

Arquitetura Integrada para Simulação de Voo e Emulação de Sinais Radar em Tempo Real para Ensaios GE em Ambiente Laboratorial

Wellington R. Munduruca¹, Felipe S. Ivo², Romildo S. Henrique², Valéria C. M. N. Leite², Cleber A. P. Santos², José C. G. Lacerda², Marcelo A. Paula², Lucio P. Amaro² e Renato Machado²

¹1º Grupo de Defesa Aérea – 1º GDA, Anápolis/GO – Brasil

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo—A avaliação de manobras de voo em cenários eletromagnéticos é relevante para a análise de sistemas e procedimentos de Guerra Eletrônica. Entretanto, ensaios em voo demandam elevados custos e recursos operacionais, quando comparados as avaliações realizadas em ambiente laboratorial. Nesse contexto, este trabalho propõe e demonstra experimentalmente uma arquitetura para integração de um ambiente de simulação de voo, baseado no software X-Plane, com a estação *Keysight EWAS* para geração e emulação de sinais radar em tempo real. A arquitetura integra a dinâmica de voo às condições eletromagnéticas definidas no cenário de teste. Para sua avaliação, foi realizado um cenário de voo dinâmico considerando a emulação de um sinal radar na frequência de 2,5 GHz. As medições apresentaram concordância com os parâmetros programados para o radar, incluindo frequência, intervalo de repetição de pulsos e largura de pulso. A taxa de atualização observada foi de 20 Hz, sem erros de sincronização observados nos testes realizados.

Palavras-Chave—Radar, Sensores Embarcados, Cenários Eletromagnéticos, Simulador de Voo.

I. INTRODUÇÃO

A avaliação de manobras em cenários eletromagnéticos adversos, associada ao desempenho adequado de sensores de radar embarcados em plataformas aéreas, constitui um fator determinante para a eficácia de missões operacionais, especialmente em contextos militares [1]. Entretanto, a realização de ensaios em voo para a adequada avaliação dessas manobras e do desempenho dos sensores requer instrumentação especializada, e envolve elevados custos operacionais, o que pode tornar sua execução limitada e, em alguns casos, inviável [2], [3].

Por outro lado, ambientes de simulação de voo, como o software X-Plane, tem sido empregados em atividades de treinamento de pilotos e simulação de aeronaves. Esses ambientes apresentam recursos capazes de simular trajetórias e manobras de aeronaves em ambiente virtual, sendo inclusive reconhecidas como ferramentas de simulação para treinamento de pilotos [4], [5].

Adicionalmente, receptores de Guerra Eletrônica podem ser avaliados em condições controladas de laboratório por meio de configurações de testes do tipo *Hardware-in-the-Loop* (HIL) [6]. O HIL é uma técnica de validação de sistemas

embarcados de laboratório em que o *hardware* do receptor sob teste da aeronave é integrado a um emulador de sinais radar em tempo real, capaz de produzir um ambiente operacional de teste de forma representativa. Essa abordagem possibilita aumentar a confiabilidade dos testes e reduzir o tempo e os custos de ensaios, uma vez que diminui a necessidade de voos experimentais [7], [8].

Nesse contexto, este trabalho propõe um demonstrador de conceito de uma arquitetura integrada entre o simulador de voo X-Plane à estação de emulação de sinais radar *Keysight EWAS*. A arquitetura permite associar a dinâmica de voo da plataforma às condições eletromagnéticas do cenário de Guerra Eletrônica (GE), bem como adquirir e processar os sinais gerados e disponibilizar essas informações ao ambiente de voo ao piloto no X-plane. Ressalta-se que, a abordagem proposta oferece um ambiente controlado e reproduzível para a avaliação de diferentes perfis de voo e condições eletromagnéticas, podendo contribuir para a redução de recursos associados à campanhas experimentais de ensaios em voo. Adicionalmente, a integração proposta pode ser utilizada em atividades de treinamento de pilotos, avaliação de manobras de voo, desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas e táticas de Guerra Eletrônica. O ambiente laboratorial também pode ser empregado como etapa complementar na avaliação de receptores de GE, permitindo avaliar em condições controladas a resposta do receptor.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção I apresenta a introdução do trabalho; a Seção II descreve a arquitetura integrada para simulação de voo e emulação de sinais radar proposta; a Seção III apresenta a demonstração experimental em laboratório; a Seção IV apresenta os resultados obtidos; e, por fim, a Seção V apresenta as principais conclusões do trabalho.

