

Avaliação Adaptativa de Sensores Radar com Emulação de Sinais em Tempo Real

Felipe S. Ivo, Wellington R. Munduruca, Lucio P. Amaro, Marco A. A. Fidos Júnior,
Dimas I. Alves e Renato Machado

Resumo— Este artigo propõe uma avaliação adaptativa de sensores radar por meio de um simulador de voo em ambiente laboratorial baseado em arquitetura *hardware-in-the-loop*, com emulação de sinais em tempo real. O sistema de teste proposto integra o simulador X-Plane à plataforma *Keysight Electronic Warfare Advanced Simulation - EWAS*, permitindo testes conduzidos de sensores com múltiplas antenas em cenários eletromagnéticos simulados. O sistema é modelado como um Processo de Decisão de Markov Parcialmente Observável (POMDP), se restringindo a avaliar como métrica de desempenho o erro de estimação angular e uma função de recompensa. Os resultados experimentais demonstram a geração de sinais de radar em tempo real em um cenário de voo simulado, validam a detecção dos sinais gerados e permitem a estimativa da função de recompensa para o teste realizado.

Palavras-Chave— Radar; *Hardware-in-the-Loop*; Simulação Radar; Sensores Aeroembarcados; Avaliação Adaptativa; Inteligência Artificial.

Abstract— This paper proposes an adaptive evaluation approach for radar sensors based on a *hardware-in-the-loop* (HIL) flight simulation environment with real-time signal emulation. The proposed test system integrates the flight simulator X-Plane with the *Keysight EWAS* platform, enabling conducted testing of multi-antenna sensors in simulated electromagnetic scenarios. The system is modeled as a partially observable Markov decision process (POMDP), establishing performance metrics and a reward function. Experimental results demonstrate real-time radar signal generation in a simulated flight scenario, validate the detection of the generated signals, and enable estimation of a reward function for the test under analysis.

Keywords— Radar; *Hardware-in-the-Loop*; Radar Simulation; Airborne Sensors; Adaptive Evaluation; Artificial Intelligence.

I. INTRODUÇÃO

A avaliação do desempenho de sensores radar embarcados em plataformas aéreas, sob cenários eletromagnéticos adversos, constitui um fator determinante para a eficácia operacional de missões militares [1]. Nesses ambientes, a capacidade de detectar, identificar e estimar a direção de chegada de emissores radar impacta diretamente a consciência situacional e a tomada de decisão [2].

Apesar de sua relevância, a validação desses sistemas por ensaios em voo apresenta limitações severas, a saber: requer instrumentação especializada, envolve custos elevados e impõe restrições operacionais que tornam a execução inviável em

muitos contextos [2], [3]. Ambientes de simulação de voo como o X-Plane têm sido reconhecidos por sua elevada fidelidade na reprodução da dinâmica de aeronaves reais, inclusive aprovados pela *Federal Aviation Administration* (FAA) para treinamento de pilotos [4]. Em paralelo, a abordagem *Hardware-in-the-Loop* (HIL) permite integrar hardware real a simulações em tempo real, viabilizando a avaliação controlada de sensores com sinais de radiofrequência representativos do ambiente operacional [5], [6].

A integração entre simulação de voo e avaliação de sensores reais em ambiente HIL possibilita a construção de ambientes híbridos com maior controle experimental e menor custo [6]. No entanto, esses sistemas de teste em laboratório têm sido empregados de forma determinística, caracterizados por cenários de voo fixos, execuções repetitivas e avaliação manual [6]. Nesse contexto, propõe-se neste trabalho um demonstrador de conceito de um ambiente de simulação HIL dinâmico, no qual as variáveis de teste são parcialmente observáveis, servindo como base para uma avaliação adaptativa.

