

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

EDUARDO YABCZNSKI

**IMPACTO DE TÉCNICAS COM MÚLTIPLAS ANTENAS
EM UMA REDE DE SENSORES SEM FIO BASEADA EM
COOPERAÇÃO PROBABILÍSTICA**

TESE

CURITIBA

2022

EDUARDO YABCZNSKI

**IMPACTO DE TÉCNICAS COM MÚLTIPLAS ANTENAS
EM UMA REDE DE SENSORES SEM FIO BASEADA EM
COOPERAÇÃO PROBABILÍSTICA**

**Impact of Techniques with Multiple Antennas
on a Wireless Sensor Network Based on Probabilistic Cooperation**

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante

Coorientador: Prof. Dr. Richard Demo Souza

CURITIBA

2022



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

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

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



EDUARDO YABCZNSKI

**IMPACTO DE TÉCNICAS COM MÚLTIPLAS ANTENAS EM UMA REDE DE SENSORES SEM FIO
BASEADA EM COOPERAÇÃO PROBABILÍSTICA**

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

Data de aprovação: 16 de Dezembro de 2021

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

Prof Andre Augusto Mariano, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Evelio Martin Garcia Fernandez, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Guilherme Luiz Moritz, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Nelson Roque Yabcznski e Neuzi Mara Yabcznski (em memória), por sempre estarem ao meu lado; a minha irmã, Erika Yabcznski, pelo cuidado e carinho; ao meu orientador, Prof. Glauber Gomes de Oliveira Brante, por toda paciência, apoio e dedicação. Sem ele, certamente, meu "caminho" seria mais árduo; ao meu coorientador, Prof. Richard Demo Souza, pessoa extraordinária; a todas as pessoas que conheci durante esse trabalho, tornaram minha vida mais rica.

RESUMO

YABCZNSKI, Eduardo. **Impacto de Técnicas com Múltiplas Antenas em uma Rede de Sensores sem Fio Baseada em Cooperação Probabilística**. 2022. 54 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI)) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2022.

O presente trabalho avalia quais os efeitos no desempenho de uma rede de sensores sem fio ao adotar múltiplas antenas nos sensores em uma rede cooperativa. A ideia principal é combinar duas técnicas que exploram a diversidade espacial: cooperação e MIMO, do inglês *Multiple Input Multiple Output*. Nas análises dois esquemas MIMO foram utilizados: seleção de antena, do inglês *Antenna Selection (AS)* e a transmissão em feixe, do inglês *beamforming*, usando a técnica de decomposição de valor singular, do inglês *Singular Value Decomposition (SVD)*. A transmissão SISO, do inglês *Single Input Single Output*, também é considerada para fins de comparação. Para o esquema cooperativo foi modelada a probabilidade de ON-OFF para redes em que os nós possuem múltiplas antenas, estendendo análises da literatura que consideravam apenas nós com uma única antena. Dessa maneira pretende-se diminuir o consumo de energia prolongando a vida útil dos sensores fazendo com que haja um aumento na quantidade de informação efetivamente transmitida pela rede, sempre mantendo uma certa probabilidade de *outage* como restrição. Verificou-se que ao empregar as duas técnicas há um ganho significativo na quantidade de informação transmitida pela rede com destaque para o AS a curtas distâncias. Ao aumentar o número de antenas constatou-se que é necessário uma menor probabilidade ON-OFF de cooperação, havendo um ganho considerável para o AS e degradação no SVD. Também verificou-se que para cada tamanho da rede (distância entre os nós) há uma potência de transmissão na qual uma maior quantidade de informação pode ser transmitida. Por fim foi proposto um algoritmo de busca exaustiva para encontrar a melhor potência de transmissão para cada esquema de transmissão.

Palavras-chave: Rede de sensores. Comunicação cooperativa. Múltiplas antenas. Eficiência Energética.

ABSTRACT

YABCZNSKI, Eduardo. **Impact of Techniques with Multiple Antennas on a Wireless Sensor Network Based on Probabilistic Cooperation**. 2022. 54 p. Thesis (PhD in Electrical Engineering and Industrial Informatics) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2022.

The present work evaluates the effects on the performance of a wireless sensor network by adopting multiple antennas in the sensors in a cooperative network. The main idea is to combine two techniques that exploit spatial diversity: cooperation and MIMO. In the analyzes two MIMO schemes were used: Antenna selection (AS) and beamforming transmission using the singular value decomposition technique (SVD). The SISO transmission is also considered for comparison purposes. For the cooperative scheme, the probability of ON-OFF was modeled for networks in which the nodes have multiple antennas, extending analyzes of the literature that considered only nodes with a single antenna. In this way it is intended to reduce the energy consumption by extending the useful life of the sensors, increasing the amount of information effectively transmitted by the network, always maintaining a certain probability of *outage* as a restriction. It was verified that when both techniques are used there is a significant gain in the amount of information transmitted by the network with emphasis on the AS at short distances. By increasing the number of antennas, it was found that a lower ON-OFF probability of cooperation is required, providing a considerable gain for the AS and degradation in the SVD. It was also found that for each network size (distance between nodes) there is a transmission power at which a greater amount of information can be transmitted. Finally, an exhaustive search algorithm was proposed to find the best transmission power for each transmission scheme.

Keywords: Sensors network. Cooperative communication. Multiple antennas. Energy Efficiency.

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Busca Exhaustiva	33
--	----

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo da rede mostrando uma transmissão em <i>broadcast</i> do nó S_i e uma retransmissão do nó (<i>relay</i>) S_k	20
Figura 2 – Modelo da rede mostrando uma transmissão cooperativa MIMO entre o nó de origem S_i , o nó de <i>relay</i> S_k e o nó de destino S_d , empregando n antenas.	22
Figura 3 – Rede com $M = 24$ nós de sensores distribuídos e espaçados igualmente em uma área com $D = 200$ metros de lado	36
Figura 4 – Probabilidade de <i>outage</i> sem otimização ($\xi_{ij} = 1$) do SISO, AS e SVD para $m \in \{1, 2, 3\}$ com $n = 2$ antenas, $\alpha = 4$ e $D = 200$ m.	37
Figura 5 – Quantidade de informação efetivamente transmitida para SISO, AS e SVD, antes e depois da otimização da probabilidade de cooperação ON-OFF com 2 antenas, 4 antenas e $D = 200$ m	38
Figura 6 – Valor médio da probabilidade cooperativa para cada grupo, variando a potência de transmissão para esquemas SISO, AS e SVD, $m = 1$, $\alpha = 4$, utilizando 2 e 4 antenas com $D = 200$ m.	40
Figura 7 – Quantidade de informação transmitida com potência dos circuitos de RF variando conforme Tabela 3, com $m = 1$, $D = 200$ m e $\alpha = 4$	41
Figura 8 – Quantidade de informação, com otimização de P_φ^* e ξ_i^* , em função do lado da área quadrada (D), para SISO, AS e SVD com $m = 1$ e $\alpha = 4$	42
Figura 9 – Quantidade de informação com otimização de P_φ^* e ξ_i^* em função da eficiência espectral, para SISO, AS e SVD com $D = 500$ m, $m = 1$ e $\alpha = 4$	42
Figura 10 – Média da probabilidade de cooperação ON-OFF em função da distância D para SISO, AS e SVD com antenas $n = 2$ e $\mathcal{P}_o = 10^{-3}$	44
Figura 11 – Média da probabilidade de cooperação ON-OFF em função da distância D para SISO, AS e SVD com antenas $n = 2$ e $\mathcal{P}_o = 10^{-4}$	45
Figura 12 – Quantidade de informação em função do número de antenas, com P_φ^* e ξ_i^* otimizados, para SISO, AS e SVD com $D = 200$ m.	45
Figura 13 – Quantidade de informação em função do número de antenas, com P_φ^* e ξ_i^* otimizados, para SISO, AS e SVD com $D = 500$ m.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação com os Trabalhos Relacionados	17
Tabela 2 – Parâmetros e Valores do Sistema	36
Tabela 3 – Potência do circuito de transmissão em relação a potência de transmissão. .	41
Tabela 4 – Ganho relativo, em termos de quantidade de informação, utilizando a otimização de potência em relação ao caso de potência de transmissão fixa com $P_{i,\varphi} = 20$ dBm com $n = 2$ antenas.	43

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

SIGLAS

ACK	Confirmação, do inglês <i>Acknowledgement</i>
AS	Seleção de Antena, do inglês <i>Antenna Selection</i>
BER	Taxa de Bits Errados, do inglês <i>Bit Error Rate</i>
BP	Fase de Difusão, do inglês <i>Broadcasting Phase</i>
BPSO	Otimização por Enxames de Partículas Binárias, do inglês <i>Binary Particle Swarm Optimization</i>
CP	Fase de Cooperação, do inglês <i>Cooperative Phase</i>
CSMA-CA	Acesso múltiplo com verificação de portadora com prevenção de colisão, do inglês <i>Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
IDF	Decodifica-e-Encaminha Incremental, do inglês <i>Incremental Decode-and-Forward</i>
IoT	Internet das Coisas, do inglês <i>Internet of Things</i>
LOS	Linha de visada, do inglês <i>Line-of-sight</i>
M2M	Máquinas a Máquinas, do inglês <i>Machine-to-Machine</i>
MIMO	Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas, do inglês <i>Multiple-input and Multiple-output</i>
NACK	Confirmação Negativa, do inglês <i>Negative Acknowledgement</i>
PPP	Ponto de Poisson, do inglês <i>Poisson Point Process</i>
PSO	Otimização por Enxames de Partículas, do inglês <i>Particle Swarm Optimization</i>
QoS	Qualidade de Serviço, do inglês <i>Quality of Service</i>
RF	Radiofrequência, do inglês <i>Radio Frequency</i>
SISO	Uma Antena na Transmissão e na Recepção, do inglês <i>Single-Input Single-Output</i>
SNR	Relação sinal-ruído, do inglês <i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SQP	Programação Quadrática Sequencial, do inglês <i>Sequential Quadratic Programming</i>
SVD	Decomposição em Valores Singulares, do inglês <i>Singular Value Decomposition</i>
TDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo, do inglês <i>Time-Division Multiple Access</i>
WuR	Rádio Despertador, do inglês <i>Wake-up Radio</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

NOTAÇÕES

α	Expoente de perda de percurso
B	Largura de banda utilizada
$\mathcal{B}_T^{(\text{sch})}$	Quantidade de informação efetivamente transmitida pela rede, pelo esquema (sch), até que um primeiro nó esgote a energia de sua bateria
$\gamma_{ik,\varphi}$	Relação sinal-ruído instantânea do enlace entre os nós S_i e S_k na fase φ
γ_o	Relação sinal-ruído pré-determinada
$\bar{\gamma}_{ik,\varphi}$	Relação sinal-ruído média entre os nós S_i e S_k na fase φ
c	Velocidade da luz no vácuo
D	Comprimento do lado da área quadrada da rede
d_{ik}	Distância entre os nós S_i e S_k
\mathcal{E}_{\max}	Energia máxima da bateria quando carregada
E_i	Energia total consumida pelo nó S_i ao transmitir N_T mensagens
$E_{i,c}$	Energia consumida ao transmitir como <i>relay</i>
$E_{i,r}$	Energia consumida ao receber a mensagem de outros nós
$E_{i,t}$	energia consumida na transmissão direta
e_r	Energia consumida por nó durante a recepção de uma mensagem
e_t	Energia consumida por nó durante a transmissão de uma mensagem
η	Eficiência do amplificador de potência
f_c	Frequência da portadora
$\Gamma(a,x)$	Função Gamma Incompleta Superior
$\Gamma(x)$	Função Gamma
G	ganho total das antenas
$\mathbf{H}_{ik,\varphi}$	Matriz de coeficientes de desvanecimento do canal sem fio entre os nós S_i e S_k na fase φ
$h_{ik,\varphi}$	variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas com distribuição Nakagami- m
κ_{ik}	Coefficiente de perda de percurso entre os nós S_i e S_k
$I^{(\text{sch})}$	Informação mútua entre dois nós quaisquer no esquema de transmissão (sch)
ξ_{ij}	Probabilidade ON-OFF do <i>relay</i> S_j cooperar com o nó S_i
ξ_{ij}^*	Probabilidade ON-OFF ótima do <i>relay</i> S_j cooperar com o nó S_i
L	Tamanho da mensagem
M	Número de nós de sensores

N_T	Número de mensagens transmitidas até que um primeiro nó da rede esgote a energia de sua bateria
N_0	Densidade espectral da potência do ruído
n	Número de antenas
\hat{n}	Número de antenas ativas
ν	Número aleatório, uniformemente distribuído entre zero e um
$\mathcal{P}_i^{(\text{sch})}$	Probabilidade total de <i>outage</i> de S_i utilizando o esquema de transmissão (sch)
$\Pr\{\mathbf{S}_{-j}^*\}$	probabilidade dos nós, cujos índices pertencem a \mathbf{S}_{-j}^* , que possam decodificar a mensagem de S_i com sucesso e os nós que não pertençam ao conjunto \mathbf{S}_{-j}^* não possam.
P_{ct}	Potência consumida pelo circuito de transmissão
P_{cr}	Potência consumida pelo circuito de recepção
$P_{i,\varphi}$	Potência total de transmissão do nó S_i durante a fase φ
P_φ^*	Potência ótima de transmissão na fase φ
$\tilde{p}_{ij,\varphi}^{(\text{sch})}$	Probabilidade de <i>outage</i> do enlace entre os nós S_i e S_j , do esquema (sch), na fase φ
$\tilde{p}_{ij,\varphi}^{(\text{sch})}$	Probabilidade de <i>outage</i> ON-OFF do enlace entre os nós S_i e S_j , do esquema (sch), na fase φ
ρ_{ij}	Probabilidade de retransmissão de S_j em relação a S_i
\mathcal{R}_o	Taxa de transmissão
\mathbf{S}	Conjunto dos nós de sensores
\mathbf{S}_{-i}	Conjunto \mathbf{S} excluindo o nó i
\mathbf{S}_{-j}^*	Conjunto de nós que decodificaram a mensagem com sucesso, excluindo o nó j
$\bar{\mathbf{S}}_{-j}^*$	Complemento do conjunto \mathbf{S}_{-j}^*
S_d	Nó de destino (nó central)
φ	Fase de transmissão ou cooperação
t_j	Tempo de espera antes de retransmitir
$\mathbf{w}_{k,\varphi}$	Vetor de variáveis aleatórias Gaussianas
w_i^2	Autovalor da matriz $\mathbf{H}_{ij}\mathbf{H}_{ij}^T$
\mathbf{x}	Vetor de transmissão de símbolo com energia unitária
$\mathbf{y}_{ik,\varphi}$	Sinal recebido numa transmissão entre os nós S_i e S_k na fase φ
z	Menor quantidade de antenas utilizada nos nós na transmissão SVD
$\ \cdot\ _F$	norma de Frobenius
$ \cdot ^2$	Módulo quadrático de um número complexo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2	MODELO DO SISTEMA	20
2.1	MODELO DE CANAL	21
2.2	PROBABILIDADE DE <i>OUTAGE</i>	23
2.2.1	Probabilidade de <i>Outage</i> do Esquema SISO	24
2.2.2	Probabilidade de <i>Outage</i> do Esquema AS	25
2.2.3	Probabilidade de <i>Outage</i> do Esquema SVD	26
2.3	PROBABILIDADE DE RETRANSMISSÃO	26
3	QUANTIDADE DE INFORMAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA	29
3.1	QUANTIDADE DE INFORMAÇÃO	29
3.2	MODELO DE CONSUMO DE ENERGIA	29
4	REDUZINDO O CONSUMO DE ENERGIA	32
4.1	ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO	32
4.2	CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE ON-OFF	33
4.2.1	Método de Otimização	34
5	RESULTADOS NUMÉRICOS	35
5.1	POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO FIXA	36
5.2	POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO OTIMIZADA	41
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	47
6.1	TRABALHOS FUTUROS	48
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

A Internet das coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT), é uma tecnologia promissora que impactará cada vez mais no dia a dia das pessoas e na economia. O objetivo é criar uma rede conectando tudo: humanos a humanos, humanos a máquinas, e máquinas a máquinas, do inglês *Machine-to-Machine* (M2M), a qualquer hora, de qualquer lugar (CHEN *et al.*, 2017). A demanda por aplicações IoT vem crescendo na saúde, nas indústrias, na agricultura, na gestão de infraestrutura de cidades, no monitoramento de ambientes hostis, na área militar, etc. (NIŽETIĆ *et al.*, 2020; HASSAN *et al.*, 2020). Segundo (SINHA, 2021), a previsão para 2025, que era, inicialmente de 30,9 bilhões de dispositivos IoT conectados em todo o mundo, foi rebaixada para 27,1 bilhões devido ao impacto que a pandemia de COVID-19 causou em toda a cadeia de produção de *chips*/semicondutores e mercado consumidor. Como resultado, apesar do mercado de IoT triplicar até 2025, seu crescimento será cerca de 20% menor do que o esperado sem a pandemia (INTELLIGENCE, 2020). No entanto, o mercado global de IoT ainda deverá ultrapassar 1 trilhão de dólares em 2024 (GLOBALDATA, 2021).

