



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB  
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE – FACE  
MESTRADO PROFISSIONAL EM ECONOMIA

ALEXANDRA BORGES DA SILVA

**UMA PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR PARA O PROBLEMA  
AMBIENTAL DOS DETRITOS ESPACIAIS**

Brasília – DF  
2025

ALEXANDRA BORGES DA SILVA

**UMA PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR PARA O PROBLEMA  
AMBIENTAL DOS DETRITOS ESPACIAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Economia. Área de concentração: Economia da Defesa e Espacial.

Brasília, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2025

**Professora Orientadora:** Dra. Michele Cristina Silva Melo

Brasília-DF  
2025

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

Silva, B. A

### **UMA PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR PARA O PROBLEMA AMBIENTAL DOS DETRITOS ESPACIAIS**

**ALEXANDRA BORGES DA SILVA**

Brasília, 2025.

Número de páginas: 79

Dissertação de Mestrado Profissional- Universidade de Brasília -UnB, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade-FACE, Brasília, DF.

I- Palavras chaves: Economia Circular, Detritos Espaciais, Sustentabilidade Orbital, Direito Espacial, Inovação Tecnológica.

II- Universidade de Brasília. FACE

III- Uma Perspectiva da Economia Circular para o Problema Ambiental dos Detritos Espaciais

Dedico esta dissertação aos meus pais, que, mesmo sem caminhos traçados pelos livros, sonharam meus sonhos como se fossem seus. À minha avó Francisca, que, mesmo no silêncio das letras, me ensinou com a sabedoria do coração. Em memória do meu avô Miguel, cuja ausência ecoa, mas cuja força ainda me sustenta. E ao meu irmão Eduardo Felipe, cuja lembrança habita meus dias e me move nas horas mais difíceis. Esta conquista carrega o peso doce da saudade, o alento do amor e a firmeza da resistência.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por Sua presença constante em minha vida, por me conceder força nos momentos de fraqueza, serenidade nas tempestades e um propósito firme que me guiou até aqui.

Aos meus pais, minha origem e meu alicerce, expresso minha eterna gratidão. Pelo amor incondicional, pela base sólida construída com esforço e integridade e pela crença inabalável de que a educação é um instrumento de transformação.

Aos meus irmãos Valdez, Pedro Henrique, Jefferson e, com profundo amor, à memória de Eduardo, minha mais sincera gratidão. Obrigada por cada palavra de incentivo, por estarem comigo mesmo nos momentos de silêncio, por acreditarem em mim e me reconhecerem como exemplo. Eduardo, sua ausência nunca apagará a luz da sua existência em minha vida, sua memória é força e inspiração constantes. Este trabalho é também por você, com amor e saudade que permanecem eternos.

Aos meus avós, Francisca Alves de Albuquerque e Miguel Monteiro da Silva, que embora não tenham tido oportunidade de estudar, foram meus primeiros professores. Na simplicidade do campo, com mãos calejadas e rostos marcados pelo sol, ensinaram-me o valor do trabalho, da honestidade e da esperança. Com eles aprendi que, mesmo os sonhos mais altos, podem florescer no chão duro da realidade. Esta conquista carrega o suor, a luta e o amor que deles herdei.

À Professora Doutora Michele Cristina Silva Melo, minha orientadora, agradeço pela dedicação generosa, paciência incansável e sensibilidade acadêmica. Sua condução firme, ética e inspiradora foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho com profundidade e autonomia. Tê-la como orientadora foi um privilégio.

Às amigas do ambiente corporativo Francisca, Gabriela, Wallerya, Andreia, Rosiane, Silmara, Edileia, Michelly, Kamilla, Tânia e Riany, agradeço por acreditarem em minha capacidade e por me fortalecerem com amizade e apoio sincero.

Aos colegas da universidade, Gabriel Frazão e Mel, sou grata pelo apoio, pelas lágrimas divididas e pelas risadas que tornaram esta caminhada mais leve.

Aos servidores da Agência Espacial Brasileira, que sempre me incentivaram e apoiaram Lúcia Helena, Renata Ribeiro, Thaís Pedrosa, Renata Oliveira, Danilo Sakay, Simonny, Amélia meu sincero agradecimento.

À equipe da Assessoria de Cooperação Internacional, minha sincera gratidão pelo apoio constante, pelas palavras encorajadoras e pela compreensão ao longo dessa jornada. Agradeço, em especial, à Maria Catto, minha irmã de coração e parceira de trabalho, que mostrou na prática o verdadeiro significado de “mulher apoia mulher”. Seu profissionalismo, força e solidariedade foram fundamentais para que eu pudesse avançar e concluir esta dissertação. Obrigada por segurar minha mão com carinho e firmeza, por me apoiar nos momentos difíceis e por ser uma inspiração diária de coragem e parceria. Essa conquista também é sua.

Ao meu grande amigo, Péricles Cardim, registro minha mais profunda gratidão por seu apoio constante, sua orientação generosa e, sobretudo, por acreditar no meu potencial mesmo quando eu duvidei de mim. Sua confiança no meu trabalho e no meu profissionalismo foi farol em tempos difíceis e combustível nos momentos de superação.

Ao meu companheiro de vida, agradeço por me acolher nos momentos de desespero e por permanecer ao meu lado mesmo nos dias mais difíceis. Sua presença foi refúgio e força.

Às minhas companheiras de quatro patas, Bella e Lollyta, que, com amor silencioso, me acompanharam em tantas noites solitárias de escrita e estudo.

Por fim, agradeço à Agência Espacial Brasileira, pela oportunidade de crescimento profissional e humano ao longo desses anos, e à Universidade de Brasília (UnB), pela excelência acadêmica, pelo acolhimento e por me proporcionar um espaço de formação crítica e transformadora.

A todos, meu mais profundo e sincero agradecimento.

**Uma Perspectiva da Economia Circular para o Problema Ambiental dos Detritos Espaciais**

**ALEXANDRA BORGES DA SILVA**

**DISSERTAÇÃO DE TESE APROVADA DA EM: \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Michele Cristina Silva Melo  
Professora Orientadora

---

Prof. Dr. Danilo Sakay  
Professor- Examinador Externo

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Andrea Fellipe Cabello  
Examinador-Interno – FACE/UnB

Brasília -DF  
2025

## RESUMO

Considerando o aumento expressivo das atividades espaciais e a consequente intensificação da problemática dos detritos orbitais, esta dissertação propõe analisar a aplicação dos princípios da economia circular como estratégia inovadora para a gestão sustentável dos resíduos espaciais. O estudo parte da hipótese de que a adoção de práticas circulares pode contribuir significativamente para a preservação do ambiente orbital, mitigando riscos e promovendo o uso racional dos recursos no espaço. Para tanto, foram examinados os fundamentos da economia circular, a evolução jurídica da exploração espacial, o contexto histórico dos detritos espaciais, bem como iniciativas nacionais e internacionais voltadas à sustentabilidade no setor espacial. A análise evidenciou que a economia circular apresenta potencial para redefinir práticas tradicionais no ambiente orbital, por meio da reutilização, recuperação e regeneração de materiais espaciais. O estudo conclui que, embora a economia circular represente uma estratégia promissora para enfrentar a crescente crise dos detritos orbitais e promover a sustentabilidade das atividades espaciais, sua aplicação no setor espacial ainda é incipiente.

**Palavras-chave:** Economia Circular, Detritos Espaciais, Sustentabilidade Orbital, Direito Espacial, Inovação Tecnológica.

## ABSTRACT

Considering the significant increase in space activities and the consequent intensification of the orbital debris issue, this dissertation proposes to analyze the application of circular economy principles as an innovative strategy for the sustainable management of space waste. The study is based on the hypothesis that the adoption of circular practices can significantly contribute to the preservation of the orbital environment by mitigating risks and promoting the rational use of resources in space. To this end, the fundamentals of the circular economy, the legal evolution of space exploration, the historical context of space debris, as well as national and international initiatives aimed at sustainability in the space sector were examined. The analysis revealed that the circular economy has the potential to redefine traditional practices in the orbital environment through the reuse, recovery, and regeneration of space materials. The study concludes that, although the circular economy represents a promising strategy to address the growing orbital debris crisis and promote the sustainability of space activities, its application in the space sector is still incipient.

