

CIRCULAR ECOSYSTEMS IN THE AEROSPACE SECTOR: A COMPARATIVE ANALYSIS OF BRAZIL AND CANADA

ALINE GABRIELA FERRARI
POLYTECHNIQUE MONTREAL

FABIANO ARMELLINI
POLYTECHNIQUE MONTREAL

DANIEL JUGEND

Introdução

The environmental crisis has pushed industries to adopt the circular economy (CE), a model that reduces waste and promotes resource regeneration. The aerospace sector, vital for innovation but resource-intensive, faces challenges in aligning with sustainability goals due to its high carbon emissions and waste. Circular ecosystems, involving collaboration among companies, governments, and universities, foster CE principles through resource sharing and innovation. This study compares circular ecosystems in Brazil and Canada's aerospace sectors to understand their regional dynamics.

Problema de Pesquisa e Objetivo

Despite growing interest in the CE, gaps remain in its application to complex sectors like aerospace. Little is known about how companies, governments, and universities collaborate to foster circularity. This study identifies key actors and objectives within such partnerships by comparing two circular ecosystems in Brazil and Canada. The key question this article seeks to answer is: "Which actors are involved in circular ecosystems in the aerospace sector, and what objectives do they pursue?" The analysis examines innovation priorities, alignment with CE principles, and environmental impacts.

Fundamentação Teórica

The CE decouples economic growth from resource consumption by minimizing inputs, extending product life, and regenerating systems (Geissdoerfer et al., 2017; MacArthur et al., 2015). In aerospace, CE practices include redesigning components for recyclability, using reusable composites, remanufacturing parts, and adopting eco-friendly propulsion to reduce emissions. Circular ecosystems, collaborative networks of stakeholders, drive sustainable innovation through shared knowledge and resources, fostering partnerships to advance CE (Ferrari et al., 2023).

Metodologia

This study employs a qualitative, exploratory design, using document analysis to examine two programs aimed at enhancing sustainability in the aerospace sector, Ecosystem A from Brazil and Ecosystem B from Canada. The analysis focused on three dimensions: actors, collaborations, and circularity goals, enabling a comparative assessment of objectives, innovations, outcomes, and actors engagement. This approach highlights both the similarities and differences in how circular practices are structured and implemented across distinct national contexts.

Análise e Discussão dos Resultados

The analysis of both ecosystems shows distinct strategies for circularity in aerospace. Canada adopted a long-term, R&D-driven model, with funding, major firms, SMEs, universities, and government co-developing technologies like hybrid propulsion and intelligent wings, yielding patents and jobs. Brazil's short-term program focused on SMEs in the supply chain, offering diagnostics and training to implement ESG practices, boosting efficiency and waste reduction. Canada pursued innovation and competitiveness, while Brazil emphasized capacity building and practical implementation.

Considerações Finais

The comparative analysis of Ecosystems A (Brazil) and B (Canada) shows that CE strategies are context-dependent, shaped by national policies, industrial maturity, and regional priorities. Canada's long-term R&D model drove innovation and global competitiveness, while Brazil's approach built local capacity and operational efficiency. The study highlights that collaboration among diverse actors is essential for sustainability in high-tech sectors, offering insights for policymakers and industry leaders on designing effective CE programs and creating shared environmental and economic value.

Referências

Ferrari, A. G., Jugend, D., Armellini, F., Barbalho, S. C. M., & de Carvalho, M. M. (2023). Crossing actors' boundaries towards circular ecosystems in the organic food sector: Facing the challenges in an emerging economy context. *Journal of Cleaner Production*, 407, 137093. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. MacArthur, E., Zumwinkel, K., & Stuchtey, M. R. (2015). *Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe*. Ellen MacArthur Foundation, 100.

Palavras Chave

circular economy, circular ecosystem, aerospace sector

Agradecimento a órgão de fomento

The authors would like to acknowledge the Merit Scholarship Program for Foreign Students (PBEEE), from Fonds de recherche du Québec (FRQ) – under the grant DOI number: <https://doi.org/10.69777/355038> – for supporting this research. The opinions, hypotheses, conclusions, and recommendations expressed in this material are the responsibility of the authors and do not necessarily reflect the views of the Fonds de recherche du Québec.