As características desejáveis de uma infraestrutura para IoT dependem de onde e para que fim será empregada. Por exemplo: no monitoramento de pacientes e monitoramento para controle de tráfego, as informações devem estar disponíveis em tempo real. Portanto, além de ser segura e robusta, o atraso deverá ser o menor possível na comunicação dos dispositivos. Em muitas aplicações agrícolas e monitoramento de ambientes, o importante é a área de cobertura e o tempo de vida dos dispositivos. Uma das características mais desejadas em uma rede de sensores sem fio, independente da utilização/aplicação, é que seu consumo de energia seja o mais baixo possível, prolongando a vida útil dos sensores, pois, em muitos casos, a troca dessas baterias não é viável financeiramente ou pela logística e riscos exigidos (RAULT *et al.*, 2014).

Utilizar múltiplas antenas para explorar a diversidade espacial é uma das abordagens mais comuns para reduzir o consumo de energia de transmissão, uma vez que o amplificador de potência é um dos elementos que mais consome potência na cadeia de radiofrequência (RF) (SANTOS *et al.*, 2019). A técnica conhecida como MIMO, do inglês *Multiple-input and Multiple-output*, emprega múltiplas antenas na transmissão e recepção, explorando a diversidade espacial, aumentando a razão sinal-ruído, do inglês, *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), o que permite diminuir a potência de transmissão, mantendo a mesma probabilidade de *outage*, quando comparado a um sistema SISO, do inglês *Single-input and Single-output*, ou seja, quando comparado a

um sistema utilizando uma só antena (CUI *et al.*, 2004). Entretanto, ao aumentar o número de antenas também aumenta o número de circuitos de RF, aumentando o consumo de energia.

Como alternativa, ou mesmo um complemento às técnicas MIMO, a diversidade espacial também pode ser alcançada através de comunicação cooperativa (LANEMAN *et al.*, 2004). Neste tipo de transmissão, além do nó de origem e o nó de destino, existe um terceiro nó, chamado nó repetidor, ou *relay*, responsável por cooperar com o nó de origem na transmissão para o nó de destino. Esse nó repetidor compartilha sua antena/recursos com o nó de origem. Assim o nó de origem utiliza as suas próprias antenas e as antenas do *relay* para formar um conjunto (virtual) maior de múltiplas antenas, aumentando o ganho de diversidade. Em uma transmissão cooperativa, o nó de origem faz um *broadcast* da mensagem a fim de transmitir ao nó de destino. Outros nós, os nós de *relay*, que também detectaram a mensagem, retransmitem-na ao nó de destino, assim a mensagem chega ao nó de destino por diversos caminhos (com diferentes desvanecimentos), aumentando a probabilidade de um desses sinais ser decodificado corretamente. Para que os nós *relays* detectem a mensagem de *broadcast* do nó de origem, é necessário que seu circuito de recepção esteja ligado, consumindo energia e diminuindo sua vida útil. Ao utilizar outro nó (*relay*) para cooperar e retransmitir a mensagem do nó de origem, pode haver um aumento do consumo de energia total, pois apesar da diminuição da potência de transmissão, há a adição de mais circuitos de RF pertencentes aos nós de *relay*, aumentando o consumo global de energia.

A eficiência energética em redes de sensores sem fios foi amplamente estudada na literatura (AZIZ *et al.*, 2012; XU *et al.*, 2017; LIN *et al.*, 2020). Não obstante, devido ao constante crescimento das redes de IoT, este assunto tem recebido um interesse renovado, especialmente tendo em conta a otimização do período de dormência do nós sensores (BORDON *et al.*, 2017; SHAH *et al.*, 2020; AYADI *et al.*, 2018; COLLOTTA *et al.*, 2019; HAMMOOD *et al.*, 2018). Por exemplo, para aumentar o tempo de vida da rede, sem comprometer o desempenho, os autores de (BORDON *et al.*, 2017) propuseram um esquema cooperativo, onde os nós são equipados apenas com uma antena omnidirecional e o circuito de recepção de cada *relay* é ligado ou desligado de acordo com uma probabilidade ON-OFF. Esta probabilidade considera os requisitos do sistema e a posição relativa do nó sensor. Em seguida, para determinar a probabilidade ótima de ON-OFF, os autores elaboraram um problema de otimização para maximizar a quantidade de informação efetivamente transmitida pela rede, dada uma restrição de qualidade de serviço, do inglês *Quality of Service* (QoS).

De maneira alternativa, os autores de (SHAH *et al.*, 2020) propuseram um algoritmo dinâmico de atribuição de *duty-cycle* baseado na distância, a fim de regular períodos de dormência dos nós dentro de um *cluster*. Os nós mais próximos do *gateway*, transmitem com *duty-cycle* maiores, uma vez que requerem menor potência de transmissão, enquanto os nós mais afastados transmitem com *duty-cycle* menores. Os resultados mostram que o algoritmo proposto consome menos energia do que outras técnicas na literatura, aumentando a vida útil da rede. No entanto, ao custo de aumentar a latência da rede.

As características do protocolo de acesso múltiplo com detecção de portadora com prevenção de colisão, do inglês *Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA-CA), são exploradas em (AYADI *et al.*, 2018) a fim de ajustar o ciclo dos nós em uma rede IEEE 802.15.4. Em primeiro lugar, o controlador estima a quantidade de energia restante nos nós, de modo que, se estiver abaixo de um limiar especificado, o controlador reduz o *duty-cycle* do nó. Como resultado, a vida útil da rede é prolongada, uma vez que os nós permanecem no estado de dormência por períodos mais longos. Além disso, uma abordagem de lógica *fuzzy* foi considerada por (COLLOTTA *et al.*, 2019) tanto para as tecnologias IEEE 802.15.4 como para WirelessHART. Sabendo o nível restante da bateria, a razão *throughput-to-workload* e a qualidade do enlace, o controlador *fuzzy* é responsável por ajustar o tempo de dormência e a potência de transmissão dos dispositivos. Simulações e resultados experimentais mostram um aumento de 26% no tempo de vida útil dos dispositivos IEEE 802.15.4 e 40% nos dispositivos WirelessHART, em comparação com o caso habitual, onde o tempo de dormência é igual ao período de amostragem e a transmissão ocorre com potência fixa.

Em (HAMMOOD *et al.*, 2018) a saúde de um paciente é monitorada utilizando IEEE 802.15.6 com base em um protocolo cooperativo. A abordagem proposta utiliza dois nós de coordenação, um no corpo (*on-body*) e o outro fora do corpo. Na primeira fase de transmissão, os sensores realizam *broadcast* para ambos os coordenadores, enquanto que a fase de cooperação só ocorre se o coordenador fora do corpo não recebe a informação corretamente, então a retransmissão é feita pelo coordenador que está no corpo. O algoritmo proposto minimiza o número de retransmissões, reduzindo a taxa de bits errados, do inglês *Bit Error Rate* (BER), o que afeta diretamente o *duty-cycle* e, conseqüentemente, a potência média de transmissão dos nós. Como resultado, a eficiência energética aumenta, enquanto que a BER é reduzida quatro vezes em comparação com uma abordagem de transmissão direta.

Outras abordagens complementares, não centradas especificamente em aspectos de

comunicação, podem ser encontrados em (SHU *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2020). Em (SHU *et al.*, 2016), o objetivo é maximizar o tempo de monitoramento de uma certa área, dada a limitação energética dos nós sem fio. Além disso, os autores assumem que as áreas de cobertura dos nós se sobrepõem e que é possível recarregar os nós. É proposto ativar diferentes conjuntos de nós em tempos diferentes a fim de equalizar o consumo de energia e aumentar a vida útil da rede. Também é proposta uma estratégia de reabastecimento de energia. No entanto, o enfoque está unicamente no aspecto de detecção, não sobre a comunicação entre nós e *gateway*, que é o foco deste trabalho. No artigo (LIU *et al.*, 2020) é proposto um método de aprendizagem de máquina para compensar alguns dados errados/faltantes dos sensores, assumindo que existe alguma correlação na medição realizada por alguns sensores devido à proximidade espacial.

Nesta tese, o objetivo é aumentar a eficiência energética de uma rede IoT composta por dispositivos sensores. Mais especificamente, recorreu-se a abordagens cooperativas com múltiplas antenas, nomeadamente a seleção de antenas, do inglês *Antenna Selection* (AS) e a transmissão através de formação de feixe de transmissão usando a técnica de decomposição de valor singular, do inglês *Singular Value Decomposition* (SVD). Note que estão a ser desenvolvidas antenas cada vez menores para dispositivos IoT (KARIM *et al.*, 2019), (KUMAR *et al.*, 2020), (CHATTHA *et al.*, 2021), que justificam a investigação. Em particular, exploramos o fato de que os nós de redes de sensores sem fios normalmente empregam *duty-cycle* para poupar energia, de modo que os seus circuitos mudem constantemente entre estados ativos e adormecidos. Diferentemente dos autores de (SHAH *et al.*, 2020; AYADI *et al.*, 2018; COLLOTTA *et al.*, 2019; HAMMOOD *et al.*, 2018), não consideramos o *duty-cycle* de um esquema MAC em particular, como o IEEE 802.15.4 (AYADI *et al.*, 2018; COLLOTTA *et al.*, 2019), WirelessHART (COLLOTTA *et al.*, 2019) ou IEEE 802.15.6 (HAMMOOD *et al.*, 2018). Por outro lado, consideramos técnicas cooperativas e técnicas de múltiplas antenas nos nós sensores, o que altera consideravelmente a otimização dos períodos ON-OFF em função do esquema de transmissão utilizado. Considera-se que os nós podem otimizar a sua potência de transmissão e adaptar os seus *duty-cycles* em grupos, dependendo da distância em relação ao nó considerado como *gateway*. Assim, diferentes *duty-cycle* são distribuídos ao longo da rede, diferentemente dos autores de (SHAH *et al.*, 2020; AYADI *et al.*, 2018; COLLOTTA *et al.*, 2019; HAMMOOD *et al.*, 2018) que consideraram o mesmo *duty-cycles* para cada nó da rede. Estes resultados podem ser adaptados a qualquer padrão MAC. Um resumo das diferenças mais relevantes entre esta tese e os trabalhos relacionados é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação com os Trabalhos Relacionados

Referência	Duty Cycle	Múltiplas Antenas	Cooperaração	Alocação de Potência
Esta Tese	Não-Uniforme	✓	✓	✓
(BORDON <i>et al.</i> , 2017)	Não-Uniforme	×	✓	×
(SHAH <i>et al.</i> , 2020)	Uniforme	×	×	×
(AYADI <i>et al.</i> , 2018)	Uniforme	×	×	×
(COLLOTTA <i>et al.</i> , 2019)	Uniforme	×	×	×
(HAMMOOD <i>et al.</i> , 2018)	Uniforme	×	×	×

Fonte: Autoria Própria.

Assim, estabelece-se uma probabilidade ON-OFF para a cadeia de circuito de RF de recepção, dos *relays*, baseada em (BORDON *et al.*, 2017), com o objectivo de aumentar a quantidade de informação que circula na rede, ou seja, o número total de bits transmitidos pelos sensores durante a sua vida útil. No entanto, diferentemente do trabalho em (BORDON *et al.*, 2017), consideramos também a utilização de múltiplas antenas nos nós sensores bem como o controle de potência de transmissão. Então, maximiza-se os estados adormecidos dos dispositivos, respeitando a restrição de *outage*. Como consequência, a cooperação ocorre baseada nessa probabilidade otimizada de ON-OFF, que depende do número total de sensores, número de antenas e da técnica MIMO empregada. Esta abordagem é consideravelmente diferente daquela apresentada na literatura, de modo que os resultados mostram um aumento da quantidade de informação efetivamente transmitida pela rede, com a AS sendo a técnica particularmente importante neste cenário. Além disso, com um número maior de antenas, os resultados mostram que é necessária uma menor probabilidade de cooperação, proporcionando um ganho considerável para o AS e degradação no SVD. Mostrou-se, também, que há uma potência de transmissão ótima que maximiza a quantidade de informação, dependente da distância entre os nós. Posteriormente, empregou-se a programação quadrática sequencial, do inglês *Sequential Quadratic Programming* (SQP) e um algoritmo de busca exaustiva para resolver a otimização conjunta da potência de transmissão e da probabilidade ON-OFF, produzindo um ganho considerável na quantidade de informação efetivamente transmitida em comparação com o cenário com potência de transmissão fixa. Os resultados numéricos demonstram a importância do controle da potência de transmissão e o uso de múltiplas antenas, a fim de alcançar ganhos relevantes em termos de informação transmitida na rede em relação à que foi alcançada em (BORDON *et al.*, 2017).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos no desempenho da rede de sensores sem fio cooperativa, dado pela quantidade de informação efetivamente transmitida, ao adotar múltiplas antenas nos sensores e controle de potência. A ideia é combinar duas técnicas que exploram a diversidade espacial: cooperação e MIMO.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Comparar dois esquemas MIMO: AS e a transmissão *beamforming* usando a técnica SVD (BIGLIERI *et al.*, 2007) na rede de sensores sem fio cooperativa proposta. A transmissão SISO também é considerada nas comparações, para referência;
- Modelar a técnica de cooperação entre os sensores como um problema de otimização, onde os *relays* ligam e desligam seus circuitos receptores segundo uma probabilidade de ON-OFF, visando prolongar a vida útil da rede como acontece em (BORDON *et al.*, 2017);
- Alocar potência de transmissão visando reduzir ainda mais o consumo de energia e maximizar a quantidade de informação, i.e., maximizar o número de *bits* transmitidos durante o tempo de vida útil da rede.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 serão feitas algumas considerações, tais como o modo de cooperação adotado e a especificação do cenário. Será apresentado o modelo do canal, definida a probabilidade de *outage* da transmissão cooperativa, as probabilidades de *outage* dos enlaces (origem-destino, origem-*relay*, *relay*-destino) para cada esquema de transmissão proposto, e a probabilidade de retransmissão/cooperação de um nó qualquer caso a transmissão direta falhe.

No Capítulo 3 são definidas a quantidade de informação e o modelo de consumo de energia. Ao passo que no Capítulo 4 é elaborada a formulação para a redução do consumo de energia, alocando potência de transmissão e otimizando as probabilidades de ON-OFF, sem ultrapassar uma determinada *outage* limite. No mesmo capítulo é apresentada uma técnica para a

solução do problema de otimização ON-OFF e ainda um algoritmo baseado em busca exaustiva para encontrar a melhor potência de transmissão que maximiza a quantidade de informação a uma determinada distância.

Os resultados numéricos dos esquemas propostos serão discutidos no Capítulo 5, comparando as técnicas MIMO e SISO, e verificando o efeito de se alocar uma certa potência de transmissão para os nós da rede de sensores.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta algumas considerações/conclusões finais do trabalho e propostas de melhorias e expansão do estudo para trabalhos futuros.

\mathcal{R}_o bps. Apesar de todos os nós poderem agir como *relays* e cooperarem com a transmissão de outros nós, alguns desses *relays* podem estar adormecidos (OFF) durante a transmissão de outros nós. Então, quando S_i transmite durante seu *slot* de tempo, somente um subconjunto dos $M - 1$ nós acordados (ON) é capaz de captar e tentar decodificar o sinal recebido. Esta primeira fase da comunicação cooperativa é chamada de fase de difusão, do inglês *Broadcasting Phase* (BP).