**Keywords:** Circular Economy, Space Debris, Orbital Sustainability, Space Law, Technological Innovation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

**Figura 01** – Representação esquemática das camadas da atmosfera terrestre e dos fenômenos de airglow.

**Figura 02** – Vista da atmosfera terrestre a partir da Estação Espacial Internacional (ISS).  
Fonte: NASA (2025).

**Figura 03**- Economia Linear

**Figura 04** – O diagrama da borboleta: visualizando a economia.

**Figura 05** – Transição para uma Economia Circular no Espaço até o ano de 2050.

**Figura 06** – Sistema de circuito fechado avançado da ESA.

**Figura 07** – Teste de captura de detritos espaciais utilizando rede de contenção.

**Figura 08** – Detecção de detritos espaciais em órbita por sensores ópticos.

**Figura 09** – Técnica de captura de detritos utilizando braço robótico em órbita.

**Figura 10**– Experimento de captura de detritos com mecanismos de acoplamento em ambiente simulado.

**Figura 11**- Veículo Ativo de Remoção de Entulhos

## **LISTA DE TABELA**

Tabela 01- Comparaçao entre Economia Linear e Economia Circular

Tabela 02- Iniciativas Circulares no Setor Espacial

Tabela 03- Projetos de Remoção de Detritos Espaciais, Custos Estimados

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**AEB** – Agência Espacial Brasileira

**ACLS** – Advanced Closed Loop System

**ADR** – Active Debris Removal

**APC** – Australian Packaging Covenant

**COPUOS** – Comitê de Utilização Pacífica do Espaço Exterior

**DAC** – Direct Air Capture

**DEI** – Direito Espacial Internacional

**EMF** – Fundação Ellen MacArthur

**ENEC** – Estratégia Nacional de Economia Circular

**ELSA-D** - End-of-Life Services by Astroscale—demonstration

**GEO** – Geosynchronous Earth Orbit

**HEO** – High Earth Orbit

**ISS** – Estação Espacial Internacional

**LEO** – Low Earth Orbit

**MEO** – Medium Earth Orbit

**ONU** – Organização das Nações Unidas

**ODS** – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

**OOS** – On-Orbit Servicing

**OMAR** – On-Orbit Manufacture, Assembly and Recycling

**PROGRESS** – The German Resource Efficiency Programme

**RAFTI** – Rapidly Attachable Fluid Transfer Interface

**SSA** – Agência Espacial Europeia

**UNCOPUOS** – Comitê das Nações Unidas para o Uso Pacífico do Espaço

**UNOOSA** – Escritório das Nações Unidas para Assuntos do Espaço Exterior

**VANG** – Waste To Resource Programme

**WISP** – Western Cape Industrial Symbiosis Programme

## SUMÁRIO

Introdução.....	14
<b>CAPÍTULO 1. O ESPAÇO EXTERIOR: DESAFIOS JURÍDICOS .....</b>	17
1.1 O Espaço Exterior.....	17
1.2 Linha de Kármán: Definição do Início do Espaço Aéreo e a Posição do Brasil sobre o Tema.....	18
1.3 A Evolução do Direito Internacional no Espaço: Desafios Jurídicos e Técnicos da Exploração Espacial.....	21
1.4 Ausência de Definição Legal sobre a Fronteira entre o Espaço Aéreo e o Espaço Exterior.....	23
<b>CAPÍTULO 2. DETRITOS ESPACIAIS: CONTEXTO E DESAFIOS.....</b>	26
2.1Definição e Classificação dos Detritos Espaciais e Órbitas Terrestres.....	26
2.2 Lixo Espacial: Uma Ameaça Crescente à Segurança Das Missões Espaciais E Satélites Operacionais .....	28
2.3 Avanços Tecnológicos Na Mitigação E Remoção Ativa De Detritos Espaciais .....	29
<b>CAPÍTULO 3. ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR ESPACIAL.....</b>	28
3.1 Princípios Fundamentais da Economia Linear e da Economia Circular.....	32
3.1.1 Economia Linear.....	32
3.2 Definição de Economia Circular e seus Princípios Fundamentais.....	34
3.3 Rumo à Economia Circular: Estratégias Globais e Perspectivas para o Brasil.....	38
<b>CAPÍTULO 4. INICIATIVAS DE ECONOMIA CIRCULAR NO ESPAÇO.....</b>	42
4.1 A Estratégia Europeia de Economia Circular no Setor Espacial: Parceria entre a ESA e a Airbus.....	42
4.2 O Projeto RemoveDEBRIS: Um Estudo de Caso em Remoção Ativa de Detritos Espaciais.....	46
4.3Projeto Active Debris Removal Vehicle (ADRV).....	50
4.4 Outras iniciativas e o cenário brasileiro.....	52

4.5 Perspectivas para a economia circular no setor espacial.....	56
<b>Conclusão .....</b>	<b>61</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>65</b>

## INTRODUÇÃO

Esta dissertação parte da hipótese de que a adoção de práticas de economia circular na gestão de detritos espaciais pode contribuir significativamente para a sustentabilidade do ambiente orbital, mitigando os riscos associados à crescente quantidade de resíduos em órbita e promovendo uma abordagem mais eficiente e responsável na exploração do espaço.

O estudo sobre este tema teve início com a pesquisa intitulada "*Uma Perspectiva da Economia Circular para o Problema Ambiental dos Detritos Espaciais*", de minha autoria, que foi incluída no livro "*Espaço Exterior: Aspectos Jurídicos e Políticos*", publicado pela Universidade da Força Aérea (UNIFA).<sup>1</sup> A partir dessa análise, busco aprofundar as discussões sobre a viabilidade e os impactos da aplicação dos princípios da economia circular no setor espacial, especificamente no contexto da gestão e mitigação dos detritos espaciais.

A crescente intensificação das atividades espaciais nas últimas décadas, impulsionada tanto por iniciativas governamentais quanto por empresas privadas, tem ampliado significativamente a presença humana no espaço exterior. Contudo, essa expansão não ocorreu sem consequências. Entre os efeitos colaterais mais preocupantes está o aumento exponencial da quantidade de detritos espaciais em órbita terrestre, compostos por satélites inoperantes, partes de foguetes e fragmentos de colisões anteriores (ESA, 2025).

Segundo estimativas da Agência Espacial Europeia (ESA), existem mais de 1,2 milhão de fragmentos com mais de 1 cm em órbita, representando uma ameaça direta à segurança das operações espaciais, à integridade de satélites ativos e, de forma mais ampla, à sustentabilidade do ambiente espacial (LIVESCIENCE, 2025).

A ESA alerta ainda que, mesmo com a interrupção imediata de novos lançamentos, a quantidade de detritos continuaria a aumentar devido a colisões e fragmentações de objetos já existentes, o que pode tornar regiões inteiras da órbita inutilizáveis (ESA, 2025). Diante desse cenário, torna-se urgente a adoção de novas abordagens capazes de mitigar os riscos associados aos detritos espaciais e de promover o uso racional e responsável dos recursos no espaço.

É nesse contexto que a economia circular desponta como uma alternativa inovadora e promissora. Ao contrário do modelo linear tradicional de produção e descarte, a economia

---

<sup>1</sup> *Uma Perspectiva da Economia Circular para o Problema Ambiental dos Detritos Espaciais*, de autoria dessa subscritora, incluído no livro "*Espaço Exterior: Aspectos Jurídicos e Políticos*", publicado pela Universidade da Força Aérea (UNIFA).

[https://www2.fab.mil.br/bibliotecaunifa/images/Biblioteca/livrosdigitais/espaco\\_exterior.pdf](https://www2.fab.mil.br/bibliotecaunifa/images/Biblioteca/livrosdigitais/espaco_exterior.pdf)

circular baseia-se em princípios como redução, reutilização, reaproveitamento e regeneração de recursos (EMF, 2019). Sua aplicação na gestão de detritos espaciais oferece não apenas a possibilidade de minimizar a geração de resíduos, mas também de reintroduzir materiais e tecnologias no ciclo produtivo, otimizando custos e reduzindo os impactos ambientais e operacionais. Um estudo recente estimou que o valor monetário total dos detritos em órbita pode chegar a US\$ 1,2 trilhão, com potencial para reaproveitamento de até 19.124 toneladas de material um claro indicativo do valor econômico associado à circularidade no espaço (Oliveira et al., 2022).

Esta dissertação parte da hipótese de que a adoção de práticas de economia circular na gestão de detritos espaciais pode contribuir significativamente para a sustentabilidade do ambiente orbital, mitigando os riscos associados à crescente quantidade de resíduos em órbita e promovendo uma abordagem mais eficiente e responsável na exploração do espaço. Para tanto, estabelece-se como objetivo geral analisar os fundamentos e aplicações da economia circular no setor espacial, com ênfase na gestão de detritos e na implementação de projetos existentes, de modo a verificar a viabilidade e os benefícios da implementação de estratégias circulares nesse contexto.

Ao final, espera-se que este estudo contribua para o avanço do debate sobre a sustentabilidade no espaço, oferecendo subsídios teóricos e práticos que favoreçam a adoção de soluções circulares voltadas à mitigação dos impactos causados pelos detritos espaciais.

## **HIPÓTESE (S)**

A adoção de práticas de economia circular na gestão de detritos espaciais pode contribuir significativamente para a sustentabilidade do ambiente espacial, mitigando os riscos associados à crescente quantidade de detritos e promovendo uma abordagem mais responsável e eficiente no uso dos recursos no espaço.

