



ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 3/2023

RODRIGO CARVALHO DE PAULO, Cap Eng

**Inteligência Artificial Implementada em Hardware Reconfigurável para Otimizar
Campanhas de Ensaios em Voo de Separação de Carga**

Rio de Janeiro

2023

ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 3/2023

RODRIGO CARVALHO DE PAULO, Cap Eng

Inteligência Artificial Implementada em Hardware Reconfigurável para Otimizar Campanhas de Ensaios em Voo de Separação de Carga

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais da Aeronáutica como requisito parcial para aprovação no Curso de Pós-graduação em *Lato Sensu* em Liderança com Ênfase em Gestão no COMAER.

Linha de Pesquisa: Ciência, Tecnologia e Inovação

Orientador: Allison Nunes Fernandes, Maj Eng

Rio de Janeiro

2023

RODRIGO CARVALHO DE PAULO, Cap Eng

Inteligência Artificial Implementada em Hardware Reconfigurável para Otimizar Campanhas de Ensaios em Voo de Separação de Carga

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais da Aeronáutica.

Aprovado por:

Herhíc Rabelo Alves Pereira, Ten Cel Av
EAOAR

Allison Nunes Fernandes, Maj Eng
EAOAR

Rio de Janeiro

2023

RESUMO

Os ensaios em voo de separação de carga são fundamentais para garantir a separação segura de uma carga quando é realizado o lançamento de uma aeronave. Porém, a análise de separação segura de um lançamento pode durar alguns dias de operação, dado os riscos associados à atividade e as técnicas utilizadas atualmente. Desta forma, esse ensaio acadêmico tem por tese a utilização de algoritmos de inteligência artificial implementados em hardware reconfigurável para otimizar campanhas de ensaios em voo de separação de carga. Essa tese tem por fundamento o fato de que o desenvolvimento recente de algoritmos de inteligência artificial no campo da visão computacional tem aumentado a capacidade de processamento de grandes quantidades de dados, como a realização de cálculo da trajetória de uma carga em tempo real a partir de imagens de vídeo gravadas. Isso possibilita a diminuição do tempo de processamento e de avaliação da separação da carga. Além disso, a implementação desses algoritmos em hardware reconfigurável reduz equipamentos e espaços necessários para o processamento das imagens, pois existem câmeras de alta velocidade que disponibilizam hardware reconfigurável para configuração pelo usuário. Desta forma, a redução do tempo de avaliação e de equipamentos acarretam uma redução de custos otimizando as campanhas de ensaio em voo de separação de carga. Por fim, a utilização desses algoritmos otimiza também outras atividades que utilizam visão computacional na Força Aérea Brasileira, e a transforma em uma força operacionalmente moderna, contribuindo para atingir a visão da concepção estratégica - Força Aérea 100.

Palavras-chave: Ensaio em Voo. Separação de Carga. Inteligência Artificial. Hardware Reconfigurável. Trajetografia.

1 INTRODUÇÃO

Realizar ensaios em voo é uma etapa fundamental no desenvolvimento ou certificação de um novo produto aeroespacial. Porém, segundo a Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN) ensaio em voo é uma tarefa altamente custosa e potencialmente arriscada, na qual problemas não previstos podem levar a danos a aeronaves, a outras cargas, além da perda da vida do piloto ou de pessoas em solo (NATO, p. 4-63, 2014).

Os autores Arnold e Epstein (1986) descrevem que problemas de separação de carga ocorrem, geralmente, em três áreas: colisão carga-pilone/rack, colisão carga-aeronave e colisão carga-carga. Especialmente quando o ensaio em voo é destinado à separação de cargas de aeronaves de caça, na qual diversas configurações de carregamento das cargas se associam com o complexo fluxo aerodinâmico em torno das suas asas.

Sendo assim, devido ao problema relatado, uma análise de separação segura é necessária para verificar se a carga não teve tendência de colisão após o seu lançamento (Arnold; Epstein, 1986). Atualmente, essa atividade é realizada após o voo por equipes especializadas com o auxílio de software. Essa categoria de software gera a trajetória da carga por meio de imagens de câmeras de alta velocidade gravadas durante o lançamento. Porém, alguns dias de operação podem ser necessários para realizar uma avaliação completa e permitir a liberação para o próximo lançamento (Forsman *et al.*, p.10, 2008).

Portanto, esse ensaio acadêmico tem por tese a utilização de algoritmos de inteligência artificial implementados em um hardware reconfigurável para otimizar campanhas de ensaio em voo de separação de carga.

O primeiro argumento se baseia no fato de que algoritmos de inteligência artificial permitem a redução do tempo de processamento e de avaliação da separação segura. Consequentemente, é possível realizar essa atividade em tempo real, reduzindo horas de voo e possibilitando mais de um lançamento em um mesmo voo.