II. ARQUITETURA INTEGRADA PARA SIMULAÇÃO DE VOO E EMULAÇÃO DE SINAIS RADAR

A arquitetura integrada de simulação de voo e emulação de sinais radar em tempo real proposta neste trabalho, cuja capacidade de geração e emulação de sinais abrange frequências de até 40 GHz [9], é apresentada no diagrama esquemático da Fig. 1. A arquitetura baseia-se na integração entre o *software X-Plane*, responsável pela interface de voo e pelo controle da aeronave virtual, executado no computador 1, e a estação de emulação de sinais radar denominada, neste trabalho, *Electronic Warfare Advanced Simulation* (EWAS), operada a

Wellington R. Munduruca, mundurucawrm@fab.mil.br; Felipe S. Ivo, fivo@ita.br; Romildo S. Henrique, romildo@ita.br; Valéria C. M. N. Leite, valerialite@ita.br; Cleber A. P. Santos, clebercaps@ita.br; José C. G. Lacerda, joseclaudiojegl@ita.br; Marcelo A. Paula, marcelomap@ita.br; Lucio P. Amaro, lucio@ita.br; Renato Machado, rmachado@ita.br. Este trabalho foi realizado pelo Centro de Competência em Guerra Eletrônica do ITA.

partir do computador 2. A estação EWAS é responsável pela programação dos sinais e pelo controle do cenário radar por meio de uma interface de geração de cenários.

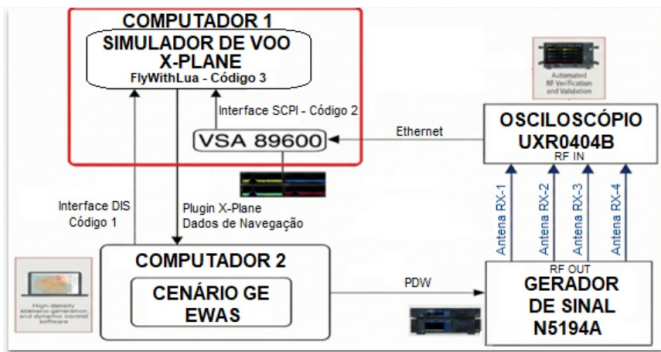


Fig. 1. Diagrama esquemático da arquitetura integrada para simulação de voo e emulação de sinais radar em tempo real, implementada em ambiente laboratorial, utilizando a estação EWAS com capacidade de geração e emulação de sinais radar até 40 GHz.

A capacidade de geração e emulação dos sinais radar da arquitetura proposta é provida pela estação EWAS, desenvolvida pela empresa *Keysight Technologies*, composta por quatro geradores de sinais Keysight UXG, modelo N5194A, sincronizados temporalmente e calibrados em fase e amplitude [9]. Essa configuração possibilita a geração coerente dos sinais associados aos cenários eletromagnéticos simulados. Na arquitetura integrada, cada gerador é configurado para emular os sinais radar correspondentes às ameaças definidas no cenário de teste, permitindo a geração, em tempo real, dos sinais que seriam interceptados por um receptor de radar embarcado na plataforma aérea simulada. Ressalta-se que, em função do número de geradores disponíveis na estação EWAS, a configuração experimental utilizada neste trabalho permite a emulação simultânea dos sinais associados a até quatro canais de recepção, correspondentes às quatro antenas do sistema receptor GE.

Na arquitetura proposta, as saídas dos geradores de RF podem ser conectadas diretamente ao *front-end* de um receptor GE real, que pode ser utilizado como unidade sob teste (*Unit Under Test – UUT*) em ambiente laboratorial. Adicionalmente, conforme ilustrado no diagrama de blocos da Fig. 1, uma amostra dos sinais gerados pode ser direcionada para um osciloscópio de quatro canais, com largura de banda de 40 GHz, modelo *Keysight UXR0404B*, para aquisição e análise dos sinais [9].