Na segunda fase da comunicação cooperativa, chamada de fase de cooperação, do inglês *Cooperative Phase* (CP), o nó de destino indica sucesso ou falha na recepção através de difusão de uma mensagem de confirmação/confirmação negativa, do inglês *Acknowledgement/Negative Acknowledgement* (ACK/NACK). Esta mensagem é enviada utilizando um canal de retorno, assumido livre de erros. Se a transmissão falhou na primeira fase (BP), o *relay* que estiver ligado (estado ON) e com a maior SNR que foi capaz de decodificar a mensagem, é selecionado para retransmitir durante a fase de cooperação. No modelo adotado, o próprio nó de origem pode ser utilizado como nó de *relay*. Observe que somente um nó age como *relay*. A proposta é que cada nó coopere com os outros nós de maneira probabilística, ativando e/ou desativando o circuito de recepção na fase de *broadcast*, segundo a definição de probabilidade de ON-OFF (BORDON *et al.*, 2017). O estado do canal entre cada *relay* e o destino pode ser estimado graças a difusão da mensagem de controle (ACK/NACK) transmitido pelo nó de destino através do canal de retorno. Como proposto em (BLETSAS *et al.*, 2006), cada nó capaz de retransmitir pode calcular seu tempo de resposta, como sendo inversamente proporcional a SNR do sinal NACK recebido. O nó de origem não possui nenhuma informação dos canais (origem-destino ou origem-*relay*).

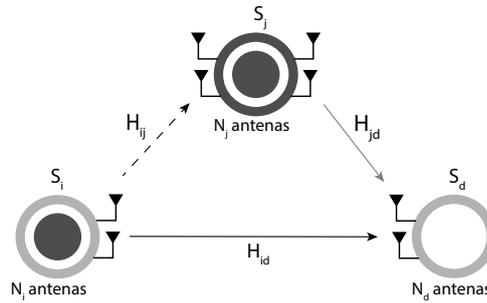
2.1 MODELO DE CANAL

Considerando apenas os três nós envolvidos no processo de comunicação: origem, *relay* e destino, representados por S_i , S_k e S_d respectivamente (Figura 2). Assumindo que todos os nós têm o mesmo *hardware*, estando equipados com n antenas (no entanto, a análise pode ser facilmente estendida ao caso em que cada nó tem um número diferente de antenas ativas), das quais \hat{n} estão ativas, sendo que $\hat{n} \leq n$. Então, o sinal recebido numa transmissão entre dois nós quaisquer é dado por:

$$\mathbf{y}_{ik,\varphi} = \sqrt{\frac{\kappa_{ik} P_{i,\varphi}}{\hat{n}}} \mathbf{H}_{ik,\varphi} \mathbf{x} + \mathbf{w}_{k,\varphi}, \quad (1)$$

onde $i \in \mathbf{S}$ representa o nó de origem e $k \in \{\mathbf{S} \cup \{d\}\} : k \neq i$ representa os potenciais retransmissores, atuando como o receptor, e o nó de destino. Além disso, $\varphi \in \{\text{BP}, \text{CP}\}$ representa

Figura 2 – Modelo da rede mostrando uma transmissão cooperativa MIMO entre o nó de origem S_i , o nó de relay S_k e o nó de destino S_d , empregando n antenas.



Fonte: Autoria Própria.

as fases de transmissão ou cooperação, $P_{i,\varphi}$ é a potência total de transmissão do nó S_i durante a fase φ , κ_{ik} é a perda de percurso e $\mathbf{H}_{ik,\varphi}$ é a matriz de coeficientes de desvanecimento do canal sem fio, de dimensão $\hat{n} \times \hat{n}$ do canal considerado quase-estático, cuja dimensão depende do esquema de transmissão, e cujos elementos $h_{ik,\varphi}$ são variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas com distribuição Nakagami- m , onde o valor de m pode variar para representar áreas urbanizadas, com várias construções, produzindo cópias difratadas, refletidas ou dispersas do sinal transmitido (aumentando a severidade do desvanecimento e diminuindo m), ou representar áreas rurais e com menos obstáculos (de desvanecimento menos severo e aumentando m). \mathbf{x} é o vetor $\hat{n} \times 1$ de transmissão de símbolo com energia unitária e $\mathbf{w}_{k,\varphi}$ é um vetor $\hat{n} \times 1$ de variáveis aleatórias Gaussianas (ruído Gaussiano branco) com variância $N_0/2$, sendo N_0 a densidade espectral da potência do ruído.

A perda de percurso do enlace é assumida como (GOLDSMITH, 2005):

$$\kappa_{ik} = \frac{c^2 G}{(4\pi f_c)^2 d_{ik}^\alpha}, \quad (2)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo, G é o ganho total das antenas, f_c é a frequência da portadora, d_{ik} é a distância entre os nós S_i e S_k e α é o expoente de perda de percurso. A SNR instantânea do enlace entre os nós S_i e S_k pode ser dada por:

$$\gamma_{ik,\varphi} = \|\mathbf{H}_{ik,\varphi}\|_F^2 \cdot \bar{\gamma}_{ik,\varphi}, \quad (3)$$

onde $\|\cdot\|_F$ é a norma de Frobenius (PAULRAJ *et al.*, 2003). Sendo o canal um canal com desvanecimento Nakagami- m , os coeficientes $|h_{ik,\varphi}|^2$ seguem uma distribuição Gamma com o parâmetro de desvanecimento m . A SNR média recebida por antena é:

$$\bar{\gamma}_{ik,\varphi} = \frac{\kappa_{ik} P_{i,\varphi}}{\hat{n} N_0 B}, \quad (4)$$

onde B é a largura de banda.

2.2 PROBABILIDADE DE *OUTAGE*

Considera-se que a transmissão entre dois nós falha se a SNR do canal está abaixo de uma SNR pré-determinada, γ_o , necessária para correta decodificação no receptor, onde $\gamma_o = 2^{\mathcal{R}_o/B} - 1$. A probabilidade de *outage* do enlace entre S_i e S_k é:

$$p_{ik,\varphi}^{(\text{sch})} = \Pr\{\gamma_{ik,\varphi} < \gamma_o\}, \quad i \in \mathbf{S}, k \in \{\mathbf{d}\} \cup \mathbf{S} : k \neq i. \quad (5)$$

sendo que $(\text{sch}) \in \{\text{SISO}, \text{AS}, \text{SVD}\}$.

Na transmissão IDF, a probabilidade de *outage* total (\mathcal{P}_i) ocorre quando o nó de origem não consegue realizar a comunicação na fase de *broadcast* com o nó de destino e o *relay* selecionado não consegue realizar a transmissão para o nó de destino na fase de cooperação, ou quando o nó de origem não consegue realizar a comunicação na fase de *broadcast* nem com o nó de destino e nem com os *relays*.

Cada nó S_j , $j \in \mathbf{S}$, agindo como *relay*, é capaz de estimar a SNR do canal $S_j \rightarrow S_d$ ($\gamma_{jd,\text{CP}}$) na fase de cooperação através da mensagem de NACK, transmitida pelo nó S_d , quando a transmissão direta $S_i \rightarrow S_d$ na fase de *broadcast* falha. De posse de $\gamma_{jd,\text{CP}}$, S_j espera um tempo $t_j \propto 1/\gamma_{jd,\text{CP}}$ antes de retransmitir. Assumindo o uso do protocolo de acesso múltiplo CSMA-CA, de modo a que a colisão não seja considerada na nossa análise, o nó de *relay* com maior SNR entre $S_j \rightarrow S_d$ será o que retransmitirá a mensagem. Considerando que somente um *relay* é selecionado, a SNR fim-a-fim de S_i quando a transmissão direta falha é (BORDON *et al.*, 2017):

$$\gamma^* = \max_{j \in \mathbf{S}} \{\min\{\gamma_{ij,\text{BP}}, \gamma_{jd,\text{CP}}\}\} \quad (6)$$

Então, a probabilidade total de *outage* de S_i é:

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_i^{(\text{sch})} &= \Pr\{\gamma_{id,\text{BP}} < \gamma_o, \gamma^* < \gamma_o\} \\ &= \Pr\left\{\gamma_{id,\text{BP}} < \gamma_o, \max_{j \in \mathbf{S}} \{\min\{\gamma_{ij,\text{BP}}, \gamma_{jd,\text{CP}}\}\} < \gamma_o\right\} \\ &= \Pr\{\gamma_{id,\text{BP}} < \gamma_o\} \prod_{j \in \mathbf{S}} (1 - \Pr\{\gamma_{ij,\text{BP}} > \gamma_o\} \Pr\{\gamma_{jd,\text{CP}} > \gamma_o\}) \\ &= \left(p_{id,\text{BP}}^{(\text{sch})}\right)^2 \prod_{j \in \mathbf{S}_{-i}} \left[p_{ij,\text{BP}}^{(\text{sch})} + p_{jd,\text{CP}}^{(\text{sch})} (1 - p_{ij,\text{BP}}^{(\text{sch})})\right], \end{aligned} \quad (7)$$

onde \mathbf{S}_{-i} é o conjunto \mathbf{S} excluindo o nó i .

Neste trabalho, é empregada a estratégia de probabilidade ON-OFF cooperativa (BORDON *et al.*, 2017), então cada *relay* ativa seu receptor, para cooperar com o nó de origem quando

este transmite na fase de difusão, de forma probabilística. Esta probabilidade é denotada por ξ_{ij} , $i, j \in \mathbf{S}$. Para decidir quando o circuito estará ativo para, potencialmente, cooperar com S_i em um dado *slot* de tempo, o nó de *relay* gera um número aleatório, uniformemente distribuído entre zero e um ($\nu = \mathcal{U}(0,1)$), que é comparado com ξ_{ij} . Se $\nu < \xi_{ij}$, então S_j ativa seu circuito (ON) e assim pode cooperar com S_i . Quando $\nu > \xi_{ij}$, S_j entra em modo adormecido (OFF) até que a transmissão de S_i encerre (*slot* de tempo). No caso em que $\xi_{ij} = 1$ (todos os *relays* sempre ligados), a probabilidade de *outage* do enlace é dado pela equação (5). Para $\xi_{ij} < 1$, a probabilidade de *outage* do enlace pode ser encontrada por:

$$\tilde{p}_{ij, \text{BP}}^{(\text{sch})} = 1 - \xi_{ij} \left(1 - p_{ij, \text{BP}}^{(\text{sch})}\right), \quad i, j \in \mathbf{S} : j \neq i. \quad (8)$$

Para encontrar a probabilidade de *outage* do caminho (total), basta substituir p_{ij} por \tilde{p}_{ij} na equação (7):

$$\mathcal{P}_i^{(\text{sch})} = \left(p_{id, \text{BP}}^{(\text{sch})}\right)^2 \prod_{j \in \mathbf{S}-i} \left[1 - \xi_{ij} \left(1 - p_{ij, \text{BP}}^{(\text{sch})}\nu\right) \left(1 - p_{jd, \text{CP}}^{(\text{sch})}\right)\right]. \quad (9)$$

As probabilidades de *outage* (dos enlaces), p_{id} , p_{ij} e p_{jd} dependem do esquema de transmissão utilizado, SISO, AS ou SVD, abordados nas próximas seções.

2.2.1 Probabilidade de *Outage* do Esquema SISO

Neste esquema os nós da rede de sensores possuem somente uma antena, ou seja, $n = \hat{n} = 1$. Então a informação mútua entre dois nós quaisquer é dada por:

$$I^{(\text{SISO})} = B \log_2(1 + \bar{\gamma}|h|^2), \quad (10)$$

onde h é o coeficiente do canal e $|\cdot|^2$ é o módulo quadrático de um número complexo. Considera-se que uma *outage* ocorre quando $I^{(\text{SISO})} < \mathcal{R}_o/B$ (GOLDSMITH, 2005), o que é equivalente à definição da equação 5.

Como o canal é um canal com desvanecimento Nakagami- m , então a probabilidade de *outage* de cada enlace é:

$$p_{ik, \varphi}^{(\text{SISO})} = 1 - \frac{\Gamma(m, m\gamma_0/\bar{\gamma}_{ik, \varphi})}{\Gamma(m)}, \quad i \in \mathbf{S}, k \in \{\text{d}\} \cup \mathbf{S} : k \neq i. \quad (11)$$

Onde $\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt$ é a função Gamma e $\Gamma(a, x) = \int_x^\infty e^{-t} t^{a-1} dt$ é a função Gamma incompleta superior (JEFFREY *et al.*, 2007).

2.2.2 Probabilidade de *Outage* do Esquema AS

Neste esquema os nós da rede de sensores possuem n antenas, no entanto somente uma antena é seleccionada para transmissão e uma para a recepção ($\hat{n} = 1$). Com o objectivo de seleccionar o par de antenas (transmissão-recepção) com a maior SNR, consideramos que alguns poucos símbolos pilotos são enviados por cada antena transmissora, dessa maneira o receptor é capaz de estimar a informação dos estados dos canais, do inglês *Channel State Information* (CSI), entre todas as antenas. Então, o índice da antena seleccionada é enviado para o transmissor, através de um canal de retorno livre de erros enquanto o receptor mantém apenas a melhor antena (em relação à antena de transmissão) ativa. O custo energético para a transmissão/recepção do bit de retorno não é considerado, uma vez que estes pacotes são muito curtos em comparação com os pacotes que transportam informação. Dessa forma é necessário somente um circuito de RF no transmissor e um circuito de RF no receptor. Como resultado, o menor consumo de energia é obtido uma vez que apenas uma cadeia de RF permanece ativa em cada lado. Na fase de dispersão a seleção de antenas é sempre entre o nó de origem (S_i) e o nó de destino (S_d) pois, segundo (BRANTE *et al.*, 2013), dessa maneira obtém-se um menor consumo de energia. Desde que as antenas sejam seleccionadas para maximizar a SNR, a informação mútua entre dois nós quaisquer pode ser calculada por:

$$I^{(AS)} = B \log_2(1 + \bar{\gamma} \max\{|h|^2\}), \quad (12)$$

onde $\max\{|h|^2\}$ é o coeficiente do canal entre o nó de origem e o nó de destino que maximiza a SNR. A probabilidade de *outage* do enlace entre S_i e S_k é dada por (LE *et al.*, 2015):

$$p_{ik,\varphi}^{(AS)} = \left(1 - \frac{\Gamma(m, m\gamma_0/\bar{\gamma}_{ik,\varphi})}{\Gamma(m)}\right)^{n^2}, \quad i \in \mathbf{S}. \quad (13)$$

Note que, tanto a fonte, como o *relay*, fazem a seleção de antenas em relação ao destino explorando totalmente a diversidade espacial dada por n^2 .

Do ponto de vista do *relay* S_j , a seleção de uma única antena do nó transmissor na fase de dispersão é considerado um evento aleatório. Sendo assim, a probabilidade de *outage* do enlace entre S_i e S_j é dada por:

$$p_{ij,BP}^{(AS)} = \left(1 - \frac{\Gamma(m, m\gamma_0/\bar{\gamma}_{ij,BP})}{\Gamma(m)}\right)^n, \quad i, j \in \mathbf{S} : j \neq i. \quad (14)$$

2.2.3 Probabilidade de *Outage* do Esquema SVD

Neste esquema os nós da rede de sensores utilizam todas as n antenas disponíveis e *beamforming* é aplicado utilizando SVD. *Beamforming* é uma técnica de processamento de sinais usada para controlar magnitude e fase dos sinais no receptor. Essa técnica é implementada através da decomposição em valores singulares da matriz de canal \mathbf{H} , a qual resulta em uma matriz de canal com n canais paralelos, ao custo do uso de uma pré-codificação no transmissor, bem como uma matriz de equalização a ser usada pelo receptor.