## **OBJETIVO GERAL**

Analisar as iniciativas implementadas de economia circular e os benefícios dessas estratégias na gestão dos detritos espaciais, considerando as implicações jurídicas, ambientais e tecnológicas para a exploração e utilização do espaço exterior.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Apresentar os conceitos de economias circular e linear, contextualizando suas diferenças e implicações
- Identificar fontes de detritos espaciais e tecnologias para mitigação e remoção.
- Analisar os impactos dos detritos nas operações e na sustentabilidade espacial.
- Identificar projetos e tecnologias inovadores baseadas na economia circular

## **MODELO DE PESQUISA:**

O método adotado para este trabalho baseou-se em revisão sistemática da literatura, com pesquisa bibliométrica realizada nos bancos de dados Google Acadêmico, repositório da UnB, Scopus, ScienceDirect e CAPES. Foram utilizadas palavras-chave como “space debris”, “orbital debris”, “space sustainability” e “debris removal technologies” para identificar conceitos, desafios e soluções relacionados aos detritos espaciais.

## CAPÍTULO 1. O ESPAÇO EXTERIOR: DESAFIOS JURÍDICOS E AMBIENTAIS NA EXPLORAÇÃO E GESTÃO DOS DETRITOS ESPACIAIS

O espaço exterior sempre foi um campo de fascínio para a humanidade, tanto pela sua vastidão e mistério quanto pelas possibilidades de exploração e avanço tecnológico. Este capítulo é dedicado a explorar a importância do espaço exterior, suas implicações jurídicas e técnicas, além de abordar o crescente problema dos detritos espaciais e suas consequências para as operações espaciais e o ambiente global.

### 1.1 O ESPAÇO EXTERIOR: DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Segundo a Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP, 2020), o espaço pode ser compreendido como a totalidade da extensão física do universo não ocupada por corpos celestes. Essa região é composta por um vácuo denominado “parcial”, caracterizado por uma densidade extremamente baixa de partículas, nas quais predominam o plasma de hidrogênio e hélio, além de radiação eletromagnética, campos magnéticos, neutrinos, poeira interestelar e raios cósmicos. Estima-se que, em regiões afastadas de astros, a temperatura alcance aproximadamente -270 °C. Essa medida, ligeiramente superior ao zero absoluto (-273,15 °C), deve-se à presença constante da radiação cósmica de fundo em micro-ondas, resquício energético do evento conhecido como Big Bang, que permeia todo o cosmos.<sup>2</sup>

É fundamental examinar como o espaço foi originado para que se possa compreendê-lo adequadamente. De acordo com Steiner (2006, p. 238), o Universo teve sua origem com o Big Bang, momento que marcou o aparecimento dos primeiros elementos cósmicos, como galáxias, buracos negros, sistemas planetários, estrelas e outros corpos celestes. Conforme observa Hawking (2002, p. 24), esses componentes galáxias, estrelas, buracos negros e corpos menores são parte integrante da estrutura natural do cosmos:

É óbvio que o espaço se prolonga indefinidamente, sendo confirmado por instrumentos modernos, como o telescópio Hubble, permitindo-nos sondar as profundidades do espaço. Vemos milhares de milhões de galáxias de diversas formas e tamanhos. Cada galáxia contém incontáveis milhões de estrelas, muitas das quais rodeadas por planetas. Vivemos em um planeta que gira ao redor de uma estrela em um braço exterior da galáxia espiral da Via Láctea. O pó dos braços espirais impede-nos de ver o universo no plano da galáxia, porém, em cada lado destes temos faces cônicas de linhas com boa visibilidade mostrando-nos as posições das galáxias. Achamos que estão uniformemente distribuídas no espaço, com algumas concentrações e vazios locais. A densidade de galáxias decresce a distâncias muito grandes, talvez em virtude de serem tão longínquas e tênues que não as observarmos.

<sup>2</sup> PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE SÃO PAULO. *O espaço sideral*. São Paulo: PUC-SP, [s.d.]. Disponível em: <https://www.pucsp.br/sites/default/files/download/eventos/bisus/d5-espaco.pdf>. Acesso em: 1 maio 2025.

Por isso, sabemos, o universo se prolonga sem fim no espaço.

No entanto, o espaço sideral é muito mais do que um mero vazio. Ele é uma imensa região que se estende além da Terra, indo até as fronteiras do sistema solar e além, incluindo estrelas, planetas, asteroides, cometas e até buracos negros. Essa vasta extensão não está, como muitos imaginam, desprovida de substâncias ou atividade. Embora o espaço tenha um nível de "vazio" com baixa densidade de matéria, ele está repleto de radiação, campos magnéticos, partículas e até mesmo ondas gravitacionais Silva (2010, p. 9-10)

Esta visão sugere que o estudo do espaço sideral deve integrar de forma equilibrada suas dimensões de forma, função, estrutura e processo. Segundo Santos (1985, cap. 4), embora cada uma dessas categorias ofereça uma perspectiva distinta, a sua combinação enriquece a análise, proporcionando um arcabouço teórico robusto para investigar os fenômenos espaciais.

Adicionalmente, o espaço pode ser interpretado como um tecido de interações funções e formas entrelaçadas que refletem dinâmicas históricas e sociais. Nessa linha, Santos (2002, p. 153) observa que “o espaço é, então, um verdadeiro campo de forças cuja aceleração é desigual”, o que explica por que seu desenvolvimento varia conforme o contexto e o tempo.

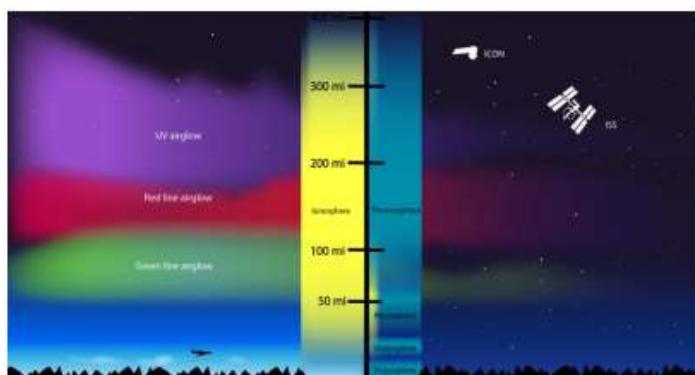
Dessa forma, o espaço sideral deve ser entendido não apenas como um ambiente físico, mas como um conjunto de relações dinâmicas que refletem processos históricos, sociais e naturais. Sua complexidade demanda uma abordagem integrada que considere os elementos estruturais, funcionais e processuais que moldam suas características e relevância. Essa perspectiva holística permite compreender o espaço não apenas como um palco de exploração tecnológica, mas como um campo de interações que conecta o passado, o presente e o futuro da humanidade.

## **1.2 LINHA DE KÁRMÁN: DEFINIÇÃO DO INÍCIO DO ESPAÇO AÉREO E A POSIÇÃO DO BRASIL SOBRE O TEMA**

A Linha de Kármán surgiu a partir da pesquisa de Theodore von Kármán, que, ao estudar as condições necessárias para que uma aeronave mantivesse o voo, determinou que a partir de uma altitude de aproximadamente 100 quilômetros, a densidade da atmosfera se tornava tão baixa que o voo convencional seria inviável.



A atmosfera da Terra da Estação Espacial Internacional. A linha divisória entre a atmosfera e o espaço sideral é chamada de linha de Kármán. Figura 01 (Nasa) Fonte: <https://www.britannica.com/science/atmosphere>



Fonte: NASA's Goddard Space Flight Center/ICON (2017) Figura 02 – Representação das camadas da atmosfera e fenômenos de airglow <https://www.nasa.gov/missions/icon/nasas-icon-explores-the-boundary-between-earth-and-space/>

Conforme ilustrado na Figura 01, as diferentes camadas da atmosfera apresentam variações significativas de densidade e composição, influenciando a definição do espaço exterior. A Figura 02, por sua vez, evidencia visualmente a tênue divisão entre a atmosfera terrestre e o espaço, observada a partir da órbita da Estação Espacial Internacional (ISS).

Nesse contexto, destaca-se a Linha Kármán um traço imaginário que se caracteriza como o espaço da atmosfera terrestre acima de 100 quilômetros, ou aproximadamente 62 milhas da superfície terrestre (CEPIK et al., 2015). De acordo com as imagens fornecidas pela NASA, essa região ultrapassa os limites alcançáveis por aeronaves e outros meios de transporte convencionais, assumindo uma importância central nos estudos contemporâneos, pois nela estão concentrados a maioria dos dispositivos e equipamentos utilizados pela humanidade para fins científicos e tecnológicos.

No contexto internacional, a Linha de Kármán também é amplamente discutida no âmbito do Comitê de Utilização Pacífica do Espaço Exterior (COPUOS) do Escritório das Nações Unidas para Assuntos do Espaço Exterior (UNOOSA). A adoção de uma definição uniforme sobre o início do espaço é vista como um passo crucial para a regulação das atividades

espaciais e a prevenção de potenciais conflitos. Embora haja uma tendência crescente de considerar a Linha de Kármán como a fronteira internacionalmente aceita, ela ainda não foi formalmente reconhecida como um costume internacional consolidado.

