2}. \quad (29)$$

4.1 ESQUEMAS DE TRANSMISSÃO

São avaliados os desempenhos dos esquemas cooperativos AF e DF (com PC e RC), considerando a disponibilidade ou não de um canal de retorno, por meio da análise de contornos de eficiência energética, como introduzido em (AKBARI et al., 2011). Considera-se ainda que as transmissões são realizadas com restrição de uma probabilidade de *outage* alvo no sistema. Dado que neste capítulo o desempenho dos modelos cooperativos não são comparados com o esquema SH de transmissão, não há necessidade de operar com o dobro da eficiência espectral para obter a mesma vazão fim-a-fim do SH, portanto emprega-se β e Δ em oposição a β' e 2Δ utilizados no Capítulo 3. Os resultados analisados neste capítulo foram apresentados em (KAKITANI et al., 2012).

4.1.1 AMPLIFICA E ENCAMINHA

Para uma dada probabilidade de *outage* alvo \mathcal{O}^* , a potência de transmissão mínima $P_{k,AF}^*$ pode ser obtida de (25).

4.1.1.1 AF SEM CANAL DE RETORNO (AF)

Sem um canal de retorno disponível, o *relay* sempre coopera com a fonte, e a eficiência energética do “Cenário k ” é

$$EE_{AF,k} = \frac{R_k}{\text{Pot}_{k,AF}}, \quad (30)$$

onde $\text{Pot}_{k,AF} = (P_{PA,AF} + P_{TX} + 2P_{RX}) + (P_{PA,R} + P_{TX} + P_{RX})$ é a potência total consumida e $P_{PA,R}$ é a potência consumida pelo *relay*.

4.1.1.2 AF COM CANAL DE RETORNO (IAF)

Com um canal de retorno disponível, a eficiência energética passa a ser

$$EE_{k,IAF} = \frac{R_k}{\text{Pot}_{k,IAF}}, \quad (31)$$

onde $\text{Pot}_{k,IAF} = (P_{PA,AF} + P_{TX} + 2P_{RX}) + p_{SD} \cdot (P_{PA,R} + P_{TX} + P_{RX})$. Deve-se notar que $EE_{k,IAF} \geq EE_{k,AF}$, com a igualdade obtida apenas se $p_{SD} = 1$. Portanto, a menos que o enlace direto entre fonte e destino esteja permanentemente indisponível, o uso de um canal de retorno mostra-se vantajoso para melhoria da eficiência energética do sistema.

4.1.2 DF COM REPETITION CODING

A potência de transmissão mínima do esquema RC $P_{k,RC}^*$ para uma probabilidade de *outage* alvo \mathcal{O}^* , é definida em (17).

4.1.2.1 RC SEM CANAL DE RETORNO (RC)

A eficiência energética de um “Cenário k ” neste esquema é

$$EE_{k,RC} = \frac{R_k}{\text{Pot}_{k,RC}}, \quad (32)$$

onde $\text{Pot}_{k,RC} = (P_{PA,RC} + P_{TX} + 2P_{RX}) + (1 - p_{SR}) \cdot (P_{PA,RC} + P_{TX} + P_{RX})$.

4.1.2.2 RC COM CANAL DE RETORNO (IRC)

Pode-se definir a eficiência energética quando um canal de retorno está disponível como

$$EE_{k,IRC} = \frac{R_k}{\text{Pot}_{k,IRC}}, \quad (33)$$

onde $\text{Pot}_{k,IRC} = (P_{PA,RC} + P_{TX} + 2P_{RX}) + p_{SD} \cdot (1 - p_{SR}) \cdot (P_{PA,RC} + P_{TX} + P_{RX})$.

4.1.3 DF COM PARALLEL CODING

Para o esquema PC e considerando uma probabilidade de *outage* alvo \mathcal{O}^* , a potência de transmissão mínima $P_{k,PC}^*$, pode ser definida a partir de (21).

4.1.3.1 PC SEM CANAL DE RETORNO (PC)

Quando um canal de retorno não está disponível a eficiência energética é dada por

$$EE_{k,PC} = \frac{R_k}{\text{Pot}_{k,PC}}, \quad (34)$$

onde $\text{Pot}_{k,PC} = (P_{PA,PC} + P_{TX} + 2P_{RX}) + (1 - p_{SR}) \cdot (P_{PA,PC} + P_{TX} + P_{RX})$.

4.1.3.2 PC COM CANAL DE RETORNO (IPC)

A eficiência energética para o esquema IPC é

$$EE_{k,IPC} = \frac{R_k}{\text{Pot}_{k,IPC}}, \quad (35)$$

onde $\text{Pot}_{k,IPC} = (P_{PA,PC} + P_{TX} + 2P_{RX}) + p_{SD} \cdot (1 - p_{SR}) \cdot (P_{PA,PC} + P_{TX} + P_{RX})$.

4.2 ANÁLISE DE RESULTADOS

É analisada nesta seção a eficiência energética dos esquemas cooperativos AF e DF para dois usuários por meio de contornos de eficiência energética. Os parâmetros do sistema seguem os valores das Tabelas 2 e 3. Considera-se uma probabilidade de *outage* alvo $\mathcal{O}^* = 10^{-3}$ nas transmissões, canal de desvanecimento Rayleigh, e que ambos usuários empregam o mesmo protocolo cooperativo.

A Tabela 4 mostra a máxima eficiência energética média EE_{av} e as respectivas taxas R_1 e R_2 pra diferentes topologias e para cada um dos esquemas de transmissão. As quatro diferentes topologias consideradas estão ilustradas nas Figuras 12, 13, 14 e 15.

No **Caso A**, em que conforme ilustrado na Figura 12, os nós estão posicionados de forma equidistante ($d_0 = d_1 = d_2 = 25$ m), pode-se observar que os esquemas DF apresentam a melhor eficiência energética. Os contornos de eficiência energética para os esquemas AF, RC e PC são ilustrados nas Figuras 16, 17 e 18. Os contornos de eficiência energética permitem

Tabela 4: Eficiência Energética Máxima.

		d_0 (m)	d_1 (m)	d_2 (m)	EE_{av} (bits/J)	R_1 (kbps)	R_2 (kbps)
Caso A	AF	25	25	25	$1,87 \times 10^4$	16,2	16,2
	RC	25	25	25	$4,78 \times 10^4$	31,9	31,9
	PC	25	25	25	$4,78 \times 10^4$	31,9	31,9
	IAF	25	25	25	$3,25 \times 10^4$	17,2	17,2
	IRC	25	25	25	$6,22 \times 10^4$	32,7	32,7
	IPC	25	25	25	$6,22 \times 10^4$	32,7	32,7
Caso B	AF	10	50	40	$9,40 \times 10^3$	8,8	8,8
	RC	10	50	40	$9,45 \times 10^3$	8,8	8,8
	PC	10	50	40	$9,88 \times 10^3$	9,6	9,6
	IAF	10	50	40	$1,62 \times 10^4$	9,4	9,4
	IRC	10	50	40	$1,63 \times 10^4$	9,4	9,5
	IPC	10	50	40	$1,70 \times 10^4$	10,2	10,3
Caso C	AF	40	50	10	$1,62 \times 10^4$	8,8	19,3
	RC	40	50	10	$1,70 \times 10^4$	7,7	19,4
	PC	40	50	10	$1,71 \times 10^4$	7,7	20,0
	IAF	40	50	10	$2,83 \times 10^4$	9,4	20,5
	IRC	40	50	10	$2,72 \times 10^4$	8,2	20,3
	IPC	40	50	10	$2,73 \times 10^4$	8,2	20,9
Caso D	AF	25	50	25	$1,23 \times 10^4$	10,6	11,8
	RC	25	50	25	$1,18 \times 10^4$	9,8	11,8
	PC	25	50	25	$1,22 \times 10^4$	10,1	12,7
	IAF	25	50	25	$2,10 \times 10^4$	11,2	12,6
	IRC	25	50	25	$2,04 \times 10^4$	10,4	12,6
	IPC	25	50	25	$2,10 \times 10^4$	10,7	13,7

identificar a relação entre as taxas de transmissão adotadas por cada usuário com a respectiva eficiência obtida. Assim, pode-se identificar as regiões avermelhadas como de maior eficiência energética e então verificar os pares de taxas empregados para estes casos. Nota-se que ambos esquemas DF obtêm a eficiência energética máxima com taxas R_1 e R_2 maiores que as obtidas na transmissão AF. Como as taxas alcançadas são mais altas (próximo do dobro do AF) e o consumo de potência é basicamente o mesmo, os esquemas DF obtêm eficiências energéticas consideravelmente maiores ($4,87 \times 10^4$ bits/J enquanto o AF obtém apenas $1,87 \times 10^4$ bits/J). Além disso, é possível observar os ganhos em termos de eficiência energética quando um canal de retorno está disponível (IAF, IRC e IPC) para todos os esquemas de transmissão considerados nesta análise. Para os casos dos esquemas PC e RC, os ganhos de eficiência energética com o emprego de um canal de retorno são por volta de 30%, enquanto para o AF a melhora na eficiência energética ultrapassa 70%.

Para o **Caso B**, conforme ilustrado na Figura 13, o *relay* é posicionado próximo do nó

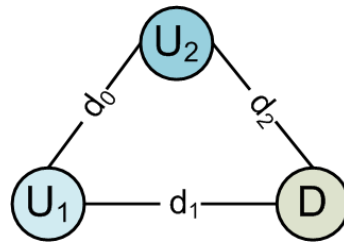


Figura 12: Caso A.

Fonte: Autoria própria

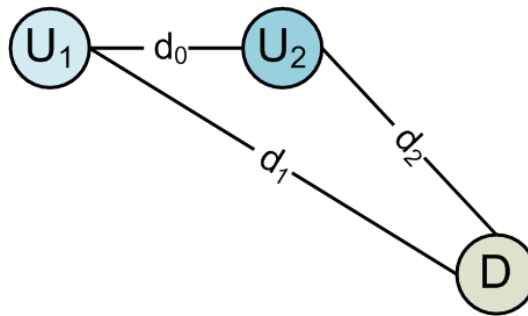


Figura 13: Caso B.

Fonte: Autoria própria

fonte (menor valor de d_0), e como consequência, o enlace $S - R$ apresenta as melhores condições de transmissão com relação aos demais enlaces, de forma que o esquema PC é o mais eficiente. No **Caso C**, o enlace $S - R$ apresenta condições piores, com uma maior distância d_0 , conforme ilustrado na Figura 14. Para este cenário, o esquema PC é o mais eficiente quando um canal de retorno não está disponível, enquanto o IAF apresenta o melhor desempenho quando um canal de retorno pode ser empregado. O **Caso D**, ilustrado na Figura 15 apresenta uma topologia linear com $d_0 = d_2$ e $d_1 = d_0 + d_2$, com o esquema AF apresentando desempenho ligeiramente superior ao RC e PC, enquanto IAF e IPC superam o IRC em termos de eficiência energética.

Deve-se notar que como a topologia do **Caso A** é simétrica, a igualdade das taxas de transmissão é sempre obtida. Porém, para os **Casos B, C e D**, a equidade de taxas não é obtida para todos os esquemas considerando seus respectivos pontos de operação de máxima eficiência energética. Além disso, é importante destacar que a máxima eficiência energética não necessariamente implica em taxas de transmissão máximas. Por exemplo, no **Caso D** a eficiência energética máxima do esquema AF é maior que a eficiência energética máxima do PC. Entretanto, neste caso enquanto a taxa R_2 é maior para o PC do que para o AF, R_1 é maior para o AF do que para o PC, sugerindo então que uma eficiência energética que supera as demais apresentadas pode ser obtida com o emprego de diferentes esquemas de transmissão para cada

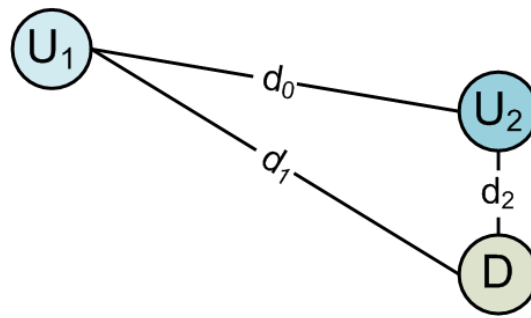


Figura 14: Caso C.

Fonte: Autoria própria

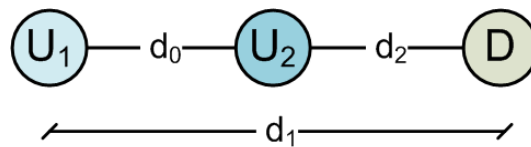


Figura 15: Caso D.

Fonte: Autoria própria

usuário.

Os resultados da Tabela 4 consideram os pontos de operação de eficiência energética máxima para cada protocolo cooperativo. É importante destacar que diferentes taxas de transmissão são empregadas pelos diferentes usuários. A Tabela 5 indica os valores de eficiência energética máximos quando a igualdade de taxa de transmissão é imposta aos usuários. Note que ao comparar os resultados com os obtidos na Tabela 4, apenas para os **Casos C e D** diferentes conclusões são obtidas. No **Caso C**, RC e PC apresentam a mesma eficiência energética máxima quando a igualdade de taxas de transmissão é imposta, enquanto no **Caso D**, AF supera os esquemas PC e RC no cenário em que um canal de retorno está disponível e também quando este está indisponível. Deve-se observar entretanto que a vantagem do AF com relação ao PC é obtida com uma menor taxa dos usuários.

Se os resultados obtidos com e sem a imposição de igualdade de taxas de transmissão forem comparados considerando o **Caso C**, com uma topologia bastante assimétrica, em que um dos usuários está consideravelmente mais próximo do nó destino do que o outro, é possível notar que a imposição de igualdade de taxas não afeta de forma significativa a eficiência energética, visto que ambos usuários operam a taxas superiores. Para o cenário em que PC é empregado e sem imposição de igualdade de taxas (Tabela 4), tem-se $EE_{av} = 1,71 \times 10^4$ bits/J, $R_1 = 7,7$ kbps e $R_2 = 20,0$ kbps. Considerando igualdade de taxas de transmissão (Tabela 5), obtem-se

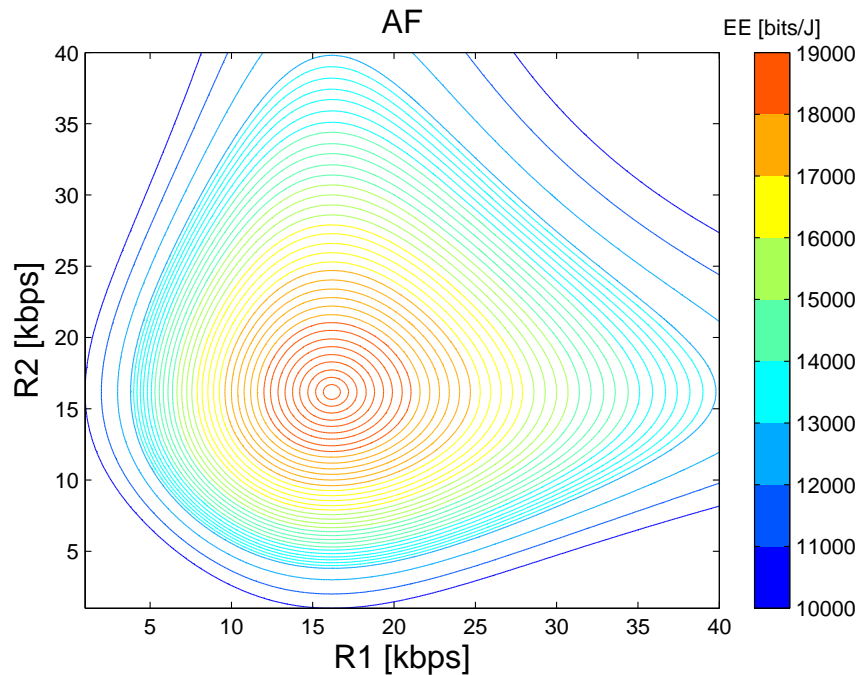


Figura 16: Contornos de eficiência energética para AF considerando o Caso A.

Fonte: Autoria própria

$EE_{av} = 1,53 \times 10^4$ bits/J e $R_1 = R_2 = 17,0$ kbps. Assim, a taxa de transmissão do usuário U_1 teve aumento de 88,9%, com uma redução na eficiência energética de apenas 11% e redução na taxa do usuário U_2 de 15%. Portanto, embora a imposição de igualdade de taxas de transmissão não seja uma estratégia otimizada para topologias assimétricas, esta estratégia ainda mostra-se relativamente eficiente.

