



ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA  
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1/2023

GUSTAVO MULLER **HAUCK**, Cap Av

**Desenvolvimento de sistemas de propulsão híbrido-elétricos:** benefícios operacionais e estratégicos para a Força Aérea Brasileira

Rio de Janeiro

2023

ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA  
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1/2023

GUSTAVO MULLER **HAUCK**, Cap Av

**Desenvolvimento de sistemas de propulsão híbrido-elétricos:** benefícios operacionais e estratégicos para a Força Aérea Brasileira

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

Linha de Pesquisa: Ciência, Tecnologia e Inovação

Orientador: Edivaldo Pires de Figueiredo, Ten Cel Esp Sup Tec

Rio de Janeiro

2023

GUSTAVO MULLER **HAUCK**, Cap Av

**Desenvolvimento de sistemas de propulsão híbrido-elétricos:** benefícios operacionais e estratégicos para a Força Aérea Brasileira

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

Aprovado por:

---

Edivaldo Pires de **Figueiredo**, Ten Cel Esp Sup Tec  
EAOAR

---

Bruno **Bitencourt** Carvalho de Oliveira, Maj Int  
EAOAR

Rio de Janeiro

2023

## RESUMO

A indústria aeronáutica se posiciona na vanguarda do progresso tecnológico. Todavia, apesar das constantes evoluções para diminuir os custos de operação, o dispêndio com combustível ainda responde por um quarto dos gastos operacionais de empresas aéreas. Uma forma de mitigar tal efeito é o desenvolvimento de novos sistemas de propulsão. Todavia, cabe ressaltar que pesquisas e inovações no setor aeronáutico são caras e de alto valor estratégico, o que favorece a participação do Estado, por meio de suas instituições, enquanto motivador dos processos. Assim, este ensaio defende a tese de que a Força Aérea Brasileira (FAB) deve fomentar o desenvolvimento da tecnologia de propulsão híbrido-elétrica no Brasil como forma de obter relevantes vantagens estratégicas e operacionais. Inicialmente, argumenta-se que esse novo tipo de propulsão tem alto potencial de reduzir o consumo de combustível das aeronaves, resultando em diminuição do custo operacional das missões aéreas. Após isso, explicita-se que a promoção do desenvolvimento industrial permitirá à FAB auferir receitas mediante pagamento de royalties quando as empresas parceiras efetuarem vendas dos produtos criados, representando um fluxo de investimentos para a continuidade do ciclo de inovação no país. Por fim, fica estabelecida o benefício estratégico obtido pela Força Aérea, permitindo o cumprimento mais eficiente de sua missão institucional, além de contribuir para a projeção da indústria brasileira como pioneira mundial, consolidando importante vantagem comercial.

**Palavras-chave:** Propulsão Aeronáutica. Híbrido-elétrico. Economia de Combustível. Royalties.

## 1 INTRODUÇÃO

O avião é uma invenção humana recente, mas cujo desenvolvimento tecnológico ocupa a vanguarda das inovações mundiais. Desde a década de 1960, melhorias nos sistemas de propulsão tornaram este meio de transporte até 80% mais eficiente em termos de consumo (SARAVANAMUTTOO *et al.*, 2017). Ainda assim, 23,7% do gasto operacional das empresas aéreas é comprometido com combustível (ATAG, 2019).

Tendo em mente preocupações com custos operacionais e deterioração ambiental, novas formas de propulsão aeronáutica vêm sendo pesquisadas e testadas. Entre elas, a híbrido-elétrica – que utiliza motores elétricos associados aos tradicionais, a combustão – tem destaque por compor um tipo de tecnologia em acelerado amadurecimento e por possibilitar economias na queima de combustível fóssil que podem passar dos 20% (VOSKUIJL, BOGAERT, RAO, 2017; GESELL, WOLTERS, PLOHR, 2018).

Todavia, é justamente essa característica inovadora que torna a evolução da indústria aeronáutica algo caro e que normalmente exige a iniciativa de Governos, por meio de suas instituições, como molas propulsoras das pesquisas (COSTA, 2020). Por óbvio, tais investimentos culminam em retorno ao Estado, mediante participações em vendas ou recebimento de *royalties* nos fechamentos de negócios das empresas intervenientes com futuros clientes (SOUZA, FILGUEIRAS, 2021).