A aquisição dos sinais pelo osciloscópio é integrada ao computador 1 por meio de uma conexão Ethernet, permitindo o processamento dos dados utilizando a ferramenta *Keysight Vector Signal Analyzer (VSA)*. Por meio da aplicação *Pulse Analysis*, o VSA possibilita a extração dos principais parâmetros dos pulsos radar, incluindo frequência, intervalo de repetição de pulsos (PRI) e largura de pulso. As informações extraídas são posteriormente disponibilizadas ao simulador de voo X-Plane por meio de uma interface baseada no protocolo SCPI, permitindo sua integração ao cenário de voo.

Essa integração possibilita a representação, no ambiente virtual de voo, de um painel de alerta radar, no qual as informações associadas aos sinais radar que incidem sobre a plataforma são apresentadas ao piloto em tempo real. Dessa forma, a arquitetura estabelece uma cadeia integrada

entre a geração e emulação dos sinais radar, sua aquisição e processamento e a representação das informações no ambiente de simulação de voo.

O ambiente de simulação de voo implementado em laboratório é composto por dois *cockpits* utilizados para a pilotagem das aeronaves simuladas no X-Plane. No ambiente integrado, o cenário de voo do X-Plane é sincronizado com a estação EWAS, de modo que a posição e a dinâmica da aeronave, incluindo as manobras realizadas pelo piloto, sejam utilizadas para atualizar a posição relativa entre a plataforma e as ameaças no cenário eletromagnético e, consequentemente, determinar as condições de geração dos sinais radar pela estação EWAS.



Fig. 2. Estações de voo para pilotagem de aeronaves no X-plane integrada ao emulador de sinais radar EWAS para geração em tempo real de sinais radar até 40 GHz.

O cenário eletromagnético utilizado nos testes, incluindo as assinaturas dos sinais radar a serem emulados no ambiente de voo, é configurado por meio do software *SimulationView*, integrado à estação EWAS, conforme apresentado na Fig. 3 [?] [9]. A configuração do cenário no *SimulationView* permite definir os parâmetros associados ao receptor, incluindo a frequência de operação, a sensibilidade, o número e os tipos de antenas de recepção, seus respectivos ganhos e diagramas de radiação nos planos vertical e horizontal, bem como a distribuição espacial das antenas. Também são definidos os parâmetros das plataformas e dos emissores radar, tais como formas de onda, padrões de varredura, características das antenas e posições geográficas no cenário.

Adicionalmente, o ambiente permite a configuração da geometria do cenário de teste em um mapa bidimensional,

considerando a disposição espacial das plataformas emissoras e receptoras. A Fig. 3 apresenta um exemplo de configuração de um ambiente eletromagnético no SimulationView, com múltiplos radares distribuídos espacialmente e suas respectivas regiões de cobertura.

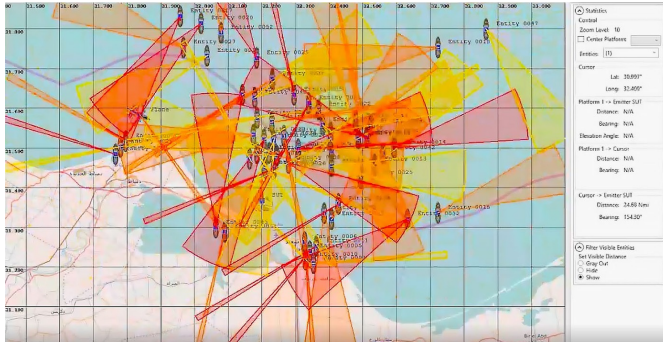


Fig. 3. Configuração de um ambiente eletromagnético no SimulationView, com múltiplos radares distribuídos espacialmente no cenário de teste e suas respectivas regiões de cobertura [?].

Uma vez definido o cenário de teste no EWAS, com a aeronave equipada com sensor radar inserida em um ambiente eletromagnético com múltiplos radares ativos, o cenário é integrado ao simulador X-Plane, permitindo associar a dinâmica de voo à emulação dos sinais radar. Para isso, são configurados o receptor radar, suas antenas e os parâmetros do sistema, bem como as posições geográficas (latitude e longitude) dos emissores e da aeronave, estabelecendo as condições necessárias à integração entre os ambientes EWAS e X-Plane.