4.3 CONTRIBUIÇÕES E CONCLUSÕES

O desempenho dos protocolos cooperativos AF e DF é investigado neste capítulo com o emprego de contornos de eficiência energética. É demonstrado que a eficiência energética máxima é geralmente obtida quando diferentes taxas de transmissão são alocadas para cada usuário, salvo se a topologia da rede seja simétrica. Os resultados alcançados indicam ainda que a imposição de igualdade de taxas de transmissão é uma estratégia sub-ótima em termos de eficiência energética. Além disso, pode-se observar nos cenários analisados que o protocolo cooperativo mais eficiente depende da topologia da rede, mais especificamente da posição relativa dos dois usuários. Ainda, é mostrado que o canal de retorno é sempre benéfico em relação à maximização da eficiência energética.

Assim, podem ser destacadas como principais contribuições desta análise:

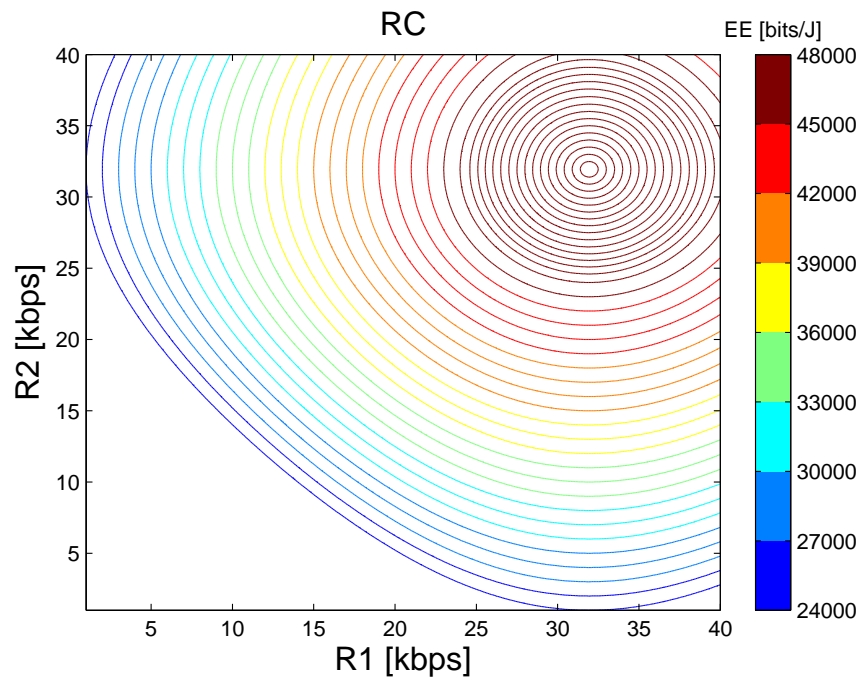


Figura 17: Contornos de eficiência energética para RC considerando o Caso A.

Fonte: Autoria própria

Tabela 5: Eficiência energética máxima com igualdade de taxas de transmissão.

		d_0 (m)	d_1 (m)	d_2 (m)	EE_{av} (bits/J)	R_1 (kbps)	R_2 (kbps)
Caso B	AF	10	50	40	$9,40 \times 10^3$	8,8	8,8
	RC	10	50	40	$9,45 \times 10^3$	8,8	8,8
	PC	10	50	40	$9,88 \times 10^3$	9,6	9,6
	IAF	10	50	40	$1,62 \times 10^4$	9,4	9,4
	IRC	10	50	40	$1,63 \times 10^4$	9,5	9,5
	IPC	10	50	40	$1,70 \times 10^4$	10,3	10,3
Caso C	AF	40	50	10	$1,46 \times 10^4$	16,1	16,1
	RC	40	50	10	$1,53 \times 10^4$	17,0	17,0
	PC	40	50	10	$1,53 \times 10^4$	17,0	17,0
	IAF	40	50	10	$2,56 \times 10^4$	17,2	17,2
	IRC	40	50	10	$2,42 \times 10^4$	17,5	17,5
	IPC	40	50	10	$2,42 \times 10^4$	17,5	17,5
Caso D	AF	25	50	25	$1,23 \times 10^4$	11,2	11,2
	RC	25	50	25	$1,18 \times 10^4$	10,8	10,8
	PC	25	50	25	$1,21 \times 10^4$	11,4	11,4
	IAF	25	50	25	$2,10 \times 10^4$	11,2	11,2
	IRC	25	50	25	$2,02 \times 10^4$	11,6	11,6
	IPC	25	50	25	$2,08 \times 10^4$	12,2	12,2

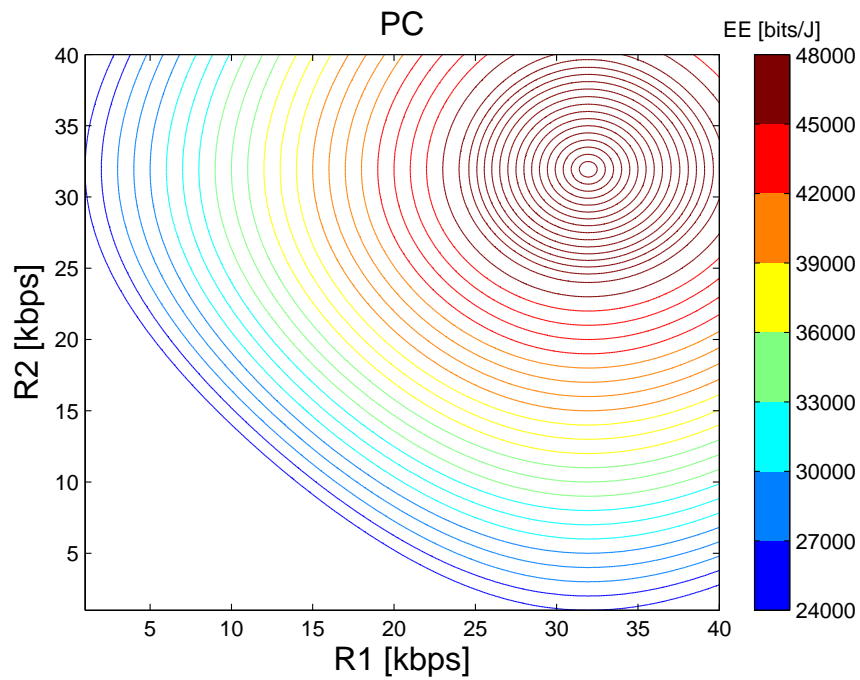


Figura 18: Contornos de eficiência energética para PC considerando o Caso A.

Fonte: Autoria própria

- para os cenários considerados, a menos que a topologia da rede seja simétrica, a eficiência energética máxima é obtida quando diferentes taxas de transmissão são empregadas pelos usuários;
- consequentemente, a imposição de igualdade de taxas de transmissão para os usuários U_1 e U_2 mostra-se uma solução sub-ótima;
- dependendo da topologia da rede analisada, o esquema cooperativo mais eficiente pode ser o AF ou o DF, enquanto o emprego de um canal de retorno apresenta-se sempre favorável em termos de eficiência energética.

5 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA SISTEMAS DE MÚLTIPLAS ANTENAS

Diferentemente das análises realizadas nos Capítulos 3 e 4, em que WSNs com transmissões de curto alcance são avaliadas, considera-se nesta análise redes sem fio de longo alcance, assumindo um modelo de consumo de potência apropriado (AUER et al., 2011). É realizada a análise do *downlink*, ou seja o enlace de uma transmissão de uma ERB para um usuário considerando canal de desvanecimento Rayleigh. É comparada neste capítulo a eficiência energética de esquemas SISO e MIMO para uma probabilidade de *outage* alvo. Considera-se que tanto a ERB quanto o usuário podem estar equipados com múltiplas antenas. Os resultados analisados foram apresentados em (KAKITANI et al., 2013).

5.1 ESQUEMAS DE TRANSMISSÃO

Para fins desta análise, o número de antenas na ERB e no usuário são limitados em $M_t \in \{1,2\}$ e $M_r \in \{1,2\}$. Assim, os esquemas de transmissão considerados são compostos por: uma antena transmissora e uma antena receptora (SISO); duas antenas transmissoras utilizando o esquema de Alamouti com uma antena receptora (Alamouti 2x1); duas antenas transmissoras aplicando TAS e uma antena receptora (TAS 2x1); uma antena transmissora e duas antenas receptoras empregando MRC (MRC 1x2); duas antenas transmissoras com o esquema de Alamouti e duas antenas receptoras utilizando MRC (Alamouti+MRC 2x2); duas antenas transmissoras aplicando TAS e duas antenas receptoras com MRC (TAS+MRC 2x2); duas antenas transmissoras com uso de TBF e duas antenas receptoras com MRC (TBF+MRC 2x2); e por fim, duas antenas transmissoras e duas antenas receptoras empregando o esquema V-BLAST (V-BLAST 2x2).

A análise de eficiência energética é realizada com base no consumo de energia por *bit* para uma probabilidade de *outage* alvo, definido em (7). Deve-se notar, com base em (7), que como P_0 e Δ_p são fixos, e R_b geralmente também é um parâmetro fixo de projeto, para minimizar o consumo total de energia por *bit* deve-se minimizar a potência de transmissão requerida para cada um dos esquemas analisados. A seguir são definidas as potências de transmissão mínimas

requeridas para os esquemas de transmissão considerados.

5.1.1 SISO

Para o esquema SISO, com $N_{TRX} = 1$ (ou seja, apenas uma cadeia de circuitos de RF é necessária na ERB), a probabilidade de *outage* é definida por (12).

Portanto, para uma probabilidade de *outage* alvo \mathcal{O}^* , potência mínima de transmissão requerida $P_t = P_{SISO}^*$ é

$$P_{SISO}^* = \frac{-N\beta}{\gamma \ln(1 - \mathcal{O}^*)}, \quad (36)$$

onde γ é a perda de percurso entre a ERB e o usuário.

Assim, o consumo total de energia por *bit* mínimo é definido a partir de (7) como

$$E_{bt,SISO} = \frac{P_0 + \Delta_p \cdot P_{SISO}^*}{R_b}. \quad (37)$$

5.1.2 ALAMOUTI 2×1

Para um sistema empregando a estratégia de codificação espaço-temporal de Alamouti ($N_{TRX} = 2$) com apenas uma antena receptora, a probabilidade de *outage* pode ser escrita como (LEE et al., 2008)

$$\mathcal{O}_{Ala(2 \times 1)} = 1 - \left(1 + \frac{2\beta}{\rho}\right) e^{-\frac{2\beta}{\rho}}. \quad (38)$$

A potência de transmissão mínima $P_t = P_{Ala(2 \times 1)}^*$ para uma probabilidade de *outage* alvo \mathcal{O}^* é então

$$P_{Ala(2 \times 1)}^* = \frac{-2\beta N}{[\mathcal{W}((\mathcal{O}^* - 1)e^{-1}) + 1] \gamma}, \quad (39)$$

onde $\mathcal{W}(\cdot)$ é a Função W de Lambert, definida como a função inversa de $f(w) = we^w$.

O consumo total de energia por *bit* é

$$E_{bt,Ala(2 \times 1)} = \frac{2 \cdot P_0 + \Delta_p \cdot P_{Ala(2 \times 1)}^*}{R_b}. \quad (40)$$

5.1.3 TAS 2×1

Dado que no esquema TAS 2×1 , apenas uma das duas antenas da ERB é selecionada durante cada transmissão, apenas uma cadeia de circuitos de RF é necessária ($N_{TRX} = 1$). A

probabilidade de *outage* neste caso é (CHEN et al., 2005)

$$\mathcal{O}_{TAS(2 \times 1)} = \left(1 - e^{-\frac{\beta}{\rho}}\right)^2. \quad (41)$$

Para uma probabilidade de outage alvo \mathcal{O}^* , a potência de transmissão mínima requerida é

$$P_{TAS(2 \times 1)}^* = \frac{-\beta N}{\ln\left(1 - \sqrt{\mathcal{O}^*}\right) \gamma}. \quad (42)$$

Com isso, o consumo total de energia por *bit* é

$$E_{bt,TAS(2 \times 1)} = \frac{P_0 + \Delta_p \cdot P_{TAS(2 \times 1)}^*}{R_b}. \quad (43)$$

5.1.4 MRC 1×2

No esquema MRC 1x2 há diversidade espacial apenas no receptor, visto que a ERB é equipada apenas com uma antena e o usuário possui duas antenas, portanto $N_{TRX} = 1$. A probabilidade de *outage* é dada por (SIMON; ALOUINI, 2004)

$$\mathcal{O}_{MRC(1 \times 2)} = 1 - \left(1 + \frac{\beta}{\rho}\right) e^{-\frac{\beta}{\rho}}. \quad (44)$$

A potência de transmissão mínima requerida é

$$P_{MRC(1 \times 2)}^* = \frac{-\beta N}{[\gamma \mathcal{W}((\mathcal{O}^* - 1)e^{-1}) + 1] \gamma}. \quad (45)$$

O consumo total de energia para este esquema pode ser definido como

$$E_{bt,MRC(1 \times 2)} = \frac{P_0 + \Delta_p \cdot P_{MRC(1 \times 2)}^*}{R_b}. \quad (46)$$

5.1.5 ALAMOUTI+MRC 2×2

Para cenários em que tanto a ERB quanto o usuário estão equipadas com duas antenas, é possível considerar a combinação de técnicas de diversidade espacial na transmissão e na recepção. No Alamouti+MRC 2x2, o esquema de Alamouti é empregado na ERB e o MRC é utilizado no usuário. A probabilidade de *outage* neste cenário é (LEE et al., 2008)

$$\mathcal{O}_{Ala(2 \times 2)} = \frac{\Gamma\left(4, \frac{2\beta}{\rho}\right)}{\Gamma(4)} = 1 - \left[1 + 2\left(\frac{\beta}{\rho}\right) + 2\left(\frac{\beta}{\rho}\right)^2 + \frac{4}{3}\left(\frac{\beta}{\rho}\right)^3\right] e^{-\left(\frac{2\beta}{\rho}\right)}. \quad (47)$$

A potência de transmissão mínima é

$$P_{Ala(2 \times 2)}^* = \frac{-2\beta N}{\psi \gamma}, \quad (48)$$

onde ψ é a raiz de $-3e^Z Z^2 + 6e^Z Z + e^Z Z^3 - 6e^Z - 6\mathcal{O}^* + 6 = 0$ que minimiza (48).

O consumo total de energia por *bit* mínimo para o Alamouti+MRC 2x2 é

$$E_{bt,Ala(2 \times 2)} = \frac{2 \cdot P_0 + \Delta_p \cdot P_{Ala(2 \times 2)}^*}{R_b}. \quad (49)$$

5.1.6 TAS+MRC 2×2

Com o TAS empregado no transmissor ($N_{TRX} = 1$) e MRC no receptor, a probabilidade de *outage* é definida como (CHEN et al., 2005)

$$\mathcal{O}_{TAS(2 \times 2)} = 1 - 2e^{-\frac{\beta}{\rho}} \left(\frac{\beta}{\rho} + 1 \right) + e^{-2\frac{\beta}{\rho}} \left(\frac{\beta}{\rho} + 1 \right)^2, \quad (50)$$

enquanto a potência mínima de transmissão requerida para \mathcal{O}^* é

$$P_{TAS(2 \times 2)}^* = \frac{-\beta N}{\left[\mathcal{W} \left(- \left(1 - \sqrt{\mathcal{O}^*} \right) e^{-1} \right) + 1 \right] \gamma}. \quad (51)$$

O consumo total de energia por *bit* é dado por

$$E_{bt,TAS(2 \times 2)} = \frac{P_0 + \Delta_p \cdot P_{TAS(2 \times 2)}^*}{R_b}. \quad (52)$$

5.1.7 TBF+MRC 2×2

Com o esquema TBF+MRC 2x2, tem-se a combinação do uso de TBF na ERB, e MRC no usuário, com $N_{TRX} = 2$. A probabilidade de *outage* aproximada por (GRANT, 2005)

$$\mathcal{O}_{TBF(2 \times 2)} \simeq 1 - e^{-\frac{\beta}{\rho}} \left(2 + \frac{\beta^2}{\rho^2} \right) + e^{-2\frac{\beta}{\rho}} \quad (53)$$

A potência de transmissão mínima requerida é determinada por

$$P_{TBF(2 \times 2)}^* = \frac{-\beta N}{\Psi \gamma}, \quad (54)$$

onde Ψ representa a raiz de $2e^Z - e^{2Z} + \mathcal{O}^* - 1 + e^Z Z^2 = 0$ que minimiza (54).