Tendo em vista as condições e o ambiente descritos, este ensaio visa a demonstrar que a Força Aérea Brasileira deve fomentar o desenvolvimento da tecnologia de propulsão híbrido-elétrica no Brasil como forma de obter relevantes vantagens operacionais e estratégicas.

Visando amparar essa tese, dois argumentos foram avaliados. Inicialmente, destaca-se que a implantação deste tipo de tecnologia implicará na redução dos custos operacionais das missões aéreas, por seu potencial de economia de combustível frente aos meios tradicionais. Em segundo lugar, evidenciam-se benefícios financeiros pelo recebimento de *royalties* oriundos da parceria público-privada para desenvolvimento tecnológico, garantindo recursos para contribuir com o ciclo de inovação no país.

## 2 DESENVOLVIMENTO

## 2.1 Propulsão híbrido-elétrica e a redução do custo operacional

No diapasão da economia operacional, cabe ressaltar primeiramente que benefícios são dados aos primeiros clientes de novas tecnologias, pelo fato de estes financiarem caros processos iniciais, como manufatura e certificação. Neste sentido, retrata-se o Projeto AL-X, que envolveu o desenvolvimento e a produção de 99 unidades da aeronave A-29 Super Tucano, no valor de 420 milhões de dólares segundo a Folha de São Paulo (2001), mediante contrato entre FAB e EMBRAER iniciado em 1995 e concluído em 2014. Os valores atualizados de venda do A-29 são da ordem de dez milhões de dólares (SACONI, 2021), podendo chegar a 15, de acordo com as capacidades instaladas. Já aí nota-se a vantagem de a FAB ter atuado como fomentadora do projeto, garantindo a aquisição das aeronaves a preços reduzidos, em torno de quatro milhões de dólares cada, implicando redução dos custos institucionais.

Do ponto de vista técnico, cumpre destacar que o grande limitante da tecnologia de propulsão elétrica aplicada a aeronaves são as baterias, componentes fundamentais desses sistemas. O principal parâmetro usado neste caso é a chamada densidade energética, ou seja, quanta energia elétrica é possível armazenar em um quilo de célula de carga. As boas baterias disponíveis atualmente têm capacidade de 100 a 200 Wh/kg (VOSKUIJL, BOGAERT, RAO, 2017), podendo, as melhores, chegar a 250 Wh/kg. Como referência, segundo Voskuil, Bogaert e Rao (2017), o querosene de aviação tem densidade energética média de 12.000 Wh/kg, ou seja, quase 50 vezes maior que as melhores células de carga disponíveis. Por conseguinte, apesar de aeronaves totalmente elétricas parecerem a solução ideal para evitar gastos com combustível, a massa de baterias necessária para o voo não deixaria espaço útil para uso com cargas e passageiros.

Uma forma de diminuir essa demanda de peso inicial seria usar menos baterias e dotar a aeronave da capacidade de carregá-las em voo, usando potência excedente da queima de combustível fóssil em um motor a combustão interna (VOSKUIJL, BOGAERT, RAO, 2017). Surge, então, a motorização híbrido-elétrica como solução, agregando as qualidades de economia de combustível e disponibilidade para transporte de carga útil.

Outro importante conceito para o entendimento dos estudos é a chamada *power split* (razão de potência). Segundo Voskuil, Bogaert e Rao (2017), este valor indica

quanto da energia necessária à sustentação do voo tem origem no sistema elétrico. Uma vez que o peso das baterias a bordo influencia a capacidade de carga e de realização da missão, é viável variar a *power split* aplicada de acordo com o perfil e a distância do voo, maximizando a característica fundamental à missão.

Com base nesses conceitos, pode-se avaliar a potencialidade dessa tecnologia em termos de diminuição do consumo de combustível e conseqüente redução do custo operacional. Pornet *et al.* (2014) propôs que a propulsão híbrido-elétrica tem aplicabilidade no mercado de aviação regional, ou seja, aeronaves de porte pequeno e médio. Simulando baterias de 1.500 Wh/kg, foi possível alcançar economias de combustível de até 20%.