ECOSSISTEMAS CIRCULARES NO SETOR AEROESPACIAL: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE BRASIL E CANADÁ

Palavras-chave: economia circular; ecossistema circular; setor aeroespacial; colaboração; sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A crescente crise ambiental tem exercido uma pressão sem precedentes sobre as indústrias para que repensem seus modelos de produção e consumo (Hofmann, 2019). Nos últimos anos, a economia circular (EC) surgiu como uma alternativa de destaque ao paradigma linear do “extrair–produzir–descartar”, oferecendo uma abordagem sistêmica para reduzir o desperdício, regenerar recursos e fechar ciclos materiais (Barros et al., 2021; Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017). Esse modelo enfatiza a criação de valor por meio da circulação contínua de recursos, em vez da extração e descarte, e vem sendo progressivamente adotado em diversos setores da economia global (Geissdoerfer et al., 2017).

O setor aeroespacial ocupa uma posição importante nesse debate. Ele é, ao mesmo tempo, um símbolo do avanço tecnológico e um setor altamente dependente de matérias-primas, de processos produtivos intensivos em energia e de uma cadeia de suprimentos globalizada (Bales; Maull; Radnor, 2004; Monteiro et al., 2022). A inovação aeroespacial impulsiona o emprego e a competitividade, mas também gera impactos ambientais significativos, especialmente em termos de emissões de carbono, poluição sonora e descarte de materiais ao final de sua vida útil (Eckelman et al., 2014; Rupcic et al., 2023). O desafio está em alinhar o progresso tecnológico às iniciativas de sustentabilidade, atendendo simultaneamente aos compromissos internacionais.

Nesse cenário, os ecossistemas circulares emergem como arranjos colaborativos nos quais empresas, governos, universidades e instituições de pesquisa se unem para promover os princípios da EC (Ferrari et al., 2023; Konietzko; Bocken; Hultink, 2020). Esses ecossistemas não são iniciativas isoladas, mas colaborações estruturadas que buscam gerar sinergias entre diversos atores (Gomes et al., 2024). Eles oferecem recursos tangíveis e intangíveis para acelerar a adoção de práticas circulares, uma vez que nenhuma empresa ou instituição é capaz de realizar a transição para a circularidade de forma isolada. É a interação entre diferentes atores que impulsiona a inovação, o compartilhamento de conhecimento e a mudança sistêmica.

A formação e o sucesso desses ecossistemas, contudo, são influenciados pelos contextos regionais e institucionais. Os desafios específicos, os recursos disponíveis e as prioridades estratégicas de um país ou região moldam a natureza das colaborações e os tipos de soluções circulares desenvolvidas. Assim, compreender como esses ecossistemas funcionam em diferentes contextos nacionais é essencial para a formulação de políticas e estratégias eficazes. Este estudo busca analisar essas dinâmicas ao examinar e comparar dois ecossistemas circulares distintos no setor aeroespacial: um no Brasil e outro no Canadá.

2 PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVO

Apesar do crescente interesse acadêmico e industrial pela EC, ainda existe uma lacuna significativa na literatura quanto à sua implementação prática em setores complexos e de alta tecnologia, como o aeroespacial (Dias et al., 2022). Especificamente, os mecanismos e os objetivos da colaboração entre diferentes atores para promover a circularidade nessa indústria ainda não estão bem documentados. Isso levanta várias questões em aberto, como, por exemplo, de que forma distintos tipos de organizações, desde grandes corporações até agências

governamentais e instituições acadêmicas, colaboram de maneira eficaz para enfrentar os desafios da sustentabilidade.

Consequentemente, o problema central de pesquisa deste estudo é identificar os principais atores envolvidos nessas colaborações e compreender os objetivos específicos que eles buscam atingir. A pergunta central que este artigo procura responder é: *“Quais atores estão envolvidos nos ecossistemas circulares do setor aeroespacial e quais objetivos eles buscam atingir?”* Ao investigar dois casos distintos, esta pesquisa busca oferecer uma perspectiva comparativa sobre as escolhas estratégicas e os modelos colaborativos que impulsionam a transição para a EC na indústria aeroespacial global.