Os objetivos deste trabalho são: i) propor uma arquitetura de um simulador de voo integrado a um sistema *hardware-in-the-loop* para emulação de sinais radar em tempo real, visando à avaliação de sensores radar de forma conduzida em ambiente laboratorial; ii) demonstrar experimentalmente a capacidade de geração de sinais radar para testes de sensores com múltiplas antenas, em ambientes eletromagnéticos simulados de laboratório; e iii) modelar o simulador como um Processo de Decisão de Markov Parcialmente Observável (POMDP), estabelecendo a função de recompensa baseada em métricas de desempenho do simulador, a qual poderá ser utilizada em futuras abordagens de testes adaptativos de sensores radar orientados por inteligência artificial.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II apresenta a arquitetura do simulador radar integrado à simulação de voo. A Seção III aborda a modelagem do sistema como um Processo de Decisão de Markov Parcialmente Observável. A Seção IV descreve a metodologia experimental adotada. A Seção V apresenta os resultados e as discussões. Por fim, a Seção VI apresenta as conclusões do trabalho.

II. EMULAÇÃO DE SINAIS RADAR INTEGRADA À SIMULAÇÃO DE VOO

O simulador radar para testes em ambiente de voo simulado, ilustrado na Fig. 1, consiste na integração entre o simulador de voo X-Plane, exemplificado na (Fig. 2), e um sistema de geração de sinais radar em tempo real baseado na plataforma *Keysight Electronic Warfare Advanced Simulation* (EWAS),

Felipe S. Ivo, Wellington R. Munduruca, Lucio P. Amaro, Marco A. A. Fidos Júnior, Dimas I. Alves e Renato Machado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos-SP, e-mails: fivo@ita.br, munduruca@ita.br, lucio@ita.br, dimasirion@ita.br, rmachado@ita.br, marco.fidos@ga.ita.br. Este trabalho foi financiado em partes pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT-Sinais), CNPq (processo 406517/2022-3) e pela empresa ATECH.

por meio do ambiente de simulação SimView, apresentado na Fig. 3 [7]. A geração física dos sinais é realizada por quatro geradores ágeis *Keysight UXG N5194A*, com sincronização temporal e coerência de fase e amplitude [7]. Os sinais radar gerados são acoplados a um osciloscópio *Keysight UXR0404B*, sendo processados pelo *software keysight VSA 89600* com o módulo *Pulse Analysis*. Essa arquitetura é baseada em *hardware-in-the-loop* (HIL) e permite a reprodução controlada de cenários eletromagnéticos dinâmicos em laboratório.

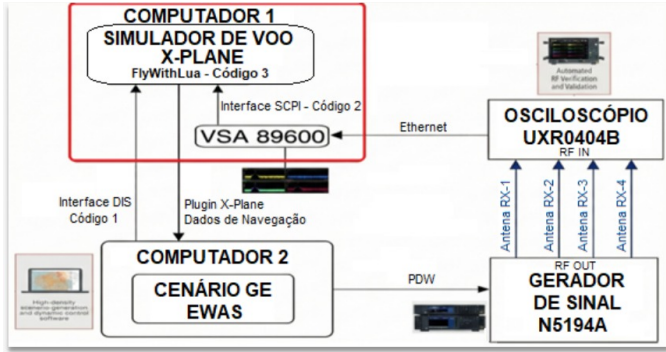


Fig. 1. Simulador radar para testes em ambiente de voo simulado. Destacam-se as interfaces de comunicação *Distributed Interactive Simulation* (DIS), Ethernet e *Standard Commands for Programmable Instruments* (SCPI) entre os ambientes de simulação, o osciloscópio e o VSA, bem como as quatro conexões de RF entre o gerador e o osciloscópio. Cada conexão de RF representa o sinal correspondente a uma antena de recepção do sensor sob teste no cenário simulado.



Fig. 2. Interface de voo do X-plane utilizado no simulador.

