

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

Héilton S. G. de Aguiar e Dayan A. Guimarães

Resumo—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 trata-se de um recurso limitado. Neste artigo 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 fazem uso de um modelo realista em termos da localização e mobilidade dos terminais, bem como da regra de formação de agrupamentos (*clusters*) na fusão híbrida.

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

Abstract—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 article, 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.

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

I. INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial dos sistemas de comunicações sem fio tem aumentado drasticamente a utilização do espectro de radiofrequência (*radio-frequency*, RF), tornado este recurso escasso [1]. Para coordenar a operação desses sistemas, uma política de alocação fixa de frequências é adotada por órgãos de regulação governamentais, que no Brasil é a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) [2]. Em tal política, destina-se uma banda de frequências a cada tipo de serviço, vinculado ao pagamento de uma licença de uso.

Os serviços de telecomunicações atuais demandam que haja tráfegos de dados com diferentes qualidades de serviço (*quality of service*, QoS) [3] e taxas cada vez mais altas, o que requer bandas cada vez maiores, tornando difícil a expansão e inserção de novas tecnologias devido a 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 (*fifth generation*, 5G) das redes de comunicação sem fio, e posteriormente também a tecnologia de sexta geração (*sixth generation*, 6G).

Nesse contexto surgiu o conceito dos rádios cognitivos (*cognitive radios*, CRs) [1] como proposta de melhor aproveitar as lacunas no espectro de RF deixados pela rede primária de usuários licenciados, ou usuários primários (*primary users*, PUs). Esta tecnologia consiste de transceptores inteligentes que fazem parte de uma rede secundária e que realizam, dentre outras tarefas, o sensoriamento do espectro para realizar transmissões oportunistas nas lacunas espectrais da rede primária. Estes dispositivos são definidos como usuários secundários (*secondary users*, SU).

O sensoriamento pode ser realizado de forma individual pelos SUs, ou cooperativo (*cooperative spectrum sensing*, CSS), sendo que o CSS é preferido por melhorar a acurácia no processo de decisão sobre o estado de ocupação da banda sensoriada. Essa melhoria é conseguida explorando-se a diversidade espacial dos terminais, contornando as degradações de sinal ocasionados por desvanecimentos por múltiplos percursos, somreamento e terminais obstruídos [4], [5].

O CSS pode ser centralizado ou distribuído. No modo centralizado, os SUs enviam seus dados a um centro de fusão (*fusion center*, FC), onde uma decisão global é tomada e comunicada a todos os SUs. Quando identificado que a banda não está sendo utilizada, uma política de acesso dinâmico ao espectro (*dynamic spectrum access*, DSA) é adotada entre os SUs para disputa de utilização da banda [4].

Um tema que tem recebido muita atenção nas pesquisas é o consumo de energia das redes de rádios cognitivos (*cognitive radio networks*, CRNs) [6]–[8], pois os dispositivos cognitivos realizam diversos processos antes da transmissão de dados, resultando em um alto gasto de energia, que, como já mencionado, é um recurso limitado.

Vários autores propuseram métodos para reduzir o consumo de energia, adotando técnicas de otimização em alguma etapa do sensoriamento [9]–[11]. Na etapa de troca de informações dos SUs, técnicas de redução da quantidade de rádios que transmitem nessa etapa foram propostas em [12], [13]. Entretanto, muitos trabalhos desconsideram o gasto de energia de todas as etapas do sensoriamento.

Por outro lado, modelagens irrealistas para análise de desempenho de uma CRN resultam em análises também irrealistas, como exemplo considerar o mesmo desempenho para todos os SUs [14], inferir que todos estão na mesma posição, ou seja, estão sob a mesma razão sinal-ruído (*signal-to-noise ratio*, SNR), ou desconsiderar a influência de relevantes aspectos de propagação do canal de comunicação [15], [16].

Héilton S. G. de Aguiar, Mestrando em Telecomunicações, e-mail: heliton@mtel.inatel.br; Dayan A. Guimarães, Professor e Pesquisador, e-mail: dayan@inatel.br; Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, Santa Rita do Sapucaí - MG.