Assim, o mínimo consumo total de energia por *bit* é

$$E_{bt,TBF(2 \times 2)} = \frac{2 \cdot P_0 + \Delta_p \cdot P_{TBF(2 \times 2)}^*}{R_b}. \quad (55)$$

5.1.8 V-BLAST 2x2

É importante ressaltar que em um sistema que emprega o esquema V-BLAST 2x2, o fluxo de informações a ser enviado é dividido em dois sub-fluxos transmitidos em paralelo pelas duas antenas da ERB ($N_{TRX} = 2$). A informação recebida é decodificada em duas etapas de detecção (LOYKA; GAGNON, 2004). Assim sendo, para obter a mesma vazão de transmissão fim-a-fim dos métodos anteriormente expostos, é considerada nesta análise que cada antena transmissora do esquema V-BLAST 2x2 opera com metade da taxa dos outros esquemas. Com isso, a probabilidade de *outage* na primeira etapa de detecção é (LOYKA; GAGNON, 2004)

$$\mathcal{O}_{VBLAST,F1} = 1 - 2e^{-\frac{\beta''}{\rho}} + \left(1 + \frac{\beta''}{2\rho}\right) e^{-2\frac{\beta''}{\rho}}, \quad (56)$$

onde $\beta'' = 2^{\frac{\Delta}{2}} - 1$. A probabilidade de *outage* na segunda etapa de detecção é (LOYKA; GAGNON, 2004)

$$\mathcal{O}_{VBLAST,F2} = \mathcal{O}_H (2 - \mathcal{O}_H), \quad (57)$$

onde $\mathcal{O}_H = 1 - e^{-\frac{\beta''}{\rho}} \left(1 + \frac{\beta''}{\rho}\right)$. Assim, a probabilidade de *outage* total é

$$\mathcal{O}_{VBLAST} = \mathcal{O}_{VBLAST,F1} + \mathcal{O}_{VBLAST,F2} (1 - \mathcal{O}_{VBLAST,F1}). \quad (58)$$

Para valores relativamente altos de SNR ou suficientemente pequenos de probabilidade de *outage*, temos que $\mathcal{O}_{VBLAST} \simeq \mathcal{O}_{VBLAST,F1}$, e a potência mínima de transmissão para uma probabilidade de *outage* alvo \mathcal{O}^* pode ser aproximada como

$$P_{VBLAST}^* \simeq \frac{e^{2\Phi} \beta'' N}{2\gamma(2e^\Phi - e^{2\Phi} + \mathcal{O}^* - 1)}, \quad (59)$$

onde Φ é a raiz de $Ze^{2Z} + 4e^Z - 2e^{2Z} + 2\mathcal{O}^* - 2 = 0$ que minimiza (59). É importante destacar que para as probabilidades de *outage* consideradas nesta análise, a aproximação $\mathcal{O}_{VBLAST} \simeq \mathcal{O}_{VBLAST,F1}$ apresentou valores bastante próximos. O consumo total de energia para o V-BLAST 2x2 é dado por

$$E_{bt,VBLAST} = \frac{2 \cdot P_0 + \Delta_p \cdot P_{VBLAST}^*}{R_b}. \quad (60)$$

Tabela 6: Parâmetros do modelo de consumo de potência

Tipo de ERB	P_0 [W]	Δ_p
Macro célula (RRH)	84,0	2,8
Micro célula	56,0	2,6
Pico célula	6,8	4,0
Femto célula	4,8	8,0

5.2 ANÁLISE DE RESULTADOS

O desempenho dos esquemas de transmissão apresentados são analisados nesta seção. Os parâmetros do sistema utilizados são: $L = 0$ dB, $N_f = 0$ dB, $G = 0$ dBi, $N_0 = -174$ dBm/Hz, $B = 10$ MHz, e $\alpha = 3$. Os parâmetros para o modelo de consumo de potência de uma macro célula seguem os valores apresentados em (AUER et al., 2011), com $P_0 = 84$ e $\Delta_p = 2,8$. Visando maior eficiência, é considerado que a ERB da macro célula emprega RRH (do inglês *Remote Radio Head*), e conseqüentemente o módulo amplificador de potência é montado na mesma localização física da antena transmissora correspondente. A Tabela 6 indica os parâmetros do modelo de consumo de potência para ERBs com diferentes coberturas (AUER et al., 2011).

A Figura 19 ilustra a variação da probabilidade de *outage* em função da SNR para os esquemas de transmissão considerados com $\Delta = 3$ b/s/Hz. Em termos gerais, o esquema SISO apresenta o pior desempenho, enquanto o TBF+MRC 2x2 requer as menores SNRs para a maioria dos valores de probabilidade de *outage*. Pode-se observar por estes extremos a diferença na ordem de diversidade alcançada por cada esquema. No entanto, como será mostrado a seguir, o melhor esquema em termos de probabilidade de *outage* não é necessariamente o que apresenta a melhor eficiência energética.

A Figura 20 apresenta o consumo de energia por *bit* em função das distâncias entre ERB e usuário para uma probabilidade de *outage* alvo de $\mathcal{O}^* = 10^{-2}$ e $\Delta = 3$ b/s/Hz, considerando uma macro célula RRH. Nota-se que o esquema SISO apresenta a menor eficiência energética para a maioria das distâncias consideradas. Entretanto, para curtas distâncias o consumo dos circuitos de transmissão torna-se um fator relevante na análise da eficiência energética, e o esquema SISO supera o desempenho dos esquemas Alamouti 2x1, Alamouti+MRC 2x2, TBF+MRC 2x2, e V-BLAST 2x2 para $d < 455$ m. Por outro lado, a combinação das técnicas TAS com MRC empregando duas antenas de transmissão e duas antenas de recepção (TAS+MRC 2x2) é o esquema com melhor eficiência energética para qualquer distância analisada, superando outros esquemas MIMO 2x2, como Alamouti+MRC 2x2, TBF+MRC 2x2, e V-BLAST 2x2. É também importante notar que o esquema TAS com

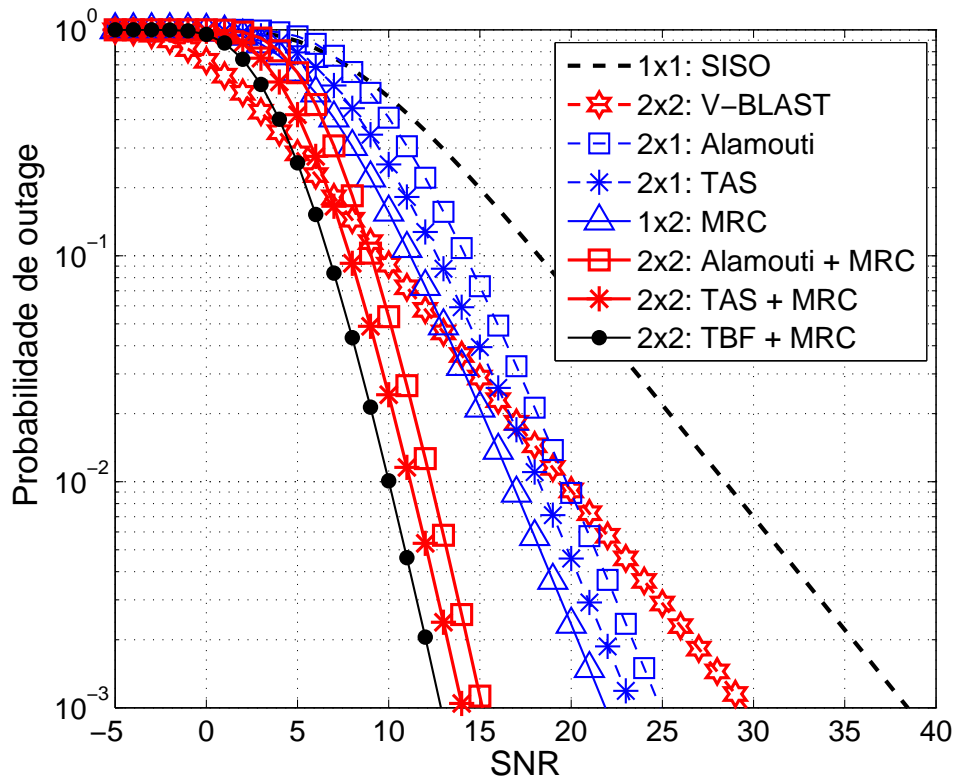


Figura 19: Probabilidade de *outage* em função da SNR para $\Delta = 3$ b/s/Hz.

Fonte: Autoria própria

o uso de apenas uma antena receptora (TAS 2x1) pode superar o desempenho de diversos esquemas MIMO 2x2. O esquema TBF+MRC 2x2 é superado pelo TAS 2x1 para $d < 1065$ m; o esquema Alamouti+MRC 2x2 é superado para $d < 1115$ m, e o esquema V-BLAST 2x2 tem seu desempenho superado pelo TAS 2x1 para qualquer distância. Portanto, neste cenário o esquema SISO apresenta-se como a pior opção para a maioria das distâncias consideradas e o TAS+MRC 2x2 possui a melhor eficiência energética, dado que ele toma vantagem da diversidade espacial tanto na transmissão quanto na recepção, com menor consumo dos circuitos de transmissão quando comparado com os outros esquemas MIMO 2x2. É interessante observar ainda que embora os esquemas Alamouti+MRC 2x2 e TBF+MRC 2x2 estão entre os melhores esquemas em termos de probabilidade de *outage* (Figura 19), quando a análise da eficiência energética é realizada, estes esquemas são superados por outros que apresentam pior desempenho de *outage*.

Conclusões similares das obtidas na análise dos resultados da Figura 20 podem ser obtidas para outras eficiências espectrais Δ e a mesma probabilidade de *outage* $\mathcal{O}^* = 10^{-2}$, como mostrado na Figura 21. Deve-se notar que para uma distância fixa entre ERB e usuário de $d = 1000$ m, o esquema TAS+MRC 2x2 apresenta a melhor eficiência energética para a maioria

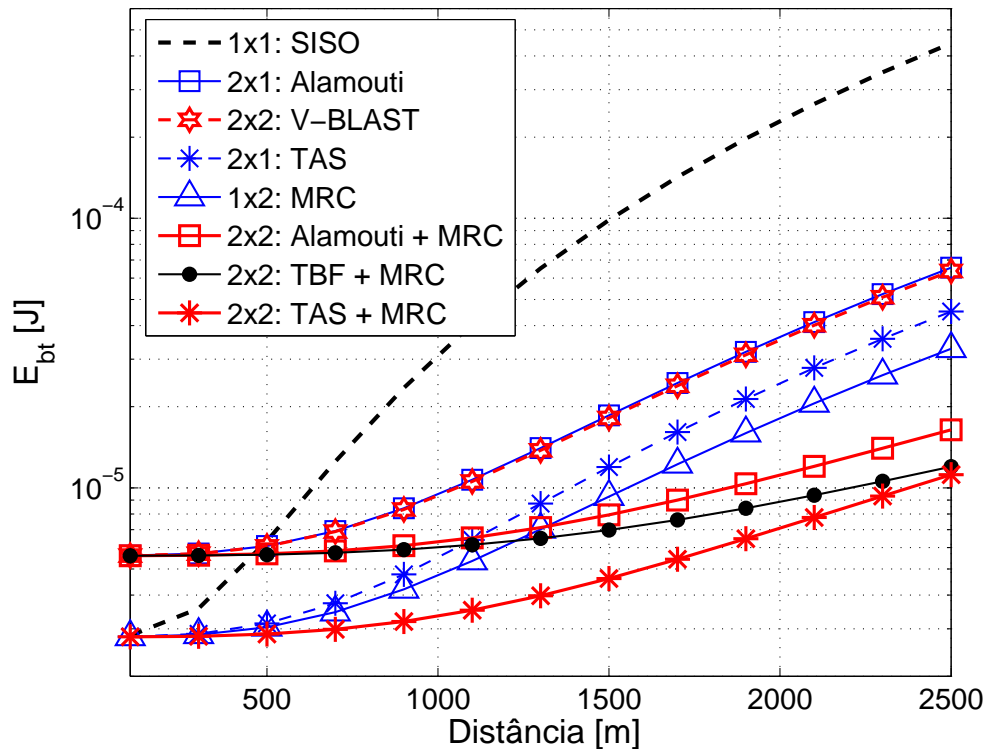


Figura 20: Consumo total de energia por *bit* para uma transmissão de macrocélula com $\mathcal{O}^* = 10^{-2}$ e $\Delta = 3$ b/s/Hz.

Fonte: Autoria própria

das eficiências espectrais analisadas, sendo superado apenas pelo esquema TBF+MRC 2x2 para $\Delta > 7$ b/s/Hz. Além disso, o esquema SISO ainda é o menos eficiente na análise de consumo para qualquer Δ , e o esquema TAS 2x1 tem seu desempenho superado pelos outros esquemas MIMO 2x2 com o aumento da eficiência espectral.

No caso de um requerimento de probabilidade de *outage* menos exigente, como $\mathcal{O}^* = 10^{-1}$, conforme ilustrado na Figura 22, o consumo dos circuitos de transmissão torna-se um fator de ainda mais relevância nas análises, e os esquemas TAS+MRC 2x2, MRC 1x2, e TAS 2x1 apresentam as melhores eficiências energéticas para a maior parte das distâncias analisadas, com o esquema TAS+MRC 2x2 sendo o mais eficiente dentre os demais. Além disso, embora o esquema SISO ainda é o de menor eficiência energética para grande parte das distâncias consideradas, observa-se a redução da desvantagem de seu desempenho com relação aos demais esquemas.

Em oposição, para um requerimento de probabilidade de *outage* mais exigente, com $\mathcal{O}^* = 10^{-3}$, embora a relevância do consumo dos circuitos de transmissão diminua, o esquema

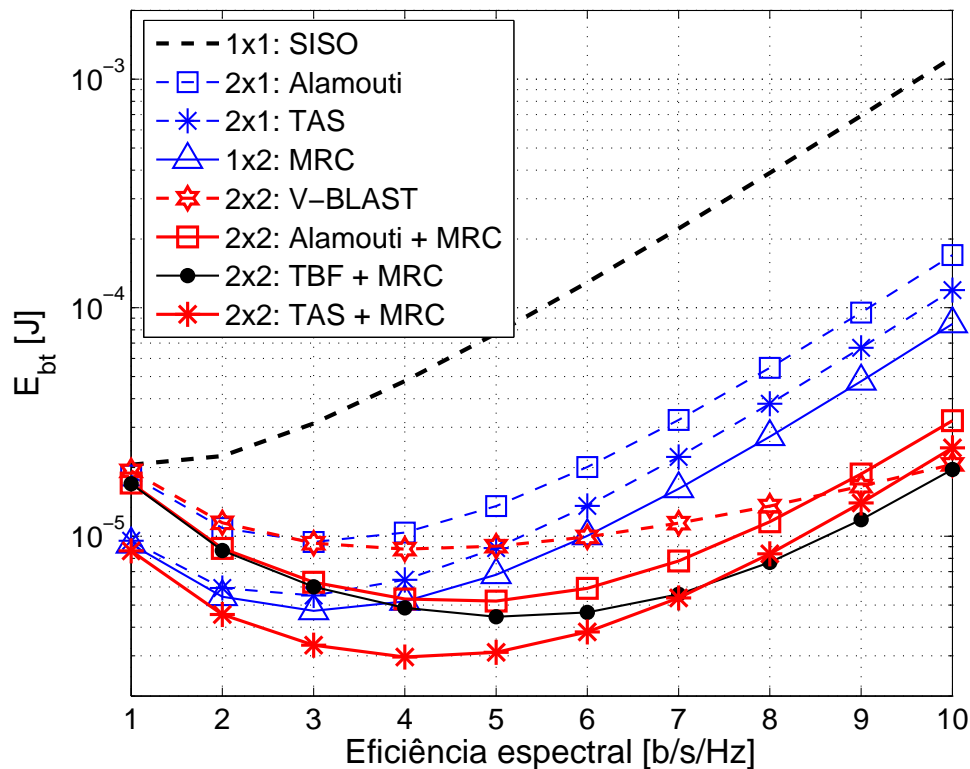


Figura 21: Consumo total de energia por *bit* para uma transmissão de macrocélula com $\theta^* = 10^{-2}$ e $d = 1000$ m.

Fonte: Autoria própria

TAS+MRC 2x2 permanece sendo o de maior eficiência energética para a grande parte das distâncias entre ERB e usuário, sendo superado pelo TBF+MRC 2x2 apenas para $d > 2250$ m.

A Figura 23 apresenta o consumo total de energia por *bit* para um cenário de cobertura de microcélula com $\theta^* = 10^{-3}$ e $\Delta = 3$ b/s/Hz. Novamente, o esquema TAS+MRC 2x2 mostra a maior eficiência energética, além do TAS 2x1 sendo capaz de superar os esquemas MIMO 2x2 V-BLAST, TBF+MRC e Alamouti+MRC. Além disso, quando os resultados são comparados com os apresentados na Figura 20, a vantagem do TAS+MRC 2x2 sobre o TBF+MRC 2x2 aumenta de forma considerável, evidenciando ainda mais os ganhos de eficiência proporcionados pelo esquema TAS. No caso de picocélulas e femtocélulas, as conclusões obtidas são em geral as mesmas, com o TAS+MRC 2x2 sendo o esquema de maior eficiência energética, enquanto o TAS 2x1 é capaz de superar os esquemas TBF+MRC 2x2, Alamouti+MRC 2x2, e V-BLAST 2x2.