Nesse processo, os dados de estado da plataforma simulada são compartilhados com o ambiente de geração de cenários eletromagnéticos, permitindo considerar a posição e a dinâmica da aeronave na atualização das condições de emulação dos sinais radar. Dessa forma, a arquitetura sincroniza a simulação de voo com o cenário eletromagnético, mantendo a correspondência espacial entre a trajetória da aeronave e os emissores radar configurados. As variações de posição, altitude e atitude decorrentes das diferentes trajetórias e manobras modificam a geometria relativa entre a plataforma receptora e os emissores, possibilitando reproduzir diferentes condições de interceptação de sinais em ambiente laboratorial.

III. DEMONSTRAÇÃO EXPERIMENTAL

Para fins de demonstração experimental da arquitetura proposta, foi configurado no EWAS um cenário de Guerra Eletrônica (GE) composto por dois sistemas radar, denominados radares A e B, conforme apresentado na Tabela I. Os parâmetros dos emissores foram definidos no ambiente de simulação do EWAS, considerando diferentes frequências de operação, intervalos de repetição de pulsos (PRI) e larguras de pulso (PW). Entretanto, para a avaliação experimental da geração e emulação dos sinais radar, foi considerado efetivamente o sinal do radar B, com frequência de operação de 2,5 GHz. A seleção desse sinal teve como objetivo realizar a demonstração de conceito da arquitetura integrada para simulação de voo e emulação de sinais radar.

O sistema receptor da plataforma aérea foi configurado com quatro antenas omnidirecionais, dispostas nos vértices de uma geometria quadrada, com espaçamento de 4,5 mm entre os

TABELA I
EMISSORES RADAR A E B UTILIZADOS NO CENÁRIO DE VOO.

Emissor	Freq. (GHz)	PRI (μ s)	PW (μ s)	ERP (dBm)
Radar A	32,0	100	5	120
Radar B	2,5	217	7	120

elementos, permitindo a recepção dos sinais radar na faixa de frequência considerada no cenário de teste. Embora essa configuração seja compatível com técnicas de estimação do ângulo de chegada (AoA) por diferença de fase, a avaliação quantitativa do desempenho do estimador angular não constitui objetivo deste trabalho.

Durante o experimento, a pilotagem da aeronave foi realizada no X-Plane, permitindo a variação dinâmica de sua posição em relação aos emissores radar configurados no cenário eletromagnético no EWAS. A taxa de atualização dos parâmetros de latitude, longitude, altitude e direção da plataforma de voo, bem como a ocorrência de eventuais erros de sincronização entre os ambientes de simulação foram avaliadas com base nos registros do arquivo de log gerado durante a execução da interface DIS (*Distributed Interactive Simulation*), responsável pela comunicação entre o EWAS e o X-Plane. Ressalta-se que, em razão das características da estação EWAS e de sua finalidade associada a testes reais de sistemas militares, não foi realizada uma avaliação quantitativa dos parâmetros de *jitter* e latência.

Quanto à detecção no cenário interativo, os sinais radar emulados pela estação EWAS são interceptados pelas quatro antenas receptoras do sensor radar. Esses sinais são então adquiridos pelos quatro canais do osciloscópio, processados pelo VSA e, por fim, realimentam a interface do piloto no X-Plane com a informação de interceptação. No experimento não foi utilizado um receptor GE real, sendo utilizado apenas o osciloscópio como instrumento de medição e avaliação de sinais radar.

A visualização do cenário de teste, considerando a disposição dos radares no mapa e a aeronave em um instante específico do voo, é apresentada na Fig. 4. Nessa condição, a aeronave encontra-se a 25 NM do radar A e a 56 NM do radar B.

IV. RESULTADOS

Embora o cenário de teste tenha sido configurado com dois emissores radar, a avaliação experimental da geração e emulação dos sinais foi realizada exclusivamente para o radar B, com frequência de operação de 2,5 GHz, PRI de 217 μ s e largura de pulso de 7 μ s. Durante o cenário de voo dinâmico, foram realizadas medições com o analisador vetorial de sinais (VSA) para avaliar a correspondência entre os sinais emulados pela estação EWAS e os parâmetros definidos no cenário de teste. A Fig. 5 apresenta uma amostra do espectro de amplitude obtido pelo VSA para os sinais recebidos pelas antenas 1 e 2.

Os parâmetros dos sinais adquiridos foram analisados e comparados com os respectivos valores programados no cenário. Embora os resultados detalhados das medições não sejam apresentados neste trabalho, foi observada concordância entre os parâmetros medidos e os valores configurados, particularmente quanto à frequência de operação, ao intervalo de repetição de pulsos (PRI) e à largura de pulso (PW).