O principal objetivo deste artigo é avaliar as colaborações-chave existentes em dois programas de ecossistemas circulares situados em diferentes países: um no Brasil e outro no Canadá. Essa avaliação concentra-se em comparar suas prioridades de inovação, o alinhamento de seus projetos aos princípios da EC e os impactos ambientais projetados de suas iniciativas. A análise comparativa visa identificar padrões compartilhados e práticas de excelência específicas de cada contexto, que possam ser adaptadas e aplicadas a outros contextos regionais e industriais. Ao alcançar esse objetivo, o estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre a implementação da EC, oferecendo insights práticos para formuladores de políticas públicas e líderes do setor industrial.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A EC tem sido conceituada como um modelo restaurativo e regenerativo que busca dissociar o crescimento econômico do consumo de recursos (MacArthur, 2015). Seus princípios orientadores incluem a minimização do uso de recursos, a extensão do ciclo de vida dos produtos e a regeneração dos sistemas naturais (Geissdoerfer et al., 2020). A EC enfatiza o redesenho sistêmico de toda a cadeia de valor, exigindo inovação em produtos, serviços, processos e modelos de negócio (Jesus; Jugend, 2021; Whalen, 2019).

No contexto da indústria aeroespacial, a EC se traduz em diversas práticas. Entre elas estão o redesenho de componentes de aeronaves para reduzir o peso e aumentar a reciclabilidade, o uso de materiais compósitos avançados que possam ser reutilizados ou reprocessados, a remanufatura de motores e peças críticas, além da adoção de tecnologias de propulsão que reduzam as emissões de carbono e a poluição sonora (Ranasinghe et al., 2019; Sadeghian, 2020). As práticas de manutenção e reparo também desempenham um papel essencial, pois prolongam a vida útil dos produtos e diminuem a necessidade de novas matérias-primas.

Com base na literatura sobre ecossistemas de negócios, os ecossistemas circulares podem ser definidos como redes colaborativas de múltiplos atores que cocriam soluções sustentáveis (Bocken et al., 2019). Moore (1993) descreve os ecossistemas de negócios como comunidades econômicas interativas compostas por organizações e indivíduos. Aplicado à circularidade, esse conceito refere-se a arranjos colaborativos que geram sinergias entre diferentes partes interessadas (Bocken et al., 2019). A eficácia desses ecossistemas está em sua capacidade de preencher lacunas de conhecimento, tecnologia e capital. Eles facilitam o fluxo de informações e recursos, permitindo a cocriação de soluções inovadoras que dificilmente seriam desenvolvidas de forma isolada por uma única empresa.

No setor aeroespacial, esses ecossistemas podem acelerar a adoção de práticas circulares por meio de pesquisas conjuntas sobre novos materiais, do desenvolvimento de tecnologias avançadas de remanufatura e da criação de cadeias de suprimentos mais robustas e localizadas para o reparo e a reutilização de componentes. Diferentemente das cadeias de suprimentos tradicionais — geralmente lineares e hierárquicas —, os ecossistemas são não lineares e interdependentes, promovendo a criação de valor por meio de parcerias e experimentação

conjunta. Adner (2017) destaca que os ecossistemas devem ser compreendidos como estruturas que moldam os resultados estratégicos, o que, no caso da EC, significa orquestrar múltiplos atores em torno de objetivos ambientais comuns.

Os ecossistemas circulares também interagem com estruturas mais amplas de políticas públicas e governança. Incentivos governamentais, mecanismos de financiamento e exigências regulatórias exercem papel crucial na configuração dessas dinâmicas colaborativas. Parcerias público-privadas e colaborações entre indústria e academia, por exemplo, frequentemente surgem como espaços de experimentação, permitindo que empresas compartilhem riscos e acessem recursos que, de outra forma, seriam inacessíveis. Como os ecossistemas circulares buscam objetivos coletivos voltados à inovação sustentável, eles se mostram particularmente relevantes para o setor aeroespacial, dada sua alta intensidade de capital e complexidade tecnológica.