Na segunda argumentação é apresentado que a utilização desses algoritmos de inteligência artificial implementados em hardware reconfigurável permite a redução de equipamentos e espaços necessários para cálculo da trajetória, visto que a aquisição das imagens e seu processamento serão realizados no mesmo dispositivo.

2 DESENVOLVIMENTO

Os avanços na área de Inteligência artificial, principalmente com o aprendizado de máquina profundo por meio da rede neural convolucional (RNC), tem aumentado consideravelmente a capacidade de processar e analisar uma grande quantidade de dados em campos como a visão computacional (Zhang *et al.*, 2018).

Isso tem contribuído com uma ampla utilização de algoritmos que possibilitam a identificação e detecção de objetos (Elmasry; Elzaky; Atia, 2023) utilizados nas mais diversas áreas, como em reconhecimento de voz, processamento de linguagem natural e visão computacional.

Por outro lado, a utilização de hardware reconfigurável, como *Field Programmable Gate Array* (FPGA) ou *System on Chip* (SoC) tem possibilitado que usuários implementem diversas aplicações em hardware compacto com a flexibilidade de poder ser reprogramado (Dinelli *et al.*, 2019). Desta forma, é possível alterar a aplicação no usuário final, não havendo a necessidade de ter que projetar outro circuito integrado específico para a aplicação. Além disso, vários dispositivos têm sido fornecidos comercialmente com acesso a hardware reconfigurável interno, como câmeras de alta velocidade semelhantes às usadas nos ensaios de separação segura.

Nesse sentido, esse trabalho propõe a utilização de técnicas de inteligência artificial no campo da visão computacional, implementados em hardware reconfigurável. Para tanto, a tese será embasada pelos seguintes argumentos:

2.1 Utilização de Algoritmos de Inteligência Artificial Reduz o Tempo de Processamento e Avaliação de Campanha

Tendo em vista os riscos associados a uma campanha de ensaio de separação de carga, é necessário que seja feita uma análise da separação para verificar se há a tendência de colisão da carga, principalmente com a aeronave (Arnold; Epstein, p.2,1986). Para tanto, as primeiras técnicas de ensaio de separação empregavam câmeras de baixa velocidade para gravar o lançamento e a análise das imagens era feita pelos engenheiros de ensaio após o voo. Porém, foi verificado que a dinâmica dos eventos exigia câmeras de alta velocidade com capacidade de gravação de 200

quadros por segundo. Além disso, com o desenvolvimento da tecnologia, passou-se a utilizar também software de simulação aerodinâmico, como o *Computational Fluid Dynamics* (CFD), que verifica previamente o comportamento da carga antes do lançamento, e software capaz de criar a trajetória da carga a partir de imagens gravadas, como o *TrackEye*®. Este software permite realizar uma análise de separação segura com o cálculo da trajetória da carga após o lançamento, porém essa atividade é realizada apenas no pós-voo (Forsman *et al.*, p.6, 2008).

Com isso, a aeronave deve pousar para realizar o download e processamento dos dados de vídeo. Esses dados devem ser inseridos no software de trajetografia, para realizar o cálculo da trajetória e a avaliação da separação deve ser feita pelos engenheiros. Isso pode demorar horas ou até dias para se finalizar, segundo Forsman *et al.* (p. 10, 2008).

Porém, o avanço da inteligência artificial tem permitido realizar diversas aplicações para processamento de uma grande quantidade de dados em diversas áreas, como visão computacional, reconhecimento de voz e interpretação de texto. Essa característica é demonstrada por Elmasry, Elzeky e Atia (2023) que utilizaram um modelo redes neurais convolucionais, amplamente conhecido, chamado *You Only Look Once* (YOLO) para fazer o rastreamento de múltiplos objetos. Segundo eles, esse modelo, rápido e eficiente, permite fazer o rastreamento de múltiplos objetos, podendo ser empregado em diversas áreas, como detecção de trajetória de células em biologia, carros autônomos e detecção de comportamento anômalo de humanos em uma multidão.

Mais especificamente para a análise de separação de carga, Melo, Máximo e Castro (p. 2241, 2022) demonstraram em seu artigo que o modelo de redes neurais convolucionais criado por eles, chamado HSMT4FT, conseguiu realizar o processamento de imagens que calculou a trajetória de uma separação de carga. Esse algoritmo apresentou uma capacidade de processamento de 47944 quadros por segundo, e obteve uma acurácia de 99%, apresentando um erro 76% menor em comparação com a função de visão computacional clássica *cornerSubPix* desenvolvido por Förstner e Gülch (1987). Melo, Máximo e Castro (p. 2242, 2022) ainda apresentam em sua conclusão que com estes resultados este algoritmo de inteligência artificial é adequado para utilização em aplicações de tempo real.