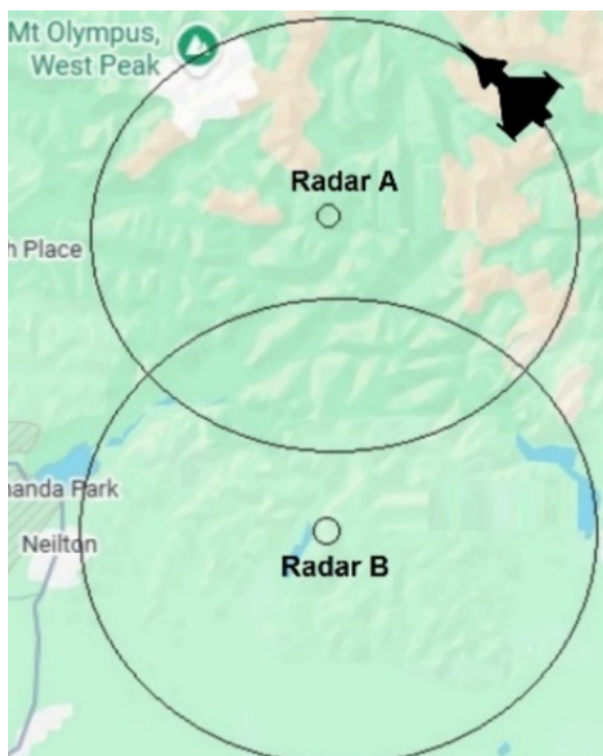


Fig. 4. Cenário de teste radar utilizado para demonstrar a capacidade de geração de sinais radar em um instante específico de voo simulado no laboratório.

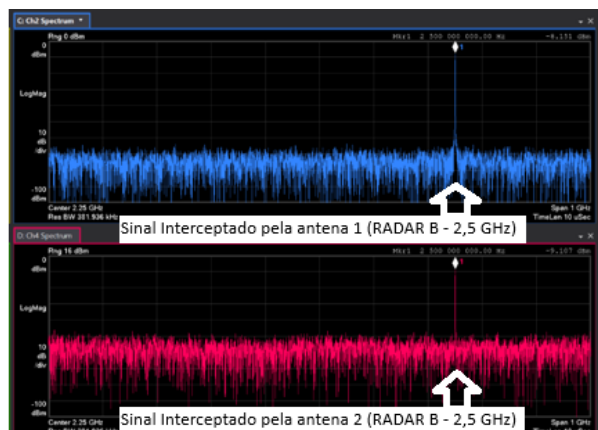


Fig. 5. Amostra da medição do espectro de amplitude obtida pelo VSA para as antenas 1 e 2, considerando a interceptação do sinal radar B (2,5 GHz) no cenário de teste dinâmico para demonstrar a capacidade de geração e emulação de sinais radar em tempo real pelo simulador proposto.

Esse resultado demonstra, para o caso avaliado, a capacidade da arquitetura proposta de gerar e emular, em tempo real, sinais radar com os parâmetros definidos no cenário eletromagnético.

Além da avaliação dos sinais radar, foi analisada a integração entre os ambientes EWAS e X-Plane por meio dos registros da interface DIS. Uma amostra dos dados registrados é apresentada na Fig. 6, utilizada para avaliar a taxa de atualização dos parâmetros de estado da plataforma e a ocorrência de eventuais erros de sincronização. Para as condições de teste consideradas, foi verificada uma taxa de atualização de 20 Hz, correspondente a um período de atualização de 50 ms dos dados de estado da plataforma no cenário do EWAS, com base nas informações provenientes do

X-Plane. Não foram identificados erros de sincronização entre os ambientes durante os testes realizados.

```
[03:02:16] E-99 fnt=>ddd + lat=50.81368 lon=-122.80271 alt=7516.9 hdg=34.8 comment=AirPlatform
[FILE] Gravado C:\Users\LABGE_VSA_2024\Desktop\Mundurucu\X-Plane 11 - zerado\Resources\plugins\FlyWithLua\Scripts\rwr_data.txt
[03:02:21] Radar B fnt=>ddd + lat=47.03380 lon=-123.96835 alt=0.0 hdg=31.0 comment=LandPlatform
```

Fig. 6. Registro de atualização de informação da interface DIS evidenciando a taxa de atualização de 20 Hz na comunicação entre o X-Plane e o EWAS. Cabe observar que não foram verificados erros de sincronização nos experimentos realizados.