Por sua vez, Voskuijl, Bogaert e Rao (2017) exploraram diferentes distribuições de *power split* com modelo computacional de um ATR-72, clássica aeronave usada para voos regionais no Brasil, capaz de transportar 70 passageiros. Abordando missões de 825 milhas náuticas (distâncias comuns voadas sobre território brasileiro), usando baterias com capacidade de 750 a 1.500 Wh/kg, cuja disponibilidade no mercado se estima para 2035, alcançou-se uma economia máxima de 28% de combustível.

Há outras opções, como aquela trazida por Gesell, Wolters e Plohr (2018) para abordar e selecionar a razão de potência. Usando-se os motores elétricos para complementar a tração do motor a combustão interna em momentos críticos como decolagem e subida, pode-se diminuir o tamanho da turbina a gás empregada, promovendo menor consumo em fases longas do voo, como o cruzeiro. Baseando-se, novamente, no ATR-72, aplicando *power splits* entre 10 e 40% nas fases críticas citadas, economias de 5,21 a 21,6% de combustível foram conseguidas.

Existem diversos outros estudos e abordagens, como a série *Subsonic Ultra-Green Aircraft* (SUGAR) desenvolvida pela Boeing. Essa prevê uma abordagem geral de projeto, modificando também estruturas clássicas de fuselagem, além de trabalhar o sistema de propulsão (BERLJE, MASTINS, 2019). Neste caso, para aeronaves com 154 passageiros, foram conseguidas reduções entre 25 e 46% na queima de querosene.

Cabe ressaltar que os estudos levantados anteriormente englobam perfis de missões de voo realizadas diuturnamente pela FAB. Sabendo-se que os gastos com combustível correspondem a um quarto do custo de operação de aeronaves em geral

(ATAG, 2019), e que a economia na queima de querosene possibilitada pela tecnologia híbrido-elétrica representa valores percentuais significativos, resta claro que a aplicação deste sistema de propulsão nas aeronaves voadas pela Força Aérea Brasileira tem grande potencial de reduzir o custo operacional da Instituição.

## 2.2 Fomento ao desenvolvimento industrial e os benefícios para a FAB

Todos os países do mundo que possuem indústria aeronáutica desenvolvida guardam a característica de o Estado, em graus variados, dela participar por meio do fomento à pesquisa e ao desenvolvimento (GOMES apud JUNIOR, 2020). Isso se dá pelo fato de o setor envolver produtos de alto valor agregado e importância estratégica (JUNIOR, 2020). Assim, o Governo atua enquanto amortecedor de risco, até que o produto se torne comercialmente viável (COSTA, 2020), evidenciando-se a necessidade do envolvimento estatal como impulsionador da atividade.

Ainda neste sentido, o desenvolvimento do Setor Industrial de Defesa está previsto em importantes documentos, a saber, a Política Nacional de Defesa (PND), em seu item 3.2: “Priorizar os investimentos em Ciência, Tecnologia e Inovação relativos a produtos de defesa de aplicação dual, visando à autonomia tecnológica do País”. Ou, ainda, na Estratégia Nacional de Defesa (END): “Utilizar encomendas tecnológicas para promover o aumento do conteúdo tecnológico nacional dos produtos de defesa” (BRASIL apud COSTA, 2020). Portanto, o fomento ao desenvolvimento tecnológico é uma das funções governamentais. Segundo Júnior (2020), com esse fito, diversas instituições públicas norte-americanas investem quantias da ordem de 20 bilhões de dólares anuais na indústria aeronáutica (GOMES apud JUNIOR, 2020), reforçando a importância do setor.

Mas, tal investimento não se motiva pelo simples desenvolvimento nacional. O fomento à atividade industrial por meio de instituições governamentais é uma forma de prover a estas uma fonte de receita a ser explorada futuramente, ainda que não represente, de fato, lucro financeiro sobre o investimento, já que essa não é a proposição legal do envolvimento do Estado no progresso da Base Industrial de Defesa (BID). A real finalidade é fomentar o avanço tecnológico do país. O recebimento de *royalties* é um benefício obtido em consequência, que garante a continuidade do processo de inovação mediante seu direcionamento às Instituições de Ciência e Tecnologia (ICT), que, por

vezes, têm dificuldade em ser abarcadas pelo desdobramento de recursos orçamentários. A Lei 13.243/16, conhecida como Marco Legal de Inovação, reforça tal afirmação ao estabelecer que a aplicação dos recursos oriundos deste tipo de processo deve ocorrer em objetivos de pesquisa e desenvolvimento institucionais (BRASIL, 2017).