Este artigo 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 FAPEMIG.

Neste artigo analisa-se o desempenho do CSS e o consumo de energia da rede secundária, adotando-se um modelo realista de 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. 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 restante do trabalho está assim organizado: a Seção II revisa o sensoriamento por detecção de energia. A modelagem dos sinais e do canal de sensoriamento é realizada na Seção III. A Seção IV descreve os cenários de fusão de dados, de decisões e híbrida. A modelagem do consumo energético é dada na Seção V. A Seção VI apresenta os resultados de simulações computacionais e a Seção VII conclui o trabalho.

II. SENSORIAMENTO POR DETECÇÃO DE ENERGIA

O sensoriamento espectral é um teste de hipótese binário no qual \mathcal{H}_1 e \mathcal{H}_0 denotam as hipóteses de presença e ausência do sinal primário na banda sensoriada, respectivamente. A decisão é tomada comparando uma estatística de teste T 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 .

Há diferentes maneiras de construir uma estatística de teste, dando origem a diferentes tipos de detectores, sendo o detector de energia (*energy detector*, ED) o mais conhecido. 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

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

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 adota-se o CSS com fusão de dados, a estatística de teste no FC, a partir da qual toma-se a decisão global, é dada por

$$T = \sum_{i=1}^m T_i, \quad (2)$$

em que T_i é a estatística de teste no i -ésimo SU.

O desempenho do sensoriamento espectral é comumente medido pela probabilidade de falso alarme, P_{fa} , e pela probabilidade de detecção, P_d . 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. Essas duas métricas são normalmente aglutinadas em uma curva característica de operação do receptor (*receiver operating characteristic*, ROC), na qual P_{fa} e P_d são apresentados para diferentes limiares de decisão.

III. MODELAGEM DE SINAIS E DE CANAL

Considere um CSS com 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

$$\mathbf{Y} = \mathbf{h}\mathbf{x}^T + \mathbf{V}, \quad (3)$$

em que o vetor $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^{m \times 1}$ modela os canais entre o PU e os SUs, $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{n \times 1}$ modela o sinal primário e $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{m \times n}$ modela o ruído nos SUs. Sob \mathcal{H}_1 tem-se $\mathbf{Y} = \mathbf{h}\mathbf{x}^T + \mathbf{V}$ e sob \mathcal{H}_0 tem-se $\mathbf{Y} = \mathbf{V}$. Os detalhes sobre \mathbf{x} , \mathbf{h} e \mathbf{V} são apresentados ao longo do restante desta seção.

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. Assim, a potência do sinal primário recebido pelo i -ésimo SU é dada por

$$P_{rx_i} = P_{tx}/d_i^\alpha, \quad (4)$$

em que $d_i \geq 1$ é a distância entre o PU e o i -ésimo SU e α é o expoente de perdas no percurso, com valor determinado de acordo com o ambiente de propagação [17].

Considera-se que $\mathbf{h} = \mathbf{G}\mathbf{u}$, com \mathbf{G} modelando as diferentes atenuações entre PU e SUs e \mathbf{u} modelando o desvanecimento multipercurso. A matriz de atenuações é dada por

$$\mathbf{G} = \text{diag} \left(\sqrt{\mathbf{P}_{rx}/P_{tx}} \right), \quad (5)$$

sendo \mathbf{P}_{rx} o vetor que contém as potências recebidas calculadas por meio de (4).

O vetor \mathbf{u} modela canais com desvanecimento Rice entre o PU e o i -ésimo SU, sendo formado por variáveis aleatórias Gaussianas complexas com média $\mu_K = \sqrt{\kappa/(2\kappa+2)}$ e variância $\sigma_K^2 = 1/(\kappa+1)$, 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 , com valores típicos ($\mu_K = 1,88$; $\sigma_K = 4,13$) dB para áreas urbanas, ($\mu_K = 2,41$; $\sigma_K = 3,84$) dB para áreas suburbanas, e ($\mu_K = 2,63$; $\sigma_K = 3,82$) para áreas rurais e abertas [18].

