

Análise de Desempenho e
Consumo de Energia da Fusão de
Informações de Sensoriamento
Espectral

HÉLITON SILVA GONÇALVES DE AGUIAR

DEZEMBRO / 2022



ANÁLISE DE DESEMPENHO E CONSUMO DE ENERGIA DA FUSÃO DE INFORMAÇÕES DE SENSORIA-MENTO ESPECTRAL

HÉLITON SILVA GONÇALVES DE AGUIAR

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Dayan Adionel Guimarães.

Aguiar, Héilton Silva Gonçalves de

H677a

Análise de Desempenho e Consumo de Energia da Fusão de Informações de Sensoriamento Espectral. / Héilton Silva Gonçalves de Aguiar.– Santa Rita do Sapucaí, 2022.

87 p.

Orientador: Prof. Dr. Dayan Adionel Guimarães

Dissertação de Mestrado em Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

Inclui bibliografia.

Inclui anexo.

1. Dector de energia 2. Consumo energético 3. Rádio cognitivo 4. Sensoriamento espectral 5. Cluster 6. Mestrado em Telecomunicações. I. Guimarães, Dayan Adionel II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em ____ / ____ / ____,
pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Dayan Adionel Guimarães
INATEL

Prof. Dr. Bartolomeu Ferreira Uchôa Filho
UFSC

Dr. Hugo Rodrigues Dias Filgueiras
INATEL

Coordenador do Curso de Mestrado
Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito

*“Percebi que a sabedoria é melhor
que a insensatez, assim como a luz
é melhor que as trevas”*

Eclesiastes 02.13

*A Deus e aos meus pais,
meus principais alicerces.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pois me sustentou nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, uma imensa gratidão por todo o suporte durante o curso e também na minha vida toda, pois sem eles não seria possível.

Ao Prof. Dr. Dayan Adionel Guimarães por toda paciência e valiosa orientação durante o curso, mesmo nos contratempos e imprevistos ao longo da caminhada.

Agradeço por todo o conhecimento e experiências compartilhadas durante nosso convívio. Ao Lucas dos Santos Costas pelo suporte na elaboração do trabalho.

Ao Inatel, pela oportunidade de concluir o curso em uma instituição renomada e de extrema excelência. Agradeço sinceramente a todos, pois foi uma jornada pessoalmente desafiadora.

Este trabalho foi financiado em parte pela RNP, com recursos do MCTIC, processo N° 01245.010604/2020-14, sob o projeto Brasil 6G do Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Inatel, e em parte pelo CNPq e pela Fundação de Amparo e Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).

Héilton Silva Gonçalves de Aguiar

Sumário

Sumário	x
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Abreviaturas e Siglas	xv
Lista de Símbolos	xvii
Resumo	xxi
Abstract	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Rádios cognitivos	2
1.3 Sensoriamento cooperativo	3
1.4 Padronização do Rádio Cognitivo	4
1.5 Consumo de energia e trabalhos relacionados	4
1.6 Contribuições e publicações	6
1.7 Estrutura da dissertação	7
2 Sensoriamento espectral	9
2.1 Modelo de sinal, canal e ruído	9
2.2 Detector de energia	14
2.3 Outras estatísticas de teste	15
2.4 Curva ROC	18
3 Métodos de Fusão no Sensoriamento Cooperativo e Modelo de Energia	23
3.1 Sensoriamento cooperativo com fusão de dados e decisões	23
3.2 Sensoriamento cooperativo com fusão híbrida	24
3.3 Modelo de consumo de energia	26
3.4 Modelos de mobilidade	30
4 Resultados	35
4.1 Análise de desempenho	37
4.2 Consumo para distribuição aleatória dos terminais	42

4.3	Consumo com modelo de mobilidade RWP	44
5	Conclusões e propostas para trabalhos futuros	49
I	Adaptação do RWP para área circular	1
	Referências Bibliográficas	5

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de coexistência da rede primária e secundária	3
2.1	Distribuições da estatística de teste T sob as hipóteses \mathcal{H}_0 e \mathcal{H}_1 para um alto valor de n	19
2.2	Desempenho dos detectores ED, MED, MMED, GLRT, GRCR, GID, PRIDe e LMPIT para uma relação sinal-ruído (<i>signal-to-noise-ratio</i> , SNR) = -10 dB	20
2.3	Desempenho dos detectores ED, MED, MMED, GLRT, GRCR, GID, PRIDe e LMPIT para uma SNR = -13 dB	21
3.1	Sensoriamento cooperativo com fusão de dados	24
3.2	Sensoriamento cooperativo com fusão de decisões	25
3.3	Sensoriamento cooperativo com fusão híbrida	26
3.4	Possibilidade de posicionamento dos terminais, com $m = 12$ usuário secundários (<i>secondary users</i> , SUs) divididos em $c = 4$ <i>clusters</i>	27
3.5	Divisão de tempo de quadro para sensoriamento espectral	28
3.6	Densidade de probabilidade empírica da posição dos nós no modelo RWP	32
3.7	Densidade de probabilidade empírica da posição dos nós no modelo RWP modificado para área de mobilidade circular	33
4.1	Distância máxima de um SU da estação base primária	37
4.2	Figura (a): Desempenho do detector ED para $m = 6$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 1$, Figura (b): Desempenho do detector ED para $m = 6$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 2$, Figura (c): Desempenho do detector ED para $m = 6$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 3$ e Figura (d): Desempenho do detector ED para $m = 6$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 6$	39
4.3	Figura (a): Desempenho do detector ED para $m = 8$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 1$, Figura (b): Desempenho do detector ED para $m = 8$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 2$, Figura (c): Desempenho do detector ED para $m = 8$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 4$ e Figura (d): Desempenho do detector ED para $m = 8$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 8$	40

4.4	Figura (a): Desempenho do detector ED para $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusção híbrida com $c = 1$, Figura (b): Desempenho do detector ED para $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusção híbrida com $c = 2$ e Figura (c): Desempenho do detector ED para $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusção híbrida com $c = 3$	41
4.5	Figura (a): Desempenho do detector ED para $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusção híbrida com $c = 4$, Figura (b): Desempenho do detector ED para $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusção híbrida com $c = 6$ e Figura (c): Desempenho do detector ED para $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusção híbrida com $c = 12$	42
4.6	Figura (a): Consumo médio de energia por bit transmitido do detector ED para $m = 6$, $m = 8$ e $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusção híbrida com $c = 1$, Figura (b): Consumo médio de energia por bit transmitido do detector ED para $m = 6$, $m = 8$ e $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusção híbrida com $c = 2$, Figura (c): Consumo médio de energia por bit transmitido do detector ED para $m = 6$, $m = 8$ e $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusção híbrida com $c = m/2$ e Figura (d): Consumo médio de energia por bit transmitido do detector ED para $m = 6$, $m = 8$ e $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusção híbrida com $c = m$	44
4.7	Exemplo de caminho percorrido por 1 SU	45
4.8	Consumo dinâmico de energia por bit transmitido para fusão de dados e fusão de decisões	46
4.9	Consumo de energia por bit transmitido dinâmico para fusão de dados e fusão de decisões	47

Lista de Tabelas

2.1	Valores típicos do expoente de perda de percurso e distância de referência	12
2.2	Valores típicos da média e desvio padrão do fator de Rice	13
4.1	Parâmetros de sistema.	36
4.2	Parâmetros de entrada do mobilidade de ponto aleatório (<i>random way-point mobility</i> , RWP)	46

Lista de Abreviaturas e Siglas

5G	Quinta geração
6G	Sexta geração
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
BS	Estação base (<i>base station</i>)
CDMA	Acesso múltiplo por divisão de código (<i>code division multiple access</i>)
CH	Líder de agrupamento (<i>cluster head</i>)
CR	Rádio cognitivo (<i>cognitive radio</i>)
CRN	Rede de rádio cognitivo (<i>cognitive radio network</i>)
CSS	Sensoriamento espectral cooperativo (<i>cooperative spectrum sensing</i>)
DSA	Acesso dinâmico ao espectro (<i>dynamic spectrum access</i>)
DSS	Compartilhamento dinâmico do espectro (<i>dynamic spectrum sharing</i>)
DTV	TV digital (<i>digital TV</i>)
ED	Detector de energia (<i>energy detector</i>)
EIRP	Potência isotrópica radiada equivalente (<i>effective isotropic radiated power</i>)
FC	Centro de fusão (<i>fusion center</i>)
FCC	Comissão de Comunicação Federal (<i>Federal Communication Commission</i>)
FDMA	Acesso múltiplo por divisão de frequência (<i>frequency division multiple access</i>)
GID	Teste realizado a partir do índice de Gini (<i>Gini index detector</i>)
GLRT	Teste de máxima verossimilhança generalizado (<i>generalized likelihood ratio test</i>)
GRCR	Detector baseado nos raios e centros dos círculos de Gerschgorin (<i>Gerschgorin radii and centers ratio</i>)
i.i.d	Independente e identicamente distribuído
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
LMPIT	Teste invariante de maior potência local (<i>locally most powerful invariant test</i>)
LoS	Linha de visada (<i>line of sight</i>)
MED	Detector pelo máximo autovalor (<i>maximum eigenvalue detection</i>)
MMED	Detector pela razão entre máximo e mínimo autovalor (<i>maximum-minimum eigenvalue detection</i>)
NLoS	Sem linha de visada (<i>non line of sight</i>)
PDF	Função densidade de probabilidade (<i>probability density function</i>)
PRIDe	Teste do índice de Pietra-Ricci (<i>Pietra-Ricci index detector</i>)

PU	Usuário primário (<i>primary user</i>)
QoS	Qualidades de serviço (<i>quality of service</i>)
RF	Rádiofrequência (<i>radiofrequency</i>)
ROC	Curva característica de operação do receptor (<i>receiver operating characteristic curve</i>)
RWP	Mobilidade de ponto aleatório (<i>random waypoint mobility</i>)
SCM	Matriz de covariância amostral (<i>sample covariance matrix</i>)
SNR	Relação sinal-ruído (<i>signal-to-noise-ratio</i>)
SU	Usuário secundário (<i>secondary user</i>)
TDMA	Acesso múltiplo por divisão de tempo (<i>time division multiple access</i>)
TVWS	Espaços em branco da faixa de TV (<i>TV white spaces</i>)
UHF	(<i>ultra high frequency</i>)
VHF	(<i>very high frequency</i>)
WRAN	Rede de área regional sem fio (<i>wireless regional area network</i>)

Lista de Símbolos

α	Expoente de perda de percurso
c	Número de agrupamentos (<i>clusters</i>)
\mathbb{C}	Conjunto dos números complexos
D	Vazão de dados da rede secundária
d_0	Distância de referência
\dagger	Conjugado transposto
Δ	Tempo de deslocamento do rádio cognitivo
Δ_{\max}	Tempo de deslocamento máxima do rádio cognitivo
Δ_{\min}	Tempo de deslocamento mínimo do rádio cognitivo
d_k	Distância do k -ésimo rádio cognitivo ao centro de fusão ou outro rádio cognitivo
\mathbb{E}	Operador esperança matemática
E_1	Energia consumida no sistema híbrido referente a parte interna do grupo
E_2	Energia consumida no sistema híbrido referente a parte externa do grupo
E_B	Quantidade de energia consumida por bit efetivamente transmitido
E_T	Energia total consumida pela rede de rádios cognitivos
\mathbf{G}	Matriz de modelagem de ganho do canal de comunicação
γ	Limiar de decisão
\mathbf{h}	Vetor de modelagem do canal de comunicação
\mathcal{H}_0	Hipótese correspondente a ausência do sinal primário
\mathcal{H}_1	Hipótese correspondente a presença do sinal primário
K	Fator de Rice
K_e	Constante de ajuste referente à perda no espaço livre
λ	Autovalor da matriz de covariância de \mathbf{Y}
λ_{\max}	Máximo autovalor da matriz de covariância de \mathbf{Y}
λ_{\min}	Mínimo autovalor da matriz de covariância de \mathbf{Y}
m	Número de rádios cognitivos
\mathbf{C}	Matriz formada pela multiplicação da matriz de covariância de \mathbf{Y} e da matriz \mathbf{D}
\mathbf{D}	Matriz diagonal formada pelos elementos da diagonal principal da matriz de covariância de \mathbf{Y}
M_Δ	Média da distribuição do tempo de deslocamento no nó no RWP
μ	Média de uma variável aleatória
μ_κ	Média da variável aleatória gaussiana do fator de Rice K
μ_κ	Média de uma variável aleatória referente aos elementos do vetor \mathbf{u} que modela canais com desvanecimentos do tipo Rice

n	Número de amostras coletadas
N_P	Número de passos do RWP
p_0	Probabilidade do espectro estar desocupado
p_1	Probabilidade do espectro estar ocupado
P_d	Probabilidade de detecção
P_{fa}	Probabilidade de falso alarme
ϕ	ângulo de deslocamento do rádio cognitivo
P_{\min}	Limiar de potência de recepção mínima do rádio cognitivo ou centro de fusão
\bar{P}_{rx}	Potência média de recepção do sinal primário nos rádios cognitivos
$\bar{\sigma}^2$	Potência média de ruído nos rádios cognitivos
$\bar{\sigma}_i^2$	Potência de ruído no i -ésimo rádio cognitivo
$P_r \{ \cdot \}$	Probabilidade de ocorrência do evento $\{ \cdot \}$
p	Probabilidade de o transmissor primário ser considerado inativo
P_{rk}	Potência de transmissão para reporte do k -ésimo rádio cognitivo
P_s	Potência dissipada durante o sensoriamento
P_{tk}	Potência de transmissão do k -ésimo rádio cognitivo para a estação base
P_{tx}	Potência de transmissão do transmissor primário
R_b	Taxa de transmissão da rede de rádio cognitivo
ρ_N	Fração de variação da potência de ruído
\mathbf{R}_Y	Matriz de covariância de \mathbf{Y}
$\hat{\mathbf{R}}_Y$	Matriz de covariância amostral de \mathbf{Y}
σ	Desvio padrão de uma variável aleatória
σ^2	Variância de uma variável aleatória
σ_κ^2	Variância da variável aleatória gaussiana do fator de Rice K
σ_κ^2	Variância de uma variável aleatória referente aos elementos do vetor \mathbf{u} que modela canais com desvanecimentos do tipo Rice
τ	Tempo de quadro
τ_r	Tempo destinado ao reporte
τ_s	Tempo destinado ao sensoriamento
τ_t	Tempo destinado a transmissão de dados
T	Estatística de teste do detector de energia
T_S	Tempo de simulação do RWP
T_{GID}	Estatística de teste do detector GID
T_{GLRT}	Estatística de teste do detector GLRT
T_{GRCR}	Estatística de teste do detector GRCR
T_{LMPIT}	Estatística de teste do detector LMPIT
T_{MED}	Estatística de teste do detector MED
T_{MMED}	Estatística de teste do detector MMED
T_{PRIDe}	Estatística de teste do detector PRIDe
\mathbf{u}	Vetor de modelagem do desvanecimento do canal de comunicação
\mathbf{V}	Matriz de modelagem do ruído nos rádios cognitivos
ϱ	Distância a percorrer pelo rádio cognitivo
v	Velocidade de deslocamento do rádio cognitivo
v_{\max}	Velocidade de deslocamento máxima do rádio cognitivo
v_{\min}	Velocidade de deslocamento mínima do rádio cognitivo

\mathbf{x}	Vetor de modelagem do sinal primário
x	Coordenada no eixo x
x_{\max}	Coordenada máxima no eixo x
x_{\min}	Coordenada mínima no eixo x
y	Coordenada no eixo y
\mathbf{Y}	Matriz de amostras recebida para fins de sensoriamento
y_{\max}	Coordenada máxima no eixo y
y_{\min}	Coordenada mínima no eixo y

Resumo

Aguiar, H.S.G. Análise de Desempenho e Consumo de Energia da Fusão de Informações de Sensoriamento Espectral [dissertação de mestrado]. Santa Rita do Sapucaí: Instituto Nacional de Telecomunicações; 2022.

Além das métricas de desempenho tradicionais no contexto do sensoriamento espectral em redes de rádios cognitivos, o consumo de energia tem recebido muita atenção, já que se trata de um recurso limitado. Neste trabalho analisa-se o desempenho do sensoriamento baseado no detector de energia e também o consumo energético da rede em três modos de sensoriamento cooperativo: fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida. Os resultados de simulação computacional apresentados usam um modelo realista em termos da localização e mobilidade dos terminais, bem como da regra de formação de agrupamentos (*clusters*) na fusão híbrida. Primeiramente utiliza-se um modo de mobilidade com distribuição uniforme para análise de desempenho e consumo de energia. Em seguida, um modelo no qual se visa simular a mobilidade de um terminal real foi adaptado para área circular para realizar as análises consideradas no modelo uniforme. Para a formação dos *clusters* adota-se um modo que leva em conta o posicionamento dos terminais móveis, visando a melhora do consumo de energia.

Palavras-Chave: Detector de energia, consumo energético, rádio cognitivo, sensoriamento espectral.

Abstract

Aguiar, H.S.G. Análise de Desempenho e Consumo de Energia da Fusão de Informações de Sensoriamento Espectral [dissertação de mestrado]. Santa Rita do Sapucaí: Instituto Nacional de Telecomunicações; 2022.

In addition to traditional performance metrics in the context of spectrum sensing in cognitive radio networks, energy consumption has received a lot of attention, as it is a limited resource. In this document, the performance of spectrum sensing based on the energy detector and also the energy consumption of the network is analyzed in three cooperative sensing modes: data fusion, decision fusion and hybrid fusion. The presented computer simulation results make use of a realistic model in terms of the location and mobility of the terminals, and of the cluster formation rule in the hybrid fusion mode. Firstly, a mobility mode with uniform distribution is used for performance analysis and energy consumption. Then, a model that aims to simulate the mobility of a real terminal was adapted to a circular area to perform the analyses considered in the uniform model. For the formation of clusters, a method is adopted that takes into account the positioning of the mobile terminals, aiming it improving the energy consumption.

Keywords: Energy detector, energy consumption, cognitive radio, spectrum sensing.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

O crescimento exponencial dos sistemas de comunicações sem fio sobrecarregou a utilização do espectro de rádiofrequência (*radiofrequency*, RF), tornando este recurso extremamente escasso e até impeditivo a alocação de novos serviços [1, 2]. Para coordenar o funcionamento dos diversos sistemas em operação, uma política de alocação fixa de frequências é adotada por órgãos de regulação governamentais, que no Brasil fica ao encargo da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e nos Estados Unidos fica por conta da Comissão de Comunicação Federal (*Federal Communication Commission*, FCC), por exemplo [3, 4]. Em tal política vigente de alocação espectral, destina-se uma banda de frequências exclusiva a cada tipo de serviço, vinculado ao pagamento de uma licença de uso.

Com a presente diversidade de serviços de telecomunicações disponíveis, tem-se a necessidade de que haja tráfegos de dados com diferentes qualidades de serviço (*quality of service*, QoS) e também taxas cada vez mais altas [5], requerendo bandas cada vez maiores, dificultando a expansão e inserção de novas tecnologias devido à escassez do espectro de RF, realidade que se tornará mais desafiadora com a massificação da internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT) e da quinta geração (5G) das redes de comunicação sem fio, e posteriormente também a tecnologia de sexta geração (6G).

A política de alocação vigente mostra-se ineficiente e incapaz de suportar expansões de novos sistemas de comunicação sem fio. Então, novas propostas mais adequadas, definidas como acesso dinâmico ao espectro (*dynamic spectrum access*, DSA) ou compartilhamento dinâmico do espectro (*dynamic spectrum sharing*, DSS) podem ser implementadas a fim de melhor explorar o espectro de RF, já que o espectro já alocado aos usuários licenciados mostrou um alto grau de subutilização em certas faixas de

frequências [6].