Assim, a informação mutua entre dois nós é calculada por:

$$I^{(\text{SVD})} = B \sum_{l=1}^z \log_2(1 + \bar{\gamma} w_l^2), \quad (15)$$

onde z é a menor quantidade de antenas utilizada nos nós e w_l^2 é o autovalor da matriz $\mathbf{H}_{ij} \mathbf{H}_{ij}^T$, em que \mathbf{H}_{ij}^T representa a matriz conjugada transposta de \mathbf{H}_{ij} . Pela desigualdade de Jensen's (TSE; VISWANATH, 2005):

$$\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \log_2(1 + \bar{\gamma} w_l^2) \leq \log_2 \left(1 + \bar{\gamma} \left(\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n w_l^2 \right) \right), \quad (16)$$

a informação mutua é dada pelo limite superior:

$$I^{(\text{SVD})} \leq zB \log_2 \left(1 + \bar{\gamma} \left(\frac{1}{z} \sum_{l=1}^z w_l^2 \right) \right) \quad (17)$$

Sendo o *beamforming* aplicado na BP e na CP, então a probabilidade de *outage* do enlace é:

$$p_{ik,\varphi}^{(\text{SVD})} \approx 1 - \frac{\Gamma(mn^2, mn(2^{\mathcal{R}_0/(Bn)} - 1)/\bar{\gamma}_{ik,\varphi})}{\Gamma(mn^2)}, \quad i \in \mathbf{S}, \quad (18)$$

onde n^2 aparece no primeiro termo da função Gamma graças ao *beamforming* aplicado entre as antenas dos nós.

Semelhante ao esquema AS, o *beamforming* é concebido apenas para o enlace fonte-destino, de modo que a probabilidade de *outage* do enlace entre fonte e *relay* na fase de *broadcast* pode ser calculada por:

$$p_{ij,\text{BP}}^{(\text{SVD})} \approx 1 - \frac{\Gamma(mn, mn(2^{\mathcal{R}_0/(Bn)} - 1)/\bar{\gamma}_{ij,\text{BP}})}{\Gamma(mn)}, \quad i, j \in \mathbf{S} : j \neq i. \quad (19)$$

2.3 PROBABILIDADE DE RETRANSMISSÃO

Outra informação relevante é a probabilidade de retransmissão do *relay*. Denominada como ρ_{ij} é a probabilidade do nó S_j ser selecionado como *relay* para retransmitir a mensagem de

S_i (já que a transmissão direta falhou). S_j é selecionado como *relay* se for capaz de decodificar com sucesso a mensagem de S_i (na fase de *broadcast*) e sua SNR do enlace $S_j \rightarrow S_d$, na fase de cooperação, for maior do que de todos os outros nós que também decodificaram a mensagem com sucesso, isto é, se

$$\gamma_{jd,CP} > \max_{l \in \mathbf{S}_{-j}^*} \{\gamma_{ld,CP}\}, \quad (20)$$

onde \mathbf{S}_{-j}^* representa o conjunto de nós que decodificaram a mensagem com sucesso, excluindo o nó j . Para um conjunto \mathbf{S}_{-j}^* , a probabilidade de que S_j retransmita a mensagem de S_i (limitado a \mathbf{S}_{-j}^*), segundo (BORDON *et al.*, 2017), pode ser calculada por:

$$\rho_{ij}(\mathbf{S}_{-j}^*) = \Pr \left\{ \max_{l \in \mathbf{S}_{-j}^*} \{\gamma_{ld,CP}\} < \gamma_{jd,CP} \right\}. \quad (21)$$

Considerando todos os possíveis conjuntos \mathbf{S}_{-j}^* , a probabilidade de retransmissão é

$$\rho_{ij} = \sum_{\mathbf{S}_{-j}^*} \Pr \left\{ \max_{l \in \mathbf{S}_{-j}^*} \{\gamma_{ld,CP}\} < \gamma_{jd,CP} \right\} \Pr\{\mathbf{S}_{-j}^*\}, \quad (22)$$

onde $\Pr\{\mathbf{S}_{-j}^*\}$ é a probabilidade dos nós, cujos índices pertencem a \mathbf{S}_{-j}^* , possam decodificar a mensagem de S_i com sucesso e os nós que não pertençam ao conjunto \mathbf{S}_{-j}^* não possam. Sendo $\bar{\mathbf{S}}_{-j}^*$ o complemento do conjunto \mathbf{S}_{-j}^* , o qual exclui o j -ésimo índice, $\Pr\{\mathbf{S}_{-j}^*\}$ pode ser calculado por:

$$\Pr\{\mathbf{S}_{-j}^*\} = \left[\prod_{l \in \mathbf{S}_{-j}^*} (1 - p_{il}^{(sch)}) \right] \left[\prod_{l \in \bar{\mathbf{S}}_{-j}^*} p_{il}^{(sch)} \right]. \quad (23)$$

Note que $\mathbf{S}_{-j} = \mathbf{S}_{-j}^* \cup \bar{\mathbf{S}}_{-j}^*$, o que implica em:

$$\left[\prod_{l \in \bar{\mathbf{S}}_{-j}^*} p_{il}^{(sch)} \right] \left[\prod_{l \in \mathbf{S}_{-j}^*} p_{il}^{(sch)} \right] = \prod_{l \in \mathbf{S}_{-j}} p_{il}^{(sch)}. \quad (24)$$

Usando esta identidade $\Pr\{\mathbf{S}_{-j}^*\}$ pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \Pr\{\mathbf{S}_{-j}^*\} &= \left[\prod_{l \in \mathbf{S}_{-j}^*} (1 - p_{il}^{(sch)}) \right] \left[\prod_{l \in \mathbf{S}_{-j}^*} \frac{p_{il}^{(sch)}}{p_{il}^{(sch)}} \right] \left[\prod_{l \in \bar{\mathbf{S}}_{-j}^*} p_{il}^{(sch)} \right] \\ &= \left[\prod_{l \in \mathbf{S}_{-j}^*} \frac{(1 - p_{il}^{(sch)})}{p_{il}^{(sch)}} \right] \left[\prod_{l \in \mathbf{S}_{-j}} p_{il}^{(sch)} \right]. \end{aligned} \quad (25)$$

Substituindo (25) em (22):

$$\rho_{ji} = \sum_{\mathbf{S}_{-j}^*} \Pr \left\{ \max_{l \in \mathbf{S}_{-j}^*} \{\gamma_{ld,CP}\} < \gamma_{jd,CP} \right\} \left[\prod_{l \in \mathbf{S}_{-j}^*} \frac{(1 - p_{il}^{(sch)})}{p_{il}^{(sch)}} \right] \left[\prod_{l \in \mathbf{S}_{-j}} p_{il}^{(sch)} \right]. \quad (26)$$

Para um valor fixo de $\gamma_{jd,CP}$, a probabilidade de retransmissão condicionada a $\gamma_{jd,CP}$ pode ser computada por:

$$\begin{aligned}
\rho_{ij}(\gamma_{jd,CP}) &= \left[\prod_{l \in \mathbf{S}_{-j}} p_{il}^{(\text{sch})} \right] \sum_{\mathbf{S}_{-j}^*} \prod_{l \in \mathbf{S}_{-j}^*} \frac{\Pr\{\gamma_{ld,CP} < \gamma_{jd,CP}\}}{p_{il}^{(\text{sch})} (1 - p_{il}^{(\text{sch})})^{-1}} \\
&= \left[\prod_{l \in \mathbf{S}_{-j}} p_{il}^{(\text{sch})} \right] \prod_{l \in \mathbf{S}_{-j}} \left[1 + \frac{\Pr\{\gamma_{ld,CP} < \gamma_{jd,CP}\}}{p_{il}^{(\text{sch})} (1 - p_{il}^{(\text{sch})})^{-1}} \right] \\
&= \prod_{l \in \mathbf{S}_{-j}} \left[1 - (1 - p_{il}^{(\text{sch})}) \Pr\{\gamma_{ld,CP} < \gamma_{jd,CP}\} \right]. \tag{27}
\end{aligned}$$

Então a probabilidade de retransmissão pode ser obtida por:

$$\rho_{ij} = \int_0^\infty \rho_{ij}(x) \frac{(m/\bar{\gamma}_{jd,CP})^m x^{m-1}}{\Gamma(m) e^{mx/\bar{\gamma}_{jd,CP}}} dx, \tag{28}$$

onde $\rho_{ij}(x)$ é obtida a partir da equação (27).

3 QUANTIDADE DE INFORMAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA

Neste capítulo será definida e formulada a quantidade de informação que a rede pode transmitir. Para isso será necessário estabelecer o consumo de energia dos nós.

3.1 QUANTIDADE DE INFORMAÇÃO

A quantidade de informação transmitida por uma rede será definida como o número de bits de informação recebidos com sucesso pelo nó de destino, até que um primeiro nó qualquer da rede esgote a energia de sua bateria.

Para que a rede transmita o maior número de bits de informação é necessário poupar energia nos nós e manter uma certa qualidade na comunicação, evitando retransmissões. Uma das maneiras de poupar energia dos nós de uma rede de sensores com transmissão cooperativa IDF, é evitar que o nó de *relay*, utilizado somente quando a transmissão direta falha, fique com seus circuitos sempre ligados, mesmo quando não for necessário. Como dito anteriormente, os autores de (BORDON *et al.*, 2017) propuseram uma técnica denominada de probabilidade de ON-OFF para que o nó de *relay* poupe energia.

Sendo N_T o número de mensagens transmitidas de S_i até que um primeiro nó da rede esgote a energia de sua bateria, o número de mensagens transmitidas de S_i e recebidas por S_d , considerando a probabilidade de *outage*, é igual a $N_T(1 - \mathcal{P}_i)$. Então a quantidade de informação transmitida pela rede é:

$$\mathcal{B}_T^{(\text{sch})} = LN_T \sum_{i \in \mathbf{S}} (1 - \mathcal{P}_i^{(\text{sch})}) \quad \text{bits} \quad (29)$$

3.2 MODELO DE CONSUMO DE ENERGIA

Assume-se que todos os nós possuem o mesmo *hardware* e baterias que iniciam com \mathcal{E}_{\max} Joules. No transmissor, assumimos que a potência total de transmissão do nó S_i , $P_{i,\varphi}$, é dividido igualmente por cada antena ativa, ou seja, a potência de transmissão por antena é igual para $P_{i,\varphi}/\hat{n}$. Com a rede em operação a energia da bateria dos sensores diminui progressivamente a cada transmissão e a cada recepção. A energia consumida por cada nó durante a transmissão de uma mensagem é:

$$e_t = \frac{(P_t/\eta + P_{ct}\hat{n})L}{\mathcal{R}_o}, \quad (30)$$

onde η é a eficiência do amplificador de potência e P_{ct} é a potência consumida pelos circuitos de transmissão, incluindo a potência consumida pelo conversor analógico-digital, *mixer*, filtros transmissor e sintetizador de frequência (CUI *et al.*, 2005). Note que para cada antena há uma cadeia de circuitos RF.

Da mesma forma, a energia consumida durante a recepção é:

$$e_r = \frac{(P_{cr}\hat{n})L}{\mathcal{R}_o}, \quad (31)$$

onde P_{cr} é consumida pelos circuitos de recepção que inclui a potência consumida pelo sintetizador de frequência, *mixer*, amplificador (amplificador de baixo ruído), filtros receptores e conversor analógico-digital (CUI *et al.*, 2005). De forma similar à transmissão, existe uma cadeia de RF ativa para cada antena.

A energia total consumida pelo nó S_i ao transmitir N_T mensagens é dado por:

$$E_i = E_{i,t} + E_{i,r} + E_{i,c}, \quad (32)$$

onde $E_{i,t}$ é a energia consumida na transmissão direta, $E_{i,r}$ é a energia consumida ao receber a mensagem de outros nós e $E_{i,c}$ é a energia consumida ao transmitir como *relay*.

A energia $E_{i,t}$ consumida na transmissão direta do nó de origem para o nó de destino na fase de *broadcast* é:

$$E_{i,t} = N_T e_t. \quad (33)$$

Quando o nó S_i age como *relay*, a energia consumida ao receber as mensagens dos outros nós na fase de *broadcast* quando seu circuito está ativo e pode cooperar com S_j com probabilidade ξ_{ji} é $E_{i,r}$ e pode ser obtida por:

$$E_{i,r} = N_T e_r \sum_{j \in \mathbf{S}_{-i}} \xi_{ji}. \quad (34)$$

Quando o nó S_i age como *relay*, $E_{i,c}$ é a energia consumida considerando todas as retransmissões possíveis na fase de cooperação. Se a transmissão direta entre S_j e S_d falha com probabilidade p_{jd} e o nó de *relay* decodifica a mensagem com sucesso $(1 - \tilde{p}_{ji})$ na fase de *broadcast*, sendo selecionado como *relay* com probabilidade ρ_{ji} na fase de cooperação, se possuir a maior SNR $S_i \rightarrow S_d$. Então $E_{i,c}$ pode ser calculada por:

$$E_{i,c} = N_T e_t \left[p_{id, \text{BP}}^{(\text{sch})} \rho_{ii} + \sum_{j \in \mathbf{S}_{-i}} p_{jd, \text{BP}}^{(\text{sch})} (1 - \tilde{p}_{ji}^{(\text{sch})}) \rho_{ji} \right] \quad (35)$$

Combinando as equações (33)-(35), podemos reescrever a energia total consumida como:

$$E_i = N_T \left(e_t + e_t p_{id, \text{BP}}^{(\text{sch})} \rho_{ii} + \sum_{j \in \mathbf{S}_{-i}} \xi_{ji} [e_r + e_t \rho_{ji} p_{jd, \text{BP}}^{(\text{sch})} (1 - p_{ji, \text{BP}}^{(\text{sch})})] \right) \quad (36)$$

Ao considerar que S_i é o primeiro nó a esgotar toda a energia \mathcal{E}_{\max} de sua bateria, é possível considerar $E_i = \mathcal{E}_{\max}$. Dessa maneira o número de mensagens transmitidas até um nó esgotar sua energia pode ser calculado por:

$$\begin{aligned} N_T &= \min_{i \in \mathbf{S}} \left\{ \frac{\mathcal{E}_{\max}}{e_t + e_t p_{id, \text{BP}}^{(\text{sch})} \rho_{ii} + \sum_{j \in \mathbf{S}_{-i}} \xi_{ji} [e_r + e_t \rho_{ji} p_{jd, \text{BP}}^{(\text{sch})} (1 - p_{ji, \text{BP}}^{(\text{sch})})]} \right\} \\ &= \frac{\mathcal{E}_{\max}}{e_t + \max_{i \in \mathbf{S}} \left\{ e_t p_{id, \text{BP}}^{(\text{sch})} \rho_{ii} + \sum_{j \in \mathbf{S}_{-i}} \xi_{ji} [e_r + e_t \rho_{ji} p_{jd, \text{BP}}^{(\text{sch})} (1 - p_{ji, \text{BP}}^{(\text{sch})})] \right\}} \end{aligned} \quad (37)$$

Como em (37) o numerador é fixo (energia máxima contida em uma bateria), a única maneira de aumentar o número de mensagens transmitidas é diminuir o denominador. Ao empregar sensores com múltiplas antenas é possível explorar a diversidade espacial das antenas diminuindo a probabilidade de ON-OFF, economizando energia dos circuitos de recepção dos *relays*.

4 REDUZINDO O CONSUMO DE ENERGIA

Com o objectivo de reduzir o consumo global de energia, duas variáveis são otimizadas na proposta, a potência de transmissão e a probabilidade ON-OFF. Esta abordagem é diferente da abordagem de Bordon *et al.* (2017), na qual a potência de transmissão é fixa. A lógica aqui é ajustar a potência de transmissão e a probabilidade ON-OFF, a fim de reduzir o consumo de energia, de modo a aumentar a quantidade de informação transmitida pela rede. Este problema é definido como uma otimização com restrições, implicando que para cada S_i , $i \in \mathbf{S}$ tem-se:

$$P_\varphi^*, \boldsymbol{\xi}_i^* = \underset{P_{i,\varphi}, \xi_{ij}^*}{\operatorname{argmax}} \mathcal{B}_T^{(\text{sch})} \quad (38a)$$

$$\text{restr.} \quad \mathcal{P}_i^{(\text{sch})} \leq \mathcal{P}_o, \quad \forall i, \quad (38b)$$

$$0 \leq \xi_{ij} \leq 1, \quad \forall j, \quad (38c)$$

$$P_{\min} \leq P_{i,\varphi} \leq P_{\max}, \quad (38d)$$

onde $\boldsymbol{\xi}_i^* = \{\xi_{ij}^*\}$ é um vetor de M elementos, contendo a probabilidade ON-OFF ótima ξ_{ij}^* do *relay* para cada nó de sensor S_j operando como *relay* de S_i . Além disso, P_φ^* é a potência ótima de transmissão, assumida como a mesma para cada sensor S_i . Também, existem M restrições associadas a (38b), assegurando uma restrição de probabilidade de *outage* \mathcal{P}_o para cada sensor. Da mesma forma, (38c) é um conjunto de M restrições relacionadas com ξ_{ij} . Finalmente, P_{\min} e P_{\max} em (38d) denotam, respectivamente, a potência mínima e máxima de transmissão utilizada pelos sensores.