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

$$\text{SNR} = 10 \log \left(\bar{P}_{rx}/\bar{\sigma}^2 \right), \quad (6)$$

em que $\bar{P}_{rx} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{rx_i}$ é a potência média dos sinais recebidos e $\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sigma_i^2$ é a potência média de ruído. A variância das amostras de ruído na i -ésima linha de \mathbf{V} é $\sigma_i^2 = [(1 - \rho_N)\sigma_{\text{avg}}^2, (1 + \rho_N)\sigma_{\text{avg}}^2]$, com $0 \leq \rho_N \leq 1$ determinando a fração de variação da potência de ruído em torno da média.

IV. CENÁRIOS DE FUSÃO NO CSS

Para modelar os cenários de fusão, como ilustra a Fig. 1, considera-se que a cada realização do sensoriamento os SUs estão distribuídos aleatoriamente dentro de uma área de cobertura circular de raio r configurável em torno do FC, este localizado na coordenada $(0, 0)$. O transmissor PU localiza-se nas coordenadas (x_{\min}, y_{\max}) . Os demais elementos da figura são definidos mais adiante.

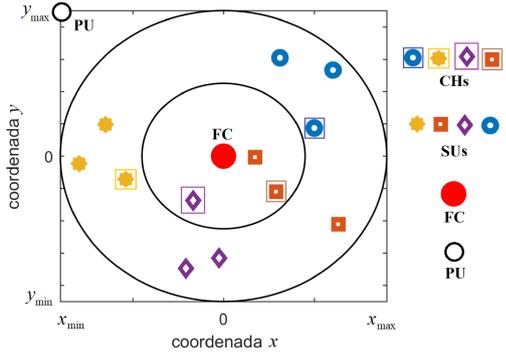


Fig. 1. Modelo de distribuição espacial dos SUs.

A. CSS com fusão de dados ou com fusão de decisões

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, cada linha da matriz \mathbf{Y} contém as amostras enviadas ao FC por cada SU e a estatística de teste é formada no FC a partir de todas as amostras em \mathbf{Y} , conforme (2). Na fusão de decisões, cada linha da matriz \mathbf{Y} é processada pelo respectivo SU para geração da estatística de teste, conforme (1), e subsequente decisão local. 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. Nessa lógica decide-se pela hipótese \mathcal{H}_1 se k ou mais SUs decidirem por \mathcal{H}_1 . Os casos particulares mais utilizados da lógica k -em- m são as regras E ($k = m$), OU ($k = 1$) e MAJ ($k = \lceil (m/2) \rceil$), essa última conhecida como regra de voto majoritário, sendo $\lceil x \rceil$ o menor inteiro maior que, ou igual a x .

B. CSS 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 (*clusters*) com m/c SUs em cada um. Todos os SUs coletam as amostras do sinal primário, mas $(m/c - 1)$ 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 sensoriada. As decisões tomadas pelos m/c CHs são então enviadas ao FC da rede secundária, onde a decisão global é tomada fazendo-se uso da lógica k -em- m/c .

Em cada CH será formada uma matriz \mathbf{Y}' , cujas m/c linhas correspondem às amostras dos SUs integrantes do respectivo *cluster*. Assim, a estatística de teste ED no i -ésimo CH será $T_i = \sum_{j=1}^{m/c} |y'_{ij}|^2$, para $i = 1, \dots, m/c$.

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, representados pela circunferência menor na Fig. 1. Os SUs com as c menores distâncias são os CHs. Os $(m/c - 1)$ SUs que estiverem menos distantes de um CH formarão o respectivo *cluster*.