1.2 Rádios cognitivos

Nos cenários de compartilhamento de espectro, usuários não licenciados podem utilizar este recurso de forma compartilhada com os usuários licenciados. Isso pode ser feito de duas maneiras, denominadas de *underlay* e *interwave* [7]. Na primeira, os usuários não licenciados podem fazer o uso da banda simultaneamente com os usuários licenciados, desde que não ultrapassem limites que causem interferência à rede primária. Já na segunda abordagem, as transmissões secundárias são realizadas de forma oportunista quando a banda estiver inativa. Nesse contexto, surge o conceito dos rádio cognitivos (*cognitive radios*, CRs), como proposta de melhor aproveitar as lacunas no espectro de RF deixados pela rede primária de usuários licenciados, ou usuário primários (*primary users*, PUs). Esta tecnologia consiste em transceptores dotados de cognição que fazem parte de uma rede secundária e que realizam, dentre outras tarefas, o sensoriamento do espectro para realizar transmissões oportunistas. Estes dispositivos são definidos como usuário secundários (*secondary users*, SUs) [8].

A Figura 1.1 ilustra a coexistência da rede primária e da rede secundária, sendo Tx_1 a estação transmissora da rede primária, Rx_1 , Rx_2 , Rx_3 e Rx_4 os terminais receptores da rede primária, a estação base (*base station*, BS) da rede secundária, comumente chamada de centro de fusão (*fusion center*, FC) e SU_1 , SU_2 e SU_3 os terminais cognitivos da rede secundária. Os círculos tracejados à direita e à esquerda representam as áreas de cobertura da rede secundária e primária, respectivamente. Esta figura exemplifica a utilização das lacunas espectrais deixadas por sinais de TV, como previsto pelo padrão IEEE 802.22, aplicado à rede de área regional sem fio (*wireless regional area network*, WRAN) [9].

As áreas de cobertura ilustradas na Figura 1.1 demonstram que os SUs que realizam o sensoriamento da rede primária podem localizar-se fora do alcance da mesma, como o SU_3 , possibilitando uma decisão individual equivocada sobre o estado de ocupação da banda, possibilitando este terminal provocar interferência à rede primária. Mesmo os terminais dentro da região abrangida pela rede primária, SU_1 e SU_2 , podem não identificar o sinal sensoriado em questão, devido a problemas intrínsecos causados pela propagação das ondas eletromagnéticas, sendo eles os desvanecimentos (*fading*) ou problemas de terminais obstruídos por obstáculos (*shadowing*). Em virtude destes efeitos, o sensoriamento realizado de forma cooperativa entre os SUs é preferido em relação ao sensoriamento realizado de forma individual [7].

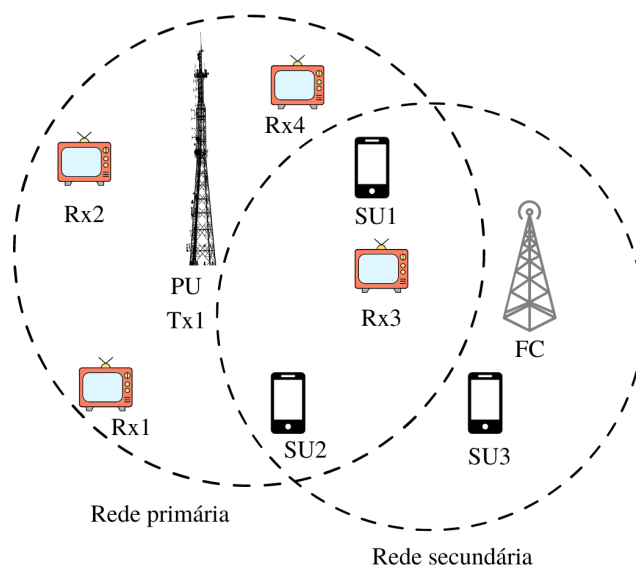


Figura 1.1: Exemplo de coexistência da rede primária e secundária.

1.3 Sensoriamento cooperativo

O sensoriamento espectral cooperativo (*cooperative spectrum sensing*, CSS) é preferido em relação ao individual por melhorar a acurácia no processo de decisão sobre o estado de ocupação da banda. Essa melhoria é conseguida explorando-se a diversidade espacial dos terminais, contornando as degradações de sinal ocasionados por desvanecimentos, sombreamentos e terminais obstruídos [8, 10].

O CSS pode ser classificado como distribuído ou centralizado. No modo distribuído, os SUs realizam o sensoriamento de forma individual, compartilham entre si informações sobre o estado de ocupação da banda e realizam a decisão através de um consenso, por exemplo. Já no modo centralizado, os SUs enviam seus dados ao FC, podendo este ser a própria estação base da rede secundária ou um terminal destinado a esta tarefa, onde uma decisão global é tomada e comunicada a todos os SUs. Quando identificado que a banda não está sendo utilizada, uma técnica de múltiplo acesso é adotada entre os SUs para disputa de utilização da banda [8], sendo elas as mais conhecidas: acesso múltiplo por divisão de frequência (*frequency division multiple access*, FDMA), acesso múltiplo por divisão de tempo (*time division multiple access*, TDMA) e acesso múltiplo por divisão de código (*code division multiple access*, CDMA) [7].

1.4 Padronização do Rádio Cognitivo

Tendo em vista o melhor aproveitamento do espectro devido ao alto grau de subutilização [11], a FCC liberou o compartilhamento nos espaços ociosos de TV, conhecidos como espaços em branco da faixa de TV (*TV white spaces*, TVWS). Com isso, novas tecnologias foram incentivadas e novos padrões foram elaborados para possibilitar a operabilidade oportunista dos TVWS [12]. Alguns exemplos como os padrões IEEE P802.19.1, IEEE 802.11af, IEEE 802.15.4m, e ECMA 392 foram desenvolvidos englobando completa ou parcialmente o conceito dos rádios cognitivos [13]. Entretanto, o padrão IEEE 802.22 é o primeiro a ser considerado como padrão cognitivo, por apresentar um trabalho mais completo e aprimorado [14].

O IEEE criou o grupo 802.22 para desenvolvimento do padrão para WRAN baseada na tecnologia de rádio cognitivo. Os sistemas WRANs operam nas bandas de TV (*very high frequency*, VHF)/ (*ultra high frequency*, UHF), as quais compreendem as faixas de 54 à 862 MHz, e que no Brasil abrange a faixa de 470 à 700 MHz [12]. Os rádios cognitivos podem operar nos espaços ociosos da banda sem causar interferência aos usuários licenciados.

Os sistemas de rádios cognitivos aplicados às WRANs podem usufruir do acesso à banda larga sem fio em áreas rurais e suburbanas e para que o padrão possa ser aplicado na prática, é necessária uma área de cobertura em torno de 17-30 km, onde o alcance máximo permitido é de 100 km [9, 12], no qual os dispositivos cognitivos devem ser capazes de identificar sinais de TV digital (*digital TV*, DTV) de até -116 dBm [15].

1.5 Consumo de energia e trabalhos relacionados

Outro tema relevante que tem recebido muita atenção de pesquisadores ultimamente é o consumo de energia das rede de rádio cognitivos (*cognitive radio networks*, CRNs) [16–18]. Com a alta demanda de taxa de dados, a eficiência energética torna-se uma métrica de extrema importância para a operação das CRNs, sendo definida como a energia média consumida por bit transmitido. Esta métrica pode aglutinar aspectos importantes de uma CRN, como a vazão de dados (*throughput*), a capacidade de detecção do sistema e a própria energia consumida. Aspectos estes relevantes aos dispositivos cognitivos, pois estes equipamentos realizam diversos processos antes da transmissão efetiva de dados, resultando em um alto gasto de energia, que, como já conhecido, é um recurso limitado principalmente aos usuários finais. Como já mencionado, o CSS mostra-se mais preciso no processo de decisão da banda sensoriada. Portanto, com o aumento dos CRs em cooperação a confiabilidade da decisão final torna-se mais pre-

cisa. Em contrapartida, quanto maior o número de CRs operando na rede, aumenta-se o gasto energético em cada etapa dos processos realizados pelos SUs, desde o sensoriamento até a alocação dos terminais à banda em questão, além de sobrecarregar e dificultar a coordenação e sincronização desses SUs através de canais de controles.

Com isso, vários trabalhos propuseram métodos para reduzir o consumo de energia das CRs, adotando técnicas de otimização em alguma etapa do sensoriamento [19–21]. Em [22] e [23] são propostos métodos para reduzir a quantidade de dados transmitidos ao FC ou outros SUs, para reduzir o consumo energético da CRN. Em [24] e [25], a otimização da regra de fusão das decisões locais no FC é proposta de forma a maximizar a eficiência energética, condicionado a limiares de desempenho pré-estabelecidos.

A abordagem com utilização de *clusters* mostra-se também interessante para redução do consumo de energia, pois os SUs são divididos em grupos e dentre eles um terminal é estabelecido como líder, sendo ele responsável pela coleta de informações dos membros do grupo. Isso reduz significativamente o *overhead* e a distância física necessária para comunicação entre SUs e FC, porém, há que se considerar os desafios no que tange a formação e coordenação destes *clusters* em uma rede de comunicação móvel [18].

Em [19] analisa-se o consumo de energia considerando apenas o estágio de sensoriamento do quadro. Em [21] é proposto um algoritmo dinâmico que visa reduzir o número de rádios em cooperação, atrelados a um desempenho mínimo de desempenho da probabilidade de falso alarme e detecção. Entretanto, o estágio de transmissão de dados na banda sensoriada não é levado em consideração. Em [20] é proposta um modelo matemático para reduzir o número de rádios em cooperação para redução do consumo de energia da rede de forma que satisfaça condições de probabilidade de falso alarme e detecção. Porém, apenas o estágio de sensoriamento é levado em consideração. Nestes artigos são analisados o consumo de energia e não a energia consumida por bit transmitido, considerando apenas um modo de fusão das informações no FC.

Em [26] um tempo de sensoriamento adaptativo é proposto com base no padrão de ocupação do canal sensoriado. Também é proposto uma política de sensoriamento na qual se aplica um aumento do período de sensoriamento quando o resultado deste sensoriamento encontra-se em um intervalo específico. Em [27] o rádio muda para um *sleeping mode* quando identificado que o espectro sensoriado está ocupado, de forma a reduzir o consumo de energia. Em [28] os tempos de sensoriamento e transmissão de dados são otimizados para reduzir o consumo de energia atrelados ao desempenho do processo de detecção e da potência disponível no rádio. Entretanto, estas propostas

de otimização [26–28], consideram apenas um único SU, não investigando a proposta em um cenário cooperativo.

Para reportar o resultado local ao FC, cada rádio representa seu próprio resultado usando um número finito de bits. A quantidade de bits utilizadas tem um impacto no desempenho geral do CSS. Por um lado, aumentar o número de bits aumenta a quantidade de informações que está disponível no FC, melhorando a precisão do processo de detecção. Por outro lado, um número maior de bits requer mais largura de banda, aumentando o consumo de energia. Um sistema que utiliza um único bit é chamado de *hard mode*, enquanto múltiplos bits são chamados de *soft mode*. Embora muitos trabalhos tenham comparado estes dois modos de operação sob diferentes configurações, nem um deles investigou o consumo de energia ou eficiência energética [29–32].

Apesar de muitos trabalhos apresentarem interessantes métodos e propostas para redução da energia de uma CRN, muitos desconsideram etapas fundamentais de todo o processo realizado pelo SUs, desde o sensoriamento até a alocação e transmissão de dados efetiva na banda sensoriada. Por outro ponto de vista, modelagens também irrealistas são adotadas para análise de desempenho de uma CRN, resultando em análises também irrealistas. Por exemplo, considerar o mesmo desempenho para todos os SUs [24] em operação, inferindo que todos estão na mesma posição espacial, ou, que estão sob a relação sinal-ruído (*signal-to-noise-ratio*, SNR), ou desconsiderar a influência de relevantes aspectos de propagação do canal de comunicação, como já mencionados, desvanecimentos e sombreamentos [25, 33].

1.6 Contribuições e publicações

Neste trabalho, analisa-se o desempenho do sensoriamento de uma CRN no modo CSS e o consumo de energia por bit transmitido da rede secundária, adotando-se um modelo realista do canal sensoriado, assim como a localização e mobilidade dos SUs, no qual as posições dos SUs, que se alteram a cada realização do sensoriamento, influenciam diretamente ambas as métricas em todas as etapas do sensoriamento. Em uma primeira análise, o método de distribuição do posicionamento e mobilidade dos terminais é feito segundo uma distribuição uniforme. No segundo momento, um modelo de mobilidade de ponto aleatório (*random waypoint mobility*, RWP), o qual simula o movimento de terminais em uma rede de comunicação móvel, é adaptado para uma área circular para análise de desempenho e consumo energético. São comparados os cenários convencionais de CSS com fusão de dados e de decisões, com um novo cenário proposto de fusão híbrida com uso de *clusters*.

O seguinte artigo foi produzido como resultado das pesquisas relacionadas a este trabalho:

❶ **Influência do Método de Fusão do Sensoriamento Espectral no Desempenho e no Consumo de Energia.**

XL Simpósio brasileiro de telecomunicações e processamento de sinais - SBrT 2022, 25–28 de Setembro de 2022, Santa Rita do Sapucaí, MG. Aceito para publicação. Santa Rita do Sapucaí, MG, 26 de Setembro. 2022.

1.7 Estrutura da dissertação

A estrutura da dissertação está dividida da seguinte forma: O Capítulo 2 aborda conceitos sobre sensoriamento espectral e apresenta a construção de detectores e as justificativas pela escolha do detector de energia. Apresenta também os modelos de sinal, canal e ruído. O Capítulo 3 aborda os métodos de fusão no sensoriamento cooperativo e os modelos de energia e mobilidade considerados, incluindo descrição da modificação necessária para adaptar a área do modelo de mobilidade para circular. O Capítulo 4 mostra os resultados numéricos, as descrições gerais da simulação que se aplicam tanto à análise que adota os terminais uniformemente distribuídos quanto via modelo de mobilidade adaptado e o Capítulo 5 conclui o trabalho.

Capítulo 2

Sensoriamento espectral

2.1 Modelo de sinal, canal e ruído

O objetivo desta seção é apresentar de forma detalhada todo o desenvolvimento aplicado para construção dos modelos de sinais e canais utilizados. Estes modelos visam representar sinais de transmissão utilizados, bem como condições realistas do canal de comunicação, incluindo desvanecimentos e sombreamentos, e os efeitos do ruído no desempenho do sistema. Com isso é possível analisar o comportamento dos modelos adotados através de simulações, já que seu objetivo implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que imite as respostas de um sistema real. As simulações podem auxiliar muito no processo de pesquisa, onde experimentos reais não são possíveis ou demandam muito tempo, custo e complexidade para serem implementados.

Considere um CSS operando com fusão de dados com 1 PU e m SUs, cada um coletando n amostras complexas do sinal transmitido pelo PU em cada intervalo de sensoriamento. As amostras coletadas pelos SUs podem ser organizadas em uma matriz $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{m \times n}$ dada por

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & \cdots & y_{1,n} \\ y_{2,1} & y_{2,2} & \cdots & y_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m,1} & y_{m,2} & \cdots & y_{m,n} \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

onde a matriz \mathbf{Y} é computada por meio de

$$\mathbf{Y} = \mathbf{h}\mathbf{x}^T + \mathbf{V}, \quad (2.2)$$

em que o vetor $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^{m \times 1}$ modela os canais entre o PU e os m SUs, ou seja,

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_m \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

sendo h_i , para $i = 1, 2, \dots, m$, o ganho do canal entre o transmissor primário e o i -ésimo SU.

O vetor $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{n \times 1}$ em (2.2) modela o sinal primário, composto por n amostras, ou seja,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

A matriz $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{m \times n}$ em (2.2) modela o ruído nos SUs, dada por

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & \cdots & v_{1,n} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & \cdots & v_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m,1} & v_{m,2} & \cdots & v_{m,n} \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

Podemos descrever a matriz \mathbf{Y} sob duas hipóteses, \mathcal{H}_0 e \mathcal{H}_1 , na seguinte forma,

$$\mathbf{Y} = \begin{cases} \mathbf{V} & : \mathcal{H}_0 \\ \mathbf{h}\mathbf{x}^T + \mathbf{V} & : \mathcal{H}_1 \end{cases}. \quad (2.6)$$

onde as hipóteses \mathcal{H}_0 e \mathcal{H}_1 consideram a ausência e presença do sinal primário, respectivamente.

No presente trabalho as amostras em \mathbf{x} são variáveis aleatórias Gaussianas complexas de média zero e variância P_{tx} , sendo P_{tx} a potência de transmissão do PU. O objetivo de utilizar amostras Gaussianas complexas é para modelar as flutuações de envoltórias de sinais modulados e filtrados ou modulações em banda base, por exemplo [7].

Os elementos h_i de \mathbf{h} modelam os desvanecimentos produzidos no sinal devido às propagações por múltiplos percursos da onda eletromagnética, conhecido como *mul-*

tipath fading, ou sombreamentos causados por obstáculos, *shadowing*. O sinal eletromagnético atinge a antena do terminal móvel através dos principais mecanismos de propagação que são: reflexão, difração e espalhamento [34, pp.206]. A reflexão ocorre quando a onda se choca contra obstáculos com dimensões físicas maiores que o comprimento de onda do sinal [34, pp.207]. A difração ocorre quando a onda eletromagnética atinge a borda dos obstáculos, onde uma nova direção de propagação é criada [34, pp.207]. O espalhamento normalmente ocorre da interação da onda contra obstáculos, ou em partes dele, cujas dimensões físicas são comparáveis ao comprimento de onda do sinal. Nesse sentido, o espalhamento pode ser visto como múltiplas pequenas reflexões [34, pp.207]. Esses mecanismos de propagação descritos compõem o que é normalmente definido como propagação por múltiplos percursos, ou *multipath propagation* [34, pp.207]. Devido às diferentes distâncias percorridas pelas ondas eletromagnéticas, as componentes dos múltiplos caminhos chegam ao receptor com diferentes atrasos e amplitudes. Com isso, as diferentes fases e amplitudes podem se adicionar construtiva ou destrutivamente, causando uma grande variação da potência do sinal recebido. Esta variação é chamada de desvanecimento por múltiplos percursos.

Os ganhos de canal são normalmente considerados constantes durante o intervalo de sensoriamento, sendo eles independentes e identicamente distribuídas (i.i.d) entre sucessivos sensoriamentos. Isto quer dizer que possuem a mesma distribuição de probabilidade e são mutuamente independentes. Estes ganhos constantes significam que a duração do sensoriamento é menor que o tempo de coerência do canal. Esta métrica é uma medida do intervalo de tempo durante o qual a resposta ao impulso do canal pode ser considerada constante, ou seja, os sinais recebidos são igualmente afetados em termos de amplitude. A independência entre os sucessivos sensoriamentos significa que o intervalo entre eles é maior que o tempo de coerência do canal [8].

Considera-se que

$$\mathbf{h} = \mathbf{G}\mathbf{u}, \quad (2.7)$$

com $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ modelando as diferentes atenuações (ganhos) entre o PU e os SUs e $\mathbf{u} \in \mathbb{C}^{m \times 1}$ modelando o desvanecimento multi-percurso. A matriz de atenuações \mathbf{G} é dada por

$$\mathbf{G} = \text{diag} \left(\sqrt{\frac{\mathbf{P}_{\text{rx}}}{P_{\text{tx}}}} \right), \quad (2.8)$$

sendo $\mathbf{P}_{\text{rx}} = [P_{\text{rx}_1}, P_{\text{rx}_2}, \dots, P_{\text{rx}_m}]$ o vetor que contém as potências recebidas por cada

SU e P_{tx} a potência de transmissão do PU.