Para encontrar a potência ótima P_φ^* foi empregado uma busca exaustiva e programação quadrática sequencial, SQP (LEE; LEYFFER, 2011), para otimizar as probabilidades ON-OFF $\boldsymbol{\xi}_i^*$ devido à complexidade do problema.

4.1 ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO

Sabendo que a SNR varia de acordo com a distância e a potência de transmissão (Equação (4)), o que impacta na probabilidade de *outage* e consequentemente na probabilidade ON-OFF e na quantidade de informação efetivamente transmitida, é proposto um algoritmo para encontrar a potência de transmissão P_φ^* que transmita a maior quantidade de informação (para uma rede de determinada área), respeitando a probabilidade de *outage*. Como dito anteriormente, todos os sensores transmitem a uma mesma potência.

O Algoritmo 1 se apoia na busca exaustiva realizada em um conjunto de possíveis valores de potência de transmissão $\mathbf{P}_{i,\varphi} = \{P_{\min}, \dots, P_{\max}\}$. O algoritmo retorna a potência na qual a maior quantidade de informação é transmitida. Observe que na linha 3 do algoritmo ocorre a otimização das probabilidades ON-OFF, vista a seguir na seção 4.2.

Algoritmo 1 – Busca Exaustiva

inserir $\mathbf{P}_{i,\varphi} = \{P_{\min}, \dots, P_{\max}\}$
 1: $\mathcal{B}_T = 0$
 2: **para** $P \in \mathbf{P}_{i,\varphi}$ **faça**
 3: $\xi_i^* = \arg \min_{\xi_i^*} \sum_{j \in \mathbf{S}_{-i}} \xi_{ij}$
 4: $B = LN_T \sum_{i \in \mathbf{S}} (1 - \mathcal{P}_i)$
 5: **se** $\mathcal{B}_T < B$ **então**
 6: $\mathcal{B}_T = B$
 7: $P_\varphi^* = P$
 8: **finaliza se**
 9: **finaliza para**
 10: **retorna** P_φ^*

Fonte: Autoria própria.

4.2 CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE ON-OFF

Independentemente do esquema utilizado na transmissão, para reduzir o consumo de energia deve-se diminuir a probabilidade de ON-OFF do circuito de recepção dos nós da rede, dessa maneira a vida útil da rede é prolongada, aumentando a quantidade de informação que pode ser transmitida. No entanto, a probabilidade de ON-OFF afeta a probabilidade de *outage*, já que uma *outage* pode ocorrer entre S_i e S_d caso S_j esteja em modo adormecido (OFF). Então, é necessário que essa probabilidade de ON-OFF seja ajustada para que a probabilidade de *outage* total não seja menor que um certo valor limite.

Considerando que, quando S_i faz *broadcast* da mensagem, a energia consumida por todos os outros nós é $e_r \sum_{j \in \mathbf{S}} \xi_{ij}$. Para minimizar o consumo de energia na recepção $e_r \sum_{j \in \mathbf{S}} \xi_{ij}$, busca-se a menor probabilidade de ON-OFF $\xi_{ij} : j \in \mathbf{S}_{-i}$, mantendo a probabilidade de *outage* total \mathcal{P}_i abaixo de um valor limite \mathcal{P}_o . Este problema é formulado como uma otimização com restrições. Então para cada S_i ($i \in \mathbf{S}$):

$$\xi_i^* = \operatorname{argmin}_{\xi_i^*} \sum_{j \in \mathbf{S}_{-i}} \xi_{ij} \quad (39a)$$

$$\text{restr.} \quad p_{id}^2 \prod_{j \in \mathbf{S}_{-i}} [1 - \xi_{ij}(1 - p_{ij})(1 - p_{jd})] \leq \mathcal{P}_o, \quad (39b)$$

$$0 \leq \xi_{ij} \leq 1, \quad j \in \mathbf{S}_{-i}, \quad (39c)$$

então há M equações de restrições do tipo $\mathcal{P}_i < \mathcal{P}_o \forall i \in \mathbf{S}$. Como resultado obtêm-se $\xi_i^* = \{\xi_{ij}^*\} : j \in \mathbf{S}_{-i}$ como sendo a probabilidade ótima de ON-OFF do *relay*, associado ao nó de origem S_i , que minimiza o consumo de energia e mantém uma certa probabilidade de *outage* \mathcal{P}_o .

4.2.1 Método de Otimização

Dada a quantidade e complexidade das restrições, não é possível resolver o problema (38a-38d) de forma analítica, portanto será utilizado um método numérico. A rapidez e precisão na solução da otimização dependem do método aplicado e de vários fatores como: o tamanho do problema, o número de variáveis e o número de restrições. Quanto mais variáveis, mais restrições e mais complexo a relação entre elas, maior é o tempo de processamento necessário e menor tende a ser a precisão.

A otimização da probabilidade de cooperação ON-OFF (ξ_i) dos *relays* é realizada pela função `fmincon` (FMINCON, 2018) do Matlab que minimiza funções com restrições não lineares:

$$\min f(x), \quad x \in \mathbb{R}^n. \quad (40a)$$

$$\text{restr.} \quad h_j(x) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (40b)$$

$$g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (40c)$$

$$x_q^L \leq x_q \leq x_q^U, \quad q = 1, \dots, n \quad (40d)$$

Sendo $x \in \mathbb{R}^n$ o vetor dos parâmetros, $f(f : \mathbb{R}^n \Rightarrow \mathbb{R})$ a função objetivo, $g(g : \mathbb{R}^n \Rightarrow \mathbb{R}^m)$ é o vetor de restrições de desigualdade, $h(h : \mathbb{R}^n \Rightarrow \mathbb{R}^l)$ é o vetor de restrições de igualdade, l é a quantidade de restrições de igualdade, m é a quantidade de restrições de desigualdade e n é a quantidade de variáveis. O sobrescrito L representa o limite inferior (*Lower Bound*) e o sobrescrito U representa o limite superior (*Upper Bound*).

A função `fmincon` foi utilizada em conjunto com o método SQP, no qual a função de custo é linearizada através da adição de um termo de segunda ordem, de modo a tornar-se uma função quadrática.

5 RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados numéricos com o objetivo de avaliar o desempenho da rede de sensores sem fio ao combinar a transmissão cooperativa utilizando a probabilidade de ON-OFF em conjunto com esquemas de transmissão MIMO (AS e SVD). Com o propósito de comparação, a transmissão SISO também será avaliada. A fim de realizar os testes, a rede da Figura 3 é adotada e algumas considerações são feitas:

- Devido à complexidade computacional para resolver o problema de otimização, o nó central, ou de destino S_d , é escolhido como controlador e possui maior poder de processamento que os outros nós da rede.
- Cada nó estima a SNR média dos canais para os outros $M - 1$ nós. S_d estima o SNR médio dos canais da transmissão direta.
- O nó central deve ter a informação sobre o consumo de energia dos nós (e_t e e_r).
- Depois da fase inicial, quando todos os nós estão aptos a transmitir, o nó central, de posse de todas as informações necessárias, realiza a otimização, informando para os nós através de uma mensagem de *broadcast*, qual a probabilidade de ON-OFF de cada um.
- Serão considerados $M = 24$ nós distribuídos, simetricamente espaçados, em uma região quadrada de D metros de lado.
- Como os sensores estão dispostos de maneira simétrica na área e transmitem com igual potência, é possível agrupar os sensores em 5 grupos: $\mathbf{S}_{g,1} = \{1, \dots, 4\}$, $\mathbf{S}_{g,2} = \{5, \dots, 12\}$, $\mathbf{S}_{g,3} = \{13, \dots, 16\}$, $\mathbf{S}_{g,4} = \{17, \dots, 20\}$, $\mathbf{S}_{g,5} = \{21, \dots, 24\}$.
- Os parâmetros do sistema estão descritos na Tabela 2, seguindo (BORDON *et al.*, 2017), com exceção de algumas variações de parâmetros que serão indicadas quando necessário.

A implementação do *grid*, acima mencionado, ilustra algumas configurações práticas, tais como agricultura de precisão, ferrovias/metrô, rodovias ou edifícios inteligentes. Além disso, a implantação da rede em *grid* não limita a aplicação da proposta, mas simplifica consideravelmente a análise e a compreensão. Em uma configuração mais geral, em que os nós são aleatoriamente distribuídos, a estratégia seria agrupar os nós de acordo com a sua proximidade,

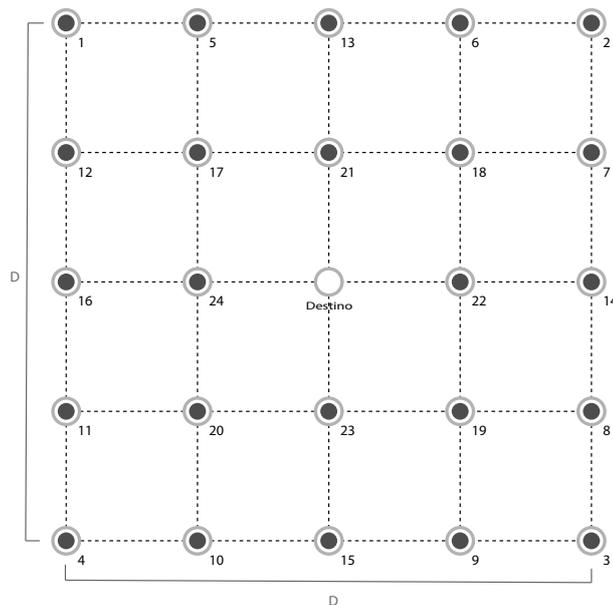
Tabela 2 – Parâmetros e Valores do Sistema

Parâmetro	Valor
Comprimento do lado da área, D	200 m
Tamanho da mensagem, L	50 bits
Taxa de transmissão, \mathcal{R}_o	200 kbps
Densidade espectral da potência do ruído, N_0	-174 dBmHz
Largura de banda do canal, B	200 kHz
Eficiência do amplificador de potência, η	0,35
Parâmetro de desvanecimento, m	{1, 2, 3}
Expoente de perda de percurso, α	{3, 4}
Distância de referência, d_0	1 m
Frequência da portadora, f_c	2,5 GHz
Energia da bateria carregada, \mathcal{E}_{\max}	10 J
Potência consumida pelo circuito do transmissor, P_{ct}	10 dBm
Potência consumida pelo circuito do receptor, P_{cr}	10 dBm

Fonte: Bordon *et al.* (2017).

de modo a que as probabilidades ON-OFF destes grupos possam ser otimizadas da mesma forma que no *grid*.

Figura 3 – Rede com $M = 24$ nós de sensores distribuídos e espaçados igualmente em uma área com $D = 200$ metros de lado



Fonte: Adaptada de Bordon *et al.* (2017).

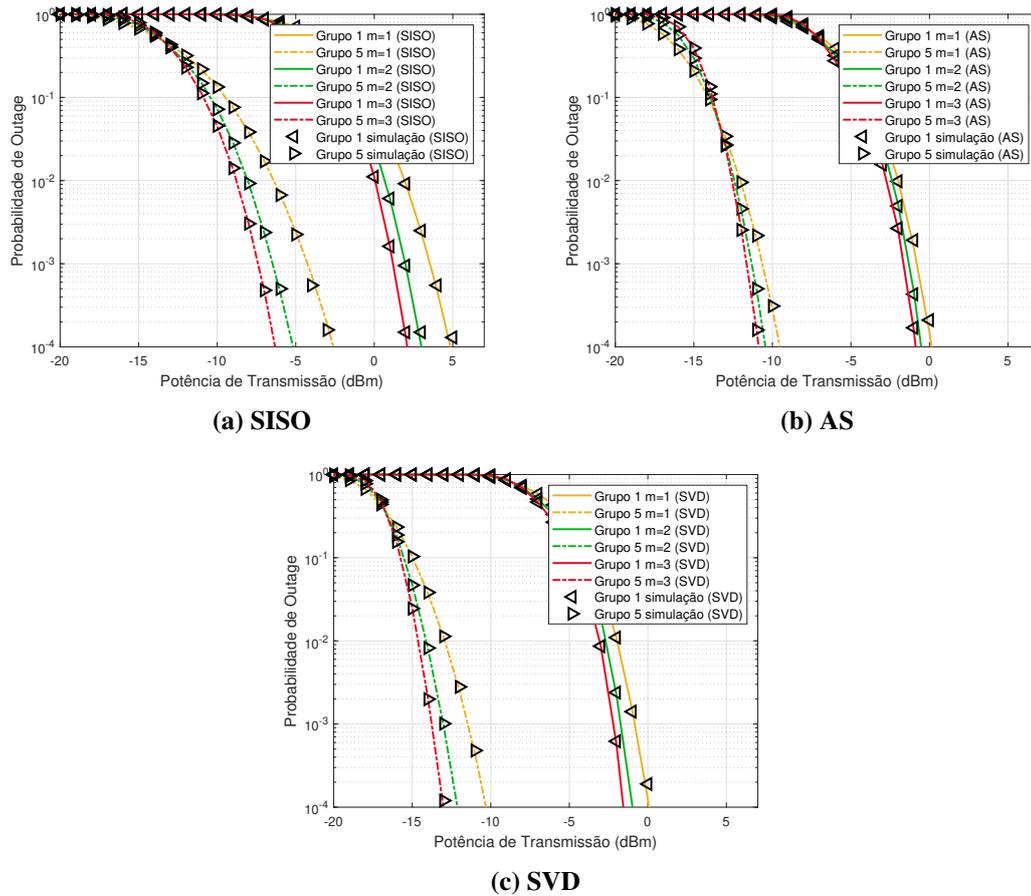
5.1 POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO FIXA

Em primeiro lugar, consideramos o caso em que a potência de transmissão é fixa, ou seja, excluída do problema de otimização da potência de transmissão em (38a).

Na Figura 4 são mostradas as probabilidades de *outage* total dos esquemas de transmissão SISO, AS e SVD, quando os circuitos de recepção dos *relays* estão sempre ligados ($\xi_{ij} = 1$),

$n = 2$ antenas, $m \in \{1, 2, 3\}$ e $\alpha = 4$. Para não poluir a figura são mostrados apenas os gráficos com os grupos $S_{g,1}$, que é formado pelos sensores mais afastados do nó destino, e do grupo $S_{g,5}$, formado pelos sensores mais próximos ao nó de destino. Na figura, as linhas cheias representam a análise teórica enquanto os marcadores representam simulações de Monte Carlo, as quais concordam perfeitamente.