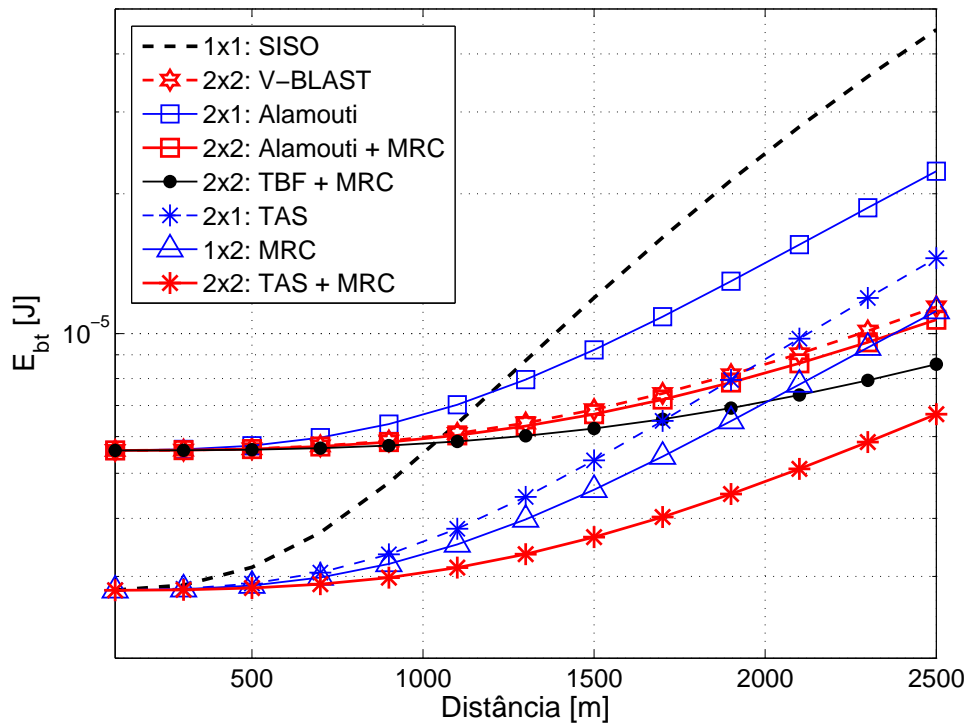


Figura 22: Consumo total de energia por *bit* para uma transmissão de macrocélula com $\mathcal{O}^* = 10^{-1}$ e $\Delta = 3$ b/s/Hz.

Fonte: Autoria própria

5.3 CONTRIBUIÇÕES E CONCLUSÕES

É investigada neste capítulo a eficiência energética de sistemas MIMO para uma probabilidade de *outage* alvo, considerando diversos tipos de ERBs com diferentes áreas de cobertura. É demonstrado que, embora a combinação de TAS e MRC não seja o melhor esquema em termos de probabilidade de *outage*, esta pode ser uma solução com grande eficiência energética. Esta vantagem é uma consequência do esquema TAS requerer uma única cadeia de circuitos de RF, enquanto os outros esquemas MIMO demandam uma cadeia de circuitos de RF por antena transmissora, afetando de forma considerável a eficiência energética.

Assim, podem ser destacados como principais resultados obtidos desta análise:

- para diferentes tipos de ERBs, requisitos de probabilidades de *outage* alvo e eficiências espectrais, o esquema TAS é de modo geral a opção que oferece melhor eficiência energética;
- embora o esquema TBF apresente o melhor desempenho com relação à SNR em termos

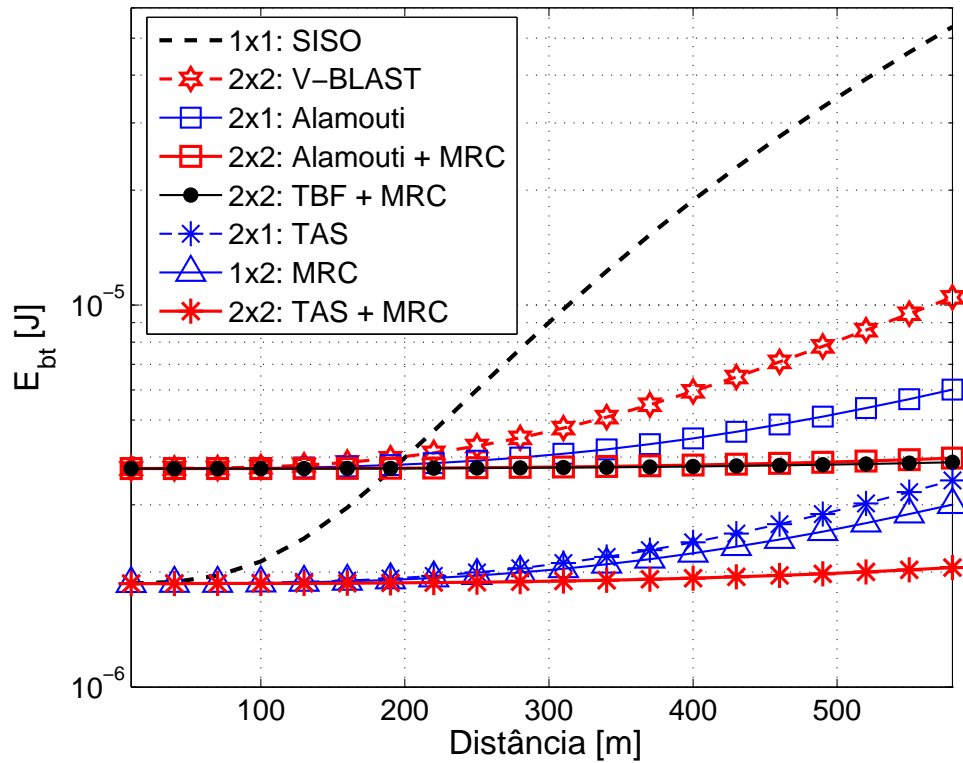


Figura 23: Consumo total de energia por *bit* para uma transmissão de microcélula com $\mathcal{O}^* = 10^{-3}$ e $\Delta = 3$ b/s/Hz.

Fonte: Autoria própria

da probabilidade de *outage*, ao empregar modelos de consumo de potência realísticos, o esquema TAS oferece a melhor eficiência energética. Esta vantagem em termos de eficiência energética deve-se à exigência geral dos esquemas MIMO de uma cadeia de circuitos de RF por antena, enquanto para o TAS uma única cadeia de RF é demandada.

6 ANÁLISE DO IMPACTO DO NÚMERO DE ANTENAS TRANSMISSORAS NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA OS ESQUEMAS TAS E TBF

Os resultados apresentados no Capítulo 5 destacam dois esquemas de diversidade espacial: TBF, que apresenta o melhor desempenho em termos da probabilidade de *outage*, e o esquema TAS, que por apresentar menores exigências de *hardware*, proporciona ganhos na análise da eficiência energética. Neste capítulo é investigada a eficiência energética dos esquemas de transmissão TAS e TBF considerando uma probabilidade de *outage* alvo e um modelo realista de consumo de potência das ERBs (AUER et al., 2011). É analisada a transmissão das ERBs para os usuários para canais com desvanecimento Rayleigh, considerado que as ERBs são equipadas com M_t antenas transmissoras e os usuários possuem uma antena receptora ($M_r = 1$).

Assim, como no Capítulo 5, a análise da eficiência energética é realizada considerando o consumo de total de energia por *bit* definido como (7).

6.1 ESQUEMAS DE TRANSMISSÃO

A seguir são definidas as potências mínimas de transmissão P^* considerando uma probabilidade de *outage* \mathcal{O}^* para os esquemas TBF e TAS empregando M_t antenas transmissoras. Os resultados apresentados foram analisados em (KAKITANI et al., 2013c).

6.1.1 TAS

Dado que no esquema TAS apenas uma cadeia de circuitos de RF é requerida, já que em uma transmissão apenas uma antena selecionada fica ativa, tem-se $N_{TRX} = 1$. A probabilidade de *outage* para M_t antenas transmissoras pode ser definida como (GOLDSMITH, 2005)

$$\mathcal{O}_{TAS}(M_t) = \left[1 - \exp\left(\frac{-\beta}{\rho}\right) \right]^{M_t}. \quad (61)$$

A partir de (61) pode-se obter a potência mínima de transmissão requerida pelo TAS

para uma probabilidade de *outage* alvo \mathcal{O}^* como

$$P_{\text{TAS}}^*(M_t) = \frac{-\beta N}{\gamma \ln \left(1 - \mathcal{O}^* \frac{1}{M_t} \right)}. \quad (62)$$

O consumo total de energia por *bit* do esquema TAS é

$$E_{bt,\text{TAS}}(M_t) = \frac{P_0 + \Delta_p \cdot P_{\text{TAS}}^*(M_t)}{R_b}. \quad (63)$$

Deve-se notar que $E_{bt,\text{TAS}}(M_t') \leq E_{bt,\text{TAS}}(M_t'')$ se $M_t' \geq M_t''$, visto que $(\mathcal{O}^*)^{\frac{1}{M_t''}} \leq (\mathcal{O}^*)^{\frac{1}{M_t'}}$ com $0 < \mathcal{O}^* < 1$. Portanto, com relação à eficiência energética, é de interesse que no esquema TAS o número de antenas transmissoras seja o maior possível.

6.1.2 TBF

Para o esquema TBF, como é necessária uma cadeia de circuitos de RF para cada uma das M_t antenas transmissoras, tem-se $N_{\text{TRX}} = M_t$ e pode-se definir a probabilidade de *outage* como (GOLDSMITH, 2005)

$$\mathcal{O}_{\text{TBF}}(M_t) = 1 - \exp \left(\frac{-\beta}{\rho} \right) \sum_{m=0}^{M_t-1} \frac{1}{m!} \left(\frac{\beta}{\rho} \right)^m, \quad (64)$$

que pode ser reescrita como

$$\mathcal{O}_{\text{TBF}}(M_t) = \frac{\Psi \left(M_t, \frac{\beta}{\rho} \right)}{\Gamma(M_t)}, \quad (65)$$

onde $\Psi(a,b) = \int_0^b y^{a-1} \exp(-y) dy$ é a função gama incompleta e $\Gamma(a) = \int_0^\infty y^{a-1} \exp(-y) dy$ é a função gama completa. Para SNRs suficientemente altas ou baixas probabilidades de *outage*, como as consideradas nesta análise, a função gama incompleta pode ser aproximada para $\Psi(a,b) = \frac{1}{a} \cdot b^a$, portanto

$$\mathcal{O}_{\text{TBF}}(M_t) \approx \left(\frac{\beta}{\rho} \right)^{M_t} \frac{1}{\Gamma(M_t + 1)}. \quad (66)$$

A potência de transmissão mínima requerida para uma probabilidade de *outage* \mathcal{O}^* pode ser obtida de (66) tal que

$$P_{\text{TBF}}^*(M_t) = \frac{\beta N}{\gamma [\Gamma(M_t + 1) \mathcal{O}^*]^{\frac{1}{M_t}}}, \quad (67)$$

enquanto o consumo total de energia por *bit* é

$$E_{bt,TBF}(M_t) = \frac{M_t \cdot P_0 + \Delta_p \cdot P_{TBF}^*(M_t)}{R_b}. \quad (68)$$

Em oposição ao comportamento de (63) com relação ao número de antenas transmissoras M_t , não é sempre verdadeiro que $E_{bt,TBF}(M_t'') \leq E_{bt,TBF}(M_t')$ se $M_t'' \geq M_t'$. Assim, para uma condição inicial com $E_{bt,TBF}(M_t') = E_{bt,TBF}(M_t'')$, e depois de substituir $E_{bt,TBF}$ e P_{TBF}^* por (68) e (67), é possível determinar a distância $d_{TBF,TBF}(M_t', M_t'')$ a partir da qual o emprego de M_t'' antenas transmissoras no TBF é mais eficiente do que o uso de M_t' antenas ($M_t'' > M_t'$) como

$$d_{TBF,TBF}(M_t', M_t'') = \left(\frac{\lambda^2 P_0 (M_t'' - M_t') [(M_t'')! \mathcal{O}^*]^{\frac{1}{M_t''}} [(M_t')! \mathcal{O}^*]^{\frac{1}{M_t'}}}{(4\pi)^2 \Delta_p \beta N \left\{ [(M_t'')! \mathcal{O}^*]^{\frac{1}{M_t''}} - [(M_t')! \mathcal{O}^*]^{\frac{1}{M_t'}} \right\}} \right)^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (69)$$

Evidenciando, portanto, que a utilização de mais antenas no esquema TBF nem sempre representa a solução com maior eficiência energética.

Deve-se ainda destacar que para distâncias curtas o suficiente entre a ERB e o usuário, (com a potência de transmissão requerida sendo pequena o suficiente), o consumo dos circuitos de transmissão torna-se mais relevante do que a potência de transmissão, e como consequência, o esquema TAS apresenta melhor eficiência energética do que TBF para qualquer número de antenas transmissoras. É possível considerar portanto, que a princípio o esquema TAS é uma solução com melhor eficiência energética. No entanto, visto que o TBF apresenta um melhor desempenho em termos de *outage*, pode-se buscar uma distância a partir da qual o TBF com um certo número de antenas transmissoras apresenta melhor eficiência energética que o TAS com um determinado número de antenas. Com base no procedimento utilizado na obtenção de (69), e empregando (62), (63), (67), e (68), consegue-se definir uma distância limiar $d_{TAS,TBF}(M_t', M_t'')$ até a qual TAS com M_t' antenas ainda é mais eficiente do que TBF com M_t'' antenas, mesmo que $M_t' \leq M_t''$. Assim

$$d_{TAS,TBF}(M_t', M_t'') = \left(\frac{-\lambda^2 \ln \left(1 - \mathcal{O}^* \frac{1}{M_t'} \right) [(M_t'')! \mathcal{O}^*]^{\frac{1}{M_t''}} P_0 (M_t'' - 1)}{(4\pi)^2 \Delta_p \beta N \left\{ [(M_t'')! \mathcal{O}^*]^{\frac{1}{M_t''}} + \ln \left(1 - \mathcal{O}^* \frac{1}{M_t'} \right) \right\}} \right)^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (70)$$

Note que o numerador em (70) nunca pode assumir valores negativos. Portanto, como o denominador deve ser sempre maior do que zero, tem-se a condição

$$M_t' < (\ln \mathcal{O}^*) / \left[\ln \left(1 - \exp \left(- (M_t''! \mathcal{O}^*)^{\frac{1}{M_t''}} \right) \right) \right], \quad (71)$$

que deve ser respeitada, caso contrário TBF nunca supera o desempenho do TAS em termos de eficiência energética.

Portanto, embora o TBF tenha um melhor desempenho que o TAS em termos de probabilidade de *outage*, na análise da eficiência energética, o TAS mostra-se mais vantajoso para algumas distâncias práticas entre ERB e usuário, mesmo com o emprego de um menor número de antenas que o TBF. Por exemplo, para $\mathcal{O}^* = 10^{-2}$ e $M_t' = 2$, TAS tem sempre melhor eficiência quando comparado ao TBF para qualquer valor de M_t'' . Além disso, a partir de (70) e com o emprego de parâmetros realísticos, é possível mostrar que TAS com apenas $M_t' = 2$ antenas supera o esquema TBF com $M_t'' = 5$ antenas até uma distância consideravelmente alta $d_{TAS,TBF} = 1,6$ km.

6.1.3 SISO

Por fim, considera-se para fins de referência o esquema SISO ($N_{TRX} = 1$), com potência mínima requerida para transmissão P_{SISO}^* e consumo total de energia por *bit* $E_{bt,SISO}$ dados por (36) e (37) respectivamente. Ao comparar a eficiência energética do SISO com o TAS, tem-se que para $E_{bt,SISO} \leq E_{bt,TAS}$, é necessário que $\mathcal{O}^{*\frac{1}{M_t}} \geq \mathcal{O}^*$, o que apenas pode ser obtido (com a igualdade) para $M_t = 1$. Portanto, o esquema SISO sempre é superado pelo TAS para $M_t \geq 2$. Entretanto, caso a transmissão SISO seja comparada com o TBF, de forma similar ao obtido em (69) e (70), é possível obter a distância limiar $d_{SISO,TBF}$ até a qual o SISO supera o TBF com M_t antenas como

$$d_{SISO,TBF}(M_t) = \left(\frac{-\lambda^2 \ln(1 - \mathcal{O}^*) [(M_t)! \mathcal{O}^*]^{\frac{1}{M_t}} P_0 (M_t - 1)}{(4\pi)^2 \Delta_p \beta N \left\{ [(M_t)! \mathcal{O}^*]^{\frac{1}{M_t}} + \ln(1 - \mathcal{O}^*) \right\}} \right)^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (72)$$

6.2 ANÁLISE DE RESULTADOS

Para a análise da eficiência energética e do impacto no número de antenas dos esquemas TAS e TBF, são considerados os mesmos parâmetros de sistema empregados na Seção 5, com $L = 0$ dB, $N_f = 0$ dB, $G = 0$ dBi, $N_0 = -174$ dBm/Hz, $\alpha = 3$, e $B = 10$ MHz. Visando maior eficiência, são consideradas apenas macrocélulas compostas por ERBs com RRH, com $P_0 = 84$ W e $\Delta_p = 2,8$.