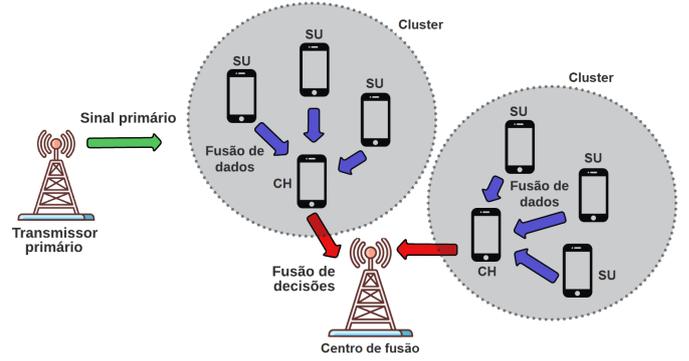


Fig. 2. Sensoriamento cooperativo com fusão híbrida.

V. MODELAGEM DE CONSUMO DE ENERGIA

Para análise do consumo de energia, considere que um quadro possui duração τ segundos e é dividido em três etapas: sensoriamento, reporte e transmissão. 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, totalizando $m\tau_r$ segundos, sendo τ_r o tempo de reporte de cada SU. Por fim, se o sinal primário é identificado como inativo, o tempo restante do quadro é destinado à transmissão de dados, sendo ele $\tau_t = \tau - (\tau_s + m\tau_r)$ segundos.

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. 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.

A potência de transmissão para reporte (vide Fig. 1) pode ser calculada a partir de

$$P_{r_k} = P_{\min} d_k^\alpha, \quad (7)$$

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,

$$P_{t_k} = P_{\min} d_k^\alpha, \quad (8)$$

onde P_{t_k} é a potência de transmissão do k -ésimo SU para a estação base, localizada também na coordenada $(0, 0)$.

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 [6] é dada por

$$E_T = mP_s\tau_s + \left(\sum_{k=1}^m P_{r_k} \right) \tau_r + p \left(\sum_{k=1}^m P_{t_k} \right) \tau_t, \quad (9)$$

sendo p a probabilidade de o transmissor primário ser considerado inativo; P_s , P_{T_k} e P_{k_s} 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 e P_t variáveis em função do modo de fusão aplicado e das distâncias. Note que, implicitamente, a terceira parcela em (9) resulta da divisão do tempo de transmissão igualmente entre os SUs, admitindo assim um acesso por divisão de tempo (*time-division multiple access*, TDMA) à banda, ou seja, essa parcela é dada por $pmP_t\tau_t/m$.

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

$$D = p_0(1 - P_{fa})R_b\tau_t, \quad (10)$$

medida em bits, em que R_b é a taxa de bits de transmissão.

Assim, a quantidade de energia consumida por bit efetivamente transmitido, medida em joule/bit, é dada por

$$E_B = E_T/D. \quad (11)$$

VI. RESULTADOS NUMÉRICOS

Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos por simulações computacionais utilizando o software MATLAB, com base dos modelos apresentados nas Seções III, IV e V.

As curvas ROC e de consumo de energia foram obtidas por meio de 15000 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 . Cada ponto nas curvas de consumo de energia levou em conta 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 sistema estão listados na Tabela I.

A Fig. 3 mostra o desempenho do sensoriamento para os cenários de fusão em pauta, para um número total de $m = 18$ SUs, $n = 100$ amostras por SU e diferentes números de *clusters*. No gráfico superior esquerdo da Fig. 3 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

TABELA I
PARÂMETROS DE SISTEMA.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
r	10000 m	τ_s	2 ms
R_b	100 kbps	τ_r	0,2 ms
P_{tx}	5 W	$\max\{P_{T_k}\}$	100 mW
p_0 e p_1	0,5	τ	20 ms
α	3	P_{min}	-100 dBm
P_{fa}	0,1	SNR	-13 dB
P_s	1 mW	n	100

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.

No gráfico superior direito da Fig. 3 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. Por outro lado, observando o gráfico superior direito da Fig. 4 nota-se que quando $c = 1$ tem-se um consumo energético ainda maior que no caso da fusão de dados. Como já mencionado, o processo de reporte dos SUs tem grande impacto no consumo de energia, mais ainda quando se opera com fusão de dados devido ao fato de serem transmitidos múltiplos bits por amostra coletada. Paralelo a isso, verificou-se que a distância média entre os SUs e o CH único é maior que dos SUs para o FC, fazendo com que o consumo de energia seja ainda maior que na fusão de dados pura.