O canal de comunicação sem fio apresenta duas características principais: propagação em grande escala (*large scale*) e propagação em pequena escala (*small scale*). A primeira pode ser compreendida como a variação da média em área e da média local da potência de sinal recebido. A segunda é definida como a variação da potência instantânea recebida [34, pp.199]. Embora não se tenha um consenso, o termo média local se refere a média tomada em intervalos espaciais de cerca de dezenas de comprimentos de onda. A média em área corresponde à média tomada em intervalos espaciais correspondentes a centenas de comprimentos de onda [34, pp.200].

Entre o transmissor e o receptor existem muitos empecilhos que atenuam o sinal eletromagnético, causando perdas na potência média recebida. Essas perdas podem ser divididas em função da distância entre transmissor e receptor, que mostra como ela afeta a potência média em área do sinal recebido, e em função dos obstáculos entre eles, que impõem variações na potência média local do sinal recebido sobre a potência média em área [34, pp.200].

Considera-se que na perda de percurso no espaço livre, a potência recebida tem variação inversamente proporcional ao quadrado da distância. Por isso, a atenuação no espaço livre é governada por um expoente de perda de percurso cujo valor é igual a 2. Devido à facilidade de implementação, esse modelo é uma adaptação do espaço livre para maiores perdas, conhecido como modelo por perdas logarítmicas. Nesse modelo, a potência recebida média em área, a uma distância d (em metros) do transmissor, é dada por [34, pp.200-202]

$$P_r(d) = P_{tx} K_e \left(\frac{d_0}{d} \right)^\alpha, \quad (2.9)$$

onde P_{tx} é a potência de transmissão, K_e é a constante de ajuste referente à perda no espaço livre em relação ao ponto de referência, d_0 é a distância de referência, e α é o expoente de perda de percurso. Dependendo do ambiente analisado, a distância de referência e o expoente de perda de percurso possuem valores típicos como mostra a Tabela 2.1 [35].

Tabela 2.1: Valores típicos do expoente de perda de percurso e distância de referência [35].

Ambiente	α	d_0 [m]
Espaço livre	2	1
Área urbana	3 ~ 5	100 ~ 1000
Área suburbana	2 ~ 3,5	100 ~ 1000

Com o intuito de simplificar o modelo de propagação adotado, para cálculos referentes às potências transmitidas e recebidas, as seguintes convenções foram adotadas: constante de ajuste $K_e = 1$ e distância de referência $d_0 = 1$ para todo e qualquer ambiente. Apesar de ser simples, este modelo apresenta boa concordância em relação às leis de propagação das ondas eletromagnéticas, tendo o nível de potência determinado em função da distância entre transmissor e receptor e o ambiente adotado. Assim, a potência do sinal primário recebido pelo i -ésimo SU é dada por

$$P_{rx_i} = \frac{P_{tx}}{d_i^\alpha}, \quad (2.10)$$

em que $d_i \geq 1$ m é a distância entre o PU e o i -ésimo SU e α é o expoente de perdas no percurso, com valor determinado conforme o ambiente de propagação, (ver Tabela 2.1).

O vetor \mathbf{u} em (2.7) modela canais com desvanecimento Rice entre o PU e os SUs, formado por variáveis aleatórias Gaussianas complexas com média $\mu_R = \sqrt{\kappa/(2\kappa + 2)}$ e variância $\sigma_R^2 = 1/(\kappa + 1)$, em que $\kappa = 10^{K/10}$ e K é o fator de Rice modelado por uma variável aleatória Gaussiana com média μ_K e desvio padrão σ_K . Estes dois parâmetros tem valores típicos definidos de acordo com o ambiente [36], como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Valores típicos da média e variância do fator de Rice [36].

Ambiente	μ_K [dB]	σ_K [dB]
Áreas urbanas	1,88	4,13
Áreas suburbanas	2,41	3,84
Áreas rurais e abertas	2,63	3,82

Em um canal com desvanecimento do tipo Rice, o fator de Rice é a razão entre a potência do sinal recebido via um percurso dominante de propagação, por exemplo, ao ter visada direta linha de visada (*line of sight*, LoS) entre transmissor e receptor, e a potência contida nos sinais provindos de outros percursos. Quanto maior o fator de Rice, menos desvanecimentos há na potência do sinal recebido. Um fator de Rice nulo indica a ausência de um percurso dominante de propagação, o que caracteriza este canal com desvanecimento *Rayleigh*. Na prática, um fator de Rice acima de 10 configura o canal como livre de desvanecimentos [7, 8].

Os elementos da matriz $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{m \times n}$ em (2.2) são variáveis aleatórias Gaussianas complexas de média nula e variâncias determinadas a partir da SNR, dada por

$$\text{SNR} = 10 \log \left(\frac{\bar{P}_{\text{rx}}}{\bar{\sigma}^2} \right), \quad (2.11)$$

em que \bar{P}_{rx} é a potência média dos sinais recebidos, dada por

$$\bar{P}_{\text{rx}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{\text{rx}_i}, \quad (2.12)$$

e $\bar{\sigma}^2$ é a potência média de ruído, dada por

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sigma_i^2. \quad (2.13)$$

A variância das amostras de ruído na i -ésima linha de \mathbf{V} são determinadas a partir de uma distribuição uniforme no intervalo $[(1 - \rho_N)\bar{\sigma}^2, (1 + \rho_N)\bar{\sigma}^2]$, ou seja,

$$\sigma_i^2 \sim \mathcal{U}[(1 - \rho_N)\bar{\sigma}^2, (1 + \rho_N)\bar{\sigma}^2], \quad (2.14)$$

com $0 \leq \rho_N \leq 1$ determinando a fração de variação da potência de ruído em torno da média, $\bar{\sigma}^2$.

As variações da potência de ruído podem ser ocasionadas pela variação da temperatura ambiente na qual os SUs estão inseridos, bem como por descalibração do circuito interno do próprio receptor e até mesmo sinais indesejados na banda sensoriada, considerados ruído de fundo que são adicionados ao ruído térmico [37].

2.2 Detector de energia

O sensoriamento espectral é um teste de hipótese binário no qual a hipótese nula, \mathcal{H}_0 , hipótese alternativa, \mathcal{H}_1 , denotam as hipóteses de ausência e presença do sinal primário na banda sensoriada, respectivamente. O propósito do processo de detecção é decidir se o sinal recebido foi gerado em função de \mathcal{H}_0 ou \mathcal{H}_1 . Para isso, uma estatística de teste T é formada e comparada com um limiar de decisão γ pré-estabelecido. Se $T > \gamma$, decide-se pela hipótese \mathcal{H}_1 . Caso contrário, decide-se por \mathcal{H}_0 . O grande desafio no projeto de detectores é determinar a estatística de teste T e o limiar de decisão γ para obter o desempenho desejado no processo de sensoriamento.

Há diferentes maneiras de se construir uma estatística de teste, dando origem a diferentes tipos de detectores, sendo o detector de energia (*energy detector*, ED) o detector ótimo segundo os critérios de *Neyman-Pearson* [7]. O ED distingue entre

presença e ausência do sinal primário por meio da energia das amostras coletadas em um intervalo de sensoriamento. A estatística de teste ED no i -ésimo SU é

$$T_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \sum_{j=1}^n |y_{ij}|^2, \quad (2.15)$$

em que σ_i^2 é a potência de ruído no i -ésimo SU e $|y_{ij}|$ é o módulo da j -ésima amostra no i -ésimo SU.

No CSS com fusão de decisões, as decisões locais (nos SUs) são tomadas comparando-se T_i com o correspondente limiar de decisão. Quando se adota o CSS com fusão de dados, a estatística de teste do ED no FC, a partir da qual se toma a decisão global, é dada por [38]

$$T = \sum_{i=1}^m T_i. \quad (2.16)$$

O ED é o detector ótimo segundo os critérios de *Neyman-Pearson*, existindo diferentes detectores com melhor ou pior desempenho de acordo com diferentes critérios de projeto considerados. O ED é amplamente adotado pela relativa baixa complexidade computacional inerente e por apresentar desempenho satisfatório em diversas condições sistêmicas. Em contrapartida, há a necessidade de se conhecer a potência de ruído nas entradas dos receptores para construção do limiar de decisão adequado, característica que o enquadra na categoria de detector semi-cego [39].

2.3 Outras estatísticas de teste

Existem diversas outras técnicas de detecção importantes, por exemplo: detecção por filtro casado [40], detecção por propriedades ciclo-estacionárias [3] e detecção baseada em autovalores [41]. A detecção por filtro casado é considerada ótima, porém a necessidade de conhecer as características do sinal primário, como o formato do pulso de transmissão, a modulação empregada e também o sincronismo de portadoras no receptor para detecção coerente, torna este método de detecção complexo de ser implementado na prática [40]. A detecção por propriedades ciclo-estacionárias mostra-se também muito eficiente, embora inferior ao filtro casado. Neste método são exploradas propriedades de periodicidade do sinal transmitido em decorrência do processo de modulação por portadoras senoidais. Porém, isto requer tempo no processo de detecção para estimação da função de autocorrelação cíclica, com alta complexidade de implementação [3].

Destacam-se também as técnicas de sensoriamento baseadas na matriz de co-

variância do sinal recebido, as quais apresentam boa confiabilidade de detecção e não necessitam de informações *a priori* do sinal sensoriado. A matriz de covariância do sinal recebido é definido como [7]

$$\mathbf{R}_Y = \mathbb{E} [\mathbf{Y}\mathbf{Y}^\dagger], \quad (2.17)$$

onde \mathbb{E} é o operador esperança matemática, $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{m \times n}$ é a matriz das n amostras complexas coletadas pelos m SUs e \dagger denota o conjugado transposto. A matriz de covariância cuja ordem é $m \times m$ é originalmente definida como

$$\mathbf{R}_Y = \mathbb{E} \{ [\mathbf{Y} - \mathbb{E}(\mathbf{Y})][\mathbf{Y} - \mathbb{E}(\mathbf{Y})]^\dagger \}, \quad (2.18)$$

mas, no presente contexto considera-se $\mathbb{E}(\mathbf{Y}) = 0$, então $\mathbf{R}_Y = \mathbb{E} [\mathbf{Y}\mathbf{Y}^\dagger]$, podendo \mathbf{R}_Y ser usualmente definida como matriz de autocovariância ou autocorrelação.

Na prática, \mathbf{R}_Y não é exatamente conhecida, e no lugar dela é utilizada a sua estimação por máxima verossimilhança, definida como matriz de covariância amostral (*sample covariance matrix*, SCM), definida por [41]

$$\hat{\mathbf{R}}_Y = \frac{1}{n} \mathbf{Y}\mathbf{Y}^\dagger. \quad (2.19)$$

A matriz $\hat{\mathbf{R}}_Y$ se aproxima da matriz real, \mathbf{R}_Y , à medida que o número de amostras coletadas aumenta. No limite, $n \rightarrow \infty$, $\mathbf{R}_Y = \hat{\mathbf{R}}_Y$.

Nas técnicas de detecção por autovalores, de posse de $\hat{\mathbf{R}}_Y$, os autovalores, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$, são escalares obtidos através da solução da equação característica $\det(\hat{\mathbf{R}}_Y - \lambda \mathbf{I}) = 0$, sendo \mathbf{I} uma matriz identidade de ordem $m \times m$. Entretanto, na prática, o cômputo destes autovalores não é uma tarefa simples, adotando soluções numéricas para tal fim. Os autovalores são convenientemente organizados de forma decrescente, $\{\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m\}$, sendo possível a construção de detectores como o teste de máxima verossimilhança generalizado (*generalized likelihood ratio test*, GLRT) [41], o detector pela razão entre máximo e mínimo autovalor (*maximum-minimum eigenvalue detection*, MMED) [42] e o detector pelo máximo autovalor (*maximum eigenvalue detection*, MED) [7], cujas estatísticas de teste são, respectivamente

$$T_{\text{GLRT}} = \frac{\lambda_1}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \lambda_i}, \quad (2.20)$$

$$T_{\text{MMED}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_m}, \quad (2.21)$$

$$T_{\text{MED}} = \frac{\lambda_1}{\sigma^2}. \quad (2.22)$$

Vale ressaltar que dentre os detectores apresentados, o GLRT e o MMED não requerem nenhuma informação acerca do sinal sensoriado ou ruído, pois suas estatísticas de teste são construídas diretamente a partir dos autovalores da SCM. Este tipo de detector é classificado como totalmente cego, o que é uma característica desejada. Já o detector MED se adequa na mesma categoria do ED, classificado como semi-cego, já que requer a informação sobre a potência de ruído, σ^2 .

Outros detectores baseados na SCM e que merecem ser citados são o teste invariante de maior potência local (*locally most powerful invariant test*, LMPIT) [7], o detector baseado nos raios e centros dos círculos de Gerschgorin (*Gerschgorin radii and centers ratio*, GRCR) [43], o teste realizado a partir do índice de Gini (*Gini index detector*, GID) [44] e o teste do índice de Pietra-Ricci (*Pietra-Ricci index detector*, PRIDE) [45]. A estatística de teste do detector LMPIT é dada por

$$T_{\text{LMPIT}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m |c_{i,j}|^2, \quad (2.23)$$

onde $c_{i,j}$ são os elementos da i -ésima linha e j -ésima coluna da matriz $\mathbf{C} = \mathbf{D}^{-1/2} \hat{\mathbf{R}}_Y \mathbf{D}^{-1/2}$, com $i, j = 1, 2, \dots, m$, e \mathbf{D} é uma matriz diagonal formada pelos elementos da diagonal principal de $\hat{\mathbf{R}}_Y$. A estatística de testes do LMPIT não apresenta grande complexidade, pois \mathbf{C} é formada por multiplicações matriciais e \mathbf{D} é uma matriz diagonal formada pelos elementos da diagonal principal de $\hat{\mathbf{R}}_Y$, tornando a operação $\mathbf{D}^{-1/2}$ também simples, a qual é o inverso da raiz quadrada dos elementos da diagonal principal de \mathbf{D} . A maior complexidade em questão se dá na obtenção da matriz de covariância amostral $\hat{\mathbf{R}}_Y$.

A estatística de teste do detector GRCR é dada por

$$T_{\text{GRCR}} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1, j \neq i}^m |r_{i,j}|}{\sum_{i=1}^m r_{i,i}}, \quad (2.24)$$

sendo $r_{i,j}$ o elemento da i -ésima linha e j -ésima coluna da matriz $\hat{\mathbf{R}}_Y$, com $i, j = 1, 2, \dots, m$. A estatística de teste do detector GID é dada por

$$T_{\text{GID}} = \frac{\sum_{i=1}^{m^2} |r_i|}{\sum_{i=1}^{m^2} \sum_{j=1}^{m^2} |r_i - r_j|}, \quad (2.25)$$

onde r_i , para $i = 1, 2, \dots, m^2$, é o i -ésimo elemento do vetor \mathbf{r} , formado pelo empilhamento de todas as colunas de $\hat{\mathbf{R}}_Y$. Finalmente, a estatística de teste do detector PRIDe é

$$T_{\text{PRIDe}} = \frac{\sum_{i=1}^{m^2} |r_i|}{\sum_{i=1}^{m^2} |r_i - \bar{r}|}, \quad (2.26)$$

onde $\bar{r} = (1/m^2) \sum_{i=1}^{m^2} r_i$.

É possível observar que T_{GRCR} , T_{GID} e T_{PRIDe} operam diretamente nos elementos de $\hat{\mathbf{R}}_Y$, sendo a obtenção de tal matriz a maior complexidade associada a essas estatísticas de teste. Dentre os detectores LMPIT, GRCR, GID e PRIDe, o LMPIT é o que apresenta um pouco mais de complexidade computacional, pois além de obter a matriz $\hat{\mathbf{R}}_Y$, também necessita da construção da matriz \mathbf{D} . Portanto, é possível observar que esses quatro detectores são um pouco mais complexos que o detector de energia, sendo os detectores cegos de menor complexidade computacional conhecidos até o momento.

2.4 Curva ROC

O desempenho do sensoriamento espectral é comumente medido pela probabilidade de falso alarme [46],

$$P_{\text{fa}} = \text{Pr} \{T > \gamma | \mathcal{H}_0\}, \quad (2.27)$$

e pela probabilidade de detecção [46],

$$P_{\text{d}} = \text{Pr} \{T > \gamma | \mathcal{H}_1\}, \quad (2.28)$$

onde $\text{Pr} \{\cdot\}$ é a probabilidade de ocorrência do evento em questão.

Considerando como exemplo a estatística de teste apresentada em (2.16), T é uma variável aleatória devido à aleatoriedade de y . À medida que o número de amostras

coletadas, n , aumenta, a distribuição probabilística da estatística de teste T se aproxima de uma variável aleatória Gaussiana, segundo o teorema do limite central. A Figura 2.1 [7] mostra a função densidade de probabilidade (*probability density function*, PDF) de T sob ambas as hipóteses, \mathcal{H}_0 e \mathcal{H}_1 , para um valor arbitrariamente grande de n . Como indicado na figura, o cálculo de P_{fa} e P_d se dá pela área sob as PDFs em ambas as hipóteses, dado um limiar de decisão γ . É possível perceber que estas duas métricas são concorrentes, conforme o deslocamento de γ . Movendo γ para esquerda tem-se o aumento de P_{fa} e a redução de P_d . Mudando γ para direita, diminui-se a P_{fa} enquanto P_d aumenta. A faixa de variação de γ é dependente da estatística de teste implementada. Normalmente esse intervalo corresponde a junção de ambas as PDFs, até onde elas se tornam praticamente zero. Como exemplo, na Figura 2.1 o intervalo de variação vai de $\approx 0,05$ à $\approx 0,6$.

É desejável que o sistema apresente baixa P_{fa} , assim proporcionando alta utilização do espectro quando o mesmo estiver desocupado, e alta P_d , para que se forneça alta proteção à rede primária com relação a interferências da rede secundária. Então, adota-se uma solução de compromisso (*trade-off*) normalmente regulamentada por norma, que exige, por exemplo, uma $P_{fa} \leq 0,1$ e $P_d \geq 0,9$ como é o caso do padrão IEEE 802.22.

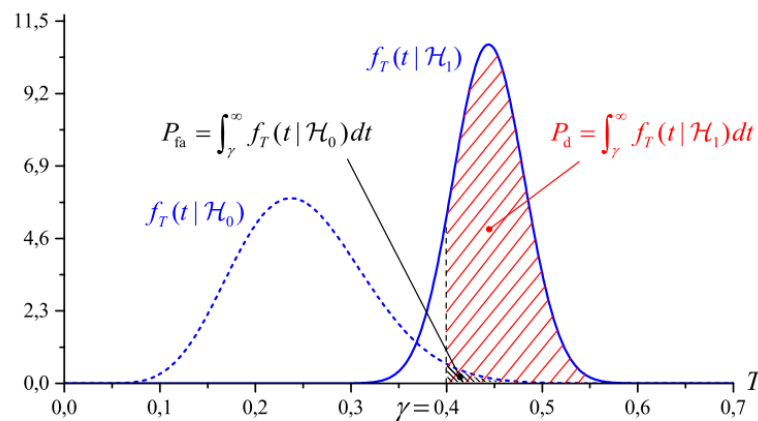


Figura 2.1: Distribuições da estatística de teste T sob as hipóteses \mathcal{H}_0 e \mathcal{H}_1 para um alto valor de n [7].

Essas duas métricas são normalmente aglutinadas em uma curva característica de operação do receptor (*receiver operating characteristic curve*, ROC), na qual P_{fa} e P_d são apresentadas para diferentes limiares de decisão. Cada ponto da curva ROC está vinculado a um valor de limiar γ e é igualmente ótimo em comparação aos outros pontos, pois é o melhor resultado obtido no objetivo de minimizar a P_{fa} e maximizar a

P_d .

A Figura 2.2 mostra curvas ROC para os detectores aqui apresentados. A simulação para tais resultados foi realizada para 20000 eventos de Monte Carlo, com $s = 1$ transmissor primário, $m = 10$ SUs, $n = 100$ amostras, $\text{SNR} = -10$ dB e canal tipo Rice entre transmissor primário e receptor secundário. De forma semelhante, a Figura 2.3 foi obtida para os mesmos parâmetros sistêmicos, porém com $\text{SNR} = -13$ dB. A mudança da SNR é comumente a alternativa mais adotada para obter o desempenho desejado no sensoriamento espectral.