A Figura 24 apresenta o consumo de energia por *bit* para uma probabilidade de *outage* $\mathcal{O}^* = 10^{-2}$ e $\Delta = 3$ b/s/Hz. Pode-se observar que os esquemas TAS possuem a melhor eficiência energética até uma dada distância. Considerando o mesmo número de antenas para os esquemas

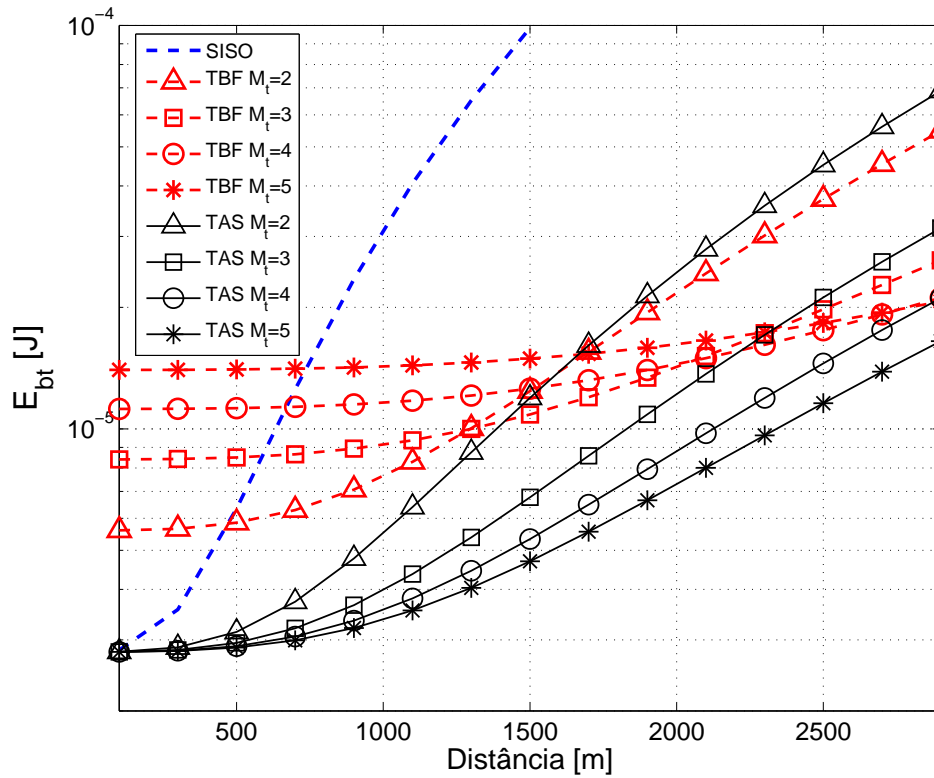


Figura 24: Consumo total de energia por bit para $\theta^* = 10^{-2}$ e $\Delta = 3$ b/s/Hz.

Fonte: Autoria própria

de transmissão, o TAS é superado pelo TBF apenas para distâncias longas. Por exemplo, para $M_t = 2$ TAS tem seu desempenho superado pelo TBF apenas para $d > 1595$ m, para $M_t = 3$ a distância é $d > 2323$ m, para $M_t = 4$ tem-se $d > 2905$ e para $M_t = 5$ TBF supera o TAS para $d > 3393$ m. Além disso, para apenas duas antenas, o TAS ($M_t = 2$) tem seu desempenho superado pelo TBF ($M_t = 3$) para $d > 1415$ m, pelo TBF ($M_t = 4$) quando $d > 1540$ m, e pelo TBF ($M_t = 5$) para $d > 1664$ m. Deve ainda ser destacado que as distâncias limiares indicadas (obtidas por meio de simulações e indicadas na Figura 24) e valores obtidos a partir das equações (69), (70), e (72) apresentam resultados bastante próximos.

Dado que a potência de transmissão requerida é inversamente proporcional à ordem de diversidade dos esquemas de transmissão, pode-se notar na Figura 24 que as inclinações das curvas também são inversamente proporcionais à ordem de diversidade. Então, embora os esquemas TBF tenham o melhor desempenho em termos da probabilidade de *outage*, quando o consumo total de energia pelas ERBs é considerado, eles são superados pelos esquemas TAS para uma grande parte das distâncias, visto que com a seleção de antenas há um consumo bem menor gerado pelos circuitos de transmissão. Adicionalmente, para curtas distâncias,

enquanto os esquemas TAS são os de melhor eficiência energética, os esquemas TBF também são superados pela transmissão SISO, que apresenta o pior desempenho em termos de *outage*, mas possui um menor consumo dos circuitos de transmissão. Finalmente, deve-se notar que quando apenas os esquemas TBF são comparados, o TBF ($M_t = 5$) apresenta a menor eficiência energética para curtas distâncias devido ao maior consumo dos circuitos (com $N_{TRX} = 5$), porém para maiores distâncias, como a potência de transmissão torna-se um fator mais relevante na análise, o TBF ($M_t = 5$) mostra a maior eficiência energética entre os esquemas TBF considerados.

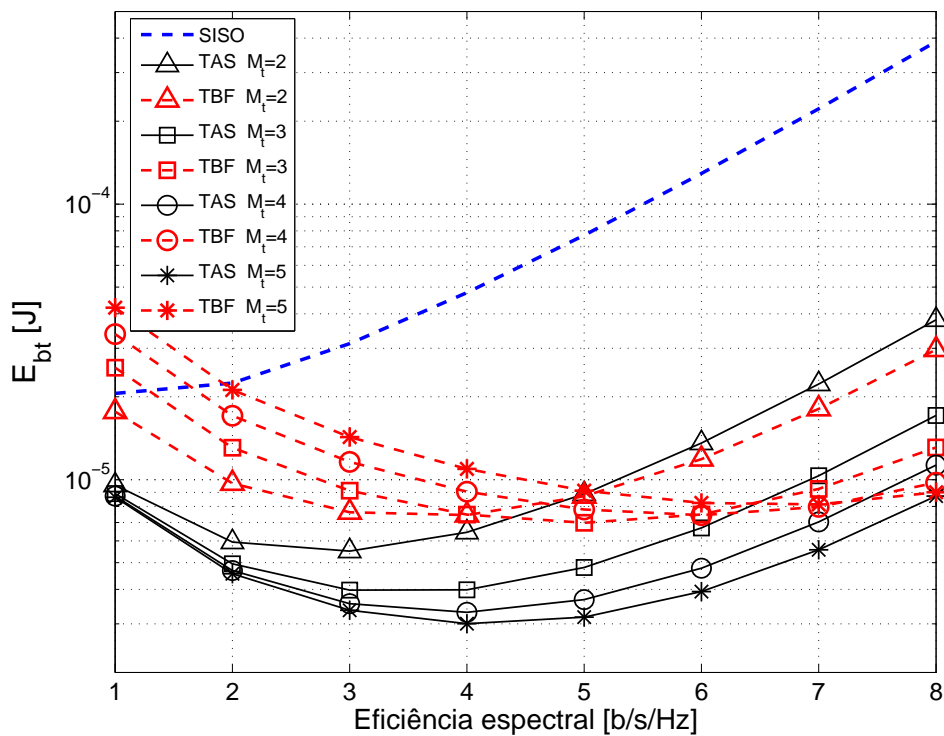


Figura 25: Consumo total de energia por *bit* para $\mathcal{O}^* = 10^{-2}$ e $d = 1000$ m.

Fonte: Autoria própria

Conclusões similares podem ser obtidas para outras eficiências espectrais e a mesma probabilidade de *outage* $\mathcal{O}^* = 10^{-2}$, como mostrado na Figura 25 para uma distância entre ERB e usuário de $d = 1000$ m. É possível notar que os esquemas TAS apresentam as maiores eficiências energéticas para a maior parte das eficiências espectrais consideradas, sendo superados apenas pelo TBF com o aumento significativo da eficiência espectral, resultando em cenários nos quais a potência de transmissão requerida tem maior impacto na análise da eficiência energética do que o consumo dos circuitos de transmissão. Além disso, para um dado número de antenas M_t , ambos esquemas TAS e TBF possuem um ponto ótimo de eficiência

energética para uma distância d , que pode ser obtida pela derivada das equações (63) e (68) com relação à eficiência espectral Δ . Assim, para o esquema TAS, a eficiência espectral ótima em função da distância d e do número de antenas M_t é

$$\Delta_{\text{TAS}} = \frac{\mathcal{W} \left(-\frac{1}{16} \frac{d^{-\alpha} P_0 \lambda^2 \ln \left(1 - \mathcal{O}^* \frac{1}{M_t} \right) + 16 \Delta_p N \pi^2}{\Delta_p N \pi^2 e} \right) + 1}{\ln(2)}, \quad (73)$$

enquanto para o esquema TBF, a eficiência espectral ótima é dada por

$$\Delta_{\text{TBF}} = \frac{\mathcal{W} \left(\frac{1}{16} \frac{d^{-\alpha} M_t P_0 \lambda^2 (\Gamma(M+1) \mathcal{O}^*)^{\frac{1}{M_t}} - 16 \Delta_p N \pi^2}{\Delta_p N \pi^2 e} \right) + 1}{\ln(2)}. \quad (74)$$

Os resultados obtidos das equações (73) e (74) refletem os mesmos valores de eficiência espectrais ótimas da Figura 25.

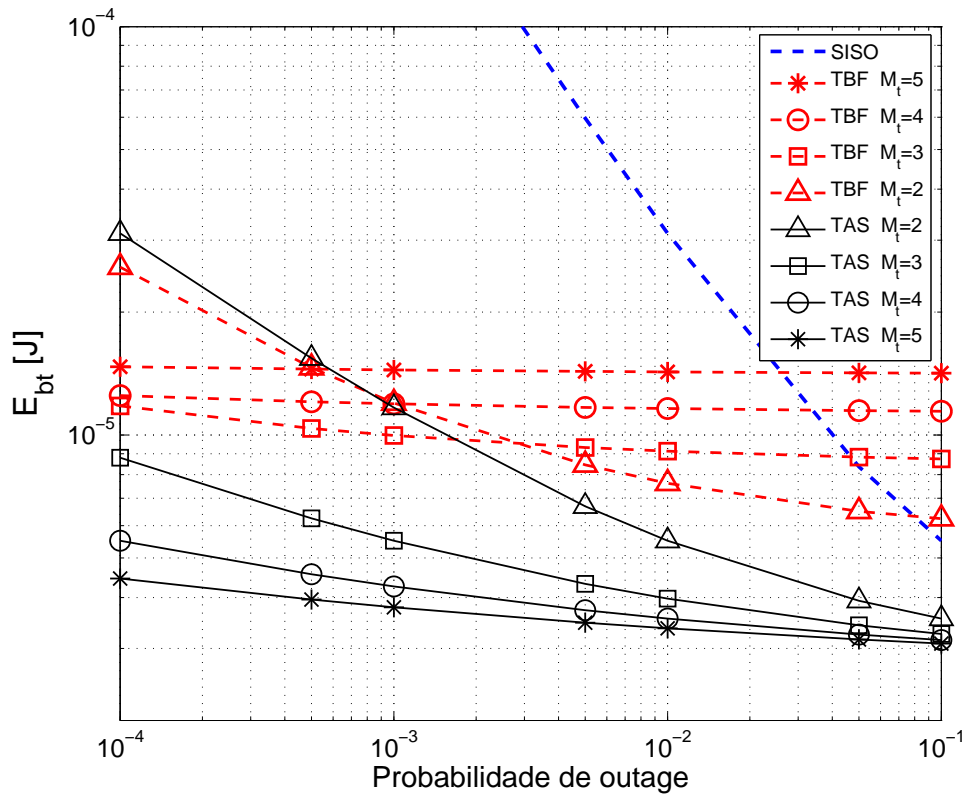


Figura 26: Consumo total de energia por bit para $\Delta = 3$ b/s/Hz e $d = 1000$ m.

Fonte: Autoria própria

A Figura 26 mostra que para $\Delta = 3$ b/s/Hz e $d = 1000$ m, no caso de uma probabilidade de *outage* menos rígida, como $\mathcal{O}^* = 10^{-1}$, o consumo dos circuitos de transmissão torna-

Tabela 7: Distâncias limiaries para os quais os esquemas de transmissão são superados pelo TBF, para $\mathcal{O}^* = 10^{-4}$ e $\Delta = 3$ b/s/Hz.

Esquemas de transmissão	Número de antenas	d [m]
$E_{bt,TAS}(M_t') < E_{bt,TBF}(M_t'')$	$M_t' = 2, M_t'' = 2$	699
	$M_t' = 2, M_t'' = 3$	608
	$M_t' = 2, M_t'' = 4$	677
	$M_t' = 2, M_t'' = 5$	740
	$M_t' = 3, M_t'' = 3$	1289
	$M_t' = 4, M_t'' = 4$	1810
	$M_t' = 5, M_t'' = 5$	2267
$E_{bt,TBF}(M_t') < E_{bt,TBF}(M_t'')$	$M_t' = 2, M_t'' = 3$	551
	$M_t' = 2, M_t'' = 4$	667
	$M_t' = 2, M_t'' = 5$	756
	$M_t' = 3, M_t'' = 4$	1102
	$M_t' = 3, M_t'' = 5$	1277
	$M_t' = 4, M_t'' = 5$	1674
$E_{bt,SISO} < E_{bt,TBF}(M_t)$	$M_t = 2$	100
	$M_t = 3$	126
	$M_t = 4$	144
	$M_t = 5$	158

Fonte: Autoria própria

se ainda mais relevante, e a vantagem do TAS em termos da eficiência energética aumenta. Além disso, embora a transmissão SISO ainda tenha a menor eficiência energética para a maioria das distâncias, o seu desempenho mostra-se mais competitivo. Em oposição, para uma probabilidade de *outage* bem mais rígida, com $\mathcal{O}^* = 10^{-4}$, embora a relevância do consumo dos circuitos de transmissão diminua, o esquema TAS ($M_t = 5$) ainda é o esquema de melhor eficiência energética. A Tabela 7 fornece informações mais detalhadas para a análise com $\mathcal{O}^* = 10^{-4}$. Note que o esquema TAS ($M_t = 5$) é superado pelo esquema TBF ($M_t = 5$) apenas para $d > 2267$ m. Além disso, quando comparado com o cenário da Figura 24, pode-se observar que a vantagem dos esquemas TAS sobre os TBF sofre uma pequena redução.

Foram analisados também cenários com $M_t > 5$ antenas, entretanto as conclusões são qualitativamente as mesmas. Além disso, caso fosse considerado um aumento do número de antenas nos usuários, seria observada uma redução na potência de transmissão requerida, com o consumo dos circuitos tornando-se um fator ainda mais relevante na análise da eficiência energética, e conseqüentemente o TAS representaria uma solução com ainda maior eficiência quando comparado com o TBF. Além disso, esquemas de diversidade de transmissão baseados em códigos espaço-temporais apresentam desempenho pior que o TBF em termos de probabilidade de *outage* e empregam o mesmo número de cadeias de circuitos de RF. Assim, como estes esquemas apresentam pior eficiência energética que o TBF, não foram incluídos

nesta análise.

6.3 CONTRIBUIÇÕES E CONCLUSÕES

É investigada neste capítulo a eficiência energética de sistemas com diversidade de transmissão para uma dada probabilidade de *outage* alvo, empregando um modelo realístico de consumo de potência. É analisado o impacto que o número de antenas transmissoras tem para os esquemas TAS e TBF. Os resultados das simulações indicam as distâncias limites a partir das quais um esquema de transmissão supera o outro. São obtidas ainda as equações que fornecem diretamente as distâncias limiares diretamente, ou seja, sem a necessidade de simulações. Ambos métodos, simulação e por meio da equação direta, apresentam valores de distâncias limiares bastante próximos.

É mostrado que o TAS, embora não seja o melhor esquema em termos de probabilidade de *outage*, pode representar uma solução com grande eficiência energética. Mesmo que o TAS empregue um menor número de antenas transmissoras, pode superar o desempenho em termos de eficiência energética do TBF para distâncias consideráveis entre ERB e usuário.

Assim, são destacados como principais resultados desta análise:

- foram apresentadas equações que permitem comparar os esquemas TAS e TBF para qualquer número de antenas, fornecendo as distâncias limiares em que um esquema de transmissão é superado pelo outro;
- o esquema TAS, mesmo com um reduzido número de antenas disponível, pode superar o TBF para distâncias relevantes de transmissão entre ERB e usuário.