Uma das propostas mais fortemente respaldadas para delimitar essa fronteira é a definição que corresponde a uma altitude de 100 quilômetros acima do nível do mar (Lyall & Larsen, 2017). De acordo com essa perspectiva, as atividades realizadas e os objetos posicionados acima dessa linha seriam considerados parte do espaço exterior. Embora alguns países já adotem essa definição em suas leis nacionais (Bittencourt Neto, 2017), ela permanece um ponto de debate teórico, dado o avanço das novas tecnologias e as implicações legais envolvidas. Há, portanto, questionamentos sobre se a Linha de Kármán já alcançou o status de costume internacional, conforme sugerido em questionamentos e decisões do Comitê de Utilização Pacífica do Espaço Exterior (COPUOS) (Ferreira-Snyman, 2021, p. 5).

O Brasil tem acompanhado atentamente o debate em torno da Linha de Kármán e sua relevância no contexto do direito espacial. Por meio da Agência Espacial Brasileira (AEB), o país participa de maneira ativa em fóruns e discussões internacionais, com o objetivo de promover a implementação de práticas que assegurem o uso sustentável e colaborativo do espaço. A AEB orienta suas ações com base nas diretrizes estabelecidas pelo direito internacional, em particular pelo Tratado do Espaço Exterior de 1967, o qual traz diretrizes a exploração do espaço por todos os países. Embora a Linha de Kármán ainda não esteja contemplada de forma uniforme nas legislações nacionais, o Brasil adota uma postura alinhada às orientações internacionais, buscando conciliar avanços tecnológicos com a regulamentação adequada.

Segundo o Escritório das Nações Unidas para Assuntos do Espaço Exterior (2002, p.2):A velocidade dos avanços tecnológicos no espaço e pesquisa aeronáutica indicam que, em futuro próximo, será possível desenvolver uma nave com características similares às de um “objeto aeroespacial”, que poderia ser definido como objeto capaz de voar e realizar atividades tanto no espaço exterior quanto no espaço aéreo. Tendo isso em conta, objetos aeroespaciais devem ser regulados por lei espacial internacional quando estiverem no espaço exterior e pelas leis aeronáuticas internacionais e nacionais, quando estiverem no espaço aéreo. A principal diferença entre os dois regimes é que no Direito Aeronáutico prevalece o princípio da soberania do Estado, enquanto no Direito Espacial isso não ocorre. Para lidar adequadamente com situações decorrentes do desenvolvimento ou uso de objetos aeroespaciais (por exemplo, atividades no espaço aéreo estrangeira), é necessário que a comunidade internacional tome medidas para estabelecer princípios e parâmetros universalmente aceitos, que levem à definição de fronteiras entre os espaços exterior e aéreo.

### **1.3 A EVOLUÇÃO DO DIREITO INTERNACIONAL NO ESPAÇO: DESAFIOS JURÍDICOS E TÉCNICOS DA EXPLORAÇÃO ESPACIAL**

O Direito Espacial Internacional tem evoluído ao longo das décadas, refletindo as mudanças tecnológicas, políticas e as crescentes necessidades de cooperação entre nações na exploração do espaço. Brian Wessel (2012) contribuiu significativamente para a compreensão dessa evolução, segmentando-a em três etapas principais, cada uma marcada por distintos tipos de acordos e tratados.

A primeira etapa, que compreende as décadas de 1960 e 1970, foi crucial para a criação dos marcos iniciais do direito espacial. Durante esse período, estabeleceram-se tratados vinculativos que definiam as bases para a utilização do espaço exterior. O Tratado do Espaço Exterior, de 1967, destaca-se como um dos documentos mais importantes dessa fase, apresentando princípios fundamentais, como a utilização pacífica do espaço, a proibição de armas de destruição em massa em órbita e a responsabilidade dos Estados pelas atividades espaciais. Além disso, o período contou com a assinatura de acordos complementares, como o Acordo de Resgate de 1968 e a Convenção sobre Responsabilidade de 1972, que trataram de aspectos específicos da cooperação e da responsabilidade internacional.

Na segunda fase, que abrange as décadas de 1980 e 1990, a ênfase recaiu sobre a implementação de acordos não vinculativos, principalmente por meio dos Princípios das Nações Unidas para o Espaço Exterior. Estes princípios abordaram questões emergentes, como a transmissão de televisão global, o sensoriamento remoto e a aplicação de energia nuclear no espaço. O conceito de “província da humanidade”, estabelecido no Artigo I do Tratado do Espaço Exterior, foi reforçado, destacando a natureza coletiva da exploração espacial e a necessidade de cooperação internacional.

Esse período também foi marcado por declarações importantes, como o discurso proferido por John F. Kennedy em 1963, durante a 18<sup>a</sup> Assembleia Geral das Nações Unidas. Kennedy afirmou:

"Por resolução desta Assembleia, os membros das Nações Unidas renunciaram a qualquer reivindicação de direitos territoriais no espaço sideral ou sobre os corpos celestes, e declararam que o direito internacional e a Carta das Nações Unidas serão aplicados." (Kennedy, 1963).

Desde então, o cenário espacial passou por significativas transformações, com o crescente envolvimento de mais de 70 nações, incluindo países como China, Japão e Índia, além

dos esforços colaborativos da Agência Espacial Europeia (ESA) (Dawson, 2017). O uso civil de sistemas espaciais também tem se expandido, contribuindo para a relevância crescente do espaço exterior em diversas atividades humanas.

A terceira fase, que se inicia nos anos 2000, é marcada por uma maior complexidade técnica e pela emergência de novas questões, voltadas para a expansão da demanda por serviços e tecnologias espaciais e a exploração privada do setor espacial. Dentre as novas preocupações, tem-se também a gestão de detritos espaciais, justamente pela previsão de aumento das órbitas disponíveis. Embora tenham sido alcançados avanços no sentido de estabelecer um arcabouço normativo internacional mínimo para orientar os Estados na condução responsável de suas atividades espaciais, como a aprovação das Diretrizes de Longo Prazo para a Sustentabilidade das Atividades no Espaço Exterior pela Assembleia Geral das Nações Unidas, tais diretrizes foram elaboradas com o objetivo de promover a sustentabilidade das operações espaciais em seus múltiplos aspectos técnico, ambiental e jurídico por meio da mitigação da geração de detritos, da prevenção de colisões e do fomento à cooperação internacional. A falta de consenso internacional sobre a definição de “espaço sideral” continua a ser um obstáculo para a consolidação do direito espacial. Para o autor Buhr (2012, p. 39-40) assim expõem:

O professor José Monserrat Filho conceitua o Direito Espacial Internacional (DEI) como sendo “o ramo do Direito Internacional Público que regula as atividades dos Estados, de suas empresas públicas e privadas, bem como das organizações internacionais intergovernamentais, na exploração e uso do espaço exterior, e estabelece o regime jurídico do espaço exterior e dos corpos celestes”. Já o professor Haroldo Valadão conceituou o direito interplanetário como sendo o ramo do direito usado “para os problemas jurídicos decorrentes dos lançamentos, da colocação e da circulação dos satélites artificiais, enfim, para as relações jurídicas consequentes à descoberta e utilização do espaço extraterritorial”. Também já visualizava o ilustre professor Valladão que o direito interplanetário poderá ser objeto dum outro direito, do direito intergentes planetárias. Diz o professor que esse novo direito (intergentes planetárias) “irá disciplinar as futuras relações entre os habitantes da Terra e os respectivos grupos humanos como seres e povos encontrados noutros planetas, com os possíveis selenitas, marcianos, etc.

Monserrat Filho e Valladão definem o Direito Espacial Internacional (DEI) como o conjunto de normas que regula tanto as atividades terrestres vinculadas ao espaço quanto as possíveis interações com corpos celestes além da Terra. Valladão, antecipando o futuro das relações interplanetárias, sugeriu o conceito de “direito intergentes planetárias” para lidar com esses desafios. Desse modo, o avanço do DEI depende não só do progresso técnico, mas também da elaboração de acordos multilaterais sólidos, capazes de estabelecer diretrizes claras para as novas fronteiras espaciais. Para consolidar esse campo jurídico, é fundamental a cooperação entre Estados, empresas do setor e organizações internacionais, assegurando uma

exploração espacial responsável e sustentável.

#### **1.4 AUSÊNCIA DE DEFINIÇÃO LEGAL SOBRE A FRONTEIRA ENTRE O ESPAÇO AÉREO E O ESPAÇO EXTERIOR**

Como dito anteriormente, a delimitação do espaço exterior tem sido tema de debate no Comitê das Nações Unidas para o Uso Pacífico do Espaço (UNCOPUOS) por mais de 50 anos, sem que um consenso internacional tenha sido alcançado. A definição de onde começa o espaço exterior permanece indefinida, apesar de propostas como a apresentada pela URSS em 1979, que sugeria uma fronteira prática a 100 km da Terra. Essa ideia, embora amplamente utilizada como referência, não obteve aprovação formal entre os países. O impasse reflete a complexidade do tema e a diversidade de posições sobre a necessidade de estabelecer limites claros para o espaço exterior.