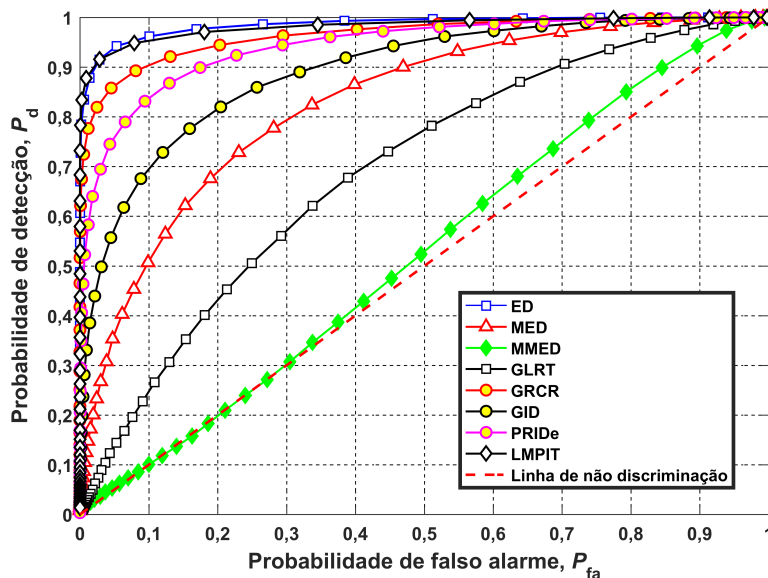


Figura 2.2: Desempenho dos detectores ED, MED, MMED, GLRT, GRCR, GID, PRIDe e LMPIT para uma $\text{SNR} = -10$ dB

O conceito de robustez citado no que tange a sensoriamento espectral está atrelado a capacidade do detector de manter seu comportamento médio em relação às métricas de desempenho analisadas frente a variações de alguns parâmetros de sistema. Por exemplo, um detector é considerado robusto quando seu desempenho não é afetado, ou é pouco afetado, para variações de potência de sinal e de ruído. Uma decisão aleatória sobre a ocupação da banda se dá nos pontos ao longo da linha identificada como “linha de não discriminação”, presente nas Figuras 2.2 e 2.3. Uma curva ROC abaixo desta linha corresponde a um desempenho inútil, exceto quando é de conhecimento que a ROC está abaixo desta linha, caso em que o desempenho voltaria a ser útil apenas invertendo as decisões tomadas.

Nota-se na Figura 2.2 as curvas de desempenho do ED e do LMPIT sobrepostas, e o MMED com desempenho muito próximo à linha de não discriminação. Já na Figura 2.3, o ED se sobressaiu em relação aos outros detectores, principalmente ao LMPIT, seu concorrente na configuração anterior, para uma queda da potência de sinal,

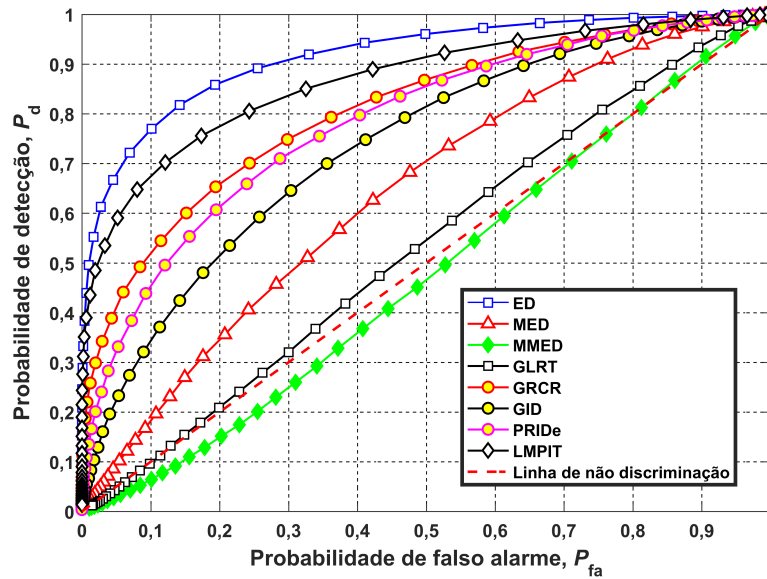


Figura 2.3: Desempenho dos detectores ED, MED, MMED, GLRT, GRCR, GID, PRIDe e LMPIT para uma SNR = -13 dB

ou aumento da potência de ruído, de duas vezes (3 dB), SNR = -10 dB \rightarrow SNR = -13 dB. Destaca-se também a proximidade de operação do GLRT com a linha de não discriminação e a quase total operação do MMED abaixo desta linha.

As comparações aqui apresentadas não representam a regra geral. Diferentes modelos para o canal de sensoriamento, para o sinal primário ou ruído e também a variação temporal da potência dessas grandezas, podem alterar tanto o desempenho absoluto quanto relativo de qualquer técnica de sensoriamento adotada. Diferentes critérios adotados para detectores para fins de sensoriamento podem tornar o tratamento matemático associado ao projeto um obstáculo impeditivo a seu desenvolvimento e por não considerar todas as possíveis situações e a imprecisão de parâmetros que devem ser estimados, as técnicas de sensoriamento acabam por apresentar enormes variações de desempenho sob circunstâncias variadas.

Como já mencionado, a baixa complexidade do ED está atrelada ao conhecimento prévio da variância do ruído. Porém, em cenários práticos o desconhecimento de tal parâmetro deve ser sempre considerado e sua estimação não é uma tarefa trivial, elevando a complexidade do cômputo de T_{ED} .

Em termos de esforço computacional, cada detector possui diferentes processos para construção da estatística de teste, como apresentado nesta seção. O termo complexidade foi citado buscando expressar a dificuldade de cálculo da estatística de teste, sendo tratada em termos do tempo de processamento ou esforço computacional para que se execute determinada função ou algoritmo. Porém, para análise do consumo de energia, qualquer detector poderia ser implementado para as posteriores análises

do trabalho. Porém, paralelamente à facilidade de implementação prática do ED, o desenvolvimento de simulações computacionais também carrega consigo esta característica em relação aos outros detectores. Por exemplo, no CSS operando com fusão de decisões, cada SU desenvolve sua estatística de teste individualmente como mostra (2.15). Em um intervalo de sensoriamento basta a observação de n amostras para o cômputo de T_i . Se adotado algum detector baseado em autovalor, por exemplo, a construção da SCM deve ser feita em cada SU pela coleta de amostras por múltiplas antenas ou, de modo alternativo, a aplicação de uma técnica chamada *smoothing*, no caso de uso de apenas uma antena [47]. Sendo assim, a facilidade de implementação e os desempenhos apresentados para os modelos adotados corroboram a escolha do ED no restante desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 3

Métodos de Fusão no Sensoriamento Cooperativo e Modelo de Energia

3.1 Sensoriamento cooperativo com fusão de dados e decisões

No processo de sensoriamento, os desvanecimentos provocados pelo canal de comunicação dificultam a obtenção de estimativas confiáveis. Além disso, o sombreamento pode fazer com que o SU fique impossibilitado de detectar o sinal do PU. O fato de cada rádio cognitivo estar sujeito a diferentes desvanecimentos gera uma diversidade espacial que pode ser explorada com o uso de técnicas cooperativas de detecção, pois dificilmente todos os rádios estarão sujeitos simultaneamente a profundos desvanecimentos ou sombreamentos. Então, tais adversidades podem ser superadas através da fusão das estimativas obtidas pelos diversos SUs [16,48].

A fusão de dados e a fusão de decisões são técnicas conhecidas de envio das informações de sensoriamento dos SUs para o FC, onde a decisão global é tomada. Na fusão de dados são necessários múltiplos bits para representar as informações enviadas pelos SUs, os quais funcionam como sensores de energia, pois enviam suas próprias medições de energia, no caso do ED, do PU para o FC [16]. Cada linha da matriz \mathbf{Y} (2.2) contém as amostras enviadas ao FC por cada SU, indicadas pelas setas azuis da Figura 3.1, então a estatística de teste é formada no FC a partir de todas as amostras em \mathbf{Y} , conforme (2.16).

Na fusão de decisões, cada linha da matriz \mathbf{Y} é processada pelo respectivo SU para geração da estatística de teste, conforme (2.15), e subsequente decisão local, que será enviada ao FC, representadas pelas setas vermelhas da Figura 3.2. Nota-se que na

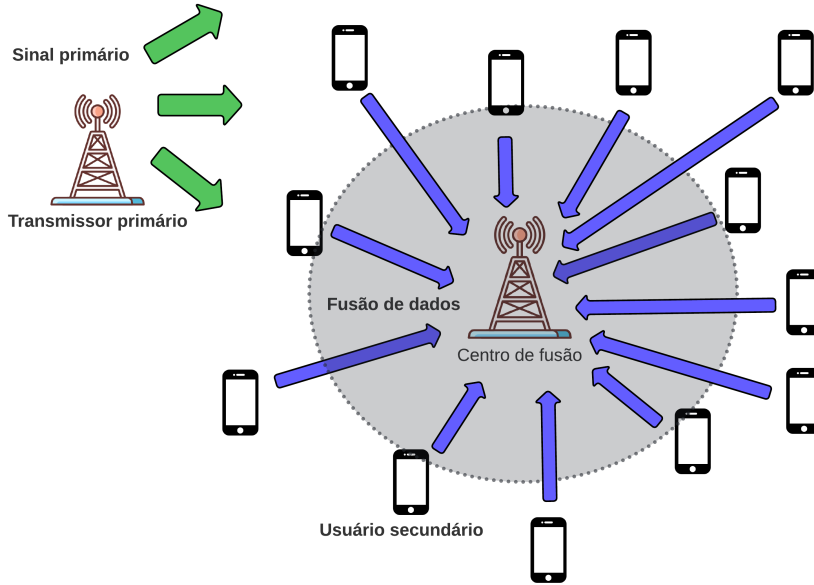


Figura 3.1: Sensoriamento cooperativo com fusão de dados.

fusão de decisões a matriz \mathbf{Y} não é definida como em (2.2). A estatística de teste no i -ésimo SU é formada a partir do vetor de amostras

$$\mathbf{y}_i^T = (h_i \mathbf{x})^T + \mathbf{v}_i^T, \quad (3.1)$$

onde \mathbf{y}_i , h_i e \mathbf{v}_i correspondem a i -ésima linha da matriz \mathbf{Y} , i -ésimo elemento do vetor \mathbf{h} e i -ésima linha da matriz \mathbf{V} , respectivamente e \mathbf{x} o vetor que modelo o sinal primário.

As redes de CSS centralizadas baseadas em fusão de decisões são de simples implementação. Neste tipo de rede, cada terminal pode enviar ao FC um bit b_i indicando sua decisão local [21]. Pode-se adotar que $b_i = 1$ se o i -ésimo SU identificou a presença do sinal primário e $b_i = 0$ caso contrário. Considerando haver m SUs realizando o sensoriamento na rede, as m decisões locais são enviadas ao FC e a lógica de fusão do tipo k -em- m é adotada para se tomar a decisão global [16]. Nessa lógica decide-se pela hipótese \mathcal{H}_1 se k ou mais SUs decidirem por \mathcal{H}_1 , senão, decide-se por \mathcal{H}_0 . Os casos particulares mais utilizados da lógica k -em- m são as regras E ($k = m$), OU ($k = 1$) e MAJ ($k = \lceil \frac{m+1}{2} \rceil$), essa última conhecida como regra de voto majoritário, sendo $\lceil x \rceil$ o menor inteiro maior que, ou igual a x [7].

3.2 Sensoriamento cooperativo com fusão híbrida

Propõe-se aqui um cenário de fusão que combina as fusões de dados e de decisões da seguinte maneira: o número total m de SUs em cooperação é dividido em c grupos

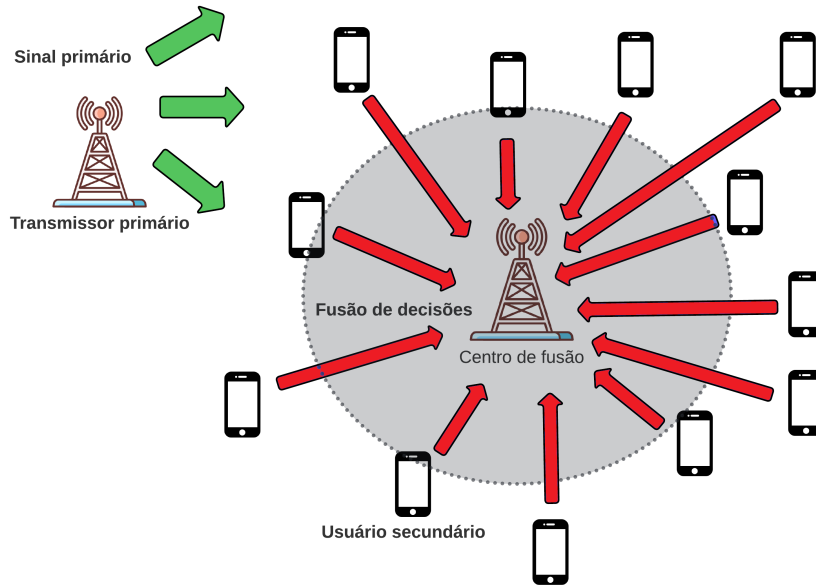


Figura 3.2: Sensoriamento cooperativo com fusão de decisões.

(*clusters*) com $\frac{m}{c}$ SUs em cada um. A utilização de *clusters* é uma interessante abordagem para reduzir a sobrecarga de tráfego de dados nos canais de controle entre SUs e o FC [49]. Todos os SUs coletam as amostras do sinal primário, mas $(\frac{m}{c} - 1)$ SUs de um *cluster* enviam suas amostras a um líder de agrupamento (*cluster head*, CH) onde, a partir das amostras recebidas e daquelas por ele próprio coletadas, é formada uma estatística de teste e tomada uma decisão sobre o estado de ocupação da banda sensorizada. As decisões tomadas pelos c CHs são então enviadas ao FC da rede secundária, onde a decisão global é tomada fazendo-se uso da lógica k -em- $\frac{m}{c}$. A Figura 3.3 ilustra o cenário operando com os dois modos clássicos de fusões, de forma híbrida.

Em cada CH será formada uma matriz \mathbf{Y}' , cujas $\frac{m}{c}$ linhas correspondem às amostras dos SUs integrantes do respectivo *cluster*. Assim, a estatística de teste ED no i -ésimo CH será

$$T_i = \sum_{j=1}^{\frac{m}{c}} \frac{1}{\sigma_j^2} \sum_{k=1}^n |y'_{jk}|^2, \quad (3.2)$$

para $i = 1, \dots, c$ e sendo y'_{jk} o elemento da j -ésima linha e k -ésima coluna de \mathbf{Y}' .

O algoritmo proposto para estruturação dos *clusters* baseia-se no posicionamento dos SUs na área de cobertura da rede secundária, representada pela circunferência maior da Figura 3.4. Para formação dos *clusters* são calculadas as distâncias dos SUs ao lugar geométrico dos pontos intermediários entre o perímetro da área de cobertura circular e o FC, os quais são representados pela circunferência menor na Fig. 3.4. Os

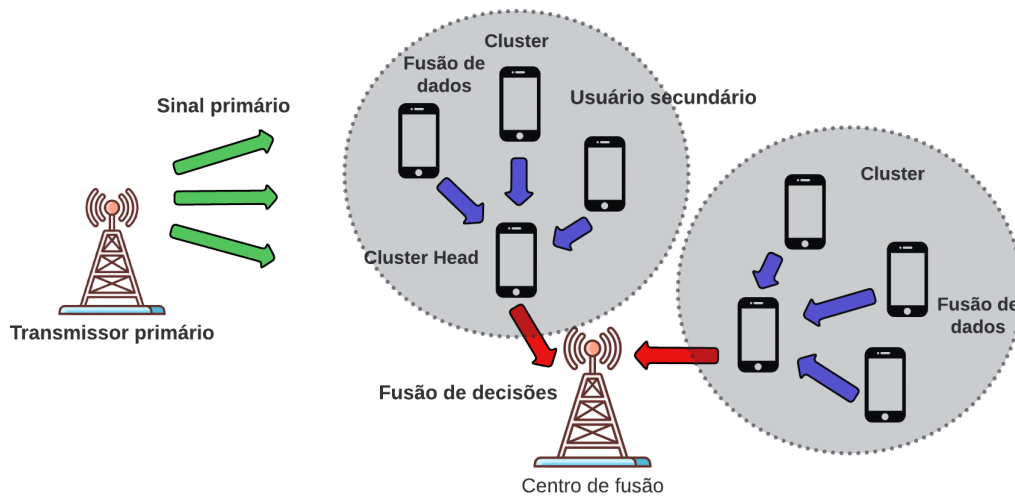


Figura 3.3: *Sensoriamento cooperativo com fusão híbrida.*

SUs com as c menores distâncias são os CHs. Os $(\frac{m}{c} - 1)$ SUs que estiverem menos distantes de um CH formarão o respectivo *cluster*.

A formação dos *clusters* se dá pela ordem de execução do algoritmo. Primeiramente, após a leitura das posições de todos os SUs, serão calculadas todas as distâncias para definição dos c CHs. Depois, o primeiro CH que foi determinado irá verificar quais $(\frac{m}{c} - 1)$ SUs, excluindo os outros CHs do processo, estão mais próximos a ele. Identificado estes SUs, o primeiro *cluster* está formado. Na próxima execução do algoritmo, os SUs que já formaram o primeiro *cluster* não estarão inclusos nos próximos cálculos, para evitar que um SU seja considerado parte de dois ou mais grupos simultaneamente. A Figura 3.4 ilustra um exemplo de possibilidade de posicionamento possível, onde $m = 12$ SUs são divididos em $c = 4$ *clusters*, sendo cada grupo representado pela sua respectiva forma geométrica.

3.3 Modelo de consumo de energia

Um dos pontos-chave de uma rede de comunicação sem fio é o consumo de energia. Por conta disso, um grande esforço é feito no desenvolvimento de equipamentos para se atingir a maior economia de energia possível. No contexto de sensoriamento espectral, esta otimização do consumo pode ser feita em qualquer etapa do sensoriamento. Por exemplo, a energia total consumida no sensoriamento é igual ao produto entre o tempo necessário em tal etapa, a potência dissipada e o número total de SUs. Assim, a redução do consumo de energia neste estágio pode ser realizada de duas maneiras:

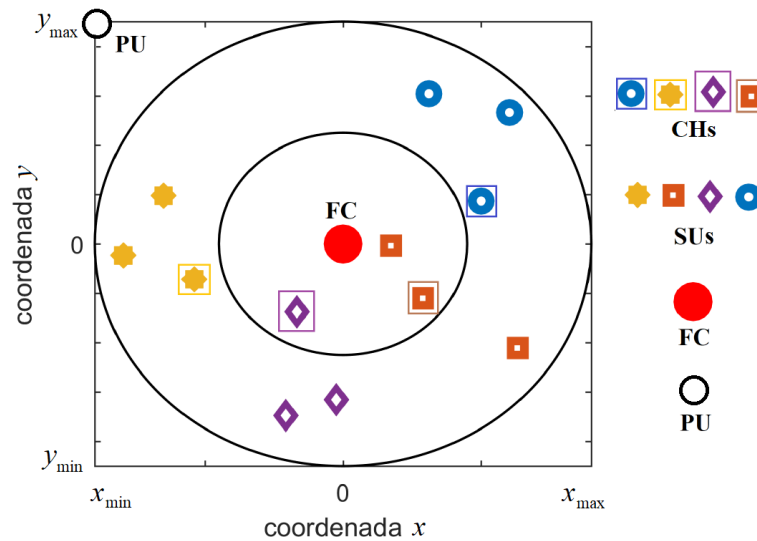


Figura 3.4: Possibilidade de posicionamento dos terminais, com $m = 12$ SUs divididos em $c = 4$ clusters.

reduzindo o número de SUs ou reduzindo o tempo de sensoriamento [20, 26]. Entretanto, ambos os parâmetros têm importante influência no desempenho do sistema, pois reduzindo o número de SUs em cooperação ou reduzindo o tempo de coleta de informações do ambiente sensoriado pelos SUs, logicamente reduzirá a precisão da detecção. O segundo estágio do CSS é o estágio de reporte, onde os SUs transmitem seus resultados do sensoriamento local para o FC. Com relação à potência dissipada, que tende a ser maior que aquela referente ao sensoriamento, naturalmente conclui-se que a energia consumida no reporte é mais alta [16]. Por outro lado, o tempo gasto no sensoriamento é normalmente bem maior que o tempo necessário para o SU enviar suas informações ao FC. Portanto, a energia consumida durante o reporte pode ser similar à energia gasta no sensoriamento [18].