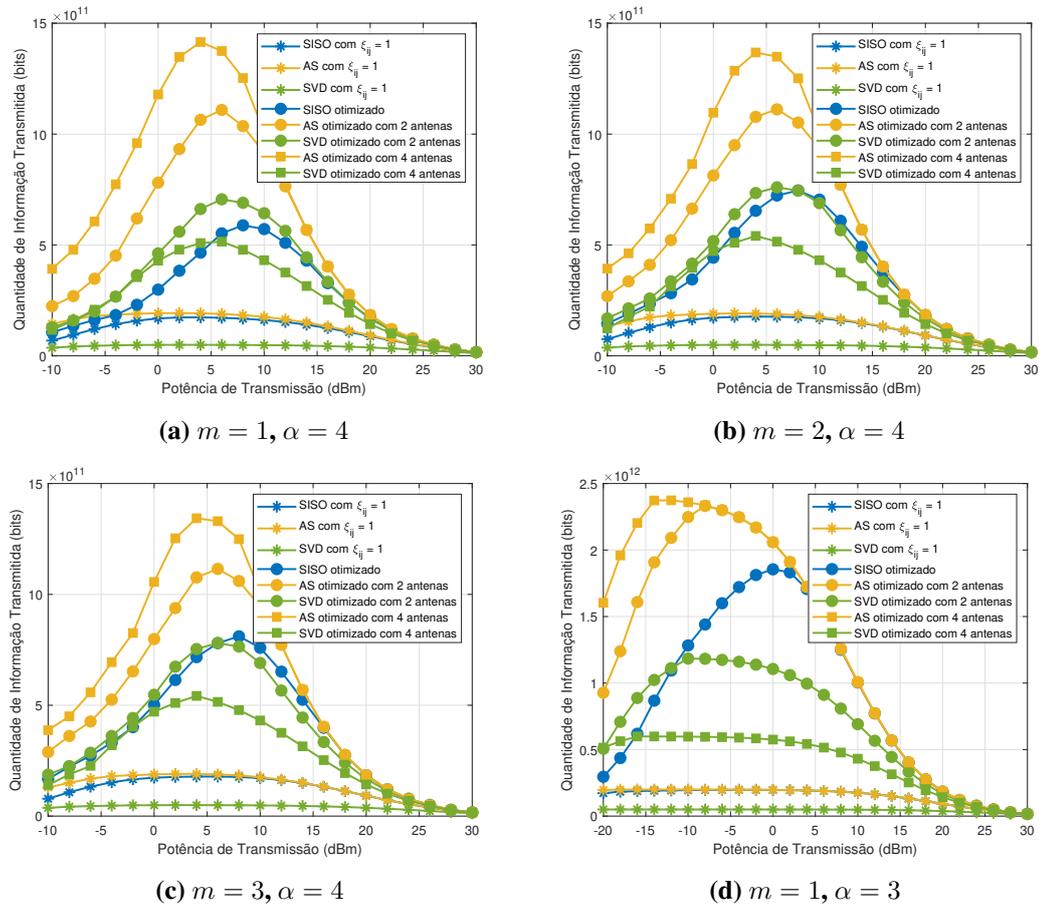
Figura 4 – Probabilidade de *outage* sem otimização ($\xi_{ij} = 1$) do SISO, AS e SVD para $m \in \{1, 2, 3\}$ com $n = 2$ antenas, $\alpha = 4$ e $D = 200$ m.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 5 mostra a quantidade de informação efetivamente transmitida antes da otimização ($\xi_{ij} = 1$) e após a otimização da probabilidade de cooperação ON-OFF ($\xi_{ij} < 1$). Nesta análise consideramos que a *outage* alvo é de $\mathcal{P}_o = 10^{-3}$. Além disso, as figuras consideram casos com $m \in \{1, 2, 3\}$, $\alpha \in \{3, 4\}$ e $n = \{2, 4\}$ antenas. Ao otimizar a probabilidade de cooperação ON-OFF há um aumento significativo na quantidade de informação transmitida, pois os circuitos de recepção dos *relays* não permanecem ligados o tempo todo, aumentando a vida útil dos sensores. Por exemplo, conforme a Figura 5(a) observamos que, para uma dada faixa de potência de transmissão, a quantidade de informação transmitida aumenta mais de 5 para o AS

Figura 5 – Quantidade de informação efetivamente transmitida para SISO, AS e SVD, antes e depois da otimização da probabilidade de cooperação ON-OFF com 2 antenas, 4 antenas e $D = 200$ m



Fonte: Autoria Própria.

com $n = 2$ antenas (comparado ao próprio AS com $n = 2$ antenas sem otimização de ξ_{ij}) e mais de 7 vezes para o AS com $n = 4$ após a otimização.

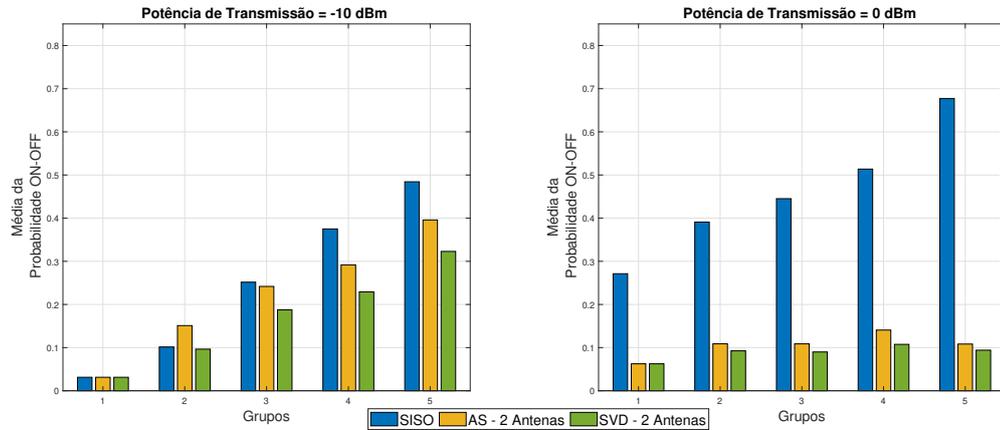
Ao aumentar o m , espera-se um aumento na quantidade de informação transmitida uma vez que a severidade do desvanecimento diminui. No entanto, isso não acontece com AS se compararmos as Figuras 5(a), 5(b) e 5(c). Tal comportamento é explicado pela Figura 4(b), tendo em vista que para valores de SNR na faixa de -15 dBm as curvas de probabilidade de *outage* com $m = 2$ e $m = 3$ possuem valores levemente maiores de que com $m = 1$ considerando o grupo $S_{g,5}$. Isso é devido à própria inflexão da curva de probabilidade de *outage* em baixa SNR para os nós mais próximos do nó central. Ainda, ao diminuir o expoente de perda de percurso de $\alpha = 4$ para $\alpha = 3$ na Figura 5(d), o que indica menor perda de potência do sinal entre antenas transmissoras e receptoras, há um aumento de 1,6 vezes na quantidade de informação transmitida, se considerar a transmissão AS com $n = 4$ antenas e SVD com $n = 2$ antenas. Também observa-se um aumento de mais de 3 vezes para a transmissão SISO.

Na realidade, a diversidade espacial devido às múltiplas antenas combinadas com a otimização da probabilidade ON-OFF traz ganhos expressivos para a rede. Os esquemas de diversidade espacial se beneficiam mais com a otimização, uma vez que, devido à maior confiabilidade de transmissão, mais nós podem permanecer no estado OFF, poupando energia. Além disso, com a diversidade espacial, os nós mais afastados do destino são mais capazes de cooperar com outros nós, equilibrando o consumo de energia da rede, enquanto, na SISO, os nós mais próximos do destino tendem a cooperar muito mais frequentemente. Ao aumentar o número de antenas para 4, a diversidade espacial aumenta, levando o esquema de transmissão AS a aumentar a quantidade de informação transmitida. Assim, a combinação de menor consumo de energia do AS e os ganhos de diversidade espacial são essenciais nesta configuração, permitindo os nós dormirem mais frequentemente, aumentando a vida útil da rede e, conseqüentemente, a quantidade de informação. Já com o esquema de transmissão SVD a quantidade de informação efetivamente transmitida piora em relação a 2 antenas. Apesar do aumento da diversidade espacial (diminuição das probabilidades de *outage* dos enlaces), a piora na quantidade de informação transmitida no esquema SVD é causada por um aumento no consumo de energia devido ao aumento do número de circuitos RF (um circuito de RF para cada antena) e, conseqüentemente, um esgotamento da bateria mais rapidamente.

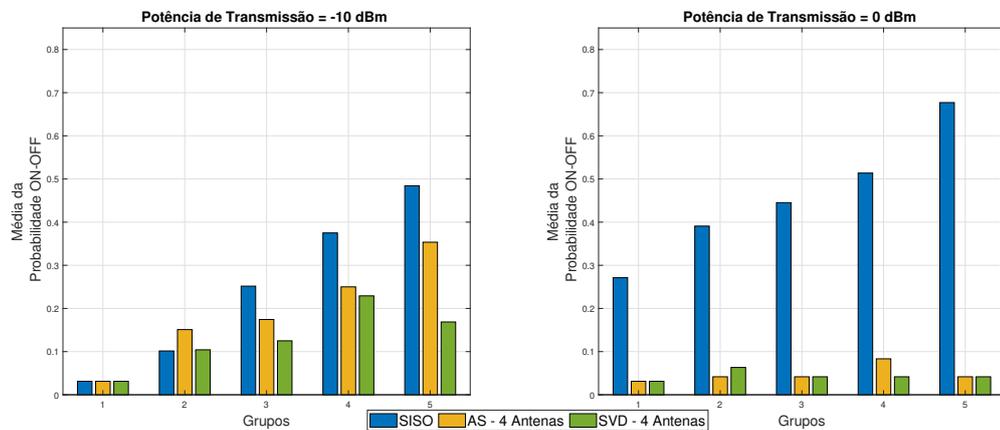
É interessante observar na Figura 5, que há uma potência de transmissão onde uma maior quantidade de informação é transmitida. Por exemplo: ao transmitir empregando o esquema AS com 2 antenas e otimizando a probabilidade de cooperação ON-OFF em uma rede de sensores distribuídos igualmente espaçados em uma área quadrada de 200 metros de lado, a maior quantidade de informação é transmitida quando os sensores transmitem a uma potência de 4 dBm nas Figuras 5(a)-5(c) e de -12 dBm para a Figura 5(d), a qual considera $\alpha = 3$.

Um outro dado interessante de se observar é o valor médio da probabilidade de cooperação ON-OFF de cada grupo, ilustrado pela Figura 6. Ao observar a Figura 6(a) utilizando 2 antenas e a Figura 6(b) utilizando 4 antenas, é possível verificar que ao aumentar o número de antenas a diversidade espacial aumenta, diminuindo a probabilidade de *outage*, permitindo que probabilidade de ON-OFF também diminua. Embora o SISO também experimente a diversidade espacial, através da utilização dos *relays*, os esquemas com múltiplas antenas têm um grau adicional de diversidade, o que tem impacto na otimização ON-OFF. Assim, ao aumentar a diversidade espacial empregando esquemas de múltiplas antenas, podemos aumentar os estados de OFF dos nós, bem como permitimos mais oportunidades para que os nós mais distantes do

Figura 6 – Valor médio da probabilidade cooperativa para cada grupo, variando a potência de transmissão para esquemas SISO, AS e SVD, $m = 1$, $\alpha = 4$, utilizando 2 e 4 antenas com $D = 200$ m.



(a) $n = 2$ antenas



(b) $n = 4$ antenas

Fonte: Autoria Própria.

destino cooperarem com outros nós.

A seguir, visando ilustrar um cenário em que a potência dos circuitos de RF também varia com a potência de transmissão, consideramos a relação entre P_t e P_{ct} dada pela Tabela 3, baseada em (SANTOS *et al.*, 2019). Note que $P_{ct} = 10$ dBm foi considerado até então, ao passo que a Tabela 3 representa os valores de operação de um amplificador de potência com múltiplos modos. A Figura 7 ilustra os resultados obtidos em termos da quantidade de informação transmitida para $m = 1$, $D = 200$ m e $\alpha = 4$. Comparando a Figura 7 com a Figura 5(a) (mesmo cenário, com $P_{ct} = 10$ dBm) é possível verificar que o amplificador de potência tem um impacto significativo no consumo de potência total da cadeia de RF e, conseqüentemente, na quantidade de informação transmitida. Em especial, o esquema SVD, que utiliza todas as cadeias de RF, tem sua quantidade de informação transmitida reduzida com P_{ct} conforme Tabela 3, de modo que o esquema SISO se torna um pouco mais interessante neste caso. Entretanto, as conclusões

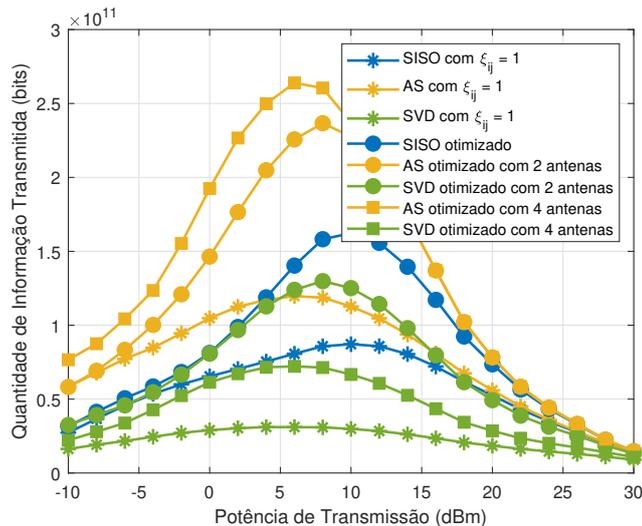
qualitativas considerando o AS se mantém semelhantes. Portanto, na sequência de resultados iremos considerar apenas o caso com $P_{ct} = 10$ dBm de modo a simplificar os efeitos observados nas análises.

Tabela 3 – Potência do circuito de transmissão em relação a potência de transmissão.

Faixa de Potência de Transmissão P_t (dBm)	Potência dos Circuitos de RF P_{ct} (dBm)
$[-30, 13,6)$	21,84
$[13,6, 14,5)$	23,30
$[14,5, 14,7)$	23,73
$[14,7, 16,5)$	23,89
$[16,5, 17,2)$	24,73
$[17,2, 18,4)$	25,17
$[18,4, 30,0]$	25,95

Fonte: Adaptada de Santos *et al.* (2019).

Figura 7 – Quantidade de informação transmitida com potência dos circuitos de RF variando conforme Tabela 3, com $m = 1$, $D = 200$ m e $\alpha = 4$.



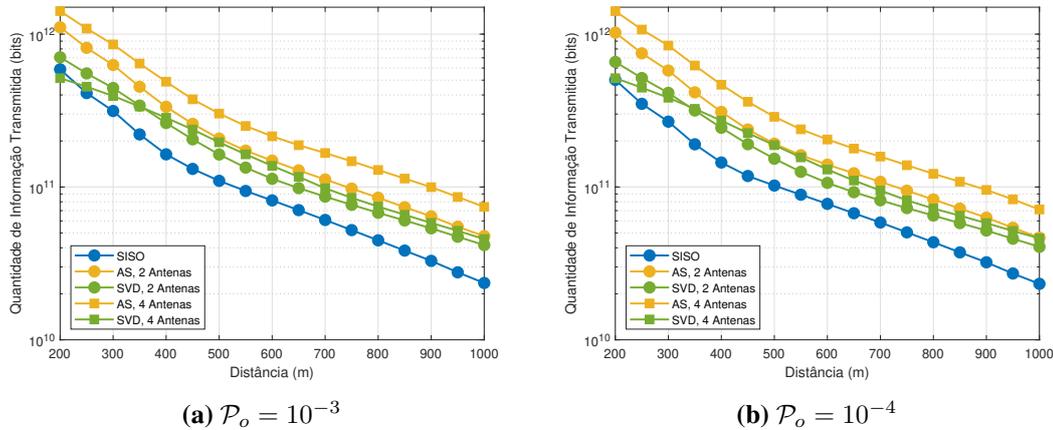
Fonte: Autoria Própria.

5.2 POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO OTIMIZADA

Como visto na seção anterior, há um valor ótimo para a potência de transmissão, utilizar menor ou maior potência só diminui a quantidade de bits transmitidos. Para analisar o impacto da alocação de potência, considerando que a potência de transmissão varia entre -10 dBm e 30 dBm, vamos analisar na sequência a quantidade de informação em função de vários tamanhos da área de comunicação, variando D .