Quanto à estimação do ângulo de chegada (AoA), ressalta-se que a avaliação de desempenho do estimador angular não constituiu um objetivo específico deste trabalho. O foco da avaliação experimental foi demonstrar a capacidade do simulador proposto de gerar e emular sinais radar em tempo real, reproduzindo os parâmetros definidos nos cenários de teste. Dessa forma, não foi conduzida uma campanha experimental específica para caracterizar o desempenho do estimador de AoA, incluindo métricas como erro angular, ambiguidades de fase, calibração entre canais ou comparação sistemática com uma direção geométrica de referência. A representação da ameaça no display deve, portanto, ser interpretada no contexto da demonstração da capacidade de emulação dos sinais radar, e não como uma validação quantitativa do desempenho do estimador de AoA. A caracterização específica desses aspectos constitui uma etapa complementar, a ser considerada em trabalhos futuros.

Além da avaliação da capacidade de geração e emulação dos sinais radar, foi analisada a integração entre os ambientes de simulação EWAS e X-Plane. Após o estabelecimento do enlace de comunicação entre os sistemas, a entidade Gripen, utilizada como aeronave de referência no cenário e controlada remotamente pelo EWAS, foi automaticamente posicionada de acordo com os dados de posição da aeronave no simulador X-Plane. Nesse contexto, a Fig. 7 apresenta a visualização do Wide Area Display (WAD) da aeronave Gripen no X-Plane. Na figura, podem ser identificados os aeródromos KUIL (Aeroporto de Quillayute) e KCLM (Aeroporto de Port Angeles), destacados pelos círculos vermelhos. Essas referências geográficas também foram verificadas no ambiente de simulação SimulationView da estação EWAS, sendo observada correspondência entre as respectivas posições de latitude e longitude dos elementos representados no cenário.

A Fig. 8 apresenta, ainda, o display do sistema de alerta radar, integrado ao cenário de navegação do X-Plane. As informações extraídas pelo VSA a partir dos sinais radar adquiridos em tempo real pelo osciloscópio são utilizadas para alimentar o display, permitindo a representação das ameaças eletromagnéticas detectadas no ambiente de voo simulado. Dessa forma, a visualização da posição da plataforma receptora e da direção de chegada dos sinais radar proporciona ao piloto uma representação das ameaças presentes no cenário simulado, demonstrando a integração entre a geração e aquisição dos sinais eletromagnéticos e sua representação no ambiente de voo.

É apresentado na Fig. 8 o *display* do receptor de GE da aeronave no X-Plane. As informações extraídas pelo VSA, a partir dos sinais adquiridos em tempo real pelo osciloscópio, são utilizadas para atualizar esse display. A visualização da posição da plataforma receptora e da direção de chegada dos

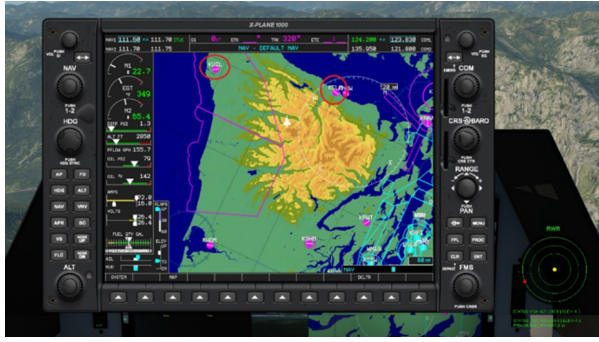


Fig. 7. Visualização das informações do cenário radar no Wide Area Display (WAD) do X-Plane, evidenciando a integração entre o ambiente de voo simulado e a estação EWAS.

sinais radar permite ao piloto acompanhar a dinâmica do cenário eletromagnético durante o voo no X-plane.