Para reportar seu resultado local ao FC, cada SU representa seus dados usando um número finito de bits. A carga de dados enviados ao FC tem um impacto importante no desempenho do sensoriamento, pois aumentando o número de bits, aumenta-se quantidade de informações disponíveis no FC, o que melhora a precisão da detecção [5]. Por outro lado, um número maior de bits requer maior largura de banda, aumentando o consumo de energia. O grande desafio de se reduzir o consumo de energia no contexto de sensoriamento espectral consiste em adotar um equilíbrio entre desempenho e consumo [19].

Para análise do consumo de energia, considere que um quadro possui duração τ segundos sendo dividido em três etapas: sensoriamento, reporte e transmissão, conforme mostra a Figura 3.5 [16]

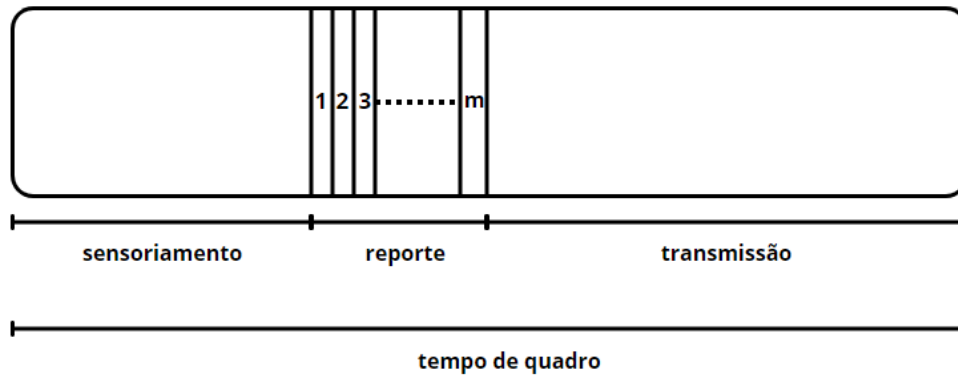


Figura 3.5: Divisão de tempo de quadro para sensoriamento espectral.

Primeiramente, os m SUs realizam o sensoriamento simultaneamente, com duração τ_s segundos. Em seguida, as informações de sensoriamento são reportadas sequencialmente ao FC ou aos CHs, empregando a técnica TDMA [19], totalizando $m\tau_r$ segundos, sendo τ_r o tempo de reporte de cada SU. Por fim, se o sinal primário é identificado como ausente, o tempo restante do quadro é destinado à transmissão de dados, sendo ele calculado por

$$\tau_t = \tau - (\tau_s + m\tau_r). \quad (3.3)$$

O consumo de energia do sensoriamento está vinculado ao modo de fusão adotado. Quando se opera com fusão de decisões, o sensoriamento apresenta maior consumo comparado à fusão de dados, pois o processamento do sinal recebido vai além da coleta das amostras. Em compensação, no estágio de reporte, a decisão local pode ser representada por apenas 1 bit, ocasionando em um gasto de energia inferior em relação à transmissão dos múltiplos bits por amostra na fusão de dados [18, 19]. Destaca-se que, nesse estágio, a potência de transmissão é determinante do consumo energético total, pois a comunicação com o FC ou os CHs representa grande parcela desse consumo [16].

A potência de transmissão para reporte pode ser calculada a partir de

$$P_{r_k} = P_{\min} \cdot d_k^\alpha, \quad (3.4)$$

em que P_{\min} é o limiar de potência de recepção mínima do FC ou dos CHs, d_k a distância do k -ésimo SU ao FC ou aos CHs, α o expoente de perdas de propagação e P_{r_k} a potência de transmissão de reporte do k -ésimo SU. Na fase de transmissão de dados, a potência de transmissão dos SUs para a estação base da rede secundária é

obviamente dependente das distâncias envolvidas, ou seja,

$$P_{t_k} = P_{\min} \cdot d_k^\alpha, \quad (3.5)$$

onde P_{t_k} é a potência de transmissão do k -ésimo SU para a estação base, localizada também no FC, por conveniência.

Tendo em vista que a energia consumida é função da potência dissipada em um intervalo de tempo de análise, a energia total consumida pela rede secundária [16] é dada por

$$E_T = mP_s\tau_s + \left(\sum_{k=1}^m P_{r_k}\right)\tau_r + p\left(\sum_{k=1}^m P_{t_k}\right)\tau_t, \quad (3.6)$$

sendo p a probabilidade de o transmissor primário ser considerado inativo; P_s , P_{r_k} e P_{t_k} as potências dissipadas durante o sensoriamento, o reporte e a transmissão de dados do k -ésimo SU, e τ_s , τ_r e τ_t os respectivos intervalos de tempo.

Os tempos no quadro destinados a cada SU permanecem fixos, sendo as potências P_s , P_{r_k} e P_{t_k} variáveis em função do modo de fusão aplicado e das distâncias. Note que, implicitamente, a terceira parcela em (3.6) resulta da divisão do tempo de transmissão igualmente entre os SUs, admitindo assim um acesso por divisão de tempo TDMA à banda.

Para a fusão híbrida com *clusters*, a energia total é dividida em duas partes, E_1 e E_2 , sendo cada uma delas responsável pelo cômputo dos dois modos de fusão aplicados, sendo $E_T = E_1 + E_2$. A probabilidade de o espectro ser identificado como inativo, p , é dada por [16]

$$p = p_0(1 - P_{fa}) + p_1(1 - P_d), \quad (3.7)$$

sendo P_{fa} e P_d as probabilidades de falso alarme e de detecção globais, e p_0 e p_1 as probabilidades de ocorrência das hipóteses \mathcal{H}_0 e \mathcal{H}_1 , respectivamente.

Para análise da energia consumida por bit transmitido, faz-se necessário definir a vazão da rede secundária, dada por [16]

$$D = p_0(1 - P_{fa})R_b\tau_t, \quad (3.8)$$

medida em bits, em que R_b é a taxa de bits de transmissão, medida em bits por segundo e o termo $p_0(1 - P_{fa})$ representa a probabilidade da correta decisão do espectro estar inutilizado.

O propósito de identificar a energia total consumida pela rede secundária é para saber o quanto ela é eficiente, ou seja, quanta energia foi utilizada para a transmissão de dados na rede secundária utilizando a banda ociosa da rede primária. Assim, a quantidade de energia consumida por bit efetivamente transmitido, medida em joule/bit, é dada por [16]

$$E_B = \frac{E_T}{D}. \quad (3.9)$$

3.4 Modelos de mobilidade

Grande parte dos trabalhos relacionados ao sensoriamento espectral assumem que os SUs possuem um posicionamento estático. No entanto, a mobilidade é uma característica primordial das redes de comunicações sem fio. Com isso, torna-se fundamental considerar tal comportamento dinâmico no contexto de sensoriamento espectral [50].

As análises de desempenho que incluem os efeitos da mobilidade em redes de comunicação sem fio são de grande importância no projeto e desenvolvimento destas tecnologias. Uma vez que os padrões de movimento reais são difíceis de obter, uma abordagem comum é usar modelos de mobilidade artificiais que se assemelham, em certa medida, ao comportamento de terminais móveis reais [51]. O modelo de mobilidade de ponto aleatório (*random waypoint*, RWP) é um dos modelos mais comuns utilizados para simulação de redes de comunicações sem fio *ad hoc* com terminais móveis. É um modelo que visa imitar o comportamento de mobilidade de terminais móveis, no qual pausas acontecem entre mudanças na direção do movimento do terminal, bem como em sua velocidade ou em ambos os parâmetros [51].

Quando a execução do modelo é iniciada, as posições dos terminais são normalmente sorteadas segundo uma distribuição uniforme dentro da área de cobertura do modelo. Em seguida, valores aleatórios do tempo de pausa, tempo de deslocamento, direção e velocidade são também determinados a partir de distribuições uniformes com valores mínimos e máximos pré-definidos. Quando o nó atinge seu destino, o processo anterior é então repetido até o esgotamento do tempo de simulação definido [51].

Especificamente, o RWP opera da seguinte maneira [52]: a posição inicial de cada terminal (nó), em metros, é sorteada segundo uma distribuição uniforme dentro da área de simulação, nas coordenadas x e y , sendo

$$x \sim \mathcal{U}[x_{\min}, x_{\max}] \quad (3.10)$$

$$y \sim \mathcal{U}[y_{\min}, y_{\max}]. \quad (3.11)$$

A partir da posição inicial, um tempo de deslocamento em segundos, Δ , é determinado segundo uma distribuição uniforme, sendo

$$\Delta \sim \mathcal{U}[\Delta_{\min}, \Delta_{\max}]. \quad (3.12)$$

A direção de movimento no plano x, y , ou seja, o ângulo que o nó irá se deslocar, em graus, segue uma distribuição uniforme, sendo

$$\phi \sim \mathcal{U}[-180, 180]. \quad (3.13)$$

A velocidade de deslocamento em metros por segundo, v , também segue uma distribuição uniforme, ou seja,

$$v \sim \mathcal{U}[v_{\min}, v_{\max}]. \quad (3.14)$$

A partir daí, a distância a percorrer é calculada com base nos valores de tempo de deslocamento e velocidade, como

$$\varrho = v \cdot \Delta, \quad (3.15)$$

então, quando o nó chega no destino, todo o processo é reiniciado, com exceção do sorteio da posição, até se esgotar o tempo de simulação, em segundos.

A Figura 3.6 mostra a função densidade de probabilidade empírica da posição do terminal móvel do modelo de RWP disponível em [52]. Esta superfície foi construída simulando-se aproximadamente 700000 passos via *software* MATLAB[®]. Para sua construção, a área total de movimento do terminal foi dividida em 900 células, representando um histograma bi-dimensional 30×30 . Todas as posições em que o terminal esteve, nas coordenadas x e y , foram contabilizadas na respectiva célula do histograma. É possível perceber que, após um longo período de análise, a densidade de probabilidade do posicionamento do terminal tende a uma distribuição uniforme na área de abrangência da mobilidade, ou seja, neste modelo adotado o terminal não apresenta um efeito indesejado presente em outros modelos RWP, conhecido como efeito

de borda, ou *border effect* [53]. Esse efeito ocorre porque os nós tendem a cruzar a área central de simulação com alta frequência. Para um longo tempo de execução de movimentos, a distribuição estocástica dos nós converge em direção a uma distribuição assintoticamente estacionária com seu valor máximo de densidade dos nós no meio da área.

A não uniformidade da distribuição dos nós no RWP tem importantes consequências práticas, apesar de a posição inicial do terminal ser tomada a partir de uma distribuição uniforme. Primeiramente, a redução da aplicabilidade dos resultados obtidos sobre redes *ad hoc*, pois normalmente se baseiam na suposição da uniformidade do RWP. Em segundo lugar, a distribuição não uniforme implica em resultados imprecisos de simulações obtidos usando o modelo RWP. Isto não significa que o RWP precisa ser descartado ou é totalmente inapropriado para simulações. Entretanto, pesquisadores devem estar cientes sobre a distribuição espacial probabilística do nó, para se chegar a conclusões corretas sobre os resultados das simulações. O efeito de borda descrito pode ser visto em [54], Seção 4, onde se nota que os nós tendem a se concentrar com maior probabilidade na área central de mobilidade.

No presente contexto do trabalho, o posicionamento do nó tem grande influência nas métricas analisadas. Por exemplo, o problema apresentado em [54] conduziria à conclusão de um menor gasto energético da rede, pois os terminais tenderiam a se concentrar com maior probabilidade próximos ao FC e à estação base.

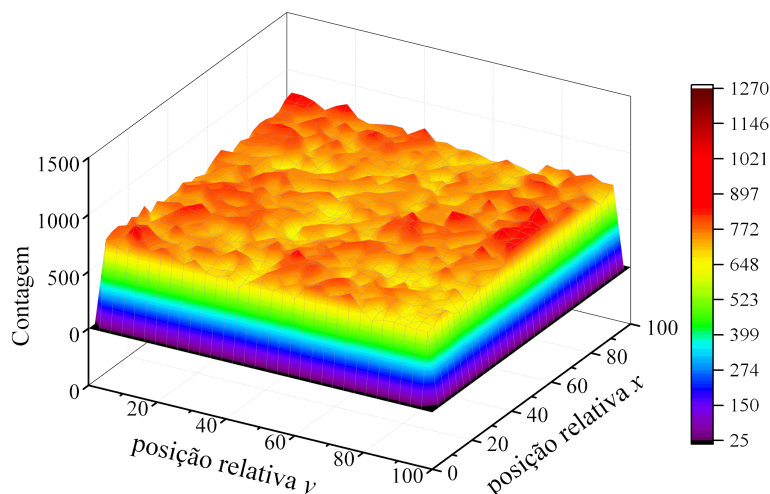


Figura 3.6: Densidade de probabilidade empírica da posição dos nós no modelo RWP.

A Figura 3.7 também apresenta a densidade de probabilidade empírica da posição do terminal móvel do modelo RWP, porém este agora adaptado a uma área circular. Tal adaptação de [52] está disponível no Apêndice I. De forma semelhante, a simulação foi realizada com aproximadamente 700000 passos. A alteração do modelo para área

circular não causou concentrações de posicionamento indesejadas, permanecendo a tendência de culminar em uma distribuição uniforme. A análise de desempenho do sensoriamento e o consumo de energia considerará o modelo RWP modificado para área de mobilidade circular.

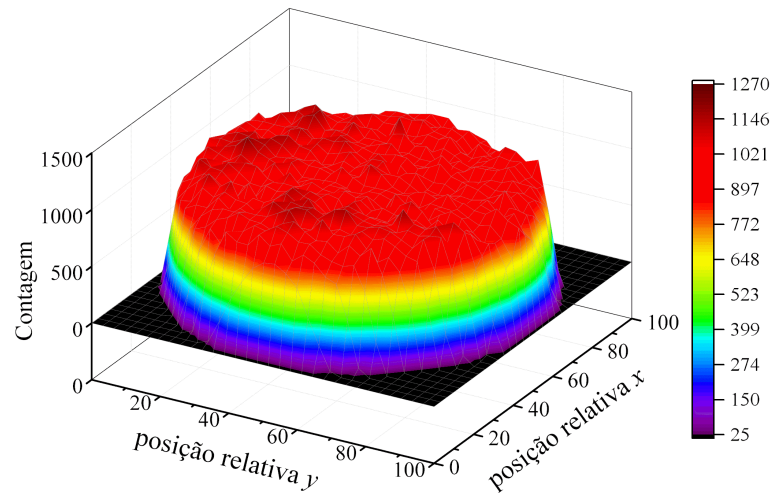


Figura 3.7: Densidade de probabilidade empírica da posição dos nós no modelo RWP modificado para área de mobilidade circular.

Capítulo 4

Resultados

Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos por simulações computacionais de uma CRN operando em uma WRAN utilizando o *software* MATLAB[®], com base nos modelos apresentados nas Seções anteriores. Primeiramente, as curvas ROC e de consumo de energia foram obtidas por meio de 20000 eventos de Monte Carlo, nos quais foram geradas as mesmas quantidades de cada um dos valores dependentes das posições dos SUs e CHs, bem como da estatística de teste para as hipóteses \mathcal{H}_0 e \mathcal{H}_1 . A posição dos SUs foi obtida segundo uma distribuição uniforme dentro da área de cobertura em cada evento de Monte Carlo. Cada ponto nas curvas de consumo de energia considerou não somente o número de SUs e o número de *clusters* em cada cenário de fusão, mas também a P_{fa} e a P_d globais. Adotou-se $P_{fa} = 0,1$ para todos os cenários, com a correspondente P_d obtida a partir da simulação de desempenho do sensoriamento. Nos cenários de operação que utilizam a fusão de decisões, a lógica utilizada foi a de voto majoritário, MAJ. A potência P_s dissipada na fase de sensoriamento para fusão de dados foi configurada em 85% da potência utilizada na fusão de decisões, refletindo assim a menor carga computacional nos SUs, da primeira em relação à segunda. Os parâmetros de tempo de quadro, τ , tempo de sensoriamento, τ_s e tempo de reporte, τ_r tem como referência valores utilizados em [16] e [9] Todos os demais parâmetros adotados na simulação do sistema estão listados na Tabela 4.1.

A potência de ruído em cada SU é calculada conforme a SNR configurada para o sistema. Tomando como base uma SNR de -13 dB, a potência média de ruído, $\bar{\sigma}^2$, é dada por

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{\bar{P}_{rx}}{10^{\frac{SNR(dB)}{10}}}, \quad (4.1)$$

onde \bar{P}_{rx} é a potência média recebida entre todos os SUs, calculada segundo (2.12).

Tabela 4.1: *Parâmetros de sistema.*

Parâmetro	Valor
Raio de cobertura da rede secundária, r	30000 m
Taxa de transmissão da rede secundária, R_b	100 kbps
Potência de transmissão do transmissor primário, P_{tx}	5 W
Probabilidade do espectro estar ocupado e desocupado, p_0 e p_1	0,5
Expoente de perda de percurso, α	3
Probabilidade de false alarme global, P_{fa}	0,1
Potência de sensoriamento, P_s	1 mW
Tempo de quadro destinado ao sensoriamento, τ_s	2 ms
Tempo de quadro destinado ao reporte, τ_r	0,2 ms
Potência máxima de transmissão de dados dos SUs, $\max\{P_{tr_k}\}$	600 mW
Potência máxima de transmissão de reporte dos SUs, $\max\{P_{tr_k}\}$	100 mW
Tempo de quadro total, τ	10 ms
Limiar de potência de recepção mínima, P_{min}	-125 dBm
Fator de variação da potência de ruído, ρ_N	0,9
Relação sinal ruído, SNR	-13 dB
Número de amostras coletadas por cada SU, n	100

A partir de $\bar{\sigma}^2$ calculado, cada SU terá sua potência de ruído segundo um fator de variação, ρ_N , em torno da média, $\bar{\sigma}^2$, como mostra (2.14).

O limiar de recepção configurado para cada SU toma como base o modelo de propagação apresentado em (2.10) para um raio de cobertura de 30 Km da rede secundária, conforme padrão IEE 802.22 [9]. Como a estação base primária está localizada nas coordenadas ($x_{min} = -30000$, $y_{max} = 30000$), a maior distância que um SU pode estar do PU é de $\approx 72,42$ Km, como mostra a Figura 4.1. Com base nesta distância, um expoente de perda de percurso $\alpha = 3$ e potência isotrópica radiada equivalente (*effective isotropic radiated power*, EIRP) da estação base primária de $P_{tx} = 5$ W aplicado ao modelo de propagação segundo (2.10), a potência recebida obtida é $\approx 1,31 \times 10^{-14}$ W, que convertida para dBm equivale a ≈ -109 dBm. Entretanto, ao considerar a fusão híbrida, pode haver uma situação em que um SU localizado em uma extremidade da área de cobertura tenha que se comunicar com seu respectivo CH localizado no extremo oposto. Então, a distância entre os dois dispositivos será igual ao diâmetro da área de cobertura, ou seja, 60 km. Considerando uma potência máxima de transmissão de reporte $P_{tr} = 100$ mW, $\alpha = 3$ e $d = 60000$, a potência de recepção mínima possível segundo (2.10) é $P_{min} = 4,62 \times 10^{-16}$ W, que convertida para dBm equivale a ≈ -124 dBm, justificando o limiar adotado de -125 dBm.