III. AVALIAÇÃO ADAPTATIVA DE SENSORES RADAR

A arquitetura *hardware-in-the-loop* do simulador pode ser modelada como um ambiente dinâmico em malha fechada, no qual a dinâmica de voo, a geração de sinais e a resposta do sensor são acessadas em tempo real. Nesse contexto, o sistema pode ser descrito pela interação entre o estado, S , as ações de controle, A , e as observações, O .

O estado S representa a configuração completa do cenário, incluindo variáveis de voo (posição, velocidade e atitude) e aspectos eletromagnéticos, como emissores radar e efeitos de propagação. As ações de controle A correspondem aos parâmetros que influenciam a evolução do sistema, como trajetórias e configuração do cenário, enquanto as observações

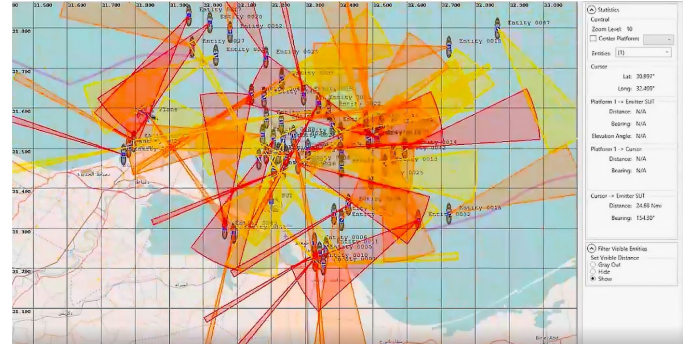


Fig. 3. Simulação no *SimulationView* de um ambiente eletromagnético do EWAS com múltiplos radares distribuídos espacialmente no cenário de teste [7]. São destacados também a região de cobertura de cada radar dentro do cenário de teste.

O consistem nos sinais radar interceptados, fornecendo uma representação parcial e ruidosa.

A dinâmica do sistema é descrita pela função de transição T , que incorpora a dinâmica de voo e a propagação eletromagnética, enquanto o processo de observação é modelado pela função Z , responsável por mapear o estado nos sinais medidos. Por fim, a função de recompensa R define um critério de desempenho do sensor.

Dessa forma, o simulador pode ser formalmente representado como um Processo de Decisão de Markov Parcialmente Observável (POMDP) [8], definido como

$$\mathcal{M} = (S, A, O, T, Z, R). \quad (1)$$

Na arquitetura do simulador proposta, o estado S e as ações de controle A são relacionadas as variáveis de simulação de voo do X-Plane e da plataforma EWAS. As observações O e a função Z estão associadas a medição dos sinais pelo módulo *Pulse Analysis*. A função de transição T se relaciona a dinâmica de voo e evolução do cenário. E ainda, R é a função de recompensa.

A. Métricas e função de avaliação do POMDP

A formalização em POMDP permite definir métricas quantitativas para a avaliação do simulador. Dentre as métricas, destacam-se: i) o erro de estimação angular, ii) a coerência espacial e temporal da simulação, e iii) a avaliação espectral dos sinais gerados. Essas métricas são incorporadas à função de recompensa R , fornecendo um critério de avaliação do desempenho do sistema. Neste trabalho considera-se apenas o erro de estimação angular, o qual pode ser definido como

$$E_{AoA} = E[|\theta_{\text{real}} - \hat{\theta}|], \quad (2)$$

em que θ_{real} representa o ângulo verdadeiro, obtido pelo cenário de simulação, e $\hat{\theta}$ representa o ângulo estimado a partir das observações do sensor.

A coerência espacial e temporal C_{st} da simulação é definida como uma medida da consistência das observações ao longo do tempo, refletindo a compatibilidade entre a evolução dinâmica do sistema e os sinais gerados. Essa métrica pode ser modelada por meio da correlação temporal entre observações

consecutivas, sendo que valores baixos indicam inconsistências na evolução do cenário simulado. O erro associado à consistência temporal é dado por

$$C_{st} = \mathbb{E} [|o_t - \hat{o}_t|], \quad (3)$$

em que o_t representa a observação no instante t , e $\hat{o}_t$ representa a observação esperada, estimada a partir do modelo dinâmico do sistema.