Nesse sentido, variados projetos estratégicos são desenvolvidos pelas ICTs da própria FAB, como o Veículo Lançador de Microssatélites (VLM), ou pela contratação de empresas, caso do F-39 Gripen e do KC-390 Millennium (COSTA, 2020). Esta última aeronave tem comercialização permitida para outros países, o que promoverá o retorno de *royalties* para a Força Aérea Brasileira sempre que uma nova unidade for vendida.

Retomando o Contrato citado anteriormente para o desenvolvimento do Projeto AL-X, especificamente por possuir números consolidados, registra-se que, quando de seu encerramento, a aeronave já podia ser caracterizada como sucesso comercial, com 150 unidades vendidas para 14 países (SOUZA, FILGUEIRAS, 2021). Ainda, conforme afirmam Souza e Filgueiras (2021), o acordo público-privado previu o retorno de 1% das vendas realizadas a terceiros na forma de *royalties* à FAB. Mediante um inédito convênio firmado entre o Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) e a Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais, tal montante foi redirecionado ao Programa de Fortalecimento das Atividades Relacionadas à Ciência, Tecnologia e Inovação no âmbito do DCTA (BRASIL, 2017). Entre os anos de 2017 e 2021, estima-se que uma receita de 30 milhões de reais foi reinvestida por este programa, representando o significativo incremento de 49,85% no orçamento para Pesquisa e Desenvolvimento no Setor Aeroespacial pelo citado Departamento (SOUZA, FILGUEIRAS, 2021).

Fica, assim, estabelecido que o fomento ao avanço da BID por meio da FAB, ainda que não vise ao lucro, representa um fluxo de receita que, mediante captação de *royalties* e seu correto direcionamento – como feito de forma pioneira com o Projeto AL-X – cumpre o papel de incentivar o ciclo de inovação no país, pelo desenvolvimento de suas ICTs.

### **3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A indústria aeronáutica lida com um produto comumente situado no que se pode chamar estado-da-arte da tecnologia. Por este motivo, sua evolução é constante e acelerada. Ainda que os sistemas de propulsão para aeronaves tenham se tornado até

80% mais eficientes energeticamente nos últimos 60 anos, gastos com combustível continuam representando um quarto dos custos de empresas aéreas.

Com o avançar das pesquisas, novas possibilidades de sistemas propulsivos vêm sendo estudadas, entre eles, os híbrido-elétricos. Englobando o alto rendimento dos componentes elétricos, e acomodando as limitações impostas pela atual tecnologia de baterias, esta nova opção de motorização se apresenta com alto potencial de redução de custos operacionais e reposicionamento estratégico do país.

Assim, defendeu-se a tese de que a FAB deve fomentar o desenvolvimento da tecnologia de propulsão híbrido-elétrica no Brasil como forma de obter relevantes vantagens estratégicas e operacionais. Tal ação pode ocorrer, efetivamente, pela celebração de parcerias entre ICTs da Força Aérea e a indústria nacional, desenvolvendo *know-how* para a instituição governamental e um produto para a entidade comercial.

Para defender tal afirmação, argumentou-se, inicialmente, que a inclusão desta tecnologia na FAB tem grande capacidade de reduzir o custo operacional na execução das missões aéreas, uma vez que os valores para economia de combustível obtidos pela bibliografia revisada são da ordem de 20%. Fica, então, claro o posicionamento deste tipo de sistema como poupador de recursos.

Em seguida, mostrou-se como a abordagem de instituições estatais enquanto propulsores do desenvolvimento tecnológico-industrial tem o condão cumprir um dever legal e obter, como resultado, *royalties* ao final do processo, caracterizando uma fonte de receitas para a FAB no futuro. Exemplo desta aplicação foi o Projeto AL-X, que, em cinco anos, retornou ao DCTA 30 milhões de reais a serem reaplicados nas instituições do Departamento para a continuidade dos ciclos de inovação.