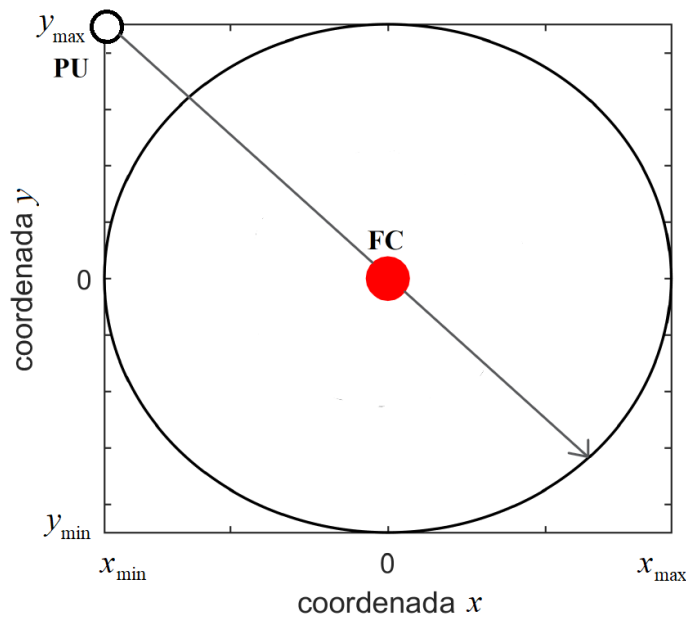


Figura 4.1: Distância máxima de um SU da estação base primária.

4.1 Análise de desempenho

A Figura 4.2 mostra o desempenho do sensoriamento para os cenários de fusão em pauta, para um número de $m = 6$ SUs, $n = 100$ amostras por SU e diferentes números de *clusters*, c . Na Figura 4.2 (a) tem-se a fusão de dados apresentando o melhor desempenho em relação aos outros dois modos de fusão. Em relação aos processos de decisão, a natureza da informação tem importante peso na acurácia da decisão. Na fusão de dados, as amostras enviadas ao FC carregam informações intrinsecamente mais ricas em relação às informações abruptas enviadas no caso da fusão de decisões, tornando a decisão com amostras potencialmente mais acurada. Portanto, é justificável a superioridade de desempenho da fusão de dados em relação aos outros modos de fusão, já que na fusão de decisões e na fusão híbrida emprega-se fusão de decisões total ou parcial, respectivamente. Ainda na Figura 4.2 (a) nota-se a fusão híbrida operando em seu limite superior quando $c = 1$. Isso ocorre devido a todos os m SUs, operando com fusão de dados, transmitirem suas amostras a um único CH, o qual decide sobre o estado de ocupação da banda e envia a decisão ao FC, a qual é igual à própria decisão global que seria tomada na fusão de dados, justificando a coincidência de desempenho das fusões de dados e híbrida.

Na Figura 4.2 (b) mostra o desempenho da fusão híbrida para $c = 2$. O desempenho está levemente abaixo da fusão de dados, pois se tem agora dois grupos de $m = 3$. Neste cenário tem-se cada CH em posse de amostras coletadas sob 3 diferentes condições. A combinação de duas decisões abruptas dos 2 diferentes grupos

introduziu uma pequena redução de desempenho em relação à fusão de dados e à fusão híbrida com $c = 1$. Na Figura 4.2 (c) tem-se $c = \frac{m}{2}$ para fusão híbrida. Neste modo tem-se 3 grupos, cada um contendo 2 SUs. Esta é a configuração limite para que os SUs sejam igualmente divididos entre os *clusters*. Aqui, a fusão híbrida apresenta um desempenho superior à fusão de decisões pura. No FC ocorre a fusão de 3 decisões, provindas dos CHs na fusão híbrida, em comparação com as 6 decisões provindas da fusão de decisões. Entretanto, cada decisão da fusão híbrida é formada a partir da observação de 2 diferentes SUs, aumentando sua acurácia da decisão enviada. Neste caso, podem ocorrer dentro do *cluster* situações nas quais um dos rádios não identifique a presença do sinal primário devido à sua distância em relação ao PU, ou mesmo obstáculos presentes no ambiente que impedem esta detecção. Contudo, o respectivo colaborador de grupo pode identificar o sinal primário, fazendo com que a decisão do grupo conte um ponto a favor da detecção. Já nas diferentes definições individuais da fusão de decisões, um SU votaria contra a decisão da presença do sinal primário enquanto outro decidiria a favor da presença do sinal primário, sendo este um contrapeso quando aplicada a regra de fusão de voto majoritário no FC.

A Figura 4.3 mostra o desempenho do sensoriamento nos cenários de fusão para $m = 8$, $n = 100$ e diferentes números de *clusters*, c . Os gráficos apresentados revelam um desempenho levemente superior aos gráficos apresentados na Figura 4.2. Por exemplo, para uma $P_{fa} = 0,1$ e $m = 6$, tem-se uma $P_d \approx 0,58$ e $P_d \approx 0,38$ para fusão de dados e fusão de decisões, respectivamente. Para uma $P_{fa} = 0,1$ e $m = 8$ SUs, tem-se uma $P_d \approx 0,61$ e $P_d \approx 0,39$. Isto ocorre devido ao aumento de 2 SUs no processo de cooperação.

Na Figura 4.3 (a) têm-se as fusões de dados e híbrida apresentando os melhores desempenhos em relação à fusão de decisões pura. Também como ocorreu para $m = 6$, todas as amostras estão disponíveis a um único CH, o qual decide sobre o estado de ocupação da banda e envia a decisão ao FC, a qual é igual à própria decisão global, justificando a coincidência de desempenho das fusões de dados e híbrida.

A Figura 4.3 (b) mostra o desempenho da fusão híbrida para $c = 2$. O desempenho está ligeiramente abaixo da fusão de dados, pois se tem agora dois grupos de $m = 4$ SUs. Neste cenário tem-se cada CH em posse das amostras coletadas sob 4 diferentes condições. A combinação de decisões abruptas dos 2 grupos diferentes introduziu esta pequena redução de desempenho em relação a $c = 1$. Na Figura 4.3 (c) tem-se $c = \frac{m}{2}$ para a fusão híbrida. Neste modo tem-se 4 grupos, cada um contendo 2 SUs. Aqui, a fusão híbrida apresenta desempenho superior à fusão de decisões pura. No FC ocorre a fusão de 4 decisões, provindas dos CHs da fusão híbrida, em comparação com as 8 decisões provindas da fusão de decisões.

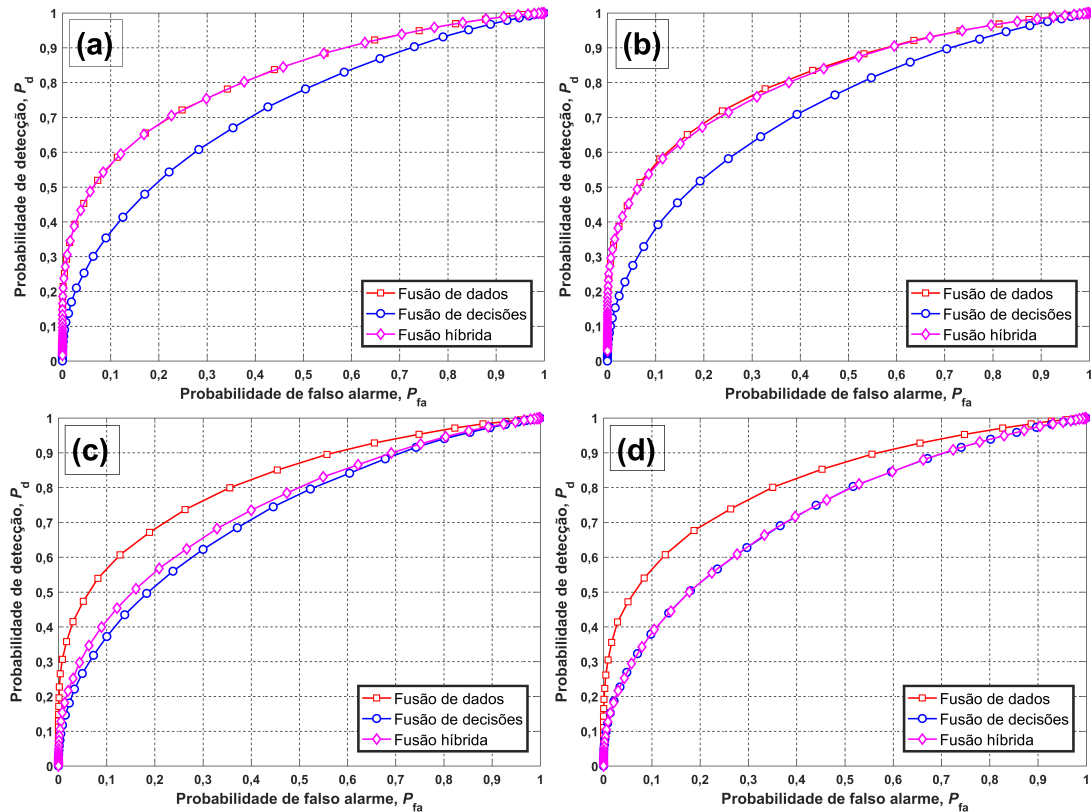


Figura 4.2: Figura (a): Desempenho do detector ED para $m = 6$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 1$, Figura (b): Desempenho do detector ED para $m = 6$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 2$, Figura (c): Desempenho do detector ED para $m = 6$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 3$ e Figura (d): Desempenho do detector ED para $m = 6$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 6$.

Percebe-se nestes gráficos um comportamento semelhante aos apresentados na Figura 4.2 quando se varia o número de *clusters* da fusão híbrida, exceto pela melhora do desempenho geral. Como explicado ao caso anterior, a decisão em cooperação mostrou ter um peso importante quando se aplica a decisão pelo voto majoritário. Por último, na Figura 4.3 (d) tem-se $c = 8$ para a fusão híbrida. Este modo apresenta o mesmo modo de operação da fusão de decisões, por isso a coincidência de desempenho.

A Figura 4.4 mostra o desempenho do sensoriamento para os cenários de fusão, para $m = 12$, $n = 100$ e diferentes números de *clusters*, c . Os gráficos apresentados mostram um desempenho significativamente superior aos gráficos apresentados na Figura 4.3 e Figura 4.2. Por exemplo, na fusão de dados, com $P_{fa} = 0,1$ e $m = 12$, se tem $P_d \approx 0,7$, contra $P_d \approx 0,61$, para $m = 8$, e $P_d \approx 0,57$ para $m = 6$. Para fusão de decisões, com $P_{fa} = 0,1$ e $m = 12$, se tem $P_d \approx 0,42$ contra $P_d \approx 0,39$ e $P_d \approx 0,37$ para $m = 8$ e $m = 6$, respectivamente. Percebe-se que para $P_{fa} = 0,1$, a correspondente P_d teve um aumento mais significativo com o aumento de SUs em cooperação

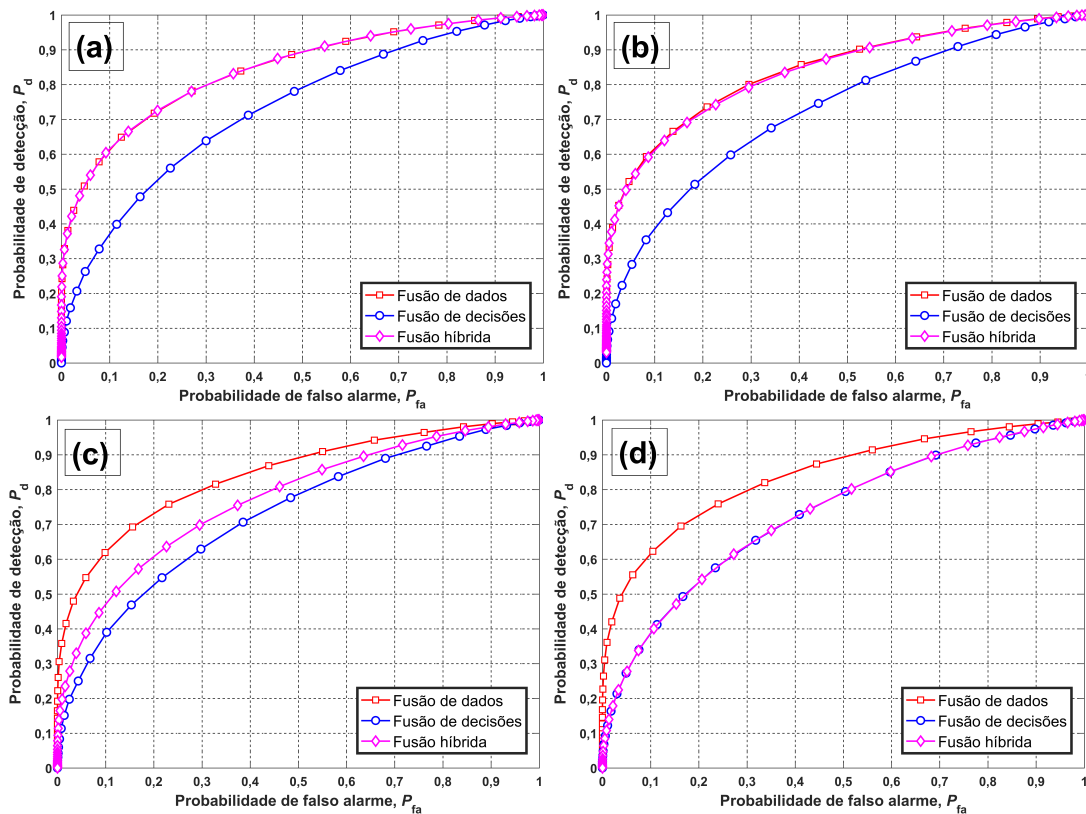


Figura 4.3: Figura (a): Desempenho do detector ED para $m = 8$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 1$, Figura (b): Desempenho do detector ED para $m = 8$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 2$, Figura (c): Desempenho do detector ED para $m = 8$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 4$ e Figura (d): Desempenho do detector ED para $m = 8$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 8$.

para fusão de dados em relação à fusão de decisões. Isto mostra a melhor resposta da fusão de dados ao acréscimo de SUs no processo de cooperação. As amostras enviadas ao FC carregam informações intrinsecamente abundantes do processo de observação, fazendo que mais SUs impactem consideravelmente no desempenho do sistema.

A Figura 4.4 (a) e Figura 4.4 (b) mostram a fusão híbrida operando com $c = 1$ e $c = 2$, respectivamente. Semelhante ao comportamento demonstrado nas Figuras 4.2 e 4.3, percebe-se a similaridade de desempenho entre as fusões de dados e híbrida para $c = 1$ e sua suave queda quando c muda de 1 para 2, assim como ocorreu nas outras duas análises anteriores. A Figura 4.4 (c) mostra a fusão híbrida com $c = 3$. Nota-se queda significativa de desempenho da fusão híbrida pela mudança de $c = 2$ para $c = 3$. Para $c = 2$, a decisão em favor de \mathcal{H}_1 se dará somente quando a decisão dos dois grupos for em favor de \mathcal{H}_1 . Se qualquer um dos grupos ou apenas um deles não votar em favor de \mathcal{H}_1 , a decisão final será sob a hipótese \mathcal{H}_0 . Neste caso, tem-se uma grande confiabilidade da decisão global, pois se a decisão foi em favor \mathcal{H}_1 , foi

porque assim foi decidido pelos dois grupos em cooperação. Por coincidência, mesmo utilizando a regra de voto majoritário, o comportamento nesta configuração é igual à regra de fusão E. Para $c = 3$, a decisão em favor de \mathcal{H}_1 se dará somente quando 2 ou 3 *clusters* decidirem em favor de \mathcal{H}_1 . Apesar de se ter 1 voto a mais no processo de decisão global, quando $c = 3$ em relação a $c = 2$, a decisão individual de cada grupo conta com dois membros a mais colaborando com o envio de amostras, quando $c = 2$ em relação a $c = 3$. Como visto, quanto mais amostras disponíveis a um nó, mais significativa é a melhora de desempenho em relação a decisões disponíveis.

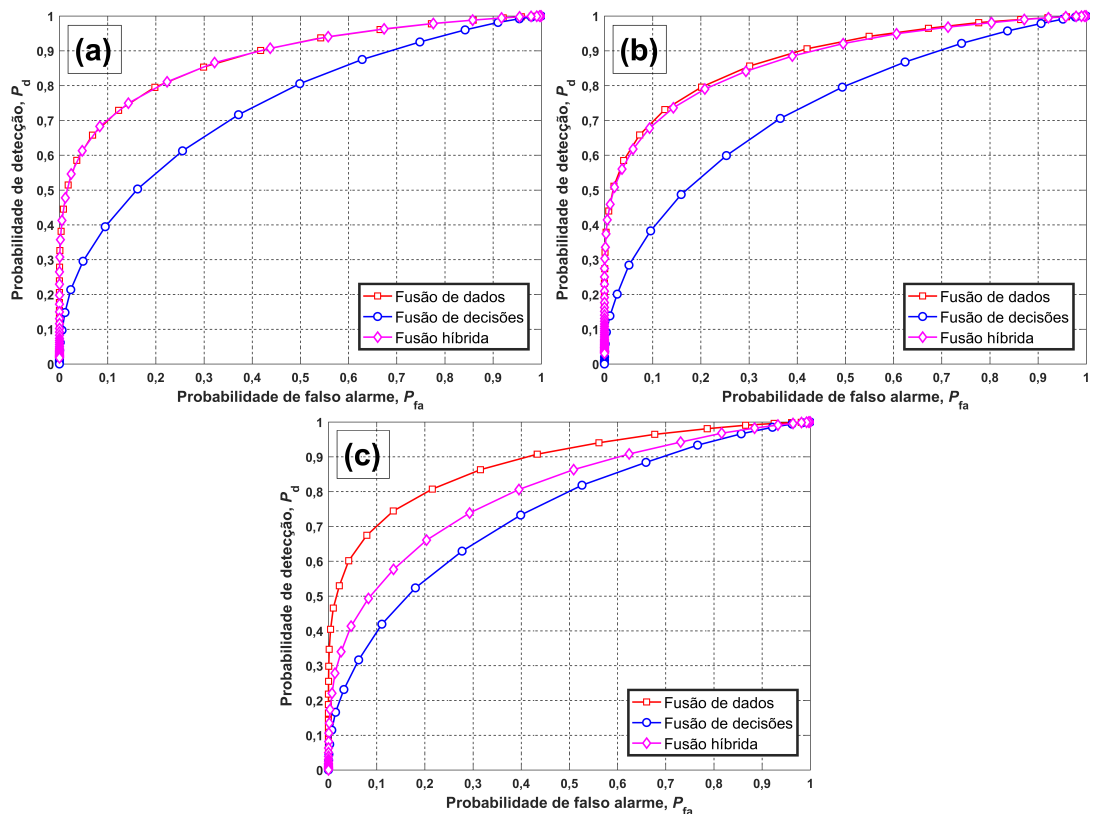


Figura 4.4: Figura (a): Desempenho do detector ED para $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 1$, Figura (b): Desempenho do detector ED para $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 2$ e Figura (c): Desempenho do detector ED para $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 3$.