4 METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem qualitativa e exploratória, baseada na análise documental. A análise documental é particularmente adequada para investigar arranjos institucionais e resultados reportados, pois permite que os pesquisadores acessem informações detalhadas produzidas pelas próprias organizações envolvidas, minimizando a interferência do pesquisador.

Para o Ecossistema A, no Brasil, foram examinados dois documentos referentes a um programa colaborativo específico voltado à sustentabilidade. O primeiro é um relatório de estudo de caso de 18 páginas, produzido por uma empresa de consultoria participante da iniciativa, que oferece uma visão sobre a implementação e os efeitos das práticas de sustentabilidade no âmbito do programa. O segundo é um e-book de 67 páginas publicado em 2025, que consolida os resultados do programa e apresenta indicadores quantitativos e qualitativos relacionados às práticas ambientais, sociais e de governança (ASG). Em conjunto, esses documentos fornecem uma visão abrangente do desenho, da implementação e dos resultados do programa.

Para o Ecossistema B, no Canadá, foram analisados doze relatórios oficiais sobre um programa específico voltado ao ecossistema aeroespacial, publicados entre 2012 e 2025. Esses documentos somam 379 páginas e foram emitidos em diferentes fases do ciclo de vida do projeto. Eles detalham os objetivos, as atividades, as inovações tecnológicas e os resultados ambientais do projeto. De forma relevante, também descrevem a participação de diferentes atores e a evolução das estruturas colaborativas ao longo do tempo, o que os torna particularmente pertinentes para os propósitos deste estudo.

Todos os documentos foram lidos integralmente e analisados segundo três dimensões analíticas: (1) os atores envolvidos em cada ecossistema, (2) as colaborações estabelecidas e (3) os objetivos e resultados relacionados à circularidade. Em seguida, foi aplicada uma abordagem comparativa para identificar semelhanças e divergências entre os dois ecossistemas. Ao analisar dados provenientes de múltiplos documentos, o estudo buscou captar a evolução e os resultados desses ecossistemas ao longo do tempo.

Embora o uso da análise documental apresente certas limitações, a abrangência, a profundidade e o caráter oficial dos relatórios examinados oferecem uma base sólida para uma avaliação comparativa das práticas implementadas nesses diferentes contextos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise documental dos dois programas, Ecossistema A (Brasil) e Ecossistema B (Canadá), revela diferentes abordagens estratégicas para promover a EC no setor aeroespacial.

Embora ambos tenham conseguido fomentar a colaboração entre diversos atores, seus modelos, prioridades e objetivos de longo prazo foram moldados por seus respectivos contextos nacionais e metas industriais.

O programa canadense representa um exemplo de abordagem de longo prazo orientada à pesquisa e desenvolvimento (P&D) para a promoção da EC. Lançado em 2010 e conduzido em três fases até 2023, seu propósito central foi desenvolver tecnologias e sistemas de ponta capazes de reduzir significativamente a pegada ambiental das aeronaves. Sua estrutura consistia em um ecossistema envolvendo grandes empresas aeroespaciais, diversas pequenas e médias empresas (PMEs), universidades, o governo e centros de pesquisa, refletindo um modelo centrado em projetos. Apenas a primeira fase do programa contou com um orçamento de 150 milhões de dólares.

Os subprojetos do programa concentraram-se em avanços tecnológicos fundamentais, como o desenvolvimento de estruturas de fuselagem em materiais compósitos, compressores de nova geração e aviônicos avançados. À medida que o programa evoluiu por suas diferentes fases, novos desafios foram abordados, incluindo o desenvolvimento de um sistema de propulsão híbrido, asas inteligentes para eco-navegação e módulos fotônicos de alta confiabilidade. As colaborações foram altamente estruturadas e voltadas para a obtenção de ganhos tecnológicos específicos. Um comitê de ganhos ambientais, composto por especialistas de cada parceiro, foi criado para desenvolver indicadores de desempenho e medir os benefícios ambientais dos novos sistemas ao longo de seu ciclo de vida. Esse modelo resultou em resultados concretos, como novos pedidos de patente e a criação de empregos qualificados para pesquisadores e engenheiros. Os objetivos do programa iam além dos benefícios ambientais, como a redução do consumo de combustível e a preservação de recursos, e incluíam também a manutenção da competitividade regional no mercado aeroespacial global.