O gráfico inferior da Fig. 3 mostra a fusão híbrida operando no seu limite inferior de desempenho, quando $c = m$, situação na qual o sistema opera 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, no gráfico inferior da Fig. 4, quando se utiliza o número máximo de *clusters* o consumo energético da fusão híbrida apresenta o mesmo consumo da fusão de decisões, pois as distâncias dos SUs em relação ao FC são as mesmas nos dois modos de operação.

Por fim, o gráfico superior esquerdo da Fig. 4 apresenta um interessante resultado em relação ao consumo de energia para a fusão híbrida com $c = m/2$. Para essa configuração, os *clusters* são compostos de apenas 1 SU e 1 CH, ambos 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 $r/2$, a transmissão das decisões locais apresenta um baixo consumo, justificando a baixa energia apresentada pela fusão híbrida.

VII. CONCLUSÕES

Neste artigo analisaram-se o desempenho e o consumo energético do sensoriamento espectral com fusão de dados,

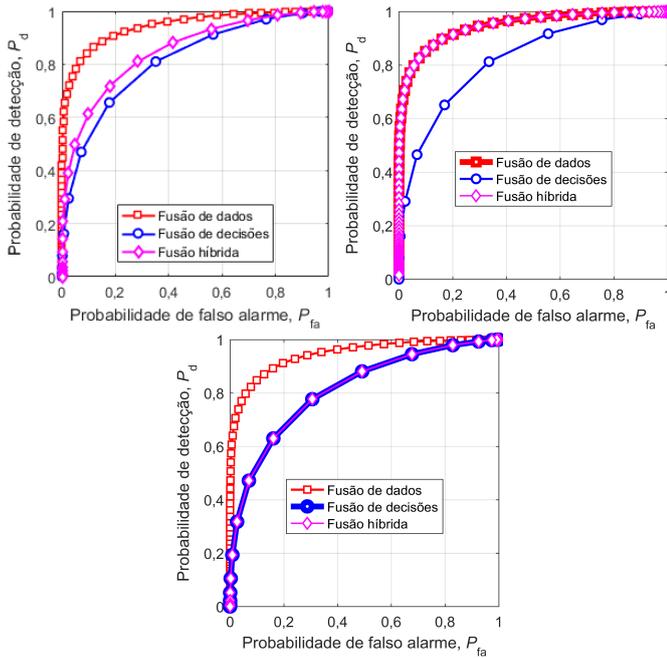


Fig. 3. ROCs para $m = 18$ SUs, com $c = 9$ clusters (gráfico superior esquerdo), $c = 1$ (gráfico superior direito) e $c = 18$ (gráfico inferior).