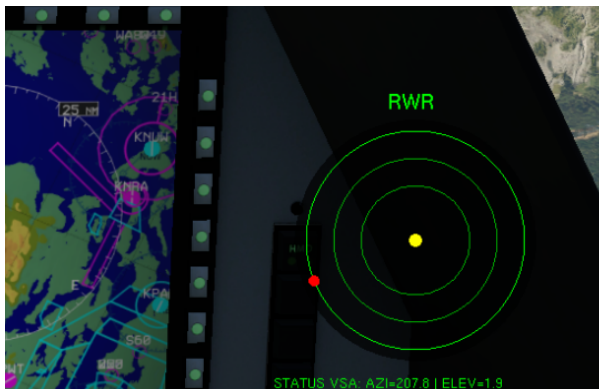


Fig. 8. Display do sensor de alerta radar integrado ao cenário de navegação da aeronave Gripen no X-Plane, permitindo ao piloto a visualização das ameaças eletromagnéticas detectadas e de sua direção estimada de chegada. A representação apresentada ilustra a integração e o processamento das informações radar no ambiente de simulação, não constituindo uma avaliação quantitativa da acurácia da estimativa de AoA.

V. CONCLUSÃO

Os resultados experimentais demonstraram a capacidade da arquitetura proposta de integrar a geração e emulação de sinais radar em tempo real ao ambiente de simulação de voo X-Plane, utilizando a estação EWAS para geração dos sinais radar. Para o cenário de teste considerado, as medições realizadas com o VSA para o sinal interceptado do radar B em 2,5 GHz apresentou concordância com os parâmetros programados no cenário.

O tempo de atualização dos dados de voo entre os ambientes de simulação X-plane e EWAS foi mensurado a partir dos registros da interface DIS, sendo mensurado em 50 ms. Durante os testes realizados, não foram identificados erros de sincronização nos registros. A correspondência observada entre as posições de latitude e longitude dos elementos representados nos ambientes EWAS e X-Plane demonstraram a consistência da integração espacial entre o cenário de voo e o cenário eletromagnético.

Cabe ressaltar que, a principal contribuição deste trabalho não está na geração de sinais radar como funcionalidade isolada da estação EWAS, mas na proposição e demonstração experimental de uma arquitetura integrada que conecta a capacidade de geração e emulação de sinais do EWAS a um

ambiente de simulação de voo com dinâmica de plataforma, permitindo associar a evolução da aeronave às condições eletromagnéticas do cenário. Adicionalmente, a integração das informações obtidas durante a aquisição dos sinais ao display do sistema de alerta radar no X-Plane demonstrou a possibilidade de disponibilizar, em tempo real, ao piloto do simulador, a representação das ameaças eletromagnéticas presentes no cenário. Neste ponto, observa-se que a avaliação quantitativa do desempenho da estimativa do ângulo de chegada (AoA) não constituiu um objetivo específico deste trabalho. Assim, a representação da direção das ameaças no display deve ser entendida como parte da demonstração da integração e do fluxo de processamento das informações radar, não como uma validação da acurácia angular do estimador. A caracterização do erro de AoA, das ambiguidades de fase, da calibração entre canais e da comparação com uma direção geométrica de referência constitui uma etapa complementar para trabalhos futuros.

De uma forma geral, os resultados obtidos demonstram a viabilidade da arquitetura proposta para a integração de cenários eletromagnéticos dinâmicos a ambientes de simulação de voo, proporcionando um meio controlado para a realização de ensaios em ambientes de laboratório. A solução permite diferentes configurações de cenário e condições de voo, podendo ser empregada como infraestrutura experimental complementar aos testes em voo.

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, *EW 101: A First Course in Electronic Warfare*. Norwood, MA: Artech House, 2001.
- [3] D. L. Adamy, *Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation*. Raleigh, NC: SciTech Publishing, 2006.
- [4] D. Aláez *et al.*, "HIL Flight Simulator for VTOL-UAV Pilot Training Using X-Plane," *Information*, vol. 13, no. 12, p. 585, 2022.
- [5] Federal Aviation Administration, *AC 61-136B: FAA Approval of Aviation Training Devices (BATD and AATD)*. Washington, DC: FAA, 2016.
- [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] D. Aláez *et al.*, "HIL Flight Simulator for VTOL-UAV Pilot Training Using X-Plane," *Information*, vol. 13, no. 12, p. 585, 2022.
- [8] A. Bittar, "Arquitetura da CPU do Pegasus Autopilot: implementação de sistema de tempo real em HIL," Diss. Mestrado, ITA, São José dos Campos, 2012.
- [9] 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>