Entre o final da década de 1960 e o início da de 1980, teve início uma nova fase das atividades do COPUOS, caracterizada pela criação de legislações, em um cenário onde os acordos multilaterais ainda eram possíveis. Nesse intervalo, cinco tratados sobre Direito Espacial da ONU foram formulados e implementados (TRONCHETTI, 2013):

- O Tratado do Espaço, de 1967, estabeleceu princípios gerais relacionados às atividades espaciais;
- O Acordo de Salvamento, de 1968, tratava sobre os astronautas, seu retorno à Terra, bem como o retorno de objetos lançados no espaço sideral;
- A Convenção de Responsabilidade, de 1972, tratava da responsabilidade por danos causados por objetos espaciais;
- A Convenção de Registro, de 1976, comentava da questão do registro de objetos espaciais;
- O Acordo da Lua, de 1979, estava focado em questões legais relativas à Lua e outros corpos celestes.

Apesar dos acordos, em diversos temas, assinados por um grande número de países, ainda se nota a ausência de uma definição clara e universalmente aceita para a fronteira entre o espaço aéreo e o espaço exterior, sendo este um dos temas mais complexos do Direito Espacial contemporâneo. Atualmente inexiste um critério objetivo que defina um limite vertical entre o espaço aéreo e o espaço ultraterrestre (BITTENCOURT NETO, 2011, p. 71).

Este debate ganha relevância devido à crescente diversificação das atividades espaciais, como o lançamento de foguetes, a ocupação de órbitas baixas e o turismo espacial. Essa lacuna jurídica gera incertezas que podem dificultar a cooperação internacional e o desenvolvimento de normas reguladoras eficazes. E essas novas atividades tem relação próxima com a ideia de

reaproveitamento dos componentes. A SpaceX é um exemplo clássico, com os motores reutilizáveis, o que diminuiu consideravelmente os custos, mas também permite o reaproveitamento por até 100 vezes dos motores. O turismo espacial também se baseia no conceito de reaproveitamento das aeronaves, como forma de redução de custos.

Inicialmente, a falta de uma definição clara sobre o ponto de transição entre o espaço aéreo e o espaço ultraterrestre foi identificada por WASSENBERGH (ano), que pontua que o interesse público foi o grande responsável pela inclinação na direção da necessidade de limitação vertical da soberania dos Estados. O receio da alteração do equilíbrio na balança de poder corroborou para que o tratado expressamente determine a aplicação do Direito Internacional ao domínio do espaço exterior (WASSENBERGH, 1991 apud BITTENCOURT NETO, 2011, p. 66).

A necessidade de estabelecer, no âmbito internacional, uma delimitação entre o espaço aéreo e o espaço regido pelas normas do Direito Internacional Espacial decorre da própria natureza essencial do Direito Internacional. Como aponta Dallari:

a efetividade da ordem jurídica do Estado pressupõe a existência de uma base geográfica e de um contingente populacional em relação aos quais possa prevalecer soberanamente. (...) Se para o direito como um todo a noção de território é essencial, para o Direito Internacional Público ela se reveste de uma importância destacada, pois são os procedimentos jurídicos com efeitos internacionais que possibilitam ao Estado ter assegurado o reconhecimento de sua jurisdição (DALLARI, 2004 apud BITTENCOURT NETO, 2011, p. 101).

Neste sentido, para que um Estado tenha sua soberania e jurisdição reconhecidas internacionalmente, ele precisa garantir que os procedimentos jurídicos e as normas que regem sua atuação interna também sejam aceitas e respeitadas no cenário global. Isso evidencia a importância de um ordenamento jurídico que, além de garantir a ordem dentro do território, também assegure a participação e o reconhecimento do Estado em uma comunidade internacional que interage por meio de normas jurídicas comuns.

Kelsen enfatiza a relevância da limitação da soberania de um Estado Nacional, argumentando que a restrição ao exercício da jurisdição de um Estado sobre territórios além de suas fronteiras é imposta pelo Direito Internacional, que estabelece normas para o respeito às fronteiras definidas. Nessa perspectiva, não há uma sobreposição da soberania de um Estado sobre a de outro, mas, sim, a observância das normas do Direito Internacional (KELSEN, 2005 apud BITTENCOURT NETO, 2011, p. 129).

Em outras palavras, a soberania de um Estado não é absoluta e deve ser exercida dentro dos limites do que é permitido pelo Direito Internacional. As fronteiras nacionais, nesse contexto, não são apenas uma questão territorial, mas também uma questão de respeito às normas que regulam as relações internacionais e a convivência pacífica entre os Estados.

## CAPÍTULO 2. DETRITOS ESPACIAIS: CONTEXTO E DESAFIOS

Este capítulo apresenta um panorama histórico dos detritos espaciais, sua crescente ameaça à segurança das operações espaciais, a classificação conforme as órbitas e as principais iniciativas internacionais voltadas à mitigação do problema.

### 2.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS DETRITOS ESPACIAIS E ÓRBITAS TERRESTRES

O conceito de lixo tem evoluído ao longo do tempo, e tem apresentado várias conotações tanto no senso comum como no campo científico. Segundo o Novo Dicionário da Língua Portuguesa (2002:01), a definição de lixo de forma geral é:

1. aquilo que se varre da casa, do jardim, da rua, e se joga fora; entulho.
2. P. ext. Tudo o que não presta e se joga fora.
3. Sujidade, sujeira, imundície.
4. Coisa ou coisas inúteis, velhas, sem valor.
5. Restr. Resíduos que resultam de atividades domésticas, industriais, comerciais, etc.

Com base no conceito de lixo geral, pode-se compreender que os detritos espaciais também denominados “lixo espacial” são objetos de origem humana que perderam sua funcionalidade, embora permaneçam em órbita ao redor da Terra (MORENO, 2008).

Nesse sentido, a Lei nº 14.946, de 12 de abril de 2024, ao dispor sobre a Política Nacional de Espaço, define como lixo espacial “qualquer objeto ou componente de origem humana que se encontre no espaço exterior e que não exerça mais nenhuma função útil” (BRASIL, 2024), reforçando o entendimento de que esses materiais, embora fora do ambiente terrestre, integram a problemática ambiental contemporânea.

Segundo a Orbital Debris Research (2002:2), lixo espacial terrestre, ou detrito espacial ou orbital, é qualquer objeto fabricado pelo homem situado sobre a órbita da Terra que não mais possui finalidade ou utilidade. Entendido aqui, aqueles acima dos 100 km, como discutido no capítulo anterior.

Para a NASA (National Aeronautics and Space Administration), o conceito sobre o lixo espacial é estabelecido como:

Os detritos espaciais orbitais, ou simplesmente detritos espaciais, são definidos como objetos feitos pelo homem que estão no espaço e não servem mais a uma finalidade útil, como satélites desativados e peças de espaçonaves. Esses detritos – também conhecidos como ‘lixo espacial’ – persistem acima da atmosfera da Terra por anos até decaírem, desorbitarem, explodirem ou colidirem com outro objeto, criando assim mais detritos. (NASA, 2021, p. 107).

De acordo com a Agência Espacial Europeia (ESA), os resíduos espaciais podem ser classificados em três categorias: carga útil (satélites e fragmentos resultantes de deterioração), foguetes (restos de estágios utilizados para colocar missões em órbita) e objetos relacionados às missões, como ferramentas perdidas. Esses detritos também são categorizados por tamanho: fragmentos menores que 1 cm (estimados em mais de 128 milhões), entre 1 e 10 cm (cerca de 900.000), e maiores que 10 cm, incluindo satélites desativados e ferramentas perdidas. Desde 1961, mais de 560 eventos de fragmentação foram registrados, principalmente devido a explosões causadas por combustíveis residuais (ESA, 2010).