A divergência espectral D_{spec} quantifica a discrepância entre os sinais gerados pelo simulador e aqueles esperados a partir do modelo de referência. Essa métrica permite avaliar se as características espectrais são preservadas ao longo da simulação, sendo a função de recompensa definida como uma combinação ponderada das métricas consideradas

$$R = -w_1 E_{\text{AoA}} - w_2 C_{st} - w_3 D_{\text{spec}}, \quad (4)$$

em que: w_1, w_2, w_3 são referente aos pesos de ajuste da função em relação as métricas avaliadas.

B. Modelo de Maximização da Função de Recompensa

A proposta de avaliação adaptativa de testes do simulador pode ser formulada como a busca por uma política ótima π^* que maxime a recompensa entre o estado do sistema S (configuração do sistema e aspectos eletromagnéticos) e as variáveis de controle A (manipulação do cenário e trajetórias). Essa política deve atuar sobre a geração dos sinais de forma a adaptar os testes para avaliar o desempenho esperado do sensor, e pode ser definida como

$$\pi^* = \arg \max_{\pi} \mathbb{E} [R(S, A)], \quad (5)$$

em que $R(S, A)$ representa a função de recompensa definida anteriormente, a qual depende do estado S e da ação A , e incorpora métricas como o erro de estimação angular, a coerência espacial e temporal, e a divergência espectral. Cabe ressaltar que, π^* pode ser utilizado para treinar um agente cognitivo.

IV. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O sensor radar é um *Radar Warning Receiver* (RWR) [2] com quatro antenas instaladas em uma plataforma aérea simulada, sendo: três direcionais (45° , 180° e 315°), com padrão Gaussiano no plano horizontal (90°) e omnidirecional no vertical; e uma antena omnidirecional em ambos os planos, orientada a 0° .

A. Estimativa do ângulo de emissão $\hat{\theta}$ pelo sensor radar

O ângulo $\hat{\theta}$ é estimado pela variação de amplitude dos sinais RF nas antenas, em função da geometria do cenário eletromagnético [3]. Para o arranjo considerado, o ganho de cada antena é modelado por um feixe Gaussiano, dado por

$$G_i(\theta) = A_i^2 \exp[-k^2(\theta - \alpha_i)^2], \quad (6)$$

em que α_i é a orientação da antena i e $k^2 = \ln(2)/(\theta_\beta/2)^2$ para largura de feixe θ_β . A comparação de amplitude entre duas antenas pode então ser dada por

$$R(\theta) = \frac{A_1}{A_2} = \frac{G_1(\theta)}{G_2(\theta)}. \quad (7)$$

A partir de (7), o ângulo $\hat{\theta}$ pode ser obtido pelo sensor como

$$\hat{\theta} = R_{\text{dB}}(\theta) \left(\frac{\theta_\beta^2}{48\alpha} \right). \quad (8)$$

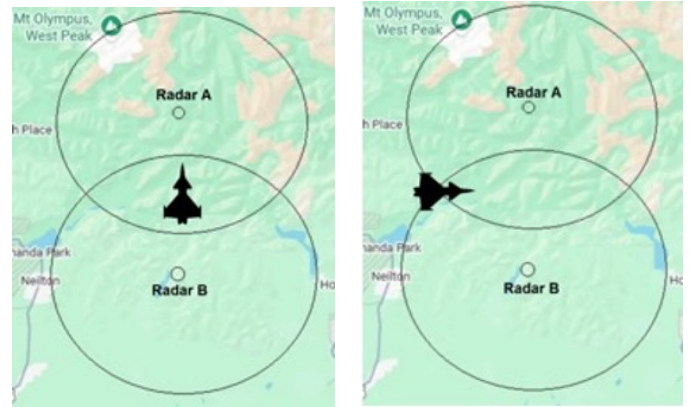
Como pode-se observar em (8) a estimativa de ângulo do sensor depende da relação de amplitude R_{dB} , a largura de feixe θ_β e orientação das antenas α na plataforma.