Assim, os dados de trajetória calculados em tempo real podem ser enviados via telemetria para uma estação base onde se encontra o engenheiro responsável

pela avaliação. Com isso, é possível que o engenheiro avalie os gráficos de separação da carga durante o voo, concluindo se foi uma separação segura ou não.

Desta forma, o engenheiro em solo pode abortar o ensaio caso tenha ocorrido alguma situação insegura ou permitir fazer o próximo lançamento, caso a aeronave já tenha sido configurada para fazer dois lançamentos por voo. Isso reduz o tempo de processamento, de avaliação e de campanha. Consequentemente, é gerado também uma redução dos custos totais para as campanhas de ensaio da Força Aérea Brasileira, pois conforme levantamento da Associação Internacional de Transportes Aéreos (IATA) a conta de combustível das linhas aéreas globais corresponde a 28% do custo de operação em 2022 (IATA, 2023).

Portanto, a utilização de algoritmos de inteligência artificial reduz o tempo de processamento do cálculo de trajetória de separação da carga e a sua avaliação, possibilitando a redução de horas de voo e a realização de dois lançamentos em um mesmo voo, otimizando as campanhas de ensaios em voo de separação segura.

2.2 Utilização dos Algoritmos Implementados em Hardware Reconfigurável Reduz Equipamentos e Espaço

Recentemente, o uso de dispositivos reconfiguráveis em inteligência artificial tem se tornado cada vez mais frequente. Esses dispositivos são flexíveis, pois permitem que usuários consigam desenvolver aplicações específicas e realizar a sua reprogramação em nível de hardware (Dinelli *et al.*, p. 2, 2019). Além disso, é possível encontrar no mercado diversos produtos comerciais que disponibilizam internamente um circuito integrado reconfigurável para que os clientes consigam adaptar o produto para suas necessidades específicas.

Desta forma, existem câmeras de alta velocidade semelhantes às utilizadas em campanhas de ensaios em voo que permitem acesso a circuitos integrados reconfiguráveis internos, como, por exemplo, a câmera de alta velocidade EoSens® Creation2.0MCX12-CM2 da empresa MIKROTRON que possui FPGA disponível (Mikrotron, 2023).

Porém, até o presente momento, para realizar o cálculo da trajetória das cargas, utilizando tanto algoritmos de visão computacional clássicos como algoritmos de inteligência artificial, são necessários equipamentos extras, como o casulo fotográfico e computadores. A função de um casulo fotográfico é acomodar em seu

interior câmeras, computadores e equipamentos para gravar o lançamento, já as câmeras e os computadores são necessários para realizar a aquisição e o processamento de imagens, conforme descrito nos artigos do de Vasconcelos *et al.* (p. 4, 2019) e Melo, Máximo e Castro (p. 2241, 2022).

Porém, ao implementar algoritmos de inteligência artificial capazes de realizar o cálculo de trajetória de cargas no circuito integrado reconfigurável da câmera de alta velocidade, a aquisição das imagens e o processamento serão realizados no mesmo dispositivo. Conseqüentemente, não será necessário utilizar um computador específico para realizar o processamento da imagem, diminuindo a quantidade de equipamentos para cálculo da trajetória.

Além disso, pelo fato do hardware reconfigurável ser um circuito integrado compacto contido dentro de um chip (Dinelli *et al.*, 2019) e, muitas vezes, disponibilizado pelo próprio fabricante do produto de forma interna às câmeras, essas sofrem variações imperceptíveis na forma e nas dimensões com a adição dessa funcionalidade. Isso possibilita, por exemplo, que as câmeras de alta velocidade possam ser fixadas apenas com um suporte mecânico específico na aeronave. Essa condição é vantajosa, visto que peso e espaço são reduzidos em aeronaves que conduzem armamentos como caças, conforme embasado por Zhao *et al.* (p. 1269, 2021) que afirma que peso e balanceamento apropriados são considerados os fatores mais críticos que impactam a eficiência e a operação segura da aeronave.

Desta forma, a utilização de algoritmos de inteligência artificial implementados em hardware reconfigurável proporciona uma redução de equipamentos e espaço necessário para executar o cálculo da trajetória da carga e sua análise de separação segura, otimizando as campanhas de ensaios em voo de separação de carga.

3 CONCLUSÃO

As campanhas de ensaios em voo de separação de carga são custosas e potencialmente arriscadas, sendo necessário realizar análises de separação segura para verificar se a carga não teve tendência de colisão com a aeronave. Além disso, o desenvolvimento de algoritmos de inteligência artificial possibilitou não só o processamento de grandes quantidades de dados em menor tempo, como também sua implementação em hardware reconfigurável compactado em um chip.