As órbitas ao redor da Terra, nas quais ocorre a maior concentração de detritos espaciais, são classificadas conforme suas características físicas e funções operacionais. Segundo a Agência Espacial Europeia (ESA, 2025), essas órbitas podem ser agrupadas, predominantemente, nos seguintes tipos:

- Órbita Terrestre Baixa (Low Earth Orbit - LEO): apresenta altitude inferior a 2.000 km, e possui a maior quantidade de lixo espacial. A Estação Espacial Internacional está localizada nessa órbita, bem como a maior parte dos satélites meteorológicos, satélites de pesquisa científica, e mais recentemente, constelações de pequenos satélites provedores de internet.
- Órbita Terrestre Média (Medium Earth Orbit - MEO): definida por objetos orbitando entre as órbitas LEO e GEO. Apresenta altitudes entre 2.000 e 35.786 km acima da superfície terrestre. Os satélites que orbitam esse espaço se destinam principalmente à navegação.
- Órbita Terrestre Geossíncrona ou Geoestacionária (Geosynchronous Earth Orbit - GEO): órbita circular com inclinação de 0º (nula) pois passa pelo plano do equador terrestre. Definida por objetos orbitando a Terra a altitudes de 35.786 km, o que equivale a um período orbital de aproximadamente 24 horas, ou seja, o período 49 de rotação da Terra. Para um observador na superfície da Terra, o satélite parece estar parado no céu, por isso essa órbita é muito usada por satélites de telecomunicação.
- Órbita Terrestre Alta (High Earth Orbit - HEO): definida por possuir uma altitude de cerca de 45.000 km e os satélites que a orbitam são principalmente meteorológicos e experimentos científicos. Os satélites presentes nessa órbita atingem uma velocidade média de aproximadamente 29.000 km/h. Órbita de alta

- excentricidade (elíptica), com inclinação de 63º em relação ao equador terrestre.
- Órbita Cemitério: Também conhecida como órbita de refugo ou órbita de descarte. Localizada em torno de 200 Km acima ou abaixo da órbita geoestacionária, ou acerca de 2.000 km a 5.000 Km na órbita LEO. É o local destinado aos satélites quando não são mais funcionais, para minimizar a probabilidade de colisão de detritos com naves espaciais ou satélites operacionais, gerando ainda mais detritos. Apesar da maioria dos operadores de satélites tentarem efetuar a transferência para a órbita cemitério ao final da vida útil, apenas um terço deles consegue sucesso na manobra (ESA, 2013).
  - Órbita Polar: Está classificada como órbita de baixa altitude, com inclinação aproximadamente de 90º em relação ao equador, onde os satélites passam acima dos polos norte e sul da Terra, em cada revolução. Os satélites que a orbitam são voltados para o mapeamento geográfico, científico e o sensoriamento remoto

## **2.2 LIXO ESPACIAL: UMA AMEAÇA CRESCENTE À SEGURANÇA DAS MISSÕES ESPACIAIS E SATÉLITES OPERACIONAIS**

O primeiro lixo espacial foi um pedaço do foguete 8K71PS que transportou o Sputnik-1, o primeiro satélite artificial da Terra. Desde então, o acúmulo de detritos espaciais cresceu exponencialmente. Acontecimentos como a explosão do satélite russo Kosmos 1813 (gerando aproximadamente 850 fragmentos) e a colisão do satélite Kosmos 2251 com o Iridium 33 evidenciam os perigos associados a estes fragmentos, que podem pôr em causa missões espaciais e satélites operacionais (ESA, 2010).

Esses episódios isolados, quando analisados em conjunto, revelam uma ameaça sistêmica ainda mais preocupante: a possibilidade de um efeito em cadeia causado pelas colisões entre objetos em órbita. Esse cenário foi previsto pelo cientista da NASA Donald Kessler, em 1978, ao propor a chamada Síndrome de Kessler. Segundo ele, colisões sucessivas entre detritos espaciais e satélites funcionais poderiam gerar fragmentos que aumentariam a probabilidade de novos impactos, criando um ciclo contínuo e descontrolado de destruição. Este fenômeno não é apenas teórico: eventos como a colisão entre o Iridium 33 e o Kosmos-2251 demonstram o risco concreto de um ambiente orbital insustentável.

Além desses exemplos mais recentes, há registros históricos de objetos que permanecem em órbita por décadas. Um caso emblemático é o do satélite Pioneer 1, da América do Norte, lançado em 1958. Embora o satélite tenha sido desativado após seis anos de operação, ele permanece em órbita e é o exemplo mais antigo de lixo espacial ainda em circulação (AEB, 2010).

Sobre os perigos que os detritos espaciais podem gerar, tem-se o exemplo ocorrido em 1983, quando as janelas do ônibus espacial Challenger foram danificadas por minúsculas lascas de tinta que haviam saído do foguete (NOGUEIRA, 2005). Ou seja, independente do tamanho, os detritos espaciais têm capacidade de gerar grandes prejuízos.

Entre 1999 e 2008, a Estação Espacial Internacional (ISS) realizou oito exercícios para evitar colisões, destacando a escala do problema (NASA, 2010). Em novembro de 2008, um incidente particularmente grave forçou a tripulação da Estação Espacial Internacional a se abrigar em uma cápsula Soyuz devido à aproximação de destroços do motor de um satélite Cosmos, mais especificamente detritos associados ao foguete russo Cosmos 2421 (SPACEFACTS, 2010).

Com todos os exemplos citados anteriormente, a problemática do lixo espacial ganhou corpo de tal forma que o assunto foi destaque na Assembleia Geral das Nações Unidas, no ano de 1992. A partir do ano seguinte o tema passou a ser discutido pelo COPUOS (Comitê das Nações Unidas para o Uso Pacífico do Espaço Exterior (MORENO, 2008).

Como resultado das discussões, em 2007, ocorreu a publicação das Diretrizes para a Redução dos Dejetos Espaciais, emitida pelo Comitê Técnico-Científico do COPUOS (MONSERRAT FILHO, 2008, apud MORENO, 2008). Porém, o documento não possui caráter impositivo, sendo tão-somente um conjunto de recomendações aos Estados e organizações intergovernamentais que atuam no setor espacial (MORENO, 2008). Isso já reflete o novo momento mundial e as dificuldades de se estabelecer cooperações multilaterais.

## **2.3 AVANÇOS TECNOLÓGICOS NA MITIGAÇÃO E REMOÇÃO ATIVA DE DETRITOS ESPACIAIS**

A crescente intensificação das atividades espaciais nas últimas décadas tem contribuído para o acúmulo significativo de detritos orbitais, representando um dos maiores desafios à sustentabilidade do ambiente espacial. Contudo, diversas empresas privadas têm trabalhado em

soluções inovadoras para diminuir os impactos ambientais.

Nesse contexto, entre os projetos mais notáveis, destaca-se a empresa japonesa Astroscale, que, em 2021, lançou a missão ELSA-d (*End-of-Life Services by Astroscale-demonstration*), considerada a primeira demonstração comercial de captura de detritos orbitais por meio de tecnologia magnética. A missão foi composta por dois satélites: um *servicer*, projetado para remover detritos da órbita com segurança, e um *cliente*, que simulava um objeto inativo. Ambos foram lançados acoplados a partir do Cosmódromo de Baikonur, no Cazaquistão, em uma órbita de 550 km de altitude, em março de 2021. A primeira demonstração, na qual o *servicer* liberou o *cliente* e realizou manualmente o acoplamento magnético, foi concluída em 25 de agosto de 2021, validando com êxito o sistema de captura, os sensores e as câmeras de bordo (ASTROSCALE, 2021).

De forma semelhante, a Agência Espacial Europeia (ESA) vem liderando, em colaboração com a startup suíça ClearSpace, a missão ClearSpace-1, com lançamento previsto para 2026. O objetivo do projeto é remover um adaptador de carga útil deixado em órbita desde 2013, utilizando braços robóticos para capturar o objeto e direcioná-lo à reentrada atmosférica controlada (ESA, 2023). A ClearSpace-1 representa não apenas uma inovação tecnológica, mas também um passo significativo rumo à institucionalização de missões comerciais de limpeza orbital, que poderão, no futuro, ser contratadas por operadores públicos e privados (ClearSpace, 2023).

Além dessas iniciativas, empresas como Northrop Grumman e Momentus Space têm explorado tecnologias voltadas ao serviço em órbita (On-Orbit Servicing – OOS), com potencial de adaptação para operações de ADR. A missão MEV (Mission Extension Vehicle), da Northrop Grumman, demonstrou a capacidade de acoplar-se a satélites geoestacionários com o propósito de estender sua vida útil (Northrop Grumman, 2020). Embora inicialmente não voltada à remoção de detritos, essa tecnologia pode ser estrategicamente redirecionada para a estabilização e desorbitamento seguro de objetos não operacionais (Weeden et al., 2022). Já a Momentus Space investe no uso de propulsão à base de vapor d'água, oferecendo uma alternativa ambientalmente mais sustentável e eficiente para manobras de reentrada de detritos (Momentus, 2021).

A Altius Space Machines, subsidiária da Voyager Space com sede nos Estados Unidos, é uma dessas empresas. Sua especialização está no desenvolvimento de tecnologias de

acoplamento magnético e braços robóticos voltados à captura e manutenção de objetos espaciais. Produtos como o *DogTag* e o *MagTag* foram concebidos para permitir operações mais seguras e eficientes de captura em órbita, contribuindo diretamente para estratégias de mitigação de detritos espaciais (Altius Space Machines, 2023).

Outra iniciativa notável é a da Orbit Fab, também dos Estados Unidos, que busca construir uma infraestrutura de reabastecimento em órbita com o objetivo de prolongar a vida útil de satélites e, consequentemente, reduzir a necessidade de substituições e o acúmulo de lixo espacial. Seu sistema RAFTI (*Rapidly Attachable Fluid Transfer Interface*) permite a transferência de propelente entre veículos em ambiente orbital. A empresa prevê iniciar, até 2025, a entrega de hidrazina em órbita geoestacionária, o que representa um passo importante na viabilização de operações sustentáveis de longo prazo no espaço (Orbit Fab, 2024).