Em contraste, o programa brasileiro concentrou-se no fortalecimento da capacidade operacional e na implementação de práticas sustentáveis dentro do ecossistema aeroespacial local existente. Esse ecossistema envolveu uma agência governamental, um parque tecnológico e duas instituições privadas de consultoria, com foco em dez PMEs fornecedoras de uma grande empresa aeroespacial. O programa teve caráter de curto prazo e buscou engajar e capacitar essas empresas para a adoção de práticas ASG.

A metodologia desse programa baseou-se na oferta de diagnósticos personalizados e treinamentos práticos para ajudar as empresas a identificar oportunidades de melhoria e implementar ações concretas. Os objetivos estavam voltados ao aumento da eficiência operacional, como a redução de resíduos e o reuso de materiais, além de promover uma transformação cultural em direção à sustentabilidade. O modelo de colaboração adotado não se centrava no codesenvolvimento de novas tecnologias, mas sim na transferência de conhecimento e no apoio à implementação prática. O sucesso do programa foi avaliado com base nos avanços das empresas na integração de práticas sustentáveis, que resultaram em melhorias mensuráveis na gestão de resíduos e na eficiência no uso de recursos.

A análise comparativa entre os dois casos revela uma clara divergência estratégica. O Ecossistema B (Canadá) adotou uma estratégia proativa e centrada na inovação, investindo fortemente em projetos de P&D em múltiplas fases, com o objetivo de criar uma nova geração de tecnologias aeroespaciais que reduzissem o impacto ambiental desde a fase de concepção. Essa abordagem é adequada para uma indústria madura e de alta tecnologia, que busca consolidar uma posição de liderança global.

Já o Ecossistema A (Brasil) adotou uma estratégia reativa e voltada para a implementação, com foco no fortalecimento da cadeia de suprimentos existente, oferecendo ferramentas e conhecimento para que as PMEs pudessem atender aos requisitos de sustentabilidade. Esse modelo mostra-se eficaz para um ecossistema aeroespacial em

desenvolvimento, que precisa elevar o padrão de seus parceiros locais para construir colaborações mais resilientes voltadas aos objetivos da EC.

Essas diferenças refletem os contextos industriais e institucionais únicos de cada país. O modelo canadense, sustentado por forte financiamento público para projetos de pesquisa em larga escala, permite o foco em inovações tecnológicas de alto risco e alto retorno. Já o modelo brasileiro, que prioriza o desenvolvimento econômico e o fortalecimento da indústria local, optou por uma abordagem prática e imediata, capaz de ser aplicada a um conjunto mais amplo de empresas. Apesar das diferenças em sua execução, ambos os modelos ressaltam o papel central da colaboração na promoção da EC dentro do setor aeroespacial.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise comparativa dos dois ecossistemas no setor aeroespacial evidencia que a abordagem para promover a EC é altamente dependente do contexto. Trata-se de uma escolha estratégica moldada por políticas nacionais, maturidade industrial e prioridades regionais. Enquanto o Ecossistema B (Canadá) demonstrou um modelo bem-sucedido para impulsionar a inovação por meio de P&D colaborativa de longo prazo, posicionando sua indústria na vanguarda tecnológica, o Ecossistema A (Brasil) apresentou um modelo eficaz para o desenvolvimento de capacidade e aumento da eficiência operacional dentro do ecossistema local.

Esses achados contribuem para o debate mais amplo sobre a implementação da EC, ilustrando como diferentes mecanismos de colaboração podem levar a resultados valiosos, embora distintos. O estudo destaca a importância de um esforço coordenado entre diversos atores para enfrentar os complexos desafios da sustentabilidade em um setor de alta tecnologia. A articulação desses ecossistemas, seja por meio do foco em avanços tecnológicos ou do compromisso com a adaptação industrial, constitui um determinante chave para o sucesso.