B. Cenários radar de teste

São definidos dois cenários de teste radar, típicos de vigilância aérea [2], denominados Caso 1 e Caso 2, conforme ilustrado nas Figs. 4a e 4b. Os parâmetros de frequência de operação (Freq.), intervalo de repetição de pulsos (PRI), largura de pulso (PW) e potência efetivamente irradiada (ERP) dos emissores radar são apresentados na Tabela I.

TABELA I: Emissores radar A e B utilizados nos cenários.

Emissor	Freq. (GHz)	PRI (μs)	PW (μs)	ERP (dBm)
Radar A	2,0	100	5	120
Radar B	2,5	217	7	120



(a) Cenário radar do caso 1. (b) Cenário radar do caso 2.

Fig. 4. Cenário de teste radar dos Casos 1 e 2. No Caso 1, considera-se um voo simulado da aeronave do radar B para o radar A, com ponto de medição equidistante entre ambos e alinhamento de 0° em relação ao radar A e 180° em relação ao radar B. No Caso 2, considera-se um voo simulado em que a aeronave tangencia os dois radares, mantendo-se o ponto de medição equidistante, com alinhamento de 45° em relação ao radar A e 315° em relação ao radar B.

V. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Esta seção apresenta os experimentos conduzidos e os resultados obtidos. A seguir, são apresentados a geração de sinais radar para os cenários dos Casos 1 e 2, a estimativa do ângulo de emissão $\hat{\theta}$ do sensor radar e a modelagem da função de recompensa para o teste proposto.

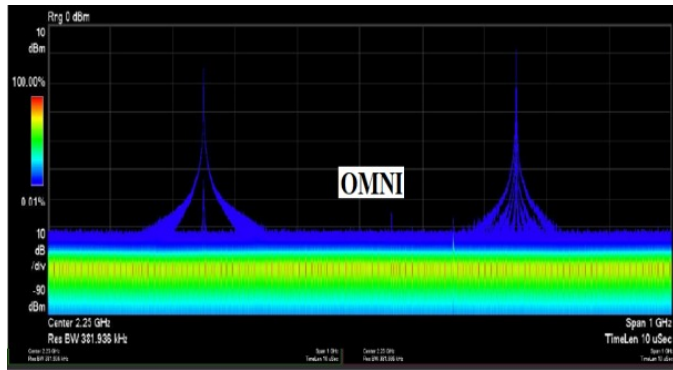
A. Geração de sinais de radar em tempo real

A geração em tempo real dos sinais interceptados pelas múltiplas antenas do sensor RWR, nos cenários com os radares A e B, é apresentada a seguir.

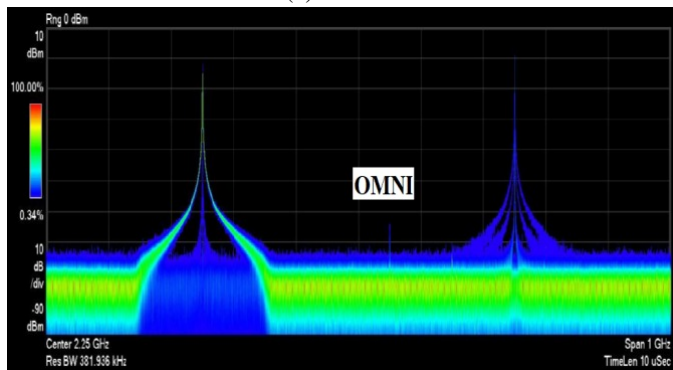
TABELA II: Parâmetros de simulação e medições experimentais nos cenários do Caso 1 e 2.