Na Europa, destaca-se a empresa escocesa Skyrora, que vem desenvolvendo veículos lançadores reutilizáveis com combustíveis ecológicos. Seu principal produto, o Skyrora XL, é projetado para lançamentos sob demanda e pode contribuir para a redução de resíduos espaciais ao permitir maior controle sobre órbitas e inserções precisas. A empresa adota práticas sustentáveis desde o projeto até a operação de seus lançadores, alinhando inovação tecnológica com responsabilidade ambiental (Skyrora, 2023).

No campo do rastreamento e gerenciamento de tráfego orbital, a empresa americana LeoLabs desenvolveu uma rede global de radares que monitora constantemente objetos em órbita baixa da Terra. Por meio de dados de alta precisão e atualizações frequentes, a empresa oferece alertas de conjunção e suporte à tomada de decisão por parte de operadores de satélites e entidades públicas, sendo uma peça-chave para a prevenção de colisões e a coordenação de missões de Remoção Ativa de Detritos (LeoLabs, 2023).

A Astroscale U.S. Inc., filial americana da japonesa Astroscale, também desempenha papel relevante nesse ecossistema. Atuando em parceria com governos como os dos Estados Unidos, Reino Unido e França, a empresa participa de missões voltadas à captura e desorbitação de satélites desativados. Com foco na demonstração de tecnologias de serviço em órbita, essa atuação reforça a importância da colaboração internacional para a preservação do ambiente espacial (Astroscale U.S., 2023).

Embora a problemática do lixo espacial já tenha sido amplamente discutida no âmbito

internacional, ela ainda carece de maior atenção nas agendas ecológicas globais (SOBREIRA, 2005). A mitigação desse desafio exige a implementação de políticas eficazes, o desenvolvimento de tecnologias de remoção de detritos e a conscientização sobre a sustentabilidade no espaço, assegurando a continuidade das atividades espaciais para as gerações futuras.

## CAPÍTULO 3. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DA ECONOMIA LINEAR E CIRCULAR

Este capítulo apresenta os fundamentos da economia circular, abordando sua evolução histórica, principais conceitos e diferentes interpretações ao longo do tempo. Serão analisadas estratégias adotadas por diversos países e o funcionamento sistêmico desse modelo, baseado em ciclos fechados de materiais, ecodesign e regeneração ambiental.

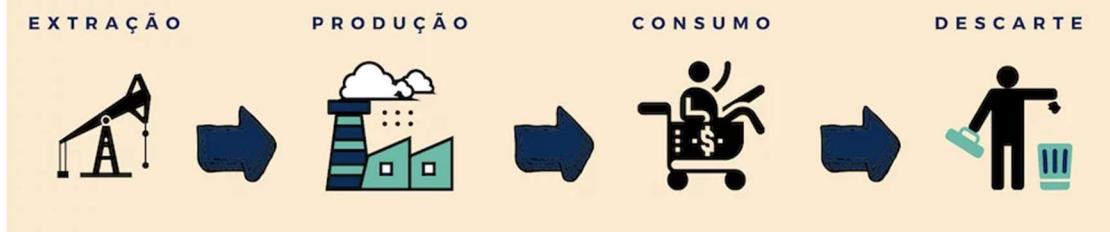
### 3.1 ECONOMIA LINEAR:

O modelo econômico linear, cuja lógica de operação baseia-se nas etapas de extrair, produzir, consumir e descartar, consolidou-se a partir da Revolução Industrial, quando o avanço técnico permitiu uma exploração intensiva dos recursos naturais em prol do crescimento econômico (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013). Esse modelo foi intensificado no pós-Segunda Guerra Mundial, período em que o consumo de massa passou a ser promovido como um vetor essencial para a reconstrução e expansão das economias industriais (FUNDAÇÃO PERSEU ABRAMO, 2014). A visão predominante era de que os recursos naturais eram abundantes e descartáveis, o que sustentou por décadas a lógica linear de crescimento ilimitado (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013).

A crítica à linearidade produtiva é reforçada pelo “*Relatório dos Limites do Crescimento*”, de Meadows et al. (1972), o qual, por meio de modelos sistêmicos, demonstrou que o crescimento exponencial da produção e do consumo é incompatível com a capacidade finita do planeta. Esse estudo foi fundamental para a emergência de uma consciência global sobre os riscos do esgotamento dos recursos e da insustentabilidade ambiental do modelo vigente.

A Figura 03 ilustra a estrutura linear desse sistema e evidencia a urgência da transição para modelos mais circulares, que sejam capazes de manter os recursos em uso pelo maior tempo possível e substituir o descarte por estratégias de reutilização, reuso e reciclagem (GMCLOG, 2023).

# ECONOMIA LINEAR



(Figura 03) GMCLOG. Economia linear x circular: diferenças e impactos ao meio ambiente. 27 fev. 2023. Disponível em: <https://gmclog.com.br/2023/02/27/economia-linear-x-circular-diferenças-e-impactos-ao-meo-ambiente/>.

Em 2014, o relatório *Circular Advantage*<sup>3</sup> (em português, *Vantagem Circular*), publicado pela consultoria Accenture, aprofundou esse debate ao questionar a viabilidade do modelo linear e apresentar casos de empresas que conquistaram vantagens competitivas a partir da adoção de modelos de negócios baseados na Economia Circular (ACCENTURE STRATEGY, 2014). O estudo também evidenciou quatro principais externalidades negativas associadas ao sistema linear: (i) o custo social do descarte de materiais e da perda de energia; (ii) a redução dos valores marginais na extração de recursos naturais; (iii) a intoxicação de ecossistemas; e (iv) os impactos climáticos globais. Como esses fatores não são refletidos nos preços de mercado, o modelo linear persiste, apesar de seus efeitos adversos.

No contexto brasileiro, a Ellen MacArthur Foundation (2017) observa que o aumento do consumo intensificou a linearidade do setor produtivo. Apenas em 2012, foram inseridas no mercado nacional 24,2 milhões de toneladas de equipamentos eletrônicos, que resultaram em 1,4 milhão de toneladas de lixo eletrônico o equivalente a cerca de 7 kg por habitante. Desse montante, somente 2% foi reprocessado ou reintegrado ao ciclo produtivo, sendo que, mesmo dentro dessa fração, a maior parte dos materiais de maior valor agregado foi destinada ao mercado externo, enquanto o mercado interno recebeu majoritariamente resíduos de baixo valor, como os plásticos (GONÇALVES; BARROSO, 2019).

Diante da projeção de que a população mundial poderá ultrapassar 10 bilhões de pessoas nas próximas décadas (FGVCES, 2017), torna-se cada vez mais evidente que a manutenção do modelo linear é insustentável. A transição para a Economia Circular surge, portanto, como um caminho necessário para garantir a sustentabilidade econômica, social e

<sup>3</sup> Relatório: Accenture Strategy, Circular Advantage: Innovative Business Models and Technologies to Create Value in a World without Limits to Growth, 2014.

ambiental no longo prazo.

### **3.2 DEFINIÇÃO DE ECONOMIA CIRCULAR E SEUS PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS**

Uma das principais referências quando se fala em economia circular é a da Fundação Ellen MacArthur (2019). Segundo a organização, a definição desse conceito é:

Uma economia circular é uma abordagem sistêmica ao desenvolvimento econômico projetada para beneficiar empresas, a sociedade e o meio ambiente. Em contraste com o modelo linear "pegar-fazer-descartar", uma economia circular é regenerativa por design e visa gradualmente desacoplar o crescimento do consumo de recursos finitos.

A economia circular é um conceito que vem ganhando relevância ao longo das últimas décadas, sendo apontada como uma alternativa ao modelo econômico linear tradicional, caracterizado pela lógica de extração, produção e descarte. Pearce e Turner (1990) foram os primeiros a formalizar o termo, destacando a ausência de mecanismos internos de reciclagem na economia convencional, o que resultava no uso indiscriminado dos recursos naturais e na transformação do meio ambiente em um repositório de resíduos (ANDERSEN, 2007; SU et al., 2013).

Em 1966, o economista Kenneth E. Boulding, em seu ensaio *“The Economics of the Coming Spaceship Earth”*, defendeu a adoção de um modelo baseado em ciclos de retroalimentação. Nesse modelo, os recursos utilizados seriam reintegrados ao sistema produtivo por meio de processos regenerativos, minimizando a extração de matéria-prima e os impactos ambientais (GEISSDOERFER et al., 2017).

Com o passar do tempo, a proposta de Boulding foi sendo complementada por diversos pesquisadores, até que a economia circular se consolidou como conceito estruturado. Murray, Skene e Haynes (2017) destacam que, apesar das múltiplas interpretações do termo, todas partem da premissa de que os sistemas econômicos devem operar em ciclos fechados. Isso significa que, ao invés de os produtos atingirem o fim de sua vida útil e serem descartados, eles devem ser reaproveitados, remanufaturados ou reciclados, reduzindo significativamente a geração de resíduos.