Dessa forma, sabendo-se que a missão da FAB suscita manter a soberania do espaço aéreo e integrar o território nacional, fica claro que fomentar o desenvolvimento de sistemas de propulsão híbrido-elétricos tem o fito de permitir a realização das tarefas fundamentais com menor comprometimento do orçamento, além de retornar valores reaplicáveis nos mesmos processos virtuosos de pesquisa. Por fim, sabendo-se que esta é uma tecnologia de emprego recente, o fomento da FAB ao seu desenvolvimento pode projetar a indústria brasileira como pioneira no cenário mundial, representando importante vantagem comercial e estratégica.

## REFERÊNCIAS

ATAG. **Air Transport Action Group - Facts and Figures**, 2020. Disponível em: <https://www.atag.org/facts-figures.html>. Acesso em 15 jun. 2021.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Royalties garantem investimento na área de ciência e tecnologia da FAB. **Força Aérea Brasileira**, 2017. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/30720/CONV%C3%8ANIO%20-%20Royalties%20garantem%20investimento%20na%20%C3%A1rea%20de%20ci%C3%Aancia%20e%20tecnologia%20da%20FAB>. Acesso em 29 mar. 2023.

BRELJE, B.; MARTINS, J. Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft: A review of concepts, models, and design approaches. **Progress in Aerospace Sciences**, Michigan University, Michigan, EUA, v. 104, p. 104–119, jan. 2019.

COSTA, J. R. A. **Fomento da inovação na Base Industrial de Defesa: uma necessidade para a manutenção das capacidades da Força Aérea Brasileira**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Altos Estudos em Defesa) – Escola Superior de Guerra – Campus Brasília. Brasília, 2020.

FAB assina contrato de R\$ 420 mi com Embraer para a produção do ALX. **Folha de São Paulo**, São José dos Campos, Sábado, 21 jul. 2001. Economia. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/vale/vl2107200109.htm>. Acesso em 29 mar. 2023.

GESELL, H.; WOLTERS, F.; PLOHR, M. System analysis of turbo electric and hybrid electric propulsion systems on a regional aircraft. **The Aeronautical Journal**, v. 123, n. 1268, p. 1602–1617, 2019.

JUNIOR, A. J. D. M. **Algoz ou herói: a participação do Estado brasileiro na internacionalização da EMBRAER S.A. (1994-2018)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Relações Internacionais) – Instituto de Relações Internacionais, Universidade de Brasília. Brasília, 2020.

MARWA, M.; MARTIN, S. M.; MARTOS, B. C.; ANDERSON, R. P. Analytic and numeric forms for the performance of propeller-powered electric and hybrid aircraft. **55th AIAA Aerospace Sciences Meeting**. Embry-Riddle Aeronautical University, Daytona Beach, FL, EUA, 9-13 jan. 2017.

PORNET, C.; ISIKVEREN, A. Conceptual design of hybrid-electric transport aircraft. **Progress in Aerospace Sciences**, Elsevier, Alemanha, v. 79, p. 114–135, out. 2015.

PORNET, C.; ISIKVEREN, A.; KAISER, S.; HORNING, M. Integrated fuel-battery hybrid for a narrow-body sized transport aircraft. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, Munique, out. 2014.

SACONI, A. Conheça o A-29, avião de ataque da Embraer cobiçado pelo Taleban. **Economia Uol**, 2021. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/todos-a-bordo/2021/08/18/a-29-super-tucano-caca-afeganistao-saconi.htm>. Acesso em 29 mar. 2023.

SARAVANAMUTTOO, H.; ROGERS, G.; COHEN, H.; STRAZNICKY, P.; NIX, A. **Gas Turbine Theory**. 7ª ed. Reino Unido - GB: Pearson Education Limited, 2017.

SOUZA, C. C.; FILGUEIRAS, E. Q. **Financiamento de ciência, tecnologia e inovação e o modelo de negócios Canvas**: o caso dos royalties de produtos estratégicos de defesa no Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Altos Estudos de Defesa) – Escola Superior de Defesa. Brasília, 2021.

VOSKUIJL, M.; BOGAERT, J. V.; RAO, A. G. Analysis and design of hybrid electric regional turboprop aircraft. **CEAS Aeronaut Journal**, Delft University of Technology, Delft, Holanda, v. 9, p. 15–25, 2018.