7 ANÁLISE ENERGÉTICA E FINANCEIRA DE REDES CELULARES SOB INTERFERÊNCIA DE CO-CANAL

É realizada neste capítulo a análise da eficiência em termos econômicos e energéticos para alguns projetos de redes celulares. De forma similar ao trabalho apresentado em (TOMBAZ et al., 2011b), são explorados os custos de infraestrutura, energia e espectro alocado, além de serem considerados nos resultados o impacto do reuso de frequências e da interferência de co-canal. Para os cenários analisados, é calculada a potência mínima requerida para uma transmissão da ERB para o usuário localizado na borda da célula, dada a condição de uma taxa mínima R para canais com desvanecimento Rayleigh. Considerando uma topologia formada por células de geometria hexagonal, a distância entre a ERB e o usuário (ou de forma equivalente o raio da célula) é dada por

$$d_{\text{cel}} = \sqrt{\frac{2A}{3\sqrt{3}N_{\text{ERB}}}}, \quad (75)$$

onde N_{ERB} é o número total de células empregadas para prover cobertura a uma dada área de serviço A .

Como destacado no Capítulo 2, o reuso de frequências e o conceito de *cluster*, além de propiciar o aumento da capacidade de sistemas celulares com o aumento do número de canais disponíveis, colaboram com a redução da interferência de co-canal¹. Porém, a interferência de co-canal não é totalmente eliminada, visto que esta é dependente do tamanho de *cluster*, e quanto menor o valor de ω , maior a interferência de co-canal. Assim, pode-se expressar a relação sinal-interferência (SIR) como (GOLDSMITH, 2005)

$$\text{SIR} = \frac{\gamma \cdot P_t}{P_{\text{int}}} = \frac{1}{6} \left(\frac{3}{\mu} \right)^{\frac{\alpha}{2}}, \quad (76)$$

¹Neste trabalho é considerado que o usuário está posicionado na borda da célula (representando um pior cenário de análise) e que são empregados esquemas de prevenção de interferência de co-canal baseados em reuso de frequências, com alocação estática dos canais para as células. Deve-se destacar porém, que técnicas adaptativas de maior complexidade baseadas na coordenação de células poderiam ser consideradas. Estas técnicas proporcionam, por meio de troca de informações entre as estações, a alocação dinâmica de recursos de acordo com a demanda de determinada região, sem a necessidade de planejamento prévio de distribuição de frequências (HAMZA et al., 2013).

onde P_{int} é a potência da interferência. Então, a relação sinal-interferência mais ruído (SINR) recebida para um usuário na borda da célula é (GOLDSMITH, 2005)

$$\varphi = \frac{\gamma \cdot P_t}{N_0 \cdot \frac{B}{\omega} + P_{\text{int}}} = \frac{\rho \cdot N}{\mu \cdot N + f_\mu \cdot \rho \cdot N} = \frac{\rho}{\mu + f_\mu \cdot \rho}, \quad (77)$$

onde o parâmetro f_μ é utilizado para simplificar a notação e é definido por

$$f_\mu = \frac{1}{\text{SIR}} = 6 \left(\frac{3}{\mu} \right)^{-\frac{\alpha}{2}}. \quad (78)$$

Considerando a SINR na equação de capacidade de Shannon, é possível obter a taxa de transmissão alvo R por ERB na borda da célula como

$$R = \mu B \log_2(1 + \varphi) = \mu B \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{\mu + f_\mu \rho} \right), \quad (79)$$

a partir da qual pode ser obtida a SNR requerida

$$\rho = \frac{\mu \left(2^{\frac{R}{\mu B}} - 1 \right)}{\left(1 - 2^{\frac{R}{\mu B}} f_\mu + f_\mu \right)}. \quad (80)$$

Deve-se destacar que ρ deve sempre assumir valores maiores do que zero. Dado que $2^{\frac{R}{\mu B}} > 1$, pode-se observar que o numerador de (80) sempre assume valores maiores do que zero, ou seja, $\mu \left(2^{\frac{R}{\mu B}} - 1 \right) > 0$. Portanto, o denominador de (80) também deve respeitar a mesma condição, com

$$\left(1 - 2^{\frac{R}{\mu B}} f_\mu + f_\mu \right) > 0, \quad (81)$$

que estabelece a relação

$$\frac{R}{B} < \mu \log_2 \left(\frac{1 + f_\mu}{f_\mu} \right). \quad (82)$$

Portanto a inequação definida em (82) estabelece a relação entre taxa de transmissão alvo por ERB e a largura de banda disponível para o sistema, que deve ser respeitada para obter um projeto válido de rede.

7.1 MODELOS DE ANÁLISE ENERGÉTICA E DE CUSTOS

7.1.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Para a análise da eficiência energética é considerada a energia total consumida pela ERB, com base no modelo de potência definido em (AUER et al., 2011). Assim, a partir de (7),

pode-se definir o consumo total de energia de cada ERB como

$$E_{\text{ERB}} = P_0 + \Delta_p \cdot P_t. \quad (83)$$

A potência mínima de transmissão por célula requerida para obter uma taxa R para um usuário na borda da célula, pode ser obtida substituindo $\rho = \frac{\gamma P_t}{N}$ em (80) de modo que

$$P_t^* = \frac{\mu \left(2^{\frac{R}{\mu B}} - 1 \right)}{\left(1 - 2^{\frac{R}{\mu B}} f_\mu + f_\mu \right)} \cdot \frac{(4\pi)^2 N_0 \cdot B \cdot L \cdot d_{\text{cel}}^\alpha}{\lambda^2}. \quad (84)$$

Além disso, em aspectos práticos, a ERB possui restrições quanto ao valor da potência máxima de transmissão, com isso pode-se definir a potência de transmissão como o mínimo entre P_t^* e o valor limite máximo de potência permitido P_t^{max} como

$$P_{tx} = \min\{P_t^*, P_t^{\text{max}}\}. \quad (85)$$

7.1.2 ANÁLISE FINANCEIRA

A análise em aspectos econômicos da rede celular é realizada com base no modelo de custos definido em (TOMBAZ et al., 2011b), em que os custos totais são dominados por três fatores: custo das licenças de uso de espectro, custo da energia e custo da infraestrutura. Assim, os custos totais da rede podem ser definidos como

$$\begin{aligned} C_{\text{total}} &= C_{\text{infraestrutura}} + C_{\text{energia}} + C_{\text{espectro}} \\ &= C_0 \cdot N_{\text{ERB}} + C_1 \cdot (N_{\text{ERB}} \cdot E_{\text{ERB}}) + C_2 \cdot B, \end{aligned} \quad (86)$$

onde C_0 representa os custos anuais gerados por cada ERB, C_1 é o custo anual da energia, e C_2 é o custo referente a um ano de uso do espectro.

7.2 ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção é realizada a análise numérica da eficiência energética e dos custos totais para alguns projetos de sistemas celulares. Os resultados obtidos foram analisados em (KAKITANI et al., 2013a). É considerada uma taxa de transmissão alvo por unidade de área $R_{\text{area}} = 15$ Mbps/km² e uma área de serviço $A = 15$ km², a não ser que seja estabelecido diferente. Além disso, é assumida uma frequência de portadora $f_c = 2,5$ GHz, margem de enlace $L = 10$ dB, figura de ruído $N_f = 0$ dB, ganho das antenas $G = 0$ dBi, expoente de perda de percurso $\alpha = 3,5$, e densidade espectral de potência de ruído $N_0 = -174$ dBm/Hz. Para

a análise do consumo energético, são consideradas macrocélulas compostas por ERBs com RRH, cujos parâmetros do modelo de consumo seguem (AUER et al., 2011) com $P_t^{\max} = 20$ W, $P_0 = 84$ W, e $\Delta_p = 2,8$. Além disso, os parâmetros do modelo de custos são baseados nos valores empregados em (TOMBAZ et al., 2011b) e são listados na Tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros do modelo de custos

Custos anuais de cada ERB	$C_0 = 0,02 \cdot 10^6$ \$/BS
Custo anual da energia	$C_1 = 0,876$ \$/Wh
Custo anual do espectro	$C_2 = 0,0737$ \$/Hz

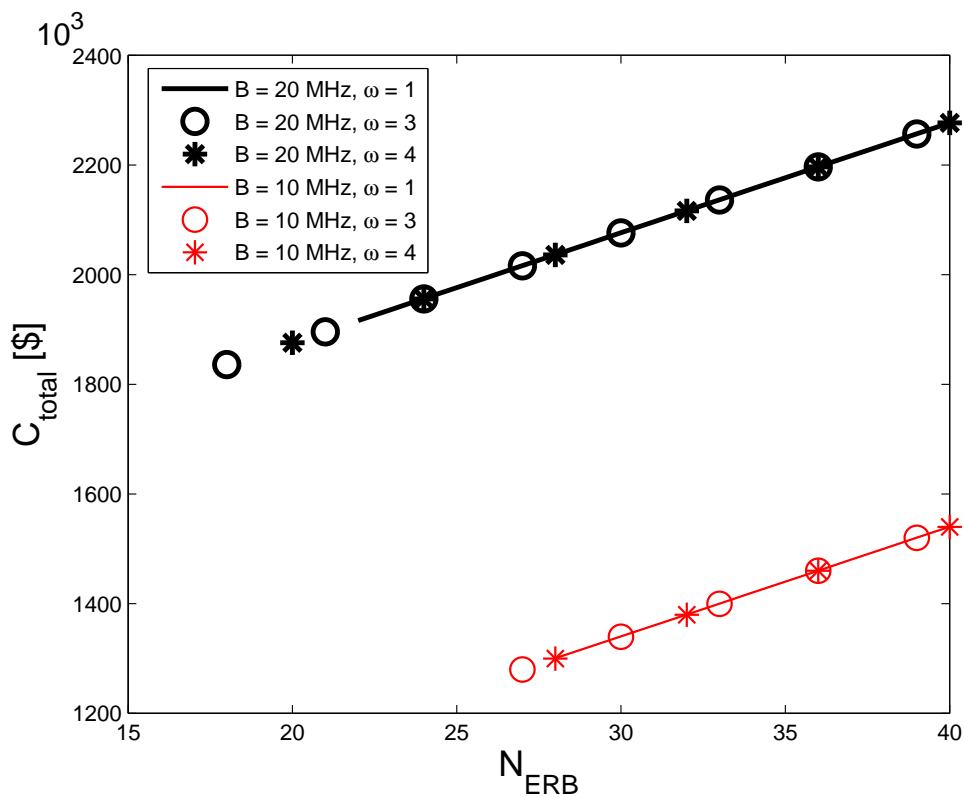


Figura 27: Custos totais da rede para diferentes tamanhos de *cluster* e largura de banda disponível em função do número de ERBs.

Fonte: Autoria própria

A Figura 27 ilustra os custos totais anuais da rede em função do número de ERBs. É considerada largura de banda $B \in \{10, 20\}$ MHz, e tamanho de *cluster* $\omega \in \{1, 3, 4\}$. A partir da análise da figura, é possível observar que, para este cenário, a solução com melhor eficiência com relação aos custos é aquela que emprega a menor largura de banda ($B = 10$ MHz), com $\omega = 3$ células por *cluster* e com o emprego do menor número de células com $N_{ERB} = 27$. O número mínimo de ERBs para cada projeto de rede (com valores diferentes de B e ω) é diretamente relacionado à condição definida em (82), que relaciona a taxa de transmissão alvo

por ERB com a largura de banda disponível. Nota-se que para sistemas com maior largura de banda disponível, como $B = 20$ MHz (e conseqüentemente provendo maior largura de banda por ERB), a condição mínima para suprir a inequação é atingida com um menor número de ERBs, visto que para maiores valores de B , a inequação em (82) torna-se mais fácil de ser satisfeita. Além disso, quanto menor o valor de N_{ERB} para prover cobertura a uma área de serviço, maior será a taxa alvo R por ERB, visto que há a imposição de uma taxa por área R_{area} , e conseqüentemente a inequação também mostra-se mais restritiva.

É importante destacar que, neste cenário, em comparação os resultados obtidos com $\omega = 1$, $\omega = 3$ reduz a interferência de co-canal, e como consequência o número mínimo de ERBs para $B = 10$ MHz é obtido. Quando $\omega = 4$ é empregado, o número mínimo de ERBs aumenta, visto que a largura de banda disponível para cada ERB diminui. Para o caso em que o reuso de frequências não é empregado ($\omega = 1$), a largura de banda por ERB aumenta, porém a interferência de co-canal (que é relacionada a f_{μ}) também aumenta. Conseqüentemente, devido à relação estabelecida em (82) o número mínimo de ERBs também aumenta com relação aos casos em que o reuso de frequências é empregado.

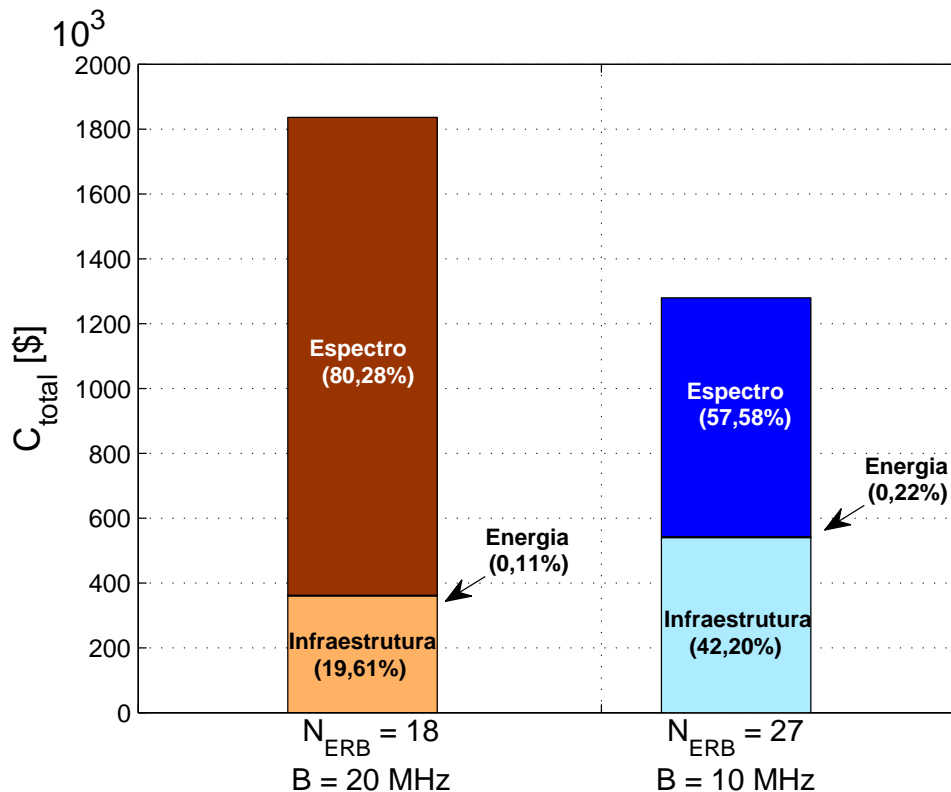


Figura 28: Custos totais detalhados da rede para o número mínimo de ERBs para $B = 10$ MHz e $B = 20$ MHz.

Fonte: Autoria própria

Além disso, embora o cenário com $B = 20$ MHz permita o uso de um número menor de ERBs, como indicado na Figura 27, pode ser observado que o custo total aumenta de forma considerável neste caso, indicando que o custo do espectro pode dominar sobre os custos da infraestrutura e energia. O impacto dos custos da infraestrutura, energia, e largura de banda são detalhados na Figura 28, em que foram considerados os custos totais para o número mínimo de ERBs (obtidos com $\omega = 3$) para $B = 10$ MHz e $B = 20$ MHz. Para $B = 10$ MHz, o espectro é responsável por 57,58% dos custos totais, fração essa que aumenta para 80,28% quando $B = 20$ MHz, o que explica o motivo dos custos totais da rede serem consideravelmente mais elevados para $B = 20$ MHz quando comparado com os custos totais para $B = 10$ MHz. É importante destacar também que o custo da energia tem impacto bastante reduzido nos custos totais, sendo representado apenas pela linha que limita os custos da infraestrutura e do espectro na figura.

A importância do custo do espectro pode também ser observada mesmo se for projetado um cenário possível em que o custo da infraestrutura tende a diminuir e o custo da energia tende a aumentar. Por exemplo, se for considerado que o custo das ERBs seja reduzido em dez vezes, enquanto o custo da energia tenha um aumento de dez vezes ($C'_0 = C_0/10$ e $C'_1 = 10 \times C_1$) para a mesma área de cobertura $A = 15$ km² e a mesma taxa de transmissão por unidade de área $R_{area} = 15$ Mbps/km², as mesmas conclusões da Figura 28 são obtidas, indicando que em termos de custos, é mais eficiente empregar uma largura de banda menor e também minimizar o número de ERBs do projeto.

Entretanto, deve ser enfatizado que os resultados das Figuras 27 e 28 consideram que o espectro disponível é alocado para prover cobertura a uma única área A . Todavia, é esperado que o provedor de serviços forneça cobertura a múltiplas áreas, de forma que o custo total referente ao uso do espectro seja diluído entre as múltiplas áreas de cobertura. Como exemplo, a Figura 29 ilustra os custos totais quando o provedor de serviços tem áreas de cobertura múltiplas de $A = 15$ km², cada uma delas com uma taxa de transmissão requerida por unidade de área de $R_{area} = 15$ Mbps/km². As curvas consideram que o número mínimo de ERBs é empregado e que $B = 10$ MHz ou $B = 20$ MHz.