A Figura 4.5 mostra o desempenho do sensoriamento para os cenários de fusão, para um número de $m = 12$, $n = 100$ e diferentes números de *clusters*, c . A Figura 4.5 (a) mostra o desempenho da fusão híbrida para $c = 4$. Comparando com o desempenho da fusão híbrida com $c = 3$, percebe-se semelhança de desempenho das duas configurações. Embora haja a redução de 1 SU por *cluster*, tem-se a formação de um grupo a mais, o que de certa forma compensa a piora de desempenho provocada pela redução de SUs dos grupos.

Finalmente, a Figura 4.5 (b) e (c) apresentam os desempenhos para $c = \frac{m}{2}$ e $c = m$, respectivamente. A análise destes dois últimos gráficos segue em concordância com os resultados mostrados pelas Figuras 4.2 e 4.3.

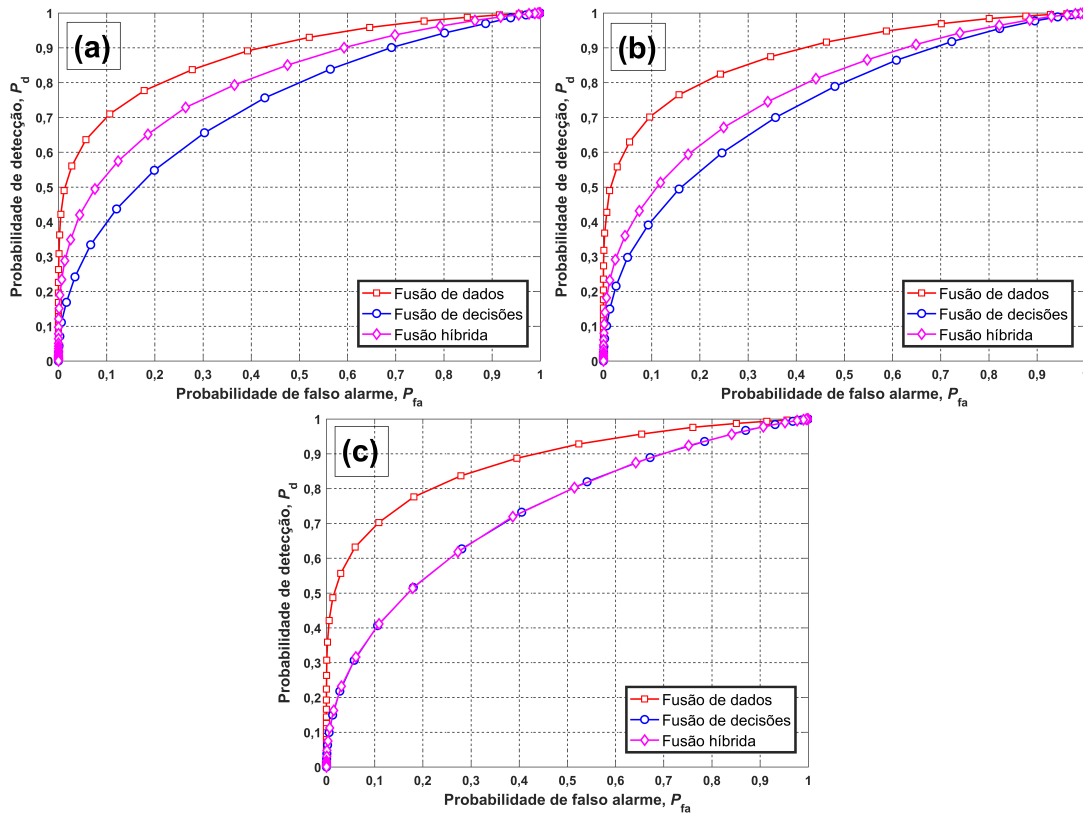


Figura 4.5: Figura (a): Desempenho do detector ED para $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 4$, Figura (b): Desempenho do detector ED para $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 6$ e Figura (c): Desempenho do detector ED para $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 12$.

4.2 Consumo para distribuição aleatória dos terminais

A Figura 4.6 apresenta gráficos de consumo de energia obtidos sob os mesmos 20000 eventos de Monte Carlo utilizados para obter as ROCs. No eixo x tem-se a variação do número de SUs para os mesmos valores utilizados nas ROCs, com $m = 6$, $m = 8$ e $m = 12$. No eixo y tem-se a consumo de energia médio por bit transmitido, obtido segundo (3.6), (3.8) e (3.9).

A Figura 4.6 (a) apresenta o consumo de energia por bit transmitido para os diferentes cenários de fusão com distintos valores de m , com $c = 1$ para fusão híbrida. Nota-se que quando $c = 1$ se tem um consumo energético ainda maior que no caso da fusão de dados. Verificou-se que a distância média dos SUs em relação ao único CH

é maior que a distância média dos SUs ao FC, para fusão de dados. O impacto desta maior distância ocorre principalmente no processo de transmissão do reporte dos SUs, que tem grande influência no consumo da energia total. Quando se opera com fusão de dados, as amostras a serem transmitidas pelos SUs necessitam de múltiplos bits para gerar sua representação digital, justificando o maior consumo apresentado pela fusão híbrida. Somado a isto, o único CH da fusão híbrida ainda deve processar as amostras recebidas, e por ele mesmo coletadas, para tomar sua decisão enviá-la ao FC.

A Figura 4.6 (b) apresenta o consumo de energia para $c = 2$ na fusão híbrida. Nota-se que quando $c = 2$ se tem um consumo energético reduzido em relação ao primeiro gráfico. Neste modo, onde há 2 CHs, a distância média dos SUs a seus respectivos líderes é menor em comparação ao gráfico anterior, com apenas 1 CH, pois agora há dois pontos intermediários de referência, fazendo com que a potência de transmissão de reporte seja menor, e conseqüentemente, menor consumo. A Figura 4.6 (c) é o que mostra o melhor desempenho do ponto de vista de energia. A configuração adotada neste caso é $c = \frac{m}{2}$ para a fusão híbrida. Para essa configuração, os *clusters* são compostos de apenas 1 SU e 1 CH, ambos geograficamente próximos entre si, reduzindo o gasto de energia onde ele é mais acentuado, ou seja, na transmissão das amostras aos CHs. Como a distância dos CHs ao FC gira em torno de $\frac{r}{2}$, a transmissão das decisões locais apresenta baixo consumo, justificando a baixa energia consumida na fusão híbrida. Por fim, a Figura 4.6 (d) mostra a fusão híbrida operando como na fusão de decisões convencional, onde cada *cluster* possui apenas um SU (sendo ele o próprio CH) que transmite sua decisão local ao FC. Como esperado, o consumo energético da fusão híbrida é o mesmo da fusão de decisões, pois as distâncias dos SUs em relação ao FC são as mesmas nos dois modos de operação.

Faz-se aqui um paralelo entre consumo e desempenho para a fusão híbrida, onde pelas ROCs apresentadas e pelos gráficos de consumo, se percebe que estas duas métricas são concorrentes, ou seja, com a redução do número de *clusters* se tem um aumento do desempenho, porém há o aumento do consumo de energia e vice-versa. Para $c = \frac{m}{2}$, se tem uma configuração interessante para ambas as métricas. Para o sensoriamento espectral, se tem desempenho melhor que na fusão de decisões pura, enquanto há um menor consumo de energia dentre os três modos de fusão. Também se nota como a variação do número de *clusters* para fusão híbrida influencia a posição da ROC, pois neste modo de fusão se emprega dois modos de operação, sendo que seu melhor desempenho coincide com a ROC da fusão de dados e o pior desempenho coincide com a ROC da fusão de decisões.

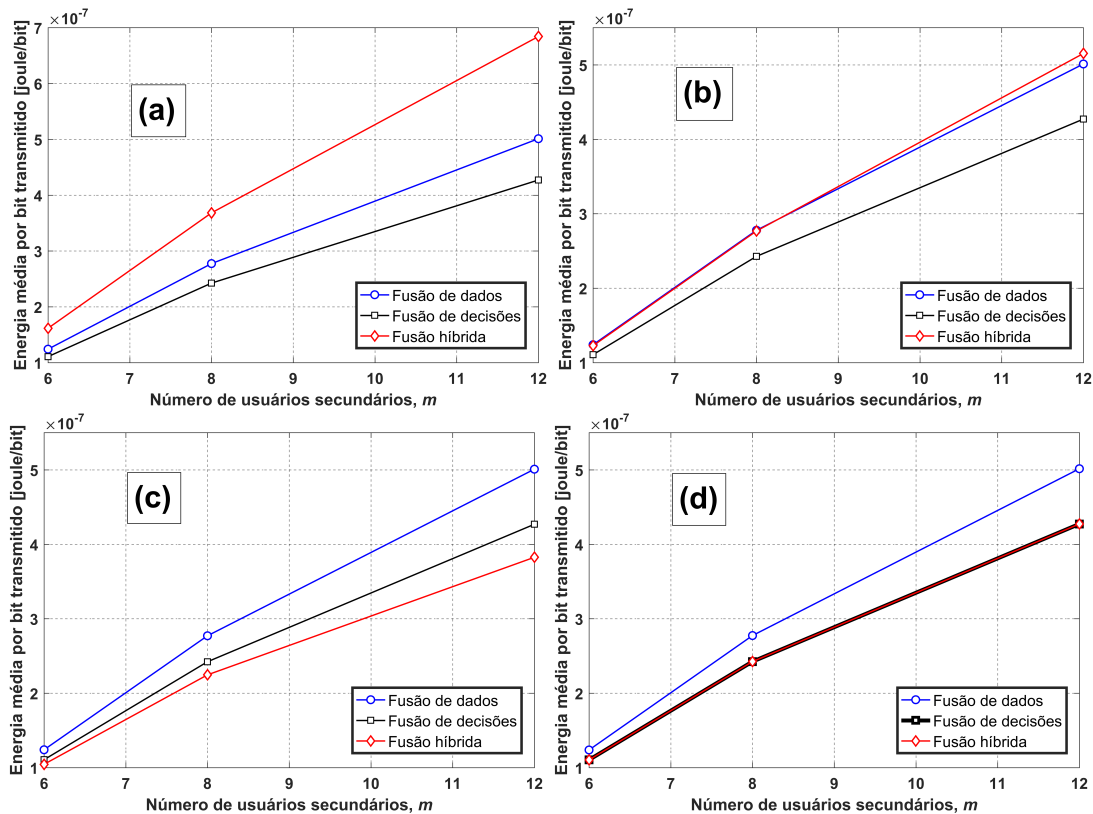


Figura 4.6: Figura (a): Consumo médio de energia por bit transmitido do detector ED para $m = 6$, $m = 8$ e $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 1$, Figura (b): Consumo médio de energia por bit transmitido do detector ED para $m = 6$, $m = 8$ e $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = 2$, Figura (c): Consumo médio de energia por bit transmitido do detector ED para $m = 6$, $m = 8$ e $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = m/2$ e Figura (d): Consumo médio de energia por bit transmitido do detector ED para $m = 6$, $m = 8$ e $m = 12$ com fusão de dados, fusão de decisões e fusão híbrida com $c = m$.

4.3 Consumo com modelo de mobilidade RWP

Para análise utilizando o RWP, os eventos são analisados de acordo com cada passo dado pelos SUs. Para garantir que o SU se movimenta o suficiente dentro da área de cobertura, o número de passos adotados foi de aproximadamente 37000. Este valor foi obtido verificando o caminho percorrido por apenas 1 SU utilizando os parâmetros adotados segundo a Tabela 4.2. Constatou-se que com estes parâmetros, o SU percorre uma parcela da área de cobertura suficiente para provocar variações significativas do consumo de energia. Tal exemplo de caminho percorrido está retratado na Figura 4.7.

Os valores de entrada do RWP foram escolhidos para melhor se adequarem a situações reais. Por exemplo, o intervalo de 0 à 27 m/s compreende uma velocidade de 0 à 97,2 km/h, o qual se adapta desde a velocidades de pedestres até automóveis. O raio de cobertura da estação base da rede secundária foi escolhido de acordo com o

padrão IEE 802.22 aplicado às WRANs. O tempo durante o qual o SU permanecerá em movimento, definido em (3.12), se dará conforme a adaptação feita para que se tenha como parâmetro de entrada o número de passos. Primeiro, é definido o número de passos desejado por SU, N_P . Segundo, este valor será o divisor do tempo de simulação T_S , resultando na média da distribuição uniforme de (3.12), ou seja,

$$M_{\Delta} = \frac{T_S}{N_P}, \quad (4.2)$$

onde de (3.12) se tem $\Delta_{min} = \frac{M_{\Delta}}{2}$ e $\Delta_{max} = 2M_{\Delta}$. Vale ressaltar que o número de passos configurado será apenas uma estimativa, devido à aleatoriedade dos parâmetros, como o próprio tempo de deslocamento, Δ (3.12), velocidade v (3.14) e também da distância a percorrer pelo SU, ρ (3.15).

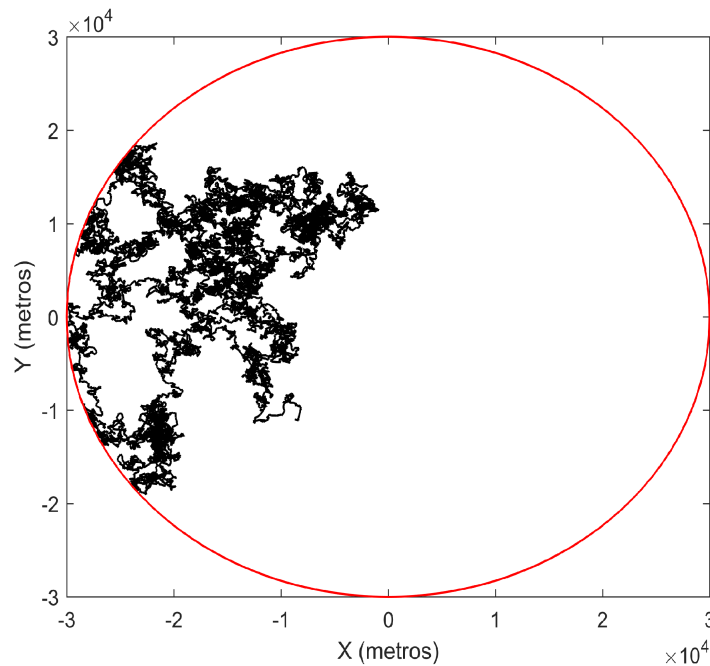


Figura 4.7: Exemplo de caminho percorrido por 1 SU.

A Figura 4.8 mostra o consumo dinâmico para $m = 12$ para os cenários de fusão de dados e fusão de decisões. Os parâmetros adotados são os mesmos utilizados na análise da mobilidade uniforme, listados na Tabela 4.1, assim como os parâmetros da Tabela 4.2. Percebe-se maior consumo da fusão de dados em relação à fusão de decisões. Tal resultado ocorre pelo fato da comunicação dos SUs com o FC, onde a carga de dados transmitidos na fusão de dados é maior devido aos múltiplos bits necessários para envio das amostras coletadas durante o período de observação, em comparação com apenas 1 bit transmitido pela fusão de decisões. Nota-se também

Tabela 4.2: *Parâmetros de entrada do RWP.*

Parâmetro de entrada	valor
Intervalo do eixo x, x_{\min} e, x_{\max}	$[-30000 \sim 30000]$ m
Intervalo do eixo y, y_{\min} e, y_{\max}	$[-30000 \sim 30000]$ m
Velocidade, v_{\min} e v_{\max}	$[1 \sim 27]$ m/s
Tempo de pausa, T_P	$[0 \sim 2]$ s
Direção de movimento, ϕ	$[-180 \sim 180]$ °
Tempo de simulação, T_S	300000 s
Número de rádios, m	12

o formato similar entre as fusões de dados e decisões. Este fenômeno ocorre devido a ambos os modos de operação estarem sendo analisados sob as mesmas posições provenientes do RWP.

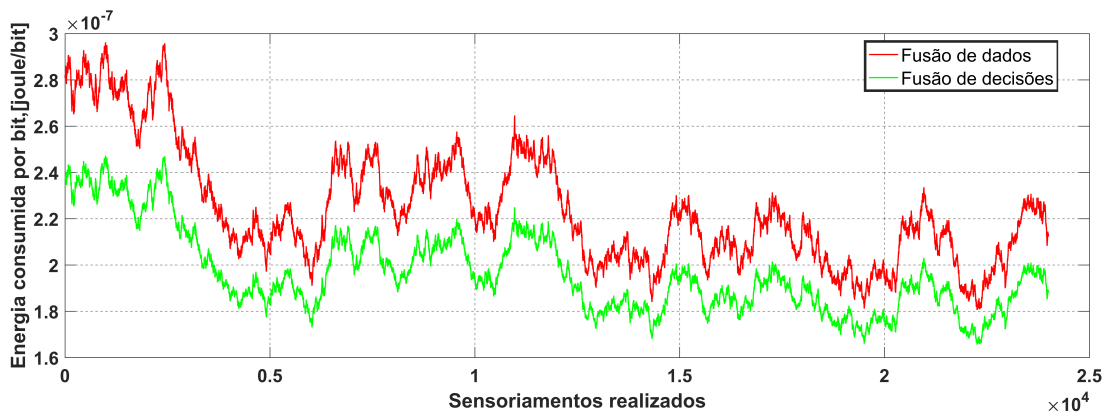


Figura 4.8: *Consumo dinâmico de energia por bit transmitido para fusão de dados e fusão de decisões.*

A Figura 4.9 mostra o consumo dinâmico para os cenários de fusão híbrida e fusão híbrida alternativa para $m = 12$ e $c = 6$. Percebe-se no gráfico uma grande variação do consumo de energia para fusão híbrida. Estes picos e subsequentes quedas abruptas ocorrem devido a mudanças constantes na formação dos *clusters*, fato que ocorre com frequência nas consecutivas mudanças de posições dos SUs. O principal desafio associado aos *clusters* é a dinamicidade da disponibilidade de canais. A estrutura dos *clusters* muda constantemente, no entanto, a disponibilidade de canais muda conforme o passar do tempo e a localização dos terminais. Isto traz novos desafios para o gerenciamento destes agrupamentos, no qual a falta de canais disponíveis, ou a sobrecarga deles, pode causar perda de conectividade [49]. Como consequência, a manutenção dos *cluster* e o reagrupamento precisa ser realizada com maior frequência do que nos outros dois modos de operação, provocando a sobrecarga dos canais de controle, tornando este modo de operação até impraticável.

A fusão híbrida alternativa é um modo de operação no qual após a formação dos primeiros *clusters*, verifica-se quando ocorre a primeira mudança na formação dos grupos, mesmo que seja de apenas um membro. Esta nova formação será mantida pelo modo alternativo até se esgotar o tempo de guarda configurado, que neste caso se dá pela quantidade de passos dos SUs. Após o esgotamento deste tempo de guarda, será verificado e armazenado como está a atual formação dos grupos. Quando ocorrer qualquer mudança, a fusão alternativa irá formar seus respectivos *clusters* de modo igual à fusão híbrida, e o contador do tempo de guarda é reiniciado. Esta medida mostra-se necessária para que a mudança de *clusters* ocorra após um tempo de espera, para evitar picos de energia e também sobrecarga nos canais de controle devido a constantes mudanças na formação dos agrupamentos.

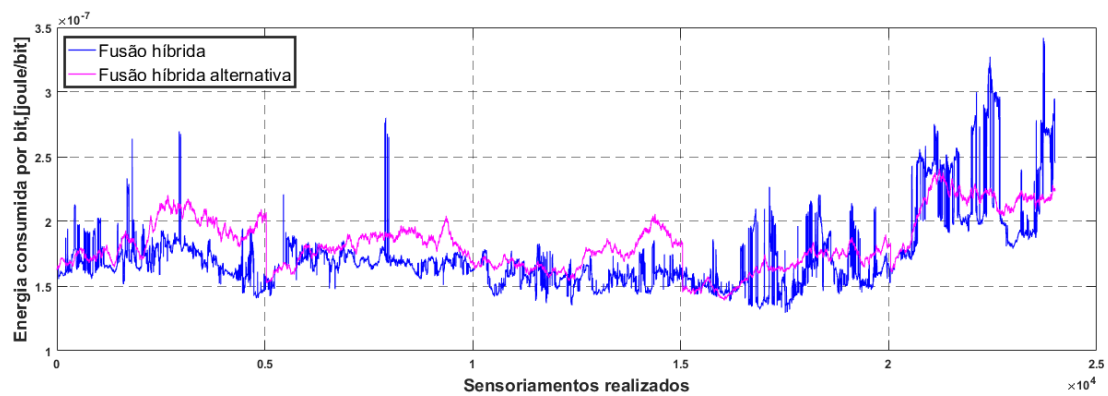


Figura 4.9: Consumo de energia por bit transmitido dinâmico para fusão híbrida e fusão híbrida alternativa.