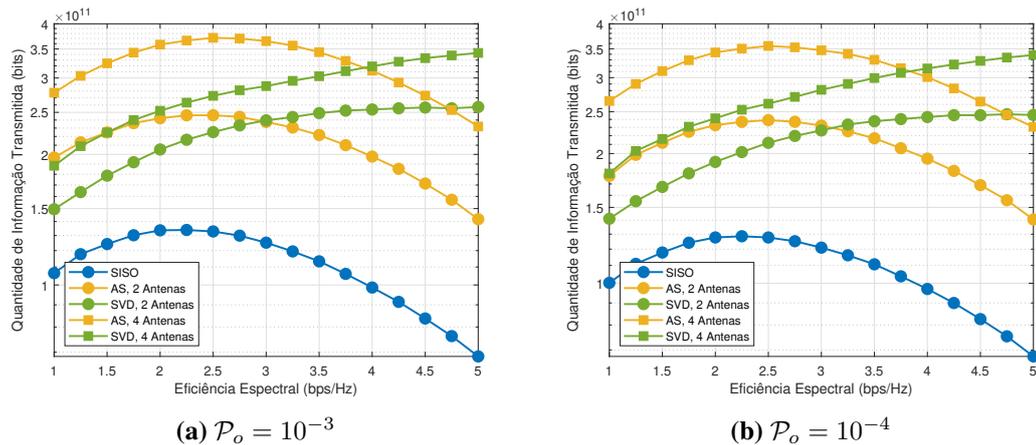
A quantidade de informação transmitida, otimizando $P_{i,\varphi}^*$ e ξ_i^* , em função do lado D da área quadrada, pode ser observada na Figura 8, com *outage* alvo de $\mathcal{P}_o = \{10^{-3}, 10^{-4}\}$, onde

Figura 8 – Quantidade de informação, com otimização de P_φ^* e ξ_i^* , em função do lado da área quadrada (D), para SISO, AS e SVD com $m = 1$ e $\alpha = 4$.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 9 – Quantidade de informação com otimização de P_φ^* e ξ_i^* em função da eficiência espectral, para SISO, AS e SVD com $D = 500$ m, $m = 1$ e $\alpha = 4$.



Fonte: Autoria Própria.

o esquema AS supera os outros esquemas na maioria das situações. Ao aumentar o número de antenas para 4, como era esperado há um aumento na quantidade de informação transmitida, salvo SVD em pequenas distâncias devido a um maior consumo por causa do acréscimo de mais antenas e circuitos RF. Note também que há pouca diferença na quantidade de informação transmitida das duas figuras, i.e., com a variação de \mathcal{P}_o entre 10^{-3} e 10^{-4} .

A quantidade de informação em função da eficiência espectral do sistema é investigada na Figura 9, com $\mathcal{P}_o = \{10^{-3}, 10^{-4}\}$. Ressalta-se que o aumento da eficiência espectral nesse caso é obtida mantendo a largura de banda fixa e aumentando a ordem de modulação empregada. Porém, nosso objetivo aqui é apenas o de extrapolar a análise para sistemas que demandam maior quantidade de bps/Hz. Observa-se que o AS tem melhor desempenho para eficiências espectrais

até 3,75 bps/Hz com $n = 4$ antenas, enquanto que o desempenho do SVD aumenta quando a eficiência espectral aumenta. Ao comparar as Figuras 9(a) e 9(b), em que a probabilidade de *outage* alvo passa de $\mathcal{P}_o = 10^{-3}$ para $\mathcal{P}_o = 10^{-4}$, verificamos que há diminuição na quantidade de informação transmitida, principalmente para o SISO.

Para verificar o ganho ao transmitir escolhendo a melhor potência de transmissão para cada distância, a Tabela 4 mostra o ganho relativo, em termos de quantidade de informação, do método de otimização da potência em relação ao caso da potência de transmissão fixa, com $P_{i,\varphi} = 20$ dBm. A otimização da probabilidade ON-OFF (ξ^*) é executada em ambos os casos.

Tabela 4 – Ganho relativo, em termos de quantidade de informação, utilizando a otimização de potência em relação ao caso de potência de transmissão fixa com $P_{i,\varphi} = 20$ dBm com $n = 2$ antenas.

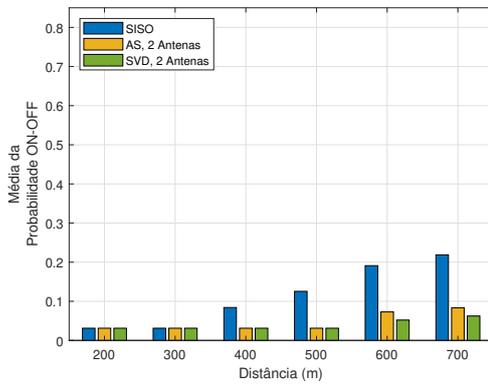
	SISO		AS		SVD	
	$\mathcal{P}_o = 10^{-3}$	$\mathcal{P}_o = 10^{-4}$	$\mathcal{P}_o = 10^{-3}$	$\mathcal{P}_o = 10^{-4}$	$\mathcal{P}_o = 10^{-3}$	$\mathcal{P}_o = 10^{-4}$
$D = 200$ m	80,86%	78,78%	88,39%	87,79%	82,23%	81,40%
$D = 500$ m	41,64%	44,71%	47,30%	45,76%	34,97%	32,10%
$D = 700$ m	39,17%	39,64%	49,78%	47,35%	31,06%	30,95%

Fonte: Autoria Própria.

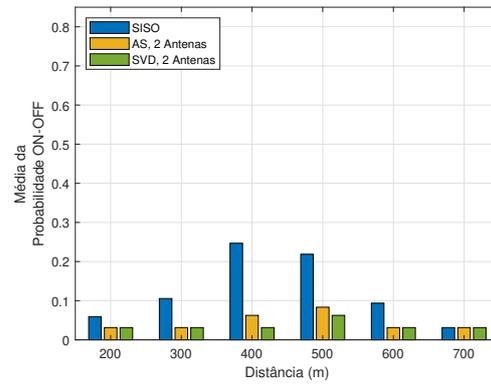
Para distâncias curtas, o ganho na seleção da melhor potência de transmissão ($P_{i,\varphi}^*$) é importante, com um aumento de até 88%, no caso do AS, no número de bits transmitidos pela rede. Este resultado é complementado pela Figura 10, que mostra a probabilidade média ON-OFF, dos grupos $\mathbf{S}_{g,1}$ e $\mathbf{S}_{g,5}$, com potência de transmissão fixa e otimizada para $\mathcal{P}_o = 10^{-3}$. Como observamos, a alocação de potência de transmissão, ao contrário do que se esperava, não diminui a probabilidade ON-OFF, mas ainda assim proporciona uma maior quantidade de informação transmitida por utilizar a potência ótima, menor que 20 dBm (vide Figura 5(a) para $D = 200$ m). De forma complementar, a Figura 11 mostra a probabilidade média ON-OFF, dos grupos $\mathbf{S}_{g,1}$ e $\mathbf{S}_{g,5}$, com potência de transmissão fixa e otimizada para $\mathcal{P}_o = 10^4$. Neste caso há um aumento da probabilidade ON-OFF a fim de respeitar a *outage* menor, comparado com a figura anterior.

Finalmente, as Figuras 12 e 13 analisam a quantidade de informação em função do número de antenas nos sensores, para $D = 200$ m e $D = 500$ m. Como observado, a quantidade de informação transmitida pela rede aumenta com o esquema AS até saturar, independentemente da distância de transmissão, enquanto que, para o esquema SVD, $n = 2$ maximiza a quantidade de informação quando $D = 200$ m e $n = 6$ quando $D = 500$ m. Isto se deve ao consumo de energia da cadeia RF requerida por cada antena, de modo que o AS seleciona um único par de antenas para permanecer ativo em cada transmissão, enquanto todas as cadeias RF estão

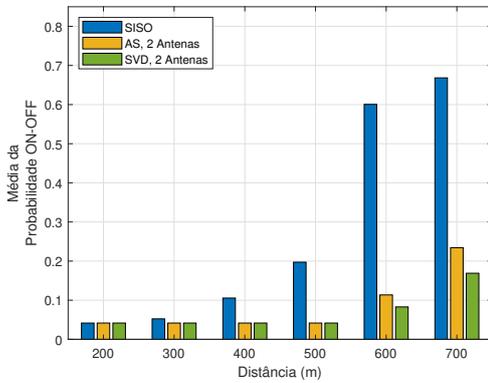
Figura 10 – Média da probabilidade de cooperação ON-OFF em função da distância D para SISO, AS e SVD com antenas $n = 2$ e $\mathcal{P}_o = 10^{-3}$.



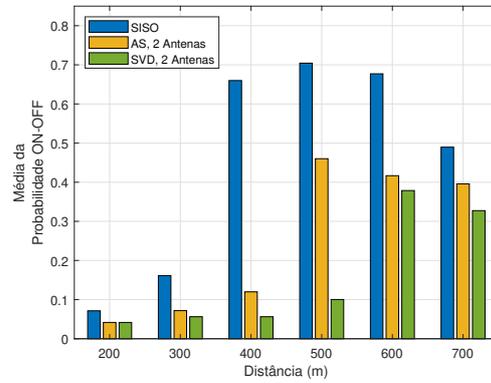
(a) Grupo $S_{g,1}$ com $P_{i,\varphi} = 20$ dBm.



(b) Grupo $S_{g,1}$ com P_{φ}^* otimizada.



(c) Grupo $S_{g,5}$ com $P_{i,\varphi} = 20$ dBm.

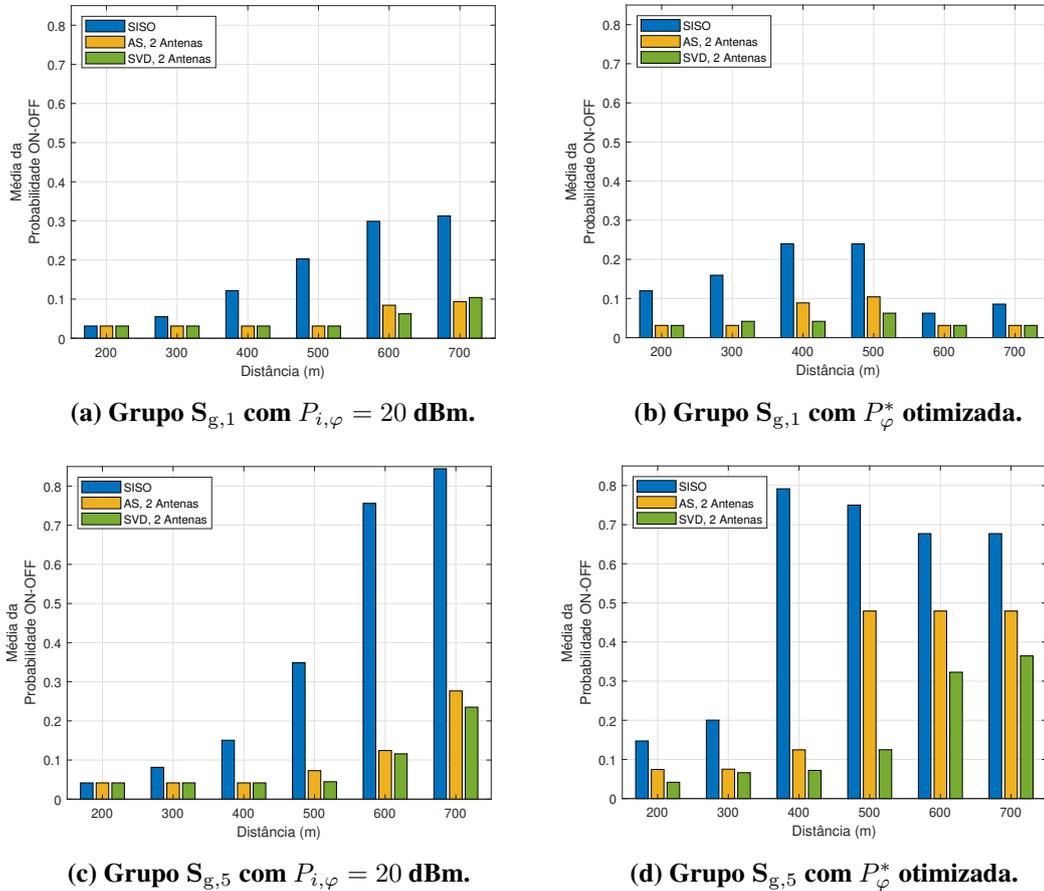


(d) Grupo $S_{g,5}$ com P_{φ}^* otimizada.

Fonte: Autoria Própria.

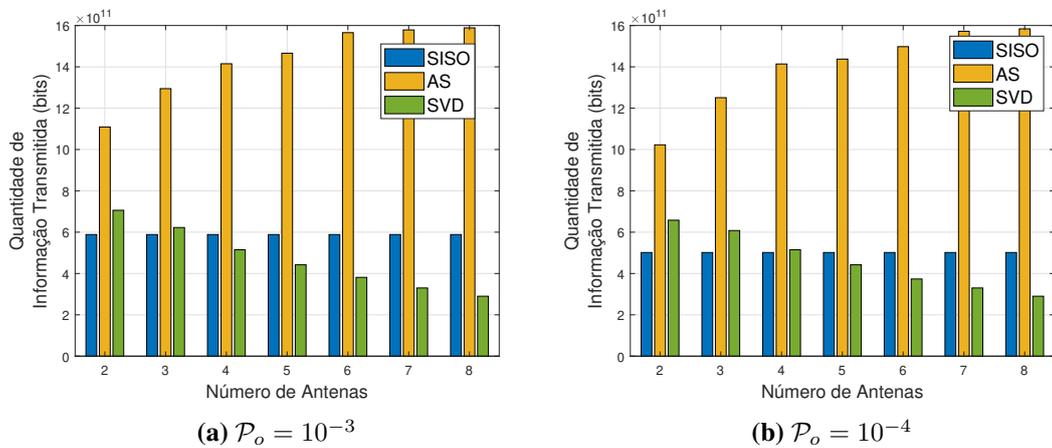
transmitindo/recebendo com o esquema SVD, aumentando o consumo de energia e reduzindo a vida útil da rede em relação àquele.

Figura 11 – Média da probabilidade de cooperação ON-OFF em função da distância D para SISO, AS e SVD com antenas $n = 2$ e $\mathcal{P}_o = 10^{-4}$.



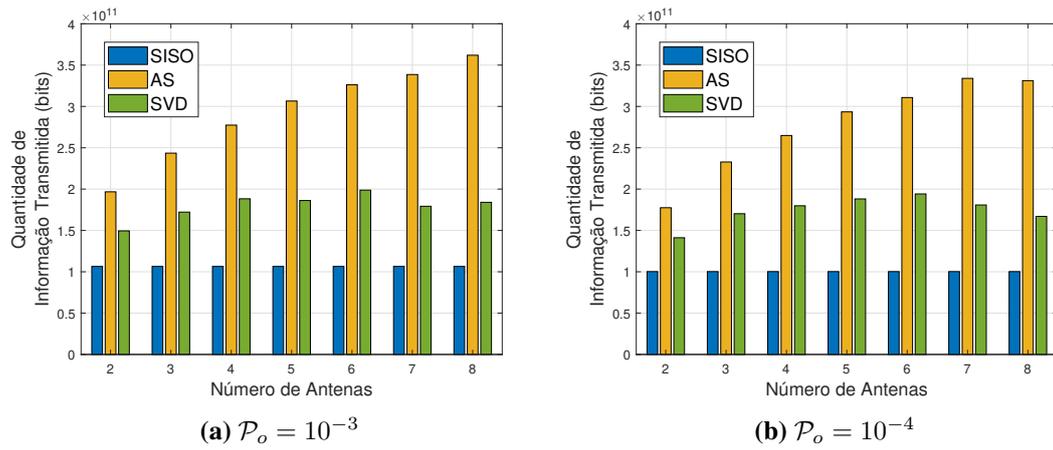
Fonte: Autoria Própria.

Figura 12 – Quantidade de informação em função do número de antenas, com P_{φ}^* e ξ_i^* otimizados, para SISO, AS e SVD com $D = 200$ m.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 13 – Quantidade de informação em função do número de antenas, com P_φ^* e ξ_i^* otimizados, para SISO, AS e SVD com $D = 500$ m.



Fonte: Autoria Própria.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

No trabalho realizado nessa tese, analisou-se o ganho de desempenho aliando duas técnicas com diversidade espacial: múltiplas antenas e cooperação. Para as análises foram utilizadas as técnicas de múltiplas antenas AS e SVD. Na cooperação é adotada uma técnica chamada ON-OFF, onde o circuito de recepção dos *relays* são ligados e desligados, de maneira probabilística, segundo a topologia e requisitos da rede, com o intuito de poupar energia, sempre respeitando uma QoS alvo, dada pela probabilidade de *outage*. Os resultados mostraram que há um ganho significativo na quantidade de informação efetiva transmitida pela rede ao aliar as duas técnicas.