Quando apenas uma área de cobertura é considerada, os resultados da Figura 29 são os mesmos da Figura 27. Ou seja, o custo do espectro de $C_2 = 0,0737$ \$/Hz domina no custo total da rede, e o uso de uma largura de banda mais estreita apresenta melhor desempenho quanto ao custo. Entretanto, com o aumento do número de áreas de cobertura (de forma equivalente, com a redução do custo do espectro por área) é possível observar que o projeto de sistema que emprega uma largura de banda maior (e conseqüentemente com uma redução do número mínimo de ERBs) torna-se a solução com melhor eficiência na análise dos custos. Por exemplo,

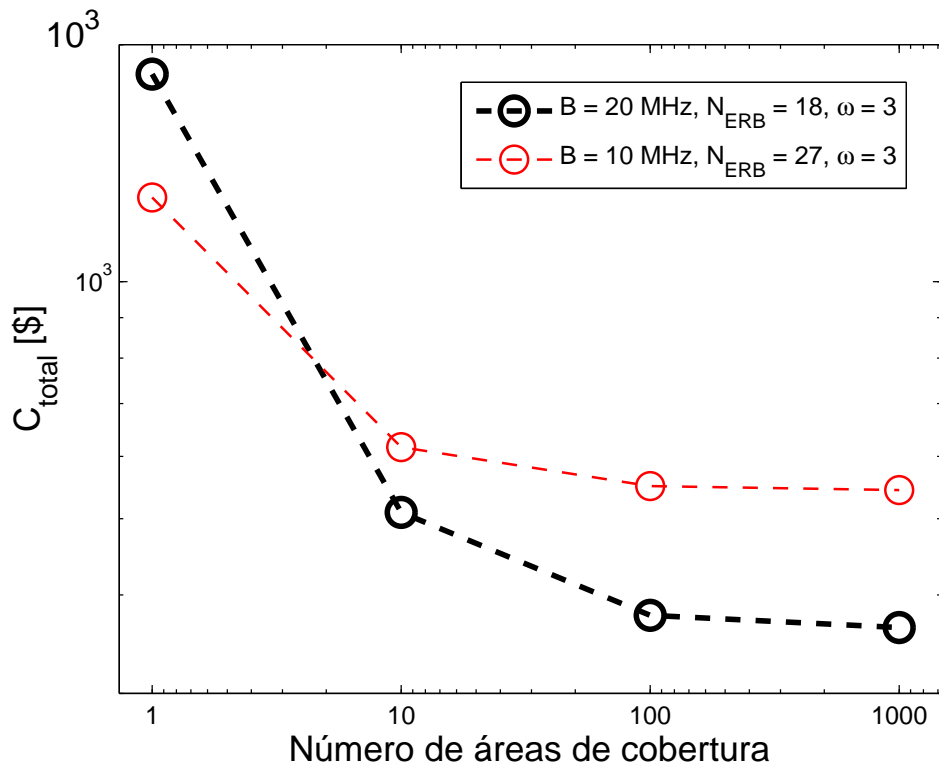


Figura 29: Custos totais da rede em função do número de áreas de cobertura.

Fonte: Autoria própria

para o caso em que tem-se dez áreas de cobertura de $A = 15 \text{ km}^2$, o custo do espectro por área é de $0,00737 \text{ \$/Hz}$, o que contribui com uma fração menor nos custos totais, de forma que a redução do número de ERBs do projeto torna-se o fator mais relevante na análise econômica da rede.

Os custos detalhados da infraestrutura, energia e espectro são mostrados na Figura 30 para um cenário com dez áreas de cobertura de $A = 15 \text{ km}^2$. Pode-se observar que o espectro é responsável por $11,95\%$ do custo total no caso de $B = 10 \text{ MHz}$, e por $28,93\%$ quando $B = 20 \text{ MHz}$ é empregado. O fator mais relevante na análise econômica torna-se o custo de infraestrutura, responsável por $87,60\%$ dos custos totais com $B = 10 \text{ MHz}$ e por $70,67\%$ com $B = 20 \text{ MHz}$.

A eficiência energética é considerada na Figura 31, em que é computado o consumo total de energia em função do número de ERBs, para uma taxa mínima de transmissão $R_{\text{area}} = 15 \text{ Mbps/km}^2$ para uma única área de serviço $A = 15 \text{ Mbps/km}^2$. Pode-se notar na análise da figura que, em termos de consumo de energia, sempre é mais vantajoso empregar larguras de banda mais amplas, e com maiores valores de ω . Portanto, na comparação dos resultados obtidos

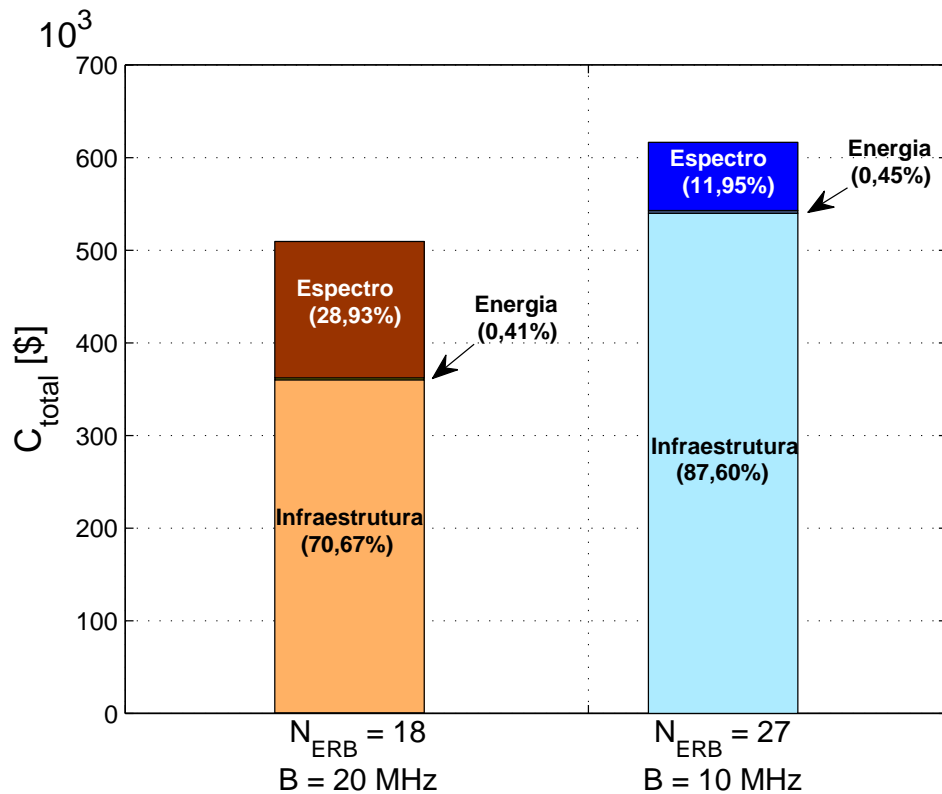


Figura 30: Custos totais detalhados da rede para o número mínimo de ERBs para $B = 10$ MHz e $B = 20$ MHz considerando 10 áreas de cobertura.

Fonte: Autoria própria

nas Figuras 27 e 31, é possível observar que a solução ótima do ponto de vista da eficiência energética difere da solução ótima em termos da análise econômica, visto que obtém-se maior eficiência energética ao empregar maior largura de banda com $\omega = 4$, enquanto na análise de custos é mais interessante empregar uma largura de banda menor com $\omega = 3$.

Em termos da eficiência energética, observa-se que o projeto de rede com menor largura de banda $B = 10$ MHz apenas supera o desempenho da solução com $B = 20$ MHz quando o reuso de frequências não é empregado neste, porém há reuso de frequências no primeiro. Visto que com o reuso de frequências a interferência de co-canal é reduzida, é possível empregar uma potência de transmissão menor. Entretanto, a solução com maior eficiência energética é obtida quando uma maior largura de banda disponível é combinada com um reuso de frequências maior, o que minimiza a potência de transmissão requerida para cada ERB. Esta análise da eficiência energética é ilustrada na Figura 32, em que pode ser observado que a melhor solução é obtida com $B = 20$ MHz e $\omega = 4$. É importante destacar que embora a solução com $\omega = 4$ requeira mais ERBs do que o projeto com $\omega = 3$, o que implica em um maior consumo de energia não-dependente da carga, o consumo dependente da carga tem grande relevância na

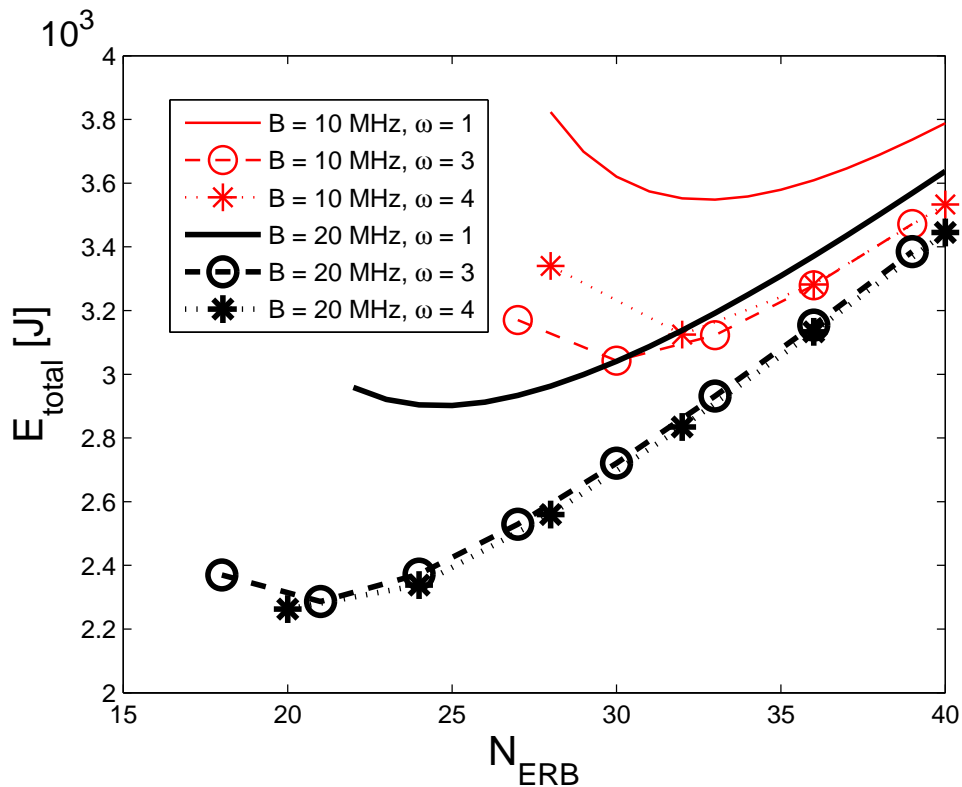


Figura 31: Consumo de energia para diferentes fatores de reuso de frequências e larguras de banda em função do número de ERBs.

Fonte: Autoria própria

Tabela 9: Projetos de sistema mais eficientes dos pontos de vista financeiro e de consumo de energia.

Áreas de cobertura		Custo total [\$]	Custo de energia [J]	ω	N_{ERB}	B [MHz]
1	Financeiro	1279,6	3,17	3	27	10
	Energia	1875,7	2,26	4	20	20
10	Financeiro	509,44	2,37	3	18	20
	Energia	549,35	2,26	4	20	20
100	Financeiro	376,81	2,37	3	18	20
	Energia	416,72	2,26	4	20	20
1000	Financeiro	363,55	2,37	3	18	20
	Energia	403,46	2,26	4	20	20

análise do consumo de energia, e com isso a solução com maior reuso de frequências torna-se mais eficiente do ponto de vista energético devido ao menor consumo proporcionado pela interferência de co-canal reduzida.

A Tabela 9 compara os projetos de sistema de maior eficiência dos pontos de vista financeiro e energético. Assim, a primeira linha da tabela indica que o melhor projeto do ponto de vista financeiro para uma rede com uma única área de cobertura custa 1279,6 \$

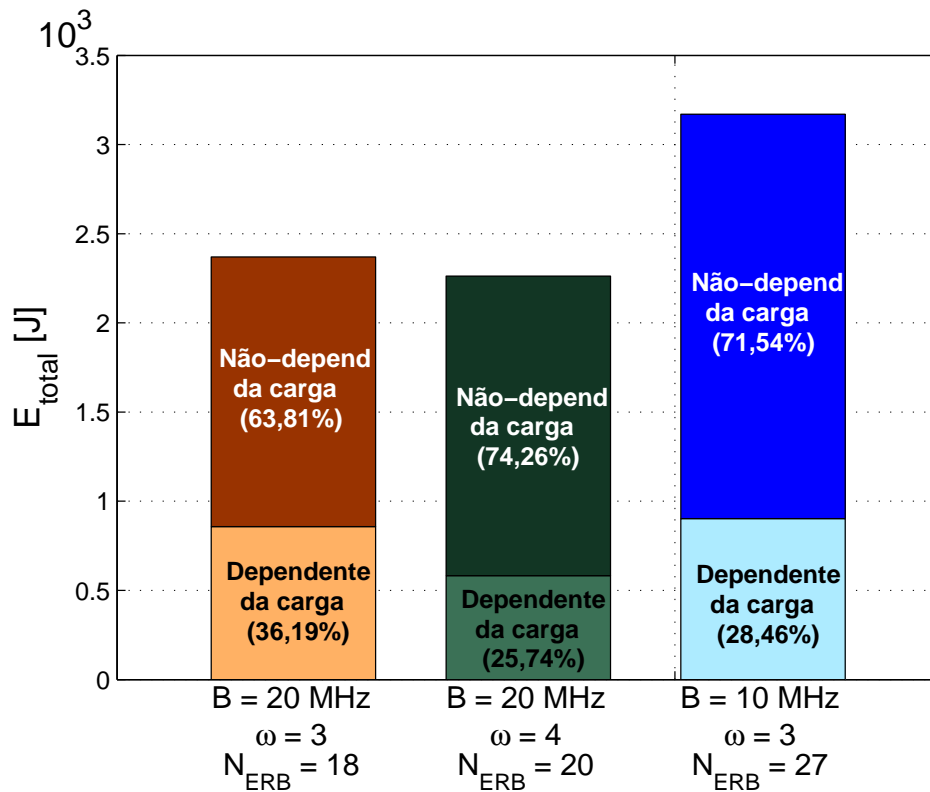


Figura 32: Custos de energia detalhados da rede para o número mínimo de ERBs para $B = 10$ MHz e $B = 20$ MHz.

Fonte: Autoria própria

e consome 3,17 J. Por outro lado, para a mesma cobertura, o projeto de rede com melhor eficiência energética custa 1875,7 \$ (46,6% a mais) e consome 2,26 J (28,7% a menos). É importante notar que os custos totais e projetos de sistema variam de forma considerável caso apenas uma área de cobertura é considerada. Entretanto, com o aumento do número de áreas de cobertura as soluções com melhor eficiência dos pontos de vista econômico e energético apresentam valores de custos totais e de energia mais próximos. Tal resultado é observado pois o custo de infraestrutura mostra-se mais relevante e ambas soluções apresentam propostas que empregam projetos de sistema mais similares, empregando uma maior largura de banda ($B = 20$ MHz) e um reduzido número de ERBs.

7.3 CONTRIBUIÇÕES E CONCLUSÕES

São investigados neste capítulo projetos de redes celulares para dois diferentes pontos de vista: eficiência energética e análise de custos. São considerados cenários em que a interferência de co-canal é considerada, diferentes larguras de banda podem estar disponíveis, e

que variados reusos de frequências podem ser empregados. Os resultados obtidos indicam que do ponto de vista energético pode ser mais eficiente empregar uma maior largura de banda e minimizar a potência de transmissão requerida por cada ERB ao balancear o número de ERBs do projeto e o reuso de frequências. Por outro lado, do ponto de vista financeiro, diferentes conclusões podem ser obtidas, visto que os custos de infraestrutura e de uso do espectro são os fatores mais relevantes a serem equilibrados para obter os projetos com melhor eficiência referente aos custos. Além disso, pode ser observado que os projetos ótimos para ambas análises, tanto do ponto de vista financeiro quanto do energético, apresentam resultados mais próximos quando a fração os custos de infraestrutura com relação aos custos totais prevalece sobre os custos de uso de espectro.