Cen.	RADAR	Simulação		Aeronave					
		f (GHz)	θ (°)	Valores Medidos				Calculado	$\hat{\theta}$ (°)
				f (GHz)	P_{omni} (dBm)	P_{45° (dBm)	P_{315° (dBm)	P_{180° (dBm)	
C1	A	2.0	0.0	2.0	0	-5.2	-4.7	-79	359.0
C1	A	2.0	0.0	2.5	-80.0	-80.0	-80.0	-80.0	—
C1	B	2.5	180.0	2.5	0	-72.5	-66.34	0	180.0
C1	B	2.5	180.0	2.0	-80.0	-80.0	-80.0	-80.0	—
C2	A	2.0	315.0	2.0	0	-13.9	-5	-80.0	343.1
C2	A	2.0	315.0	2.5	-80.0	-80.0	-80.0	-80.0	—
C2	B	2.5	45.0	2.5	0	0	-12.77	-75.7	45.0
C2	B	2.5	45.0	2.0	-80.0	-80.0	-80.0	-80.0	—

1) *Sinais interceptados pela antena omnidirecional*: as medições do espectro em tempo real para o cenário do Caso 1 são apresentadas na Fig. 5, enquanto os resultados correspondentes ao Caso 2 são mostrados na Fig. 6. Ambos os radares estão ativos no cenário de teste.



(a) Caso 1

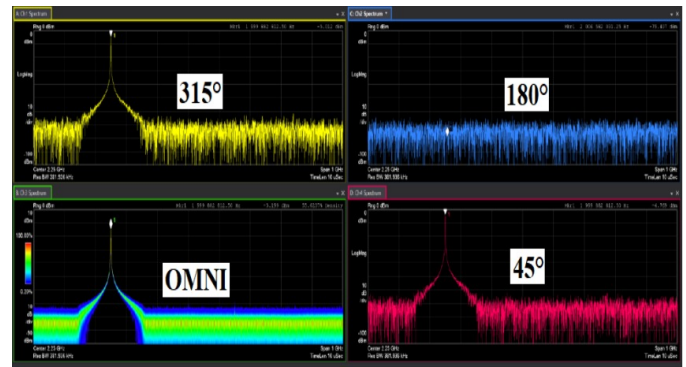


(b) Caso 2

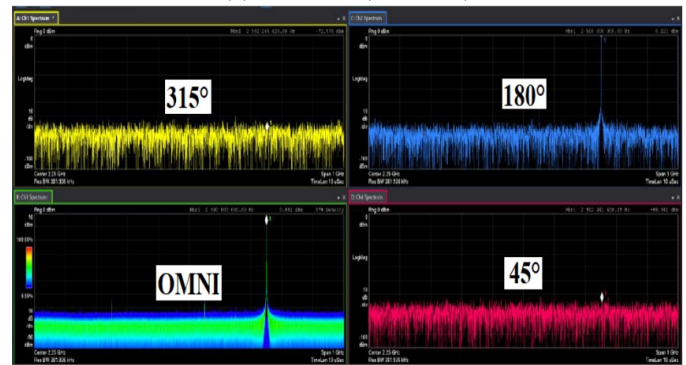
Fig. 5. Espectro em tempo real da interceptação dos sinais Radar A e Radar B pela antena omnidirecional do RWR nos cenários de teste (Casos 1 e 2) considerados.

2) *Sinais interceptados pelas antenas direcionais para o caso 1*: uma amostra das medições do espectro em tempo real para o cenário do Caso 1, referente à interceptação dos sinais dos radares A e B nas quatro antenas do RWR é apresentada na Fig. 6. A variação de amplitude entre as antenas direcionais pode ser observado nas medições em função do alinhamento angular entre as antenas e os radares. Observa-se que não há

detecção de sinal na antena posicionada a 180° para o radar A, enquanto, para o radar B, a detecção ocorre exclusivamente nessa antena. Neste teste, apenas um radar foi ativado por vez.