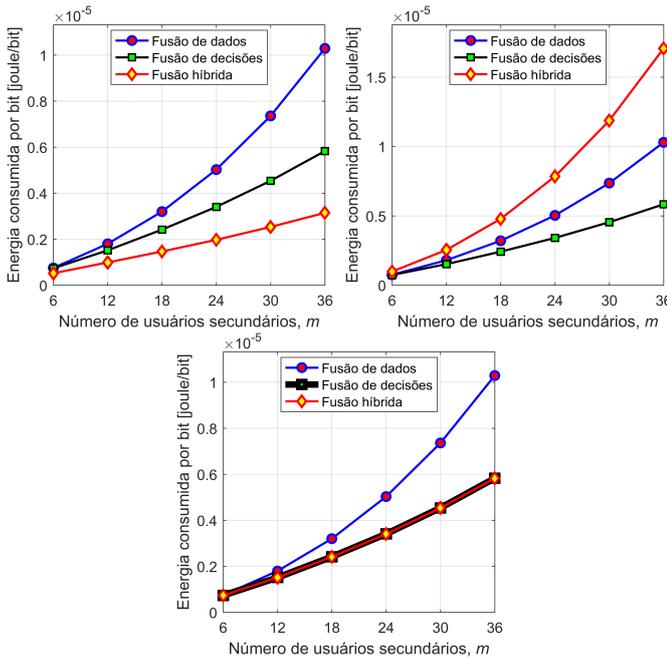


Fig. 4. Consumo de energia para m SUs, com $c = m/2$ cluster (gráfico superior esquerdo), $c = 1$ (gráfico superior direito) e $c = m$ (gráfico inferior).

decisões e híbrida, sendo as duas primeiras amplamente conhecidas, com a última tendo sido aqui proposta. 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.

A fusão híbrida revelou que a quantidade de *clusters* do sistema afeta de formas opostas o desempenho e o consumo de energia da rede, sendo necessário adotar uma solução de compromisso entre essas duas métricas. Com $c = m/2$

clusters na fusão híbrida, verificou-se melhor desempenho e menor consumo de energia em relação à fusão de decisões. Assim, a fusão híbrida com $c = m/2$ representa uma atrativa configuração do sistema.

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, a fim de apresentar cenários ainda mais realistas.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Youness; K. Naima, "A comprehensive survey on spectrum sensing in cognitive radio networks: Recent advances, new challenges, and future research directions", *Sensors*, v. 19, n. 1, p. 126, 2019.
- [2] L. C. Schiavon, 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*, v. 8, n. 3, p. 19128-19141, 2022.
- [3] 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, thirdquarter 2016.
- [4] Guimarães, D., & Pereira, E., "Influence of a Direct-Conversion Receiver Model on the Performance of Detectors for Spectrum Sensing," *Journal of Communication and Information Systems*, 36(1), 173–183, 2021.
- [5] N. Reisi, V. Jamali, M. Ahmadian and S. Salari, "Cooperative spectrum sensing over correlated log-normal channels in cognitive radio networks based on clustering," *Proceedings of the 11th International Conference on Telecommunications*, pp. 161-168, 2011.
- [6] S. Althunibat and F. Granelli, "Novel energy-efficient reporting scheme for spectrum sensing results in cognitive radio," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 2438-2442, 2013.
- [7] 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, November 2010.
- [8] Althunibat, Saud & Di Renzo, Marco & Granelli, Fabrizio, "Towards Energy-Efficient Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks - An Overview," *Telecommunication Systems*, 2014.
- [9] S. Maleki, S. P. Chepuri and G. Leus, "Energy and throughput efficient strategies for cooperative spectrum sensing in cognitive radios," *IEEE 12th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, pp. 71-75, 2011.
- [10] 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," *The 5th Annual ICST Wireless Internet Conference (WICON)*, pp. 1-9, 2010.
- [11] S. Althunibat, R. Palacios and F. Granelli, "Energy-efficient spectrum sensing in Cognitive Radio Networks by coordinated reduction of the sensing users," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2012, pp. 1399-1404, 2012.
- [12] 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, Nov. 2009.
- [13] 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, April 2008.
- [14] S. Althunibat, M. Di Renzo and F. Granelli, "Optimizing the K-out-of-N rule for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1607-1611, 2013.
- [15] E. C. Y. Peh, Y. Liang, Y. L. Guan and Y. Pei, "Energy-Efficient Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks," *IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM*, pp. 1-5, 2011.
- [16] Maleki, S., Chepuri, S. P., & Leus, G., "Optimization of hard fusion based spectrum sensing for energy-constrained cognitive radio networks," *Physical Communication*, 9, 193-198, 2013.
- [17] J. Miranda et al., "Path loss exponent analysis in Wireless Sensor Networks: Experimental evaluation," *11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, pp. 54-58, 2013.
- [18] S. Zhu et al., "Probability Distribution of Rician K -Factor in Urban, Suburban and Rural Areas Using Real-World Captured Data," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 7, pp. 3835-3839, July 2014.