Os insights provenientes deste estudo comparativo podem informar o desenho de futuros programas de sustentabilidade no setor aeroespacial e em outras indústrias complexas. Para os formuladores de políticas, o estudo sugere que é essencial compreender profundamente o contexto local antes de elaborar uma estratégia de EC. Para os líderes do setor industrial, evidencia que a colaboração é uma condição necessária para alcançar progressos significativos rumo à sustentabilidade. A transição bem-sucedida para a EC no setor aeroespacial depende da capacidade de diversos atores trabalharem juntos, aproveitando seus recursos tangíveis e intangíveis para criar valor ambiental e econômico compartilhado.

REFERÊNCIAS

ADNER, Ron. Ecosystem as structure: An actionable construct for strategy. **Journal of management**, v. 43, n. 1, p. 39–58, 2017.

BALES, R. R.; MAULL, R. S.; RADNOR, Zoe. The development of supply chain management within the aerospace manufacturing sector. **Supply chain management: An international journal**, v. 9, n. 3, p. 250–255, 2004.

BARROS, Murillo Vetroni *et al.* **Circular economy as a driver to sustainable businesses**. Elsevier Ltd, , 2021.

BOCKEN, Nancy *et al.* A review and evaluation of circular business model innovation tools. **Sustainability**, v. 11, n. 8, p. 2210, 2019.

DIAS, Veruska Mazza Rodrigues *et al.* Possibilities for applying the circular economy in the aerospace industry: Practices, opportunities and challenges. **Journal of Air Transport Management**, v. 102, p. 102227, 2022.

- ECKELMAN, Matthew J. *et al.* Life cycle carbon benefits of aerospace alloy recycling. **Journal of Cleaner Production**, v. 80, p. 38–45, 2014.
- FERRARI, Aline Gabriela *et al.* Crossing actors' boundaries towards circular ecosystems in the organic food sector: Facing the challenges in an emerging economy context. **Journal of Cleaner Production**, v. 407, p. 137093, 2023.
- GEISSDOERFER, Martin *et al.* The Circular Economy—A new sustainability paradigm? **Journal of cleaner production**, v. 143, p. 757–768, 2017.
- GEISSDOERFER, Martin *et al.* Circular business models: A review. **Journal of cleaner production**, v. 277, p. 123741, 2020.
- GOMES, Leonardo Augusto de Vasconcelos *et al.* Enablers for circular ecosystem transformation: A multi-case study of Brazilian circular ecosystems. **Sustainable Production and Consumption**, p. S2352550924001696, jun. 2024.
- HOFMANN, Florian. Circular business models: business approach as driver or obstructor of sustainability transitions? **Journal of cleaner production**, v. 224, p. 361–374, 2019.
- JESUS, Gessica Mina Kim; JUGEND, Daniel. How can open innovation contribute to circular economy adoption? Insights from a literature review. **European Journal of Innovation Management**, v. 26, n. 1, p. 65–98, 2021.
- KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221–232, 2017.
- KONIETZKO, Jan; BOCKEN, Nancy; HULTINK, Erik Jan. Circular ecosystem innovation: An initial set of principles. **Journal of Cleaner Production**, v. 253, p. 119942, abr. 2020.
- MACARTHUR, Ellen. Towards a circular economy: business rationale for an accelerated transition. **Greener Manag International**, v. 20, 2015.
- MONTEIRO, Helena *et al.* Energy and material efficiency strategies enabled by metal additive manufacturing—A review for the aeronautic and aerospace sectors. **Energy Reports**, v. 8, p. 298–305, 2022.
- MOORE, James F. Predators and prey: a new ecology of competition. **Harvard business review**, v. 71, n. 3, p. 75–86, 1993.
- RANASINGHE, Kavindu *et al.* Review of advanced low-emission technologies for sustainable aviation. **Energy**, v. 188, p. 115945, 2019.
- RUPCIC, Lea *et al.* Environmental impacts in the civil aviation sector: Current state and guidance. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 119, p. 103717, 2023.
- SADEGHIAN, Mojtaba. Technologies for aircraft noise reduction: A review. **Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering**, 2020.
- WHALEN, Katherine A. Three circular business models that extend product value and their contribution to resource efficiency. **Journal of cleaner production**, v. 226, p. 1128–1137, 2019.