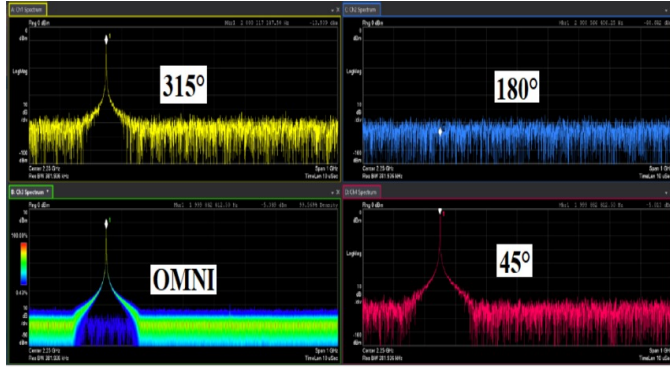
(a) Radar A (2,0 GHz)



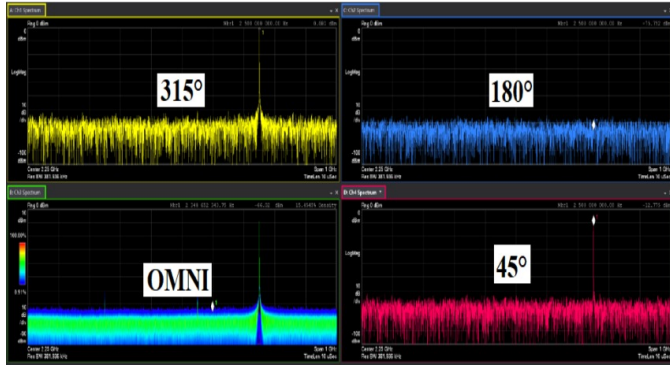
(b) Radar B (2,5 GHz)

Fig. 6. Medição dos sinais das quatro antenas do sensor sob teste para o cenário radar do Caso 1, sendo: (a) apenas o radar A ativo; (b) apenas o radar B ativo.

3) *Sinais interceptados pelas antenas direcionais para o caso 2*: uma amostra das medições do espectro em tempo real para o cenário do Caso 2, referente à interceptação dos sinais dos radares A e B nas quatro antenas do RWR é apresentada na Fig. 7. Novamente, a variação de amplitude entre as antenas direcionais pode ser observado nas medições em função do alinhamento angular entre as antenas e os radares. Neste teste, apenas um radar foi ativado por vez.



(a) Radar A (2,0 GHz)



(b) Radar B (2,5 GHz)

Fig. 7. Espectro em tempo real da interceptação dos sinais Radar A e Radar B pelas quatro antenas da aeronave no cenário de teste do Caso 2.

B. Avaliação comparativa entre parâmetros de simulação e detecção da aeronave

Com o objetivo de comparar os dados de simulação com as medições experimentais, a Tabela II apresenta os resultados obtidos a partir de medições realizadas na saída do gerador, considerando a interceptação dos sinais dos radares A e B nos cenários Caso 1 (C1) e Caso 2 (C2). São considerados como parâmetros de comparação: a frequência de emissão do radar; o ângulo de emissão θ entre a aeronave e o emissor; a frequência de detecção do sinal; e a potência medida na saída do gerador para cada antena do receptor (P_{omni} , P_{45° , P_{315° e P_{180°). A partir da variação de amplitude, o ângulo θ é estimado. Cabe ressaltar que: cada linha da tabela corresponde a uma única medida; apenas um radar está ativo por vez no cenário; e é realizada uma verificação de possível interferência entre as frequências dos radares no sensor da aeronave.