Portanto, esse ensaio acadêmico defendeu o uso de algoritmos de inteligência artificial implementados em hardware reconfigurável para otimizar as campanhas de ensaios em voo de separação de carga.

Primeiramente, foi utilizado como argumento o fato de que existem algoritmos de inteligência artificial que podem ser usados para processar grandes quantidades de dados, como, por exemplo, o algoritmo YOLO ou o algoritmo de redes neurais convolucionais chamado HSMT4FT. Esse último algoritmo apresentou melhor acurácia do que algoritmos de visão computacional clássicos, sendo adequado para o uso em tempo real. Isso permite a redução do tempo de processamento e avaliação de uma separação segura, pois pode ser realizada durante o voo, otimizando a campanha de ensaio.

Adicionalmente, usou-se o argumento de que a utilização desses algoritmos de inteligência artificial implementados em hardware reconfigurável compactados em um circuito integrado permite que o processamento seja feito em apenas um dispositivo. Além disso, o fato de equipamentos comerciais como câmeras de alta velocidade serem disponibilizadas com hardware reconfigurável interno, sem alteração de dimensão, reduz a quantidade de equipamentos necessários para fazer o processamento e diminui os espaços necessários para instalar o sistema de cálculo da trajetória.

Por fim, dado o grande avanço na área de inteligência artificial, a adoção de algoritmos de inteligência artificial implementados em hardware reconfigurável otimizam também outras atividades que utilizam visão computacional existente na Força Aérea Brasileira, como reconhecimento por imagem, navegação de VANT por imagem e sensoriamento remoto. Essa capacidade transforma a FAB em uma força operacionalmente moderna com tecnologias de ponta, contribuindo para atingir a visão da concepção estratégica - Força Aérea 100.

REFERÊNCIAS

ARNOLD, R. J.; EPSTEIN, C. S. Agard flight test techniques series. Volume 5. Store separation flight testing. **Agard Flight Test Techniques**, 1986.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. **Portaria nº 1.597/GC3, de 10 de outubro de 2018**. Aprova a reedição da DCA 11-45 "Concepção Estratégica - Força Aérea 100". Brasília, DF, 2018.

DE VASCONCELOS, L. E. G.; LEITE, N. P. O.; KUSUMOTO, A. Y.; ROBERTO, L.; LOPES, C. M. A.. Store separation: Photogrammetric solution for the static ejection test. **International Journal of Aerospace Engineering**, v. 2019, 2019.

DINELLI, G.; MEONI, G.; RAPUANO, E.; BENELLI, G.; FANUCCI, L.. An FPGA-based hardware accelerator for CNNs using on-chip memories only: Design and benchmarking with INTEL movidius neural compute stick. **International Journal of Reconfigurable Computing**, v. 2019, p. 1-13, 2019.

ELMASRY, Y.; ELZEKY, M.; ATIA, A.. Multiple Moving Objects Using Deep Learning for Trajectory Extraction and Clustering. In: **2023 Intelligent Methods, Systems, and Applications (IMSA)**. IEEE, 2023. p. 62-67.

FORSMAN, E.; GETSON, S.; SCHUG, D.; URTZ, G.. Improved Analysis Techniques for More Efficient Weapon Separation Testing. **Proceedings of the Society of Flight Test Engineers European**, 2008.

FÖRSTNER, W.; GÜLCH, E.. A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features. In: Proc. ISPRS **Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data**. 1987. p. 281-305.

IATA, Sustainability and Economics, S&P Global, Macrobond Updated: 06/2023. Disponível em: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---fuel/>. Acesso em: 03/10/2023.

MELO, G. A.; MÁXIMO, M.; CASTRO, P. A.. High Speed Marker Tracking for Flight Tests. **IEEE Latin America Transactions**, v. 20, n. 10, p. 2237-2243, 2022.

MIKROTRON, High Speed Cameras, **EoSens® Creation2.0MCX12-CM2**, Disponível em: <https://mikrotron.de/en/high-speed-cameras/mik-camera-detail.php?id=EoSens%C2%AECreation2.0MCX12-CM2>. Acesso em: 03/10/2023.

NATO, Science and Technology Organization Neuilly-Sur-Seine (France). **Aircraft/Stores Compatibility, Integration and Separation Testing (Essais de compatibilite, d'integration et de separation des emports sur aeronef)**. 2014.

ZHANG, Q.; YANG, L. T.; CHEN, Z.; LI, P.. A survey on deep learning for big data. **Information Fusion**, v. 42, p. 146-157, 2018.

ZHAO, X.; YUAN, Y.; DONG, Y.; ZHAO, R.. Optimization approach to the aircraft weight and balance problem with the centre of gravity envelope constraints. **IET Intelligent Transport Systems**, v. 15, n. 10, p. 1269-1286, 2021.