Na realização dos testes, ao aumentar o número de antenas, aumentando a diversidade espacial, é possível diminuir a a probabilidade de cooperação ON-OFF. Ao aumentar o número de antenas é possível aumentar a quantidade de informação efetivamente transmitida para o esquema AS, já para o esquema SVD há uma piora. Isto se deve ao número de circuitos de RF que cada esquema necessita: enquanto o esquema AS necessita de somente um circuito de RF para as múltiplas antenas na transmissão e um circuito de RF para as múltiplas antenas na recepção, o esquema SVD necessita de um circuito de RF para cada antena na transmissão e um circuito de RF para cada antena na recepção, o que aumenta o consumo global de energia, levando ao esgotamento da bateria mais rapidamente e diminuindo a quantidade de informação efetivamente transmitida.

Além disso, também foi proposto um algoritmo para selecionar a potência de transmissão que transmita a maior quantidade de informação, em uma certa distância, mantendo o QoS, para cada esquema de transmissão. Ao alocar a potência ótima para o esquema proposto, a energia das baterias pode ser conservada aumentando a vida útil dos nós. Já analisando a eficiência espectral, a maior quantidade de informação efetivamente transmitida pelo esquema AS é alcançada a baixas eficiências espectrais, enquanto o esquema SVD consegue uma maior quantidade de informação transmitida em eficiências espectrais maiores. Fica claro que aliar a técnica de cooperação, com os circuitos dos receptores dos *relays* ligando e desligando de maneira probabilística, com esquemas de transmissão com múltiplas antenas AS e SVD, além de alocação de potência, possibilita uma maior quantidade de informação transmitida.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros pretende-se explorar melhor a relação entre probabilidade de cooperação ON-OFF, o número de antenas e a potência de transmissão, com a finalidade de propor estratégias que poupem energia e mantenham um certo nível de serviço (QoS). Uma das propostas é atribuir diferentes potências de transmissão a diferentes grupos de *relays*, já que neste trabalho a mesma potência de transmissão é atribuída a todos os *relays*. Isto pode ser feito de modo centralizado, como é feito nessa tese, ou de modo distribuído, aplicando algoritmos de aprendizagem por reforço através do algoritmo de Q-Learning (FRIKHA *et al.*, 2021), os quais permite aos nós da rede de sensores adaptarem sua potência de transmissão de forma distribuída. Ou seja, através de uma determinada recompensa, os nós podem tomar decisões locais sobre aumentar ou reduzir potência de transmissão, com foco em minimizar o consumo de energia, ou maximizar a quantidade de informação individualmente transmitida.

Alternativamente, a análise de melhores esquemas para otimizar as probabilidades de ON-OFF poderiam ser empregadas, visando diminuir o custo computacional da busca exaustiva e do método SQP. Por exemplo, técnicas baseadas em enxame de partículas, do inglês *Particle Swarm Optimization* (PSO) (EBERHART; KENNEDY, 1995; CLERC, 2010), mais especificamente otimização de enxame de partículas binário, do inglês *Binary Particle Swarm optimization* (BPSO) (KHANESAR *et al.*, 2007), onde 1 seria o receptor do *relay* ligado (ON) e 0 desligado (OFF). Essas propostas complementam a atual proposta centralizada, com o uso de heurísticas.

Sabendo que a topologia da rede tem forte impacto no método proposto, pretende-se usar técnicas de geometria estocástica/geometria espacial para analisar redes mais complexas e mais próximas de um cenário prático, com elevado número de nós distribuídos de modo aleatório. Estas técnicas permitem realizar análises sem que haja a necessidade de simulações custosas, oferecendo valores estatísticos através de modelos estocásticos da localização dos nós, sendo o Processo de Ponto de Poisson, do inglês *Poisson Point Process* (PPP), um dos modelos espaciais mais utilizados (HAENGGI *et al.*, 2009; LU *et al.*, 2021; HMAMOUICHE *et al.*, 2021).

Outro possível trabalho, seria considerar estratégias que reduzem o consumo dos nós que vão trabalhar como *relays*, talvez utilizando *Wake-up Radio* (WuR) (FROYTLOG *et al.*, 2019; FRØYTLOG *et al.*, 2019; BASAGNI *et al.*, 2019), que é um módulo de rádio secundário, de baixíssimo consumo, responsável por ligar o módulo de rádio principal. O rádio principal é mantido em modo adormecido, quando um nó quer enviar dados, ele envia um pacote de

wake-up, o *wake-up receiver*, que está sempre ligado, detecta o sinal de *wake-up* e gera uma interrupção que ativa o módulo de rádio principal para prosseguir a transmissão normalmente. Dessa forma, o uso de WuRs tem grande sinergia com a técnica proposta nesta tese, de modo que a interação entre ambas é um ponto de exploração para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

AYADI, Hayfa; ZOUINKHI, Ahmed; VAL, Thierry; BOSSCHE, Adrien Van den; ABDELKRIM, Mohamed Naceur. Network lifetime management in wireless sensor networks. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 18, n. 15, p. 6438–6445, 2018.

AZIZ, Azrina Abd; SEKERCIOGLU, Y Ahmet; FITZPATRICK, Paul; IVANOVICH, Milosh. A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks. **IEEE communications surveys & tutorials**, IEEE, v. 15, n. 1, p. 121–144, 2012.

BASAGNI, Stefano; CECCARELLI, Federico; PETRIOLI, Chiara; RAMAN, Nithila; SHESHASHAYEE, Abhimanyu V. Wake-up radio ranges: A performance study. *In: IEEE. 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). [S.l.]*, 2019. p. 1–6.

BIGLIERI, Ezio; CALDERBANK, Robert; CONSTANTINIDES, Anthony; GOLDSMITH, Andrea; PAULRAJ, Arogyaswami; POOR, H Vincent. **MIMO wireless communications**. [S.l.]: Cambridge university press, 2007.

BLETSAS, Aggelos; KHISTI, Ashish; REED, David P; LIPPMAN, Andrew. A simple cooperative diversity method based on network path selection. **IEEE Journal on selected areas in communications**, IEEE, v. 24, n. 3, p. 659–672, 2006.

BORDON, Raikel; MONTEJO-SANCHEZ, Samuel; SOUZA, Richard Demo; BRANTE, Glauber; FERNANDEZ, Evelio Martin Garcia. Energy efficient cooperation based on relay switching on–off probability for wsns. **IEEE Systems Journal**, IEEE, v. 12, n. 4, p. 3369–3380, 2017.

BRANTE, Glauber; STUPIA, Ivan; SOUZA, Richard Demo; VANDENDORPE, Luc. Outage probability and energy efficiency of cooperative mimo with antenna selection. **IEEE Transactions on wireless communications**, IEEE, v. 12, n. 11, p. 5896–5907, 2013.

CHATTHA, Hassan Tariq; ISHFAQ, Muhammad Kamran; KHAWAJA, Bilal A; SHARIF, Abubakar; SHERIFF, Nathirulla. Compact multiport mimo antenna system for 5g iot and cellular handheld applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, IEEE, 2021.

CHEN, Shuyi; MA, Ruofei; CHEN, Hsiao-Hwa; ZHANG, Hong; MENG, Weixiao; LIU, Jiamin. Machine-to-machine communications in ultra-dense networks—a survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 19, n. 3, p. 1478–1503, 2017.

CLERC, Maurice. **Particle swarm optimization**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. v. 93.

COLLOTTA, Mario; FERRERO, Renato; REBAUDENGO, Maurizio. A fuzzy approach for reducing power consumption in wireless sensor networks: a testbed with ieee 802.15. 4 and wirelesshart. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 64866–64877, 2019.

CUI, Shuguang; GOLDSMITH, Andrea J; BAHAI, Ahmad. Energy-efficiency of mimo and cooperative mimo techniques in sensor networks. **IEEE Journal on selected areas in communications**, IEEE, v. 22, n. 6, p. 1089–1098, 2004.

CUI, Shuguang; GOLDSMITH, Andrea J; BAHAI, Ahmad *et al.* Energy-constrained modulation optimization. **IEEE transactions on wireless communications**, v. 4, n. 5, p. 2349–2360, 2005.

EBERHART, Russell; KENNEDY, James. A new optimizer using particle swarm theory. *In: IEEE. MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*. [S.l.], 1995. p. 39–43.

FMINCON, Matlab. **Find minimum of constrained nonlinear multivariable function - MATLAB fmincon**. 2018. <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>. [Online; acessado em 18-Março-2019].

FRIKHA, Mohamed Said; GAMMAR, Sonia Mettali; LAHMADI, Abdelkader; ANDREY, Laurent. Reinforcement and deep reinforcement learning for wireless internet of things: A survey. **Computer Communications**, v. 178, p. 98–113, 2021. ISSN 0140-3664. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366421002681>.

FROYTLOG, Anders; FOSS, Thomas; BAKKER, Ole; JEVNE, Geir; HAGLUND, M Arild; LI, Frank Y; OLLER, Joaquim; LI, Geoffrey Ye. Ultra-low power wake-up radio for 5g iot. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 57, n. 3, p. 111–117, 2019.

FRØYTLOG, Anders; HAGLUND, Magne Arild; CENKERAMADDI, Linga Reddy; JORDBRU, Thomas; KJELLBY, Rolf Arne; BEFERULL-LOZANO, Baltasar. Design and implementation of a long-range low-power wake-up radio for iot devices. *In: IEEE. 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. [S.l.], 2019. p. 247–250.

GLOBALDATA. **Global IoT market will surpass the \$1 trillion mark by 2024, says GlobalData**. 2021. Disponível em: <https://www.globaldata.com/global-iot-market-will-surpass-1-trillion-mark-2024-says-globaldata/>.

GOLDSMITH, Andrea. **Wireless communications**. [S.l.]: Cambridge university press, 2005.

HAENGGI, Martin; ANDREWS, Jeffrey G; BACCELLI, François; DOUSSE, Olivier; FRANCESCHETTI, Massimo. Stochastic geometry and random graphs for the analysis and design of wireless networks. **IEEE journal on selected areas in communications**, IEEE, v. 27, n. 7, p. 1029–1046, 2009.

HAMMOOD, Dalal Abdulmohsin; RAHIM, Hasliza A; AHMAD, R Badlishah; ALKHAYYAT, Ahmed; SALLEH, Mohammad Ezanni Mat; ABDULMALEK, Mohamedfareq; JUSOH, Muzammil; ABBASI, Qammer H. Enhancement of the duty cycle cooperative medium access control for wireless body area networks. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 3348–3359, 2018.

HASSAN, Rosilah; QAMAR, Faizan; HASAN, Mohammad Kamrul; AMAN, Azana Hafizah Mohd; AHMED, Amjed Sid. Internet of things and its applications: A comprehensive survey. **Symmetry**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 10, p. 1674, 2020.

HMAMOUCHE, Yassine; BENJILLALI, Mustapha; SAOUDI, Samir; YANIKOMEROGLU, Halim; RENZO, Marco Di. New trends in stochastic geometry for wireless networks: A tutorial and survey. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, 2021.

INTELLIGENCE, GSMA. **Global Mobile Trends 2021 Navigating Covid-19 and beyond**. 2020. Technical Report, GSMA Intelligence; 2020. Disponível em: <https://data.gsmaintelligence.com/api-web/v2/research-file-download?file=141220-Global-Mobile-Trends.pdf&id=58621970>.

JEFFREY, Alan; ZWILLINGER, Daniel; GRADSHTEYN, I.S.; RYZHIK, I.M. **Table of Integrals, Series, and Products (Seventh Edition)**. Seventh edition. Boston: Academic Press, 2007.

KARIM, Rashid; IFTIKHAR, Adnan; IJAZ, Bilal; MABROUK, Ismail Ben. The potentials, challenges, and future directions of on-chip-antennas for emerging wireless applications—a comprehensive survey. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 173897–173934, 2019.

KHANESAR, Mojtaba Ahmadi; TESHNEHLAB, Mohammad; SHOOREHDELI, Mahdi Aliyari. A novel binary particle swarm optimization. *In: IEEE. 2007 Mediterranean conference on control & automation*. [S.l.], 2007. p. 1–6.

KUMAR, Pawan; UROOJ, Shabana; MALIBARI, Areej. Design and implementation of quad-element super-wideband mimo antenna for iot applications. **IEEE Access**, IEEE, v. 8, p. 226697–226704, 2020.

LANEMAN, J Nicholas; TSE, David NC; WORNELL, Gregory W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. **IEEE Transactions on Information theory**, IEEE, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, 2004.

LE, Ngoc Phuc; SAFAEI, Farzad; VARMA, Vineeth Satheeskumar *et al.* Energy efficiency analysis of antenna selection multi-input multi-output automatic repeat request systems over nakagami-m fading channels. **IET Communications**, IET, v. 9, n. 12, p. 1522–1530, 2015.

LEE, Jon; LEYFFER, Sven. **Mixed integer nonlinear programming**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011. v. 154.

LIN, Deyu; WANG, Quan; MIN, Weidong; XU, Jianfeng; ZHANG, Zhiqiang. A survey on energy-efficient strategies in static wireless sensor networks. **ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)**, ACM New York, NY, USA, v. 17, n. 1, p. 1–48, 2020.

LIU, Shengzhong; YAO, Shuochao; HUANG, Yifei; LIU, Dongxin; SHAO, Huajie; ZHAO, Yiran; LI, Jinyang; WANG, Tianshi; WANG, Ruijie; YANG, Chaoqi *et al.* Handling missing sensors in topology-aware iot applications with gated graph neural network. **Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies**, ACM New York, NY, USA, v. 4, n. 3, p. 1–31, 2020.

LU, Xiao; SALEHI, Mohammad; HAENGGI, Martin; HOSSAIN, Ekram; JIANG, Hai. Stochastic geometry analysis of spatial-temporal performance in wireless networks: A tutorial. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, 2021.

NIŽETIĆ, Sandro; ŠOLIĆ, Petar; GONZÁLEZ-DE, Diego López-de-Ipiña; PATRONO, Luigi *et al.* Internet of things (iot): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 274, p. 122877, 2020.

PAULRAJ, Arogyaswami; ROHIT, Arogyaswami Paulraj; NABAR, Rohit; GORE, Dhananjay. **Introduction to space-time wireless communications**. [S.l.]: Cambridge university press, 2003.

RAULT, Tifenn; BOUABDALLAH, Abdelmadjid; CHALLAL, Yacine. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey. **Computer networks**, Elsevier, v. 67, p. 104–122, 2014.

SANTOS, Edson Leonardo Dos; MARIANO, André Augusto; BRANTE, Glauber; LEITE, Bernardo; SOUZA, Richard Demo; TARIS, Thierry. Energy efficiency in multiple antenna machine-type communications with reconfigurable rf transceivers. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 113031–113042, 2019.

SHAH, Indra Kumar; MAITY, Tanmoy; DOHARE, Yogendra Singh. Algorithm for energy consumption minimisation in wireless sensor network. **IET Communications**, IET, v. 14, n. 8, p. 1301–1310, 2020.

SHU, Yuanchao; SHIN, Kang G; CHEN, Jiming; SUN, Youxian. Joint energy replenishment and operation scheduling in wireless rechargeable sensor networks. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, IEEE, v. 13, n. 1, p. 125–134, 2016.

SINHA, Satyajit. **State of IoT 2021: Number of connected IoT devices growing 9% to 12.3 billion globally, cellular IoT now surpassing 2 billion**. 2021. Technical Report, IoT Analytics; 2021. Disponível em: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>.

TSE, David; VISWANATH, Pramod. **Fundamentals of wireless communication**. [S.l.]: Cambridge university press, 2005.

XU, Lina; COLLIER, Rem; O'HARE, Gregory MP. A survey of clustering techniques in wsns and consideration of the challenges of applying such to 5g iot scenarios. **IEEE Internet of Things Journal**, IEEE, v. 4, n. 5, p. 1229–1249, 2017.