C. Avaliação das métricas do simulador

Neste trabalho, a avaliação das métricas do modelo POMDP foi restringida à contribuição do erro de estimação angular, por se tratar de um dos principais indicadores de desempenho do sensor radar. Além disso, essa escolha permite isolar o impacto da técnica de estimação do ângulo $\hat{\theta}$, evitando a influência de outros fatores, como coerência espaço-temporal e características espectrais, que não constituem o foco desta análise. Assim, na função de recompensa definida em (4), foi considerado apenas o termo associado ao erro de estimação angular. Dessa forma, adotou-se uma configuração simplificada

na qual foram considerados os pesos como $w_1 = 1$ (100%) e $w_2 = w_3 = 0$, resultando em uma função de recompensa diretamente proporcional ao erro de estimação angular. Assim, para este caso, a função de recompensa pode ser expressa como

$$R = -E_{\text{AoA}}, \quad (9)$$

a qual pode ser diretamente obtida da Tabela II. De forma a exemplificar, o pior caso obtido (primeiro de C2) resulta em um erro aproximado de $28,1^\circ$, diminuindo proporcionalmente a função de recompensa.

VI. CONCLUSÃO

Esse artigo apresentou a modelagem de um simulador *hardware-in-the-loop* para avaliação adaptativa, em laboratório, de sensores radar do tipo RWR, considerando um modelo POMDP. O sistema foi descrito por funções de estado, observação, ação e recompensa, permitindo analisar o comportamento do simulador radar em cenários dinâmicos.

Os resultados experimentais demonstraram a capacidade do simulador em reproduzir, em tempo real, sinais radar coerentes com os parâmetros de simulação. A avaliação da variação de amplitude entre as antenas evidenciaram a consistência entre os dados simulados e as medições dos sinais de radar na saída dos geradores. Além disso, a estimativa do ângulo de emissão $\hat{\theta}$ baseada na técnica de comparação de amplitude, foi utilizada para validar o modelo adotado para o sensor, tendo como referência os dados do cenário de simulação. Cabe ainda ressaltar que, neste trabalho, a latência do simulador não foi avaliada.

Por fim, a avaliação das métricas da função de recompensa do modelo POMDP, ainda que restrita ao erro de estimação angular, permitiu estabelecer um critério quantitativo para a análise de desempenho do sistema no contexto de avaliação adaptativa. A proposta pode ser utilizada em trabalhos futuros para estratégias adaptativas baseadas em inteligência artificial, como aprendizado por reforço e otimização de cenários, ampliando o potencial de aplicação do simulador.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Fiengo and A. Adams, "Test and evaluation of radar systems operating in the modern electromagnetic spectrum," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 18, no. 11, pp. 2189–2198, 2024, doi: 10.1049/rsn2.12614.
- [2] D. L. Adamy, *Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation*. Raleigh, NC: SciTech Publishing, 2006.
- [3] D.-J. An e J.-H. Lee, "Performance Analysis of Amplitude Comparison Monopulse Direction-of-Arrival Estimation," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 4, p. 1246, 2020.
- [4] Federal Aviation Administration, *AC 61-136B: FAA Approval of Aviation Training Devices (BATD and AATD)*. Washington, DC: FAA, 2016.
- [5] D. Aláez *et al.*, "HIL Flight Simulator for VTOL-UAV Pilot Training Using X-Plane," *Information*, vol. 13, no. 12, p. 585, 2022.
- [6] E. Çakır *et al.*, "Hardware-in-the-loop radar test simulator," in *Proc. IEEE Radar Conference (RadarCon)*, Arlington, VA, mai. 2015, pp. 1–5.
- [7] Keysight Technologies, "EW Threat Simulation View (Simulation-View) Technical Overview," Tech. Rep. 5992-4339EN, 2025. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/br/pt/assets/7018-06878/technical-overviews/5992-4339.pdf>
- [8] L. P. Kaelbling, M. L. Littman e A. R. Cassandra, "Planning and acting in partially observable stochastic domains," *Artif. Intell.*, vol. 101, pp. 99–134, 1998.