Desta forma, podem ser destacados como principais resultados desta análise que:

- do ponto de vista econômico, os custos referentes à infraestrutura e uso do espectro são os fatores mais relevantes a serem equilibrados para obter maior eficiência referente aos custos;
- considerando a eficiência energética, deve-se utilizar uma largura de banda maior e balancear o reuso de frequências e o número de ERBs empregados no projeto.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

As análises realizadas nesta tese podem ser divididas em dois grandes grupos, com os Capítulos 3 e 4 apresentando o estudo da eficiência energética em WSNs, com emprego de técnicas cooperativas de transmissão, e com os Capítulos 5, 6, e 7 investigando a eficiência energética em redes de maior capacidade, como as redes celulares, com análise de técnicas de múltiplas antenas e também o estudo do impacto financeiro e energético para diferentes projetos de redes.

No Capítulo 3 foram explorados cenários WSNs em que os nós podem empregar nas transmissões protocolos cooperativos DF com RC e PC, além do AF. Os resultados obtidos indicaram que, com restrições de *outage* alvo e requerimentos de vazão fim-a-fim, para cenários em que o *relay* está posicionado mais próximo da fonte, as transmissões empregando AF e RC apresentam desempenhos semelhantes em termos de eficiência energética, com o PC superando os demais. Além disso, quando altas taxas de transmissão são consideradas, a vantagem do PC torna-se mais evidente, dado que mesmo sem canal retorno este é capaz de superar o AF e o RC com canal de retorno disponível. Por outro lado, em cenários opostos, com o *relay* mais próximo do nó destino, o desempenho dos protocolos DF são comprometidos devido à degradação da qualidade do enlace entre fonte e *relay*, e assim o protocolo AF apresenta o melhor desempenho, tanto quando um canal de retorno está disponível ou não.

O Capítulo 4 apresentou a análise de WSNs por meio de contornos de eficiência energética. Assim como no estudo apresentado no Capítulo 3, são considerados cenários cooperativos com emprego de AF, e DF com RC e PC. No entanto, diferentemente da análise realizada no Capítulo 3 em que os cenários são compostos por três nós com funções fixas (fonte, *relay* e destino), foi considerado que em um cenário com três nós, dois dos nós podem atuar tanto como fonte quanto como *relay* em uma transmissão para um nó destino comum a ambos. Os resultados obtidos mostraram que a eficiência energética máxima é obtida quando diferentes taxas de transmissão são alocadas para cada usuário do cenário analisado, e conseqüentemente o emprego de taxas iguais para ambos usuários resulta em um solução sub-ótima com relação à eficiência energética. Além disso, foi demonstrado que dependendo da topologia em particular,

o esquema com melhor eficiência energética pode ser tanto o AF quando o DF. Por fim, o emprego de um canal de retorno mostrou-se sempre benéfico em termos da eficiência energética, sendo capaz de dobrar seu valor.

No Capítulo 5 foram consideradas na análise da eficiência energética redes de longo alcance, com o emprego de modelos realísticos de consumo de potência. É considerada a transmissão da ERB para o usuário, com a possibilidade de utilização de múltiplas antenas tanto na transmissão quanto na recepção. A análise de resultados mostrou que embora o esquema de transmissão TBF apresente o melhor desempenho em termos de SNR, o TAS supera os demais esquemas em termos do consumo total de potência. Tal vantagem é devida ao fato do TAS necessitar de apenas uma cadeia de circuitos de RF no transmissor, enquanto outros esquemas de múltiplas antenas necessitam de uma cadeia de RF por antena transmissora, comprometendo assim de maneira significativa suas eficiências energéticas.

No Capítulo 6, de forma semelhante ao cenário considerado no Capítulo 5, foi realizada a análise da transmissão da ERB para o usuário com o emprego de múltiplas antenas. No entanto, foi considerado neste capítulo que os usuários possuem apenas uma antena, enquanto as ERBs podem ser equipadas com múltiplas antenas. Foi realizada a análise do impacto do aumento do número de antenas transmissoras e foram definidas ainda as distâncias entre transmissor e receptor a partir das quais um determinado esquema de transmissão supera o outro. Os resultados obtidos indicam que o esquema TAS é capaz de superar o TBF mesmo empregando uma quantidade menor de antenas transmissoras. Porém, para distâncias consideravelmente maiores, em que a potência de transmissão é um fator mais relevante na eficiência energética do que o consumo dos circuitos, foi possível observar que o TBF superou o TAS.

O Capítulo 7 finaliza as análises com o estudo da eficiência energética e do impacto financeiro de diferentes projetos de redes celulares. O modelo de sistema empregado considera fatores como as interferências de co-canal, diferentes larguras de banda disponíveis, além do reuso de frequências. O modelo para análise financeira considera como principais fatores os custos da infraestrutura, do uso de espectro e da energia consumida. Os resultados indicaram que as conclusões obtidas dos pontos de vista energético e financeiro podem diferir consideravelmente. Enquanto do ponto de vista econômico os custos da infraestrutura e do espectro empregado são os fatores a serem balanceados para obter maior eficiência, do ponto de vista energético é mais interessante empregar uma maior largura de banda e balancear o reuso de frequências e o número de ERBs empregadas no projeto.

8.1 TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos apresentados nos Capítulos 3 e 4 possuem como foco a análise da eficiência energética em WSNs considerando os ganhos de desempenho proporcionados por técnicas de transmissão cooperativa. Porém, o emprego de múltiplas antenas não é explorado nesses trabalhos. Assim como o trabalho em (BRANTE et al., 2013) que analisa a eficiência energética em WSNs com emprego de técnicas MIMO, um fator a ser explorado seria a análise dos cenários WSNs considerados para nós equipados com múltiplas antenas. Dessa forma, se realizada a comparação da eficiência energética entre os cenários MIMO e cooperativo, seria possível determinar em que condições mostra-se mais interessante o emprego de nós *relays* adicionais ou a instalação de múltiplas antenas nos nós, com consequente consumo adicional de potência dos circuitos de RF necessários por uma grande parte das técnicas MIMO.

Por sua vez, os Capítulos 5 e 6 exploram a eficiência energética em redes celulares, com maior potência de transmissão e emprego de técnicas MIMO. O impacto da cooperação entre usuários na análise da eficiência energética dos cenários de *downlink* considerados, bem como a comparação de desempenho com o uso de múltiplas antenas é um fator a ser considerado em trabalhos próximos. Além disso, a cooperação entre ERBs na decodificação das transmissões dos usuários também pode trazer benefícios do ponto de vista da eficiência energética, especialmente para usuários na borda da célula e para sistemas com células pequenas, como demonstrado em (ONIRETI et al., 2012). Assim, as análises apresentadas nestes capítulos poderiam ser expandidas com o estudo do impacto da cooperação envolvendo ERBs e usuários em redes celulares com relação à eficiência energética.

O Capítulo 7 realiza a análise de custos e da eficiência energética de um ponto de vista sistêmico, considerando o número de ERBs necessárias para prover serviço em uma determinada área de cobertura, bem com a interferência de co-canal gerada neste cenário. Visto que os cenários analisados nos Capítulos 5 e 6 focam-se no enlace entre ERB e estação móvel sem considerar a interferência gerada por células de co-canal, a análise do ponto de vista de sistema adotada neste trabalho poderia ser empregado na continuidade das análises apresentadas nos Capítulos 5 e 6. Ainda com relação ao trabalho apresentado no Capítulo 7, o uso de técnicas cooperativas de transmissão e o emprego de múltiplas antenas teria impactos tanto no aspecto financeiro quanto energético, visto que a potência de transmissão necessária deve ser reduzida com o emprego destas técnicas, trazendo porém aumento de custos, como a consideração do uso de estações adicionais para cooperar na transmissão e o emprego de mais antenas por equipamento.

Além disso, uma alternativa para aumentar a eficiência de redes de telefonia celular é pelo aumento de sua densidade com a inclusão de células de menor cobertura, como as micro, pico e femto células, sobrepostas às macrocélulas empregadas tradicionalmente, gerando redes denominadas heterogêneas (RICHTER et al., 2009; KLESSIG et al., 2011; TOMBAZ et al., 2011a), em oposição à inclusão de mais ERBs tradicionais. Inicialmente esta estratégia pode simplesmente representar um acréscimo direto no consumo energético, visto que há um aumento do número de ERBs empregadas. No entanto, com o posicionamento adequado de células de pequeno alcance em regiões que apresentam alta demanda de tráfego ou na borda da macrocélula (região em que há maior interferência, com menor eficiência energética), pode-se prover a cobertura necessária com um reduzido gasto de energia, dado que as ERBs de micro, pico e femto células apresentam propriedades mais vantajosas em termos da eficiência energética. Nesta linha, podem ser destacados como fatores a serem explorados a análise da eficiência energética considerando os modelos realistas de consumo de ERBs considerados nesta tese em cenários heterogêneos com utilização de técnicas de transmissão de múltiplas antenas, além da análise do impacto que a cooperação entre as diversas estações em redes heterogêneas pode ter na eficiência do sistema.

REFERÊNCIAS

- AKBARI, A. et al. Average energy efficiency contours for single carrier awgn mac. In: **IEEE Vehicular technology Conference - VTC Spring 2011**. [S.l.: s.n.], 2011.
- AKYILDIZ, I. et al. A survey on sensor networks. **Communications Magazine, IEEE**, v. 40, n. 8, p. 102 – 114, ago. 2002.
- ALAMOUTI, S. A simple transmit diversity technique for wireless communications. **Selected Areas in Communications, IEEE Journal on**, v. 16, n. 8, p. 1451 –1458, oct 1998.
- AUER, G. et al. How much energy is needed to run a wireless network? **Wireless Communications, IEEE**, v. 18, n. 5, p. 40–49, October 2011.
- BIGLIERI, E.; CAIRE, G.; TARICCO, G. Limiting performance of block-fading channels with multiple antennas. **Information Theory, IEEE Transactions on**, v. 47, n. 4, p. 1273 –1289, maio 2001.
- BIGLIERI, E. et al. **MIMO Wireless Communications**. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- BRANTE, G.; KAKITANI, M.; SOUZA, R. Energy efficiency analysis of some cooperative and non-cooperative transmission schemes in wireless sensor networks. **Communications, IEEE Transactions on**, v. 59, n. 10, p. 2671–2677, October 2011.
- BRANTE, G.; KAKITANI, M.; SOUZA, R. On the energy efficiency of some cooperative and non-cooperative transmission schemes in wsns. In: **Information Sciences and Systems (CISS), 2011 45th Annual Conference on**. [S.l.: s.n.], 2011.
- BRANTE, G. et al. Energy efficient transmission in mimo wireless sensor networks with antenna selection. In: **XXXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT2013)**. [S.l.: s.n.], 2013.
- CHEN, Z.; YUAN, J.; VUCETIC, B. Analysis of transmit antenna selection/maximal-ratio combining in rayleigh fading channels. **Vehicular Technology, IEEE Transactions on**, v. 54, n. 4, p. 1312–1321, July 2005.
- CUI, S.; GOLDSMITH, A.; BAHAI, A. Energy-constrained modulation optimization. **Wireless Communications, IEEE Transactions on**, v. 4, n. 5, p. 2349 – 2360, 2005.
- DOHLER, M. et al. Is the phy layer dead? **Communications Magazine, IEEE**, v. 49, n. 4, p. 159 –165, april 2011.
- GOLDEN, G. et al. Detection algorithm and initial laboratory results using v-blast space-time communication architecture. **Electronics Letters**, v. 35, n. 1, p. 14–16, Jan 1999.
- GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005.

GRANT, A. Performance analysis of transmit beamforming. **Communications, IEEE Transactions on**, v. 53, n. 4, p. 738–744, April 2005.

HAMZA, A. et al. A survey on inter-cell interference coordination techniques in ofdma-based cellular networks. **Communications Surveys Tutorials, IEEE**, v. 15, n. 4, p. 1642–1670, Fourth 2013.

HASAN, Z.; BOOSTANIMEHR, H.; BHARGAVA, V. Green cellular networks: A survey, some research issues and challenges. **Communications Surveys Tutorials, IEEE**, v. 13, n. 4, p. 524–540, Fourth 2011.

HOSSAIN, E.; KIM, D.; BHARGAVA, V. **Cooperative Cellular Wireless Networks**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2011.

KAKITANI, M.; BRANTE, G.; SOUZA, R. Energy efficiency analysis of a two dimensional cooperative wireless sensor network with relay selection. **Radioengineering**, v. 22, n. 2, p. 549–557, June 2013.

KAKITANI, M. et al. Comparing the energy efficiency of Single-Hop, Multi-Hop and incremental Decode-and-Forward in Multi-Relay wireless sensor networks. In: **22nd IEEE Personal Indoor Mobile Radio Communications (PIMRC'11 - LPAN)**. Toronto, Canada: [s.n.], 2011.

KAKITANI, M. et al. Energy efficiency of amplify-and-forward, repetition coding and parallel coding in short range communications. In: **Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2012 35th International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 212–216.

KAKITANI, M. et al. Energy and cost analysis of cellular networks under co-channel interference. In: **Communications (LATINCOM), 2013 IEEE Latin-America Conference on**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–5.

KAKITANI, M. et al. Energy efficiency of some non-cooperative, cooperative and hybrid communication schemes in multi-relay wsns. **Wireless Networks**, Springer US, v. 19, n. 7, p. 1769–1781, 2013.

KAKITANI, M. et al. Energy efficiency of transmit diversity systems under a realistic power consumption model. **Communications Letters, IEEE**, v. 17, n. 1, p. 119–122, January 2013.

KAKITANI, M.; SOUZA, R.; IMRAN, M. Energy efficiency contours for amplify-and-forward and decode-and-forward cooperative protocols. In: **Communication Systems, Networks Digital Signal Processing (CSNDSP), 2012 8th International Symposium on**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–5.

KAKITANI, M. T. et al. Downlink energy efficiency analysis of some multiple antenna systems. In: **Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2013 IEEE 77th**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–5.

KHORMUJI, M.; LARSSON, E. Cooperative transmission based on decode-and-forward relaying with partial repetition coding. **Wireless Communications, IEEE Transactions on**, v. 8, n. 4, p. 1716–1725, april 2009.

- KLESSIG, H.; FEHSKE, A.; FETTWEIS, G. Energy efficiency gains in interference-limited heterogeneous cellular mobile radio networks with random micro site deployment. In: **Sarnoff Symposium, 2011 34th IEEE**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–6.
- KNOPP, R.; HUMBLET, P. On coding for block fading channels. **Information Theory, IEEE Transactions on**, v. 46, n. 1, p. 189–205, jan. 2000.
- LANEMAN, J.; TSE, D.; WORNELL, G. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. **Information Theory, IEEE Transactions on**, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, dec. 2004.
- LEE, H.; HEATH, R.; POWERS, E. Information outage probability and diversity order of alamouti transmit diversity in time-selective fading channels. **Vehicular Technology, IEEE Transactions on**, v. 57, n. 6, p. 3890–3895, Nov 2008.
- LOYKA, S.; GAGNON, F. Performance analysis of the v-blast algorithm: an analytical approach. **Wireless Communications, IEEE Transactions on**, v. 3, n. 4, p. 1326–1337, July 2004.
- MALKAMAKI, E.; LEIB, H. Coded diversity on block-fading channels. **Information Theory, IEEE Transactions on**, v. 45, n. 2, p. 771–781, mar. 1999.
- MURTHY, C. S. R.; MANOJ, B. **Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols**. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2004. ISBN 013147023X.
- ONIRETI, O.; HELIOT, F.; IMRAN, M. On the energy efficiency-spectral efficiency trade-off in the uplink of comp system. **Wireless Communications, IEEE Transactions on**, v. 11, n. 2, p. 556–561, February 2012.
- PAULRAJ, A.; NABAR, R.; GORE, D. **Introduction to Space-Time Wireless Communications**. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2003.
- PENTIKOUSIS, K. In search of energy-efficient mobile networking. **Communications Magazine, IEEE**, v. 48, n. 1, p. 95–103, January 2010.
- RAPPAPORT, T. **Wireless Communications: Principles and Practice**. 2nd. ed. [S.l.]: Prentice Hall PTR, 2002.
- RICHTER, F.; FEHSKE, A.; FETTWEIS, G. Energy efficiency aspects of base station deployment strategies for cellular networks. In: **Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall), 2009 IEEE 70th**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5.
- SENDONARIS, A.; ERKIP, E.; AAZHANG, B. User cooperation diversity. part i. system description. **Communications, IEEE Transactions on**, v. 51, n. 11, p. 1927–1938, nov. 2003.
- SIMON, M. K.; ALOUINI, M.-S. **Digital Communication over Fading Channels**. [S.l.]: Wiley Interscience, 2004.
- TOMBAZ, S.; USMAN, M.; ZANDER, J. Energy efficiency improvements through heterogeneous networks in diverse traffic distribution scenarios. In: **Communications and Networking in China (CHINACOM), 2011 6th International ICST Conference on**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 708–713.

TOMBAZ, S.; VASTBERG, A.; ZANDER, J. Energy- and cost-efficient ultra-high-capacity wireless access. **Wireless Communications, IEEE**, v. 18, n. 5, p. 18–24, October 2011.

TSE, D.; VISWANATH, P. **Fundamentals of Wireless Communication**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.