Por fim, vale ressaltar que os gráficos mostrados na Seção 4.2 são de consumo médio de energia por bit, considerando a média dos consumos dependentes das distâncias dos SUs ao FC (no caso das funções de dados de decisões) e dos SUs aos CHs e dos CHs ao FC no caso da fusão híbrida. Já nesta Seção 4.3, o consumo de energia foi registrado à medida que os SUs e CHs se movem segundo o modelo RWP. Portanto, para um número suficientemente elevado de passos dos terminais, a média dos consumos dinâmicos tenderão aos valores apresentados na Seção 4.2, pois conforme a Figura 3.7, a distribuição dos terminais no modelo RWP adotado tende a uma distribuição uniforme, assim como é uniforme a distribuição dos terminais adotada na composição do consumo médio.

Capítulo 5

Conclusões e propostas para trabalhos futuros

Neste trabalho analisaram-se o desempenho e o consumo energético do sensoriamento espectral com fusão de dados, decisões e híbrida. Nas simulações adotou-se um modelo realista em termos do canal de sensoriamento, da localização e mobilidade dos terminais e da regra de formação de *clusters* na fusão híbrida.

O Capítulo 2 abordou conceitos sobre sensoriamento espectral, a construção dos modelos de canal, sinal, ruído e também a avaliação de diferentes detectores para as condições aqui consideradas, corroborando pela escolha do detector de energia. O Capítulo 3 abordou os métodos de fusão no sensoriamento cooperativo, sendo dois deles amplamente conhecidos, fusão de dados e fusão de decisões. Um terceiro método foi proposto, o qual implementa os dois modos clássicos com a formação de *clusters*, chamado de fusão híbrida. Também foi desenvolvido o modelo de consumo de energia e mobilidade considerados, que incluiu a descrição da modificação necessária para adaptar a área do modelo de mobilidade para circular. O Capítulo 4 mostrou os resultados numéricos, as descrições gerais da simulação, aplicados na análise que adota os terminais uniformemente distribuídos e também ao modelo de mobilidade adaptado.

Os resultados das simulações revelou que a quantidade de *clusters* do sistema afeta de formas opostas o desempenho do sensoriamento e o consumo de energia da rede para a fusão híbrida, sendo necessário adotar uma solução de compromisso entre essas duas métricas. Com $c = \frac{m}{2}$ *clusters* na fusão híbrida, verificou-se melhor desempenho e menor consumo de energia em relação à fusão de decisões, com as condições aqui implementadas. Assim, a fusão híbrida com $c = \frac{m}{2}$ representa uma interessante configuração do sistema para redução da energia consumida, principalmente nos canais de reporte. A utilização do RWP adaptado para CRN mostrou o comportamento

dinâmico do consumo de energia ao longo da mobilidade dos SUs. Para fusão híbrida, a utilização de um tempo de guarda se mostrou necessária para evitar picos subsequentes de energia devido a constantes mudanças na formação dos *clusters*.

Por fim, o detector de energia foi adotado para análise do sensoriamento, sendo a adoção de outros detectores uma oportunidade para trabalhos futuros, assim como o aprimoramento do modelo de mobilidade e também do modelo de propagação adotado, a fim de apresentar cenários ainda mais realistas. Também com relação ao canal de reporte, pesquisas que tratam sobre CSS centralizado consideram que as informações provindas do sensoriamento, sendo elas amostras ou decisões, são enviadas ao FC por canais livres de imperfeições, ou seja, esses dados chegam ao FC da mesma maneira que foram transmitidos pelos SUs. Considerar as imperfeições do canal de reporte pode ser uma interessante oportunidade de investigação de tal impacto no desempenho do sistema.

Apêndice I

Adaptação do RWP para área circular

Este apêndice demonstra as modificações necessárias no código do RWP, disponível em [52], para gerar os SUs dentro da área de cobertura configurada e também a adaptação do modelo para área circular. O modelo RWP utilizado foi desenvolvido via *software* MATLAB® e é composto de 3 arquivos, sendo eles: teste_Execute.m, test_Animate.m e Generate_Mobility.m. O primeiro arquivo, teste_Execute.m, possui os parâmetros de entrada e ele deve ser compilado para execução do código, pois nele são chamados os outros dois arquivos. O segundo, test_Animate.m, é o código responsável por gerar a animação do RWP e o terceiro, Generate_Mobility.m, contém a lógica responsável por gerar a mobilidade dos terminais.

As modificações necessárias serão feitas no arquivo Generate_Mobility.m. A primeira rotina I.1, responsável por gerar a posição inicial dos SUs de forma uniforme dentro da área de cobertura, deve ser implementada dentro da primeira *enlace for* e após a inicialização das variáveis globais. Para facilitar ao leitor, a rotina I.1 deve ser inserida após os comandos abaixo:

```
function s_mobility = Generate_Mobility(s_input)

global s_mobility_tmp;
global nodeIndex_tmp;

s_mobility.NB_NODES = s_input.NB_NODES;
s_mobility.SIMULATION_TIME = s_input.SIMULATION_TIME;
for nodeIndex_tmp = 1:s_mobility.NB_NODES
    s_mobility_tmp.VS_NODE(nodeIndex_tmp).V_TIME = [];
    s_mobility_tmp.VS_NODE(nodeIndex_tmp).V_POSITION_X = [];
    s_mobility_tmp.VS_NODE(nodeIndex_tmp).V_POSITION_Y = [];
    s_mobility_tmp.VS_NODE(nodeIndex_tmp).V_DIRECTION = [];
```

```
s_mobility_tmp.VS_NODE(nodeIndex_tmp).V_SPEED_MAGNITUDE = [];
s_mobility_tmp.VS_NODE(nodeIndex_tmp).V_IS_MOVING = [];
s_mobility_tmp.VS_NODE(nodeIndex_tmp).V_DURATION = [];
```

Por questões de formatação e espaço, fez-se a quebra de linhas para comportar o código no documento e também algumas palavras da rotina I.1 foram abreviadas. Para remover as quebras de linha basta retirar os três pontos e recolocar a respectiva linha abaixo no lugar. Com relação às palavras abreviadas, basta fazer as substituições abaixo.

- POS ⇒ POSITION
- INT ⇒ INTERVAL
- prev ⇒ previous

Listing I.1: Rotina para geração dos nós dentro da área de cobertura

```
prevX = unifrnd(s_input.V_POS_X_INT(1), s_input.V_POS_X_INT(2));
prevY = unifrnd(s_input.V_POS_Y_INT(1), s_input.V_POS_Y_INT(2));

if ((sqrt((prevX^2) + (prevY^2))) > s_input.V_POS_X_INT(2)) ...
| ((sqrt((prevX^2) + (prevY^2))) < 1)
    while ((sqrt((prevX^2) + (prevY^2))) > s_input.V_POS_X_INT(2)) ...
    | ((sqrt((prevX^2) + (prevY^2))) < 1)
        prevX = unifrnd(s_input.V_POS_X_INT(1), s_input.V_POS_X_INT(2));
        prevY = unifrnd(s_input.V_POS_Y_INT(1), s_input.V_POS_Y_INT(2));
    end
end
```

A segunda rotina I.2, deve ser implementada também no arquivo `Generate_Mobility.m`, porém agora dentro da função `function Out_setRestrictedWalk_random_waypoint(previousX,previousY,previousDuration,previousTime,s_input)`. Ela deve ser inserida dentro do enlace `while` e após o código abaixo:

```
if (y_dest > s_input.V_POSITION_Y_INTERVAL(2))
    flag_mobility_was_outside = true;
    new_direction = -direction_tmp;
    y_dest = s_input.V_POSITION_Y_INTERVAL(2);
    x_dest = x_tmp + diff([y_tmp y_dest])/tand(direction_tmp);
end
if (y_dest < s_input.V_POSITION_Y_INTERVAL(1))
    flag_mobility_was_outside = true;
```



```
new_direction = -direction_tmp;  
y_dest = s_input.V_POSITION_Y_INTERVAL(1);  
x_dest = x_tmp + diff([y_tmp y_dest])/tand(direction_tmp);  
end
```

Listing I.2: Rotina para adaptação da área de cobertura para circular

```
r_max = sqrt((x_dest^2) + (y_dest^2));  
  
if (r_max > s_input.V_POSITION_X_INTERVAL(2) | r_max < 1)  
    flag_mobility_was_outside = true;  
    new_direction = 180 - direction_tmp;  
    x_dest = x_tmp;  
    y_dest = y_tmp;  
    flag_mobility_was_outside = false;  
end
```

A inserção destas duas rotinas é o suficiente para os nós sejam gerados de forma uniforme dentro da área de cobertura, com $d \geq 1$ em relação ao FC e para mobilidade ser mantida dentro da área circular.

Referências Bibliográficas

- [1] S. Haykin, “Cognitive radio: brain-empowered wireless communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005.
- [2] Y. Arjoun and N. Kaabouch, “A comprehensive survey on spectrum sensing in cognitive radio networks: Recent advances, new challenges, and future research directions,” *Sensors*, vol. 19, no. 1, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/1/126>
- [3] J. Neto and D. Guimarães, “Sensoriamento espectral cooperativo baseado em autovalores para rádios cognitivos,” *Telecomunicações*, vol. 14, pp. 1–9, 06 2009.
- [4] L. C. Schiavon and L. N. Moreira, “An overview of broadband connectivity: insights from brazil/ panorama sobre a conectividade de banda larga: insights para o brasil,” *Brazilian Journal of Development*, vol. 8, no. 3, Mar. 2022. [Online]. Available: <https://brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/view/45343>
- [5] K. Cichoń, A. Kliks, and H. Bogucka, “Energy efficient cooperative spectrum sensing: A survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1861–1886, 2016.
- [6] D. Das and S. Das, “A survey on spectrum occupancy measurement for cognitive radio,” *Wireless Personal Communications*, vol. 85, no. 4, pp. 2581–2598, 2015.
- [7] D. A. Guimaraes, “Spectrum sensing,” *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 37, no. 1, pp. 10–29, 2022.
- [8] D. Guimarães and E. Pereira, “Influence of a direct-conversion receiver model on the performance of detectors for spectrum sensing,” *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 36, no. 1, p. 173–183, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://jcis.sbrt.org.br/jcis/article/view/789>
- [9] S. Gupta and V. Malagar, “Ieee 802.22 standard for regional area networks,” in *2017 International Conference on Next Generation Computing and Information Systems (ICNGCIS)*, 2017, pp. 126–130.

- [10] N. Reisi, V. Jamali, M. Ahmadian, and S. Salari, “Cooperative spectrum sensing over correlated log-normal channels in cognitive radio networks based on clustering,” in *Proceedings of the 11th International Conference on Telecommunications*, 2011, pp. 161–168.
- [11] S. W. Oh, Y. Ma, M.-H. Tao, and E. C. Y. Peh, “An overview and comparison of tv white space regulations worldwide,” in *International Conference on Frontiers of Communications, Networks and Applications (ICFCNA 2014 - Malaysia)*, 2014, pp. 1–6.
- [12] J. A. Rocha, “Estudo da wran utilizando a faixa de tv white space através de rádios cognitivo,” Santa Maria, p. 67, 2019.
- [13] F. S. Q. Q. Alves, “Sensoriamento espectral cooperativo baseado em rádios cognitivos com múltiplas antenas,” p. 63, 2021.
- [14] “Ieee standard - information technology-telecommunications and information exchange between systems-wireless regional area networks-specific requirements-part 22: Cognitive wireless ran mac and phy specifications: Policies and procedures for operation in the bands that allow spectrum sharing where the communications devices may opportunistically operate in the spectrum of primary service,” *IEEE Std 802.22-2019 (Revision of IEEE Std 802.22-2011)*, pp. 1–1465, 2020.
- [15] Y. Xiao and F. Hu, *Cognitive radio networks*. CRC press, 2008.
- [16] S. Althunibat and F. Granelli, “Novel energy-efficient reporting scheme for spectrum sensing results in cognitive radio,” in *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2013, pp. 2438–2442.
- [17] H. Zhang, A. Gladisch, M. Pickavet, Z. Tao, and W. Mohr, “Energy efficiency in communications,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 11, pp. 48–49, 2010.
- [18] S. Althunibat, M. Di Renzo, and F. Granelli, “Towards energy-efficient cooperative spectrum sensing for cognitive radio networks - an overview,” *Telecommunication Systems*, 05 2014.
- [19] S. Maleki, S. P. Chepuri, and G. Leus, “Energy and throughput efficient strategies for cooperative spectrum sensing in cognitive radios,” in *2011 IEEE 12th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, 2011, pp. 71–75.
- [20] H. N. Pham, Y. Zhang, P. E. Engelstad, T. Skeie, and F. Eliassen, “Energy minimization approach for optimal cooperative spectrum sensing in sensor-aided cognitive radio networks,” in *2010 The 5th Annual ICST Wireless Internet Con-*

- ference (WICON), 2010, pp. 1–9.
- [21] S. Althunibat, R. Palacios, and F. Granelli, “Energy-efficient spectrum sensing in cognitive radio networks by coordinated reduction of the sensing users,” in *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2012, pp. 1399–1404.
- [22] J. Lunden, V. Koivunen, A. Huttunen, and H. V. Poor, “Collaborative cyclostationary spectrum sensing for cognitive radio systems,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 57, no. 11, pp. 4182–4195, 2009.
- [23] S. Appadwedula, V. V. Veeravalli, and D. L. Jones, “Decentralized detection with censoring sensors,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 4, pp. 1362–1373, 2008.
- [24] S. Althunibat, M. Di Renzo, and F. Granelli, “Optimizing the k-out-of-n rule for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks,” in *2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2013, pp. 1607–1611.
- [25] S. Maleki, S. P. Chepuri, and G. Leus, “Optimization of hard fusion based spectrum sensing for energy-constrained cognitive radio networks,” *Physical Communication*, vol. 9, pp. 193–198, 2013.
- [26] S. Wang, Y. Wang, J. P. Coon, and A. Doufexi, “Energy-efficient spectrum sensing and access for cognitive radio networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 2, pp. 906–912, 2012.
- [27] B. Wang, Z. Feng, D. Huang, and P. Zhang, “Discontinuous spectrum sensing scheme for energy-constrained cognitive radio networks,” *Electronics Letters*, vol. 49, pp. 429–430, 03 2013.
- [28] Y. Wu and D. H. K. Tsang, “Energy-efficient spectrum sensing and transmission for cognitive radio system,” *IEEE Communications Letters*, vol. 15, no. 5, pp. 545–547, 2011.
- [29] S. M. Mishra, A. Sahai, and R. W. Brodersen, “Cooperative sensing among cognitive radios,” in *2006 IEEE International Conference on Communications*, vol. 4, 2006, pp. 1658–1663.
- [30] S. Chaudhari, J. Lunden, V. Koivunen, and H. V. Poor, “Cooperative sensing with imperfect reporting channels: Hard decisions or soft decisions?” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 60, no. 1, pp. 18–28, 2012.
- [31] S. Althunibat, R. Palacios, and F. Granelli, “Performance optimisation of soft and hard spectrum sensing schemes in cognitive radio,” *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 7, pp. 998–1001, 2012.
- [32] J. Shen, S. Liu, R. Zhang, and Y. Liu, “Soft versus hard cooperative energy detec-

- tion under low snr,” in *2008 Third International Conference on Communications and Networking in China*, 2008, pp. 128–131.
- [33] E. C. Y. Peh, Y.-C. Liang, Y. L. Guan, and Y. Pei, “Energy-efficient cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks,” in *2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2011*, 2011, pp. 1–5.
- [34] D. A. Guimaraes, *Digital transmission: a simulation-aided introduction with Vis-Sim/Comm*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [35] M. Mollel and M. Kisangiri, “Comparison of empirical propagation path loss models for mobile communication,” *Computer Engineering and Intelligent Systems*, vol. 5, 01 2014.
- [36] S. Zhu, T. S. Ghazaany, S. M. R. Jones, R. A. Abd-Alhameed, J. M. Noras, T. Van Buren, J. Wilson, T. Suggett, and S. Marker, “Probability distribution of rician k -factor in urban, suburban and rural areas using real-world captured data,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 7, pp. 3835–3839, 2014.
- [37] A. Quadri, M. R. Manesh, and N. Kaabouch, “Denoising signals in cognitive radio systems using an evolutionary algorithm based adaptive filter,” in *2016 IEEE 7th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*, 2016, pp. 1–6.
- [38] H. S. de Aguiar and D. A. Guimarães, “Influência do método de fusão do sensoriamento espectral no desempenho e no consumo de energia,” 2022.
- [39] I. F. Akyildiz, B. F. Lo, and R. Balakrishnan, “Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey,” *Physical communication*, vol. 4, no. 1, pp. 40–62, 2011.
- [40] T. Yucek and H. Arslan, “A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 116–130, 2009.
- [41] B. Nadler, F. Penna, and R. Garello, “Performance of eigenvalue-based signal detectors with known and unknown noise level,” in *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2011, pp. 1–5.
- [42] D. A. Guimaraes and R. A. A. de Souza, “Implementation-oriented model for centralized data-fusion cooperative spectrum sensing,” *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 11, pp. 1804–1807, 2012.
- [43] D. A. Guimarães and C. H. Lim, “Sliding-window-based detection for spectrum sensing in radar bands,” *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 7, pp. 1418–

- 1421, 2018.
- [44] D. Guimarães, “Gini index inspired robust detector for spectrum sensing over ricean channels,” *Electronics Letters*, vol. 55, no. 12, pp. 713–714, 2019.
- [45] D. A. Guimarães, “Pietra-ricci index detector for centralized data fusion cooperative spectrum sensing,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 10, pp. 12 354–12 358, 2020.
- [46] P. Pandya, A. Durvesh, and N. Parekh, “Energy detection based spectrum sensing for cognitive radio network,” in *2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, 2015, pp. 201–206.
- [47] Y. Zeng and Y.-C. Liang, “Spectrum-sensing algorithms for cognitive radio based on statistical covariances,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 1804–1815, 2009.
- [48] G. Sharma and R. Sharma, “Performance comparison of centralised and distributed css over fading channels in cognitive radio,” *Cogent Engineering*, vol. 4, no. 1, p. 1355599, 2017.
- [49] K.-L. A. Yau, N. Ramli, W. Hashim, and H. Mohamad, “Clustering algorithms for cognitive radio networks: A survey,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 45, pp. 79–95, 2014. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804514001611>
- [50] Y. Zhao, P. Paul, C. Xin, and M. Song, “Performance analysis of spectrum sensing with mobile sus in cognitive radio networks,” in *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2014, pp. 2761–2766.
- [51] C. Bettstetter, G. Resta, and P. Santi, “The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 2, no. 3, pp. 257–269, 2003.
- [52] “Random waypoint mobility model.” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30939-random-waypoint-mobility-model>
- [53] C. Bettstetter, “Mobility modeling in wireless networks: categorization, smooth movement, and border effects,” *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 5, no. 3, pp. 55–66, 2001.
- [54] D. A. Guimarães, E. P. Frigieri, and L. J. Sakai, “Influence of node mobility, recharge, and path loss on the optimized lifetime of wireless rechargeable sensor networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 97, p. 102025, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870519305992>