A partir de uma análise da literatura e das opiniões de especialistas consultados, Nobre e Tavares (2021) destacam que existem diversos conceitos associados à definição de economia circular, sendo alguns mais simples e essenciais, enquanto outros são mais elaborados. Muitos desses conceitos relacionados são semelhantes aos identificados por Mahanty et al. (2021). Por fim, os autores apresentam uma proposta de definição para a economia circular:

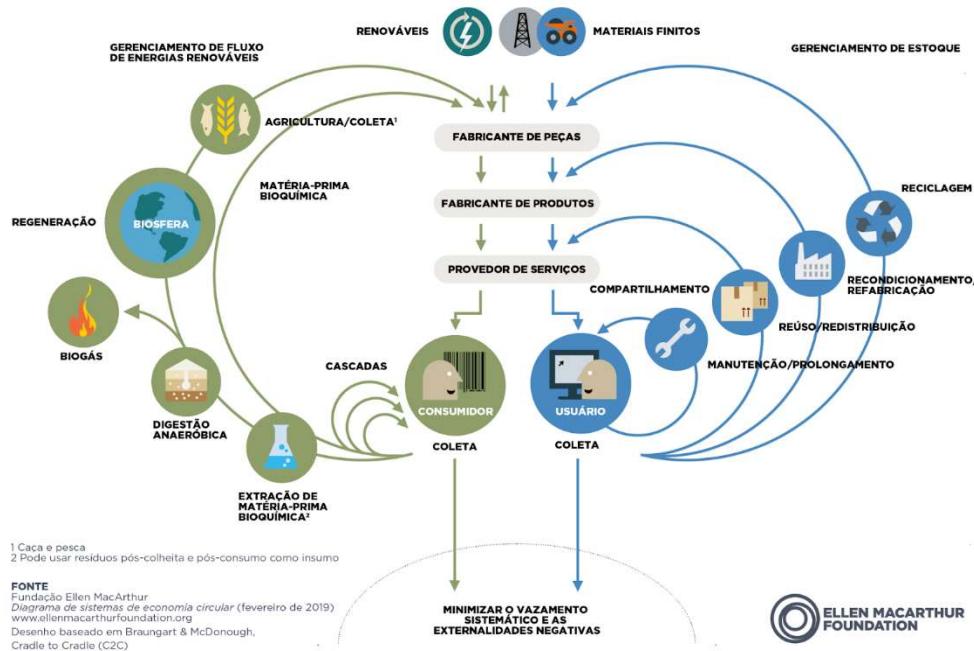
Circular Economy is an economic system that targets zero waste and pollution throughout materials lifecycles, from environment extraction to industrial transformation, and to final consumers, applying to all involved ecosystems. Upon its lifetime end, materials return to either an industrial process or, in case of a treated organic residual, safely back to the environment as in a natural regenerating cycle. It operates creating value at the macro, meso and micro levels and exploits to the fullest the sustainability nested concept. Used energy sources are clean and renewable. Resources use and consumption are efficient. Government agencies and responsible consumers play an active role ensuring correct system long-term operation. (NOBRE; TAVARES, 2021, p. 10).

Entretanto Geng e Doberstein (2008), apontam que a economia circular está fortemente associada à Ecologia Industrial, uma vertente que promove a coexistência entre crescimento econômico e conservação ambiental.

Para os economistas, David Pearce e R. Kelly Turner, a economia circular consiste em um sistema fechado propondo que o sistema aberto pode e deve ser convertido para um sistema circular, quando se considera a relação entre o uso de recursos e resíduos, de forma que o sistema circular passa a ser visto como um pré-requisito para a manutenção da sustentabilidade no planeta (GHISELLINI; CIALANI; ULCIATI, 2016).

De acordo com a Fundação Ellen MacArthur (EMF), a economia circular representa uma abordagem sistêmica para o desenvolvimento econômico, que se contrapõe ao modelo linear de “extrair-produzir-desperdiçar”. Sob essa ótica, defende-se a construção de uma economia regenerativa e restaurativa desde o princípio, dissociando a atividade econômica do consumo de recursos naturais finitos (EMF, 2017).

Neste sentido, a EMF (2013) discorre sobre os três princípios que são fundamentais para adequação dos sistemas pautados na EC: a não geração de resíduos para evitar o desperdício; manter produtos e materiais em uso; e regenerar sistemas naturais.



**O diagrama da borboleta: visualizando a economia . Figura 04**  
Circular <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>

A (figura 04), o Diagrama de Sistemas de Economia Circular, desenvolvido pela Fundação Ellen MacArthur, apresenta uma abordagem sustentável para a economia, baseada na redução do desperdício e na maximização do uso de recursos. Esse modelo promove um sistema produtivo regenerativo e restaurador, em contraste com a economia linear tradicional.

Os principais fluxos da economia circular, destacados no diagrama, são dois grandes fluxos de materiais:

1. Fluxo Biológico (em verde) – Representa o ciclo dos materiais de origem natural, como produtos biodegradáveis, biomassa e resíduos orgânicos. Esse fluxo enfatiza processos como:

- Agricultura e coleta;
- Digestão anaeróbica e produção de biogás;
- Regeneração da biosfera por meio da reintegração dos materiais ao meio ambiente.

2. Fluxo Técnico (em azul) – Abrange materiais não biodegradáveis, como metais e plásticos, promovendo sua recuperação e reutilização ao longo do tempo. As principais estratégias desse fluxo incluem:

- Manutenção e prolongamento da vida útil dos produtos;
- Reutilização e recondicionamento de componentes;
- Reciclagem para reintegração dos materiais ao ciclo produtivo.

A dinâmica da economia circular busca minimizar o desperdício e maximizar a eficiência dos recursos por meio de diversas estratégias, como:

- Uso de energias renováveis: Redução da dependência de fontes não sustentáveis.
- Compartilhamento, manutenção e reparação: Estímulo à reutilização e à extensão da vida útil dos produtos.
- Reciclagem e recondicionamento: Reinserção de materiais na cadeia produtiva para evitar descartes desnecessários.
- Redução de externalidades negativas: Mitigação dos impactos ambientais e sociais decorrentes do desperdício.

Conforme apresentado na Tabela 01, a economia linear e a economia circular representam paradigmas distintos no que tange ao uso de recursos, à gestão de resíduos e à responsabilidade produtiva. Enquanto a economia linear baseia-se no modelo de extração, produção, consumo e descarte, a economia circular propõe uma reconfiguração sistêmica, voltada para a reintrodução contínua dos materiais no ciclo produtivo (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013).

**Tabela 01. Comparação entre Economia Linear e Economia Circular**

Aspecto	Economia Linear	Economia Circular
Modelo de produção	Extração → Produção → Consumo → Descarte	Extração → Produção → Reutilização/Reciclagem → Novo uso
Destino dos resíduos	Descartados após o uso	Reintroduzidos no ciclo produtivo
Uso de recursos	Alto consumo de matéria-prima	Redução e reaproveitamento de recursos
Sustentabilidade	Baixa: ignora limites ambientais e gera excesso de lixo	Alta: visa reduzir impactos ambientais e valorizar recursos naturais
Valor do produto	Perde-se após o consumo	Mantém-se por meio de reuso, conserto, reciclagem ou revalorização
Responsabilidade	Foco no consumo e no descarte	Foco na responsabilidade compartilhada e no design inteligente para prolongar a vida útil dos produtos

Tabela 01 adaptada pela autora, utilizando a fonte: MUNDO ISOPOR. Economia linear e circular: entenda as diferenças. Mundo Isopor, [s.d.]. Disponível em: <https://www.mundoisopor.com.br/sustentabilidade/economia-linear-e-circular/>

circular#:~:text=A%20economia%20linear%20%C3%A9%20um,o%20uso%2C%20s%C3%A3o%20simplemente%20descartados. Acesso em: 20 abr. 2025.

O valor dos produtos, nesse modelo, é preservado por meio de práticas como reuso, reparo, remanufatura e reciclagem, prolongando sua vida útil e otimizando o aproveitamento dos insumos. Ademais, a responsabilidade sobre o ciclo de vida dos produtos é compartilhada entre produtores, consumidores e formuladores de políticas públicas, incentivando o design inteligente e a inovação tecnológica para garantir produtos mais duráveis e ambientalmente responsáveis.

Dessa forma, a transição do modelo linear para o circular configura-se como um passo essencial para a construção de uma economia resiliente, de baixo carbono e orientada para o futuro, capaz de conciliar o desenvolvimento econômico com a preservação dos limites ecológicos do planeta.

### **3.3 RUMO À ECONOMIA CIRCULAR: ESTRATÉGIAS GLOBAIS E PERSPECTIVAS PARA O BRASIL**

No Brasil, a economia circular ganhou um marco importante em 27 de junho de 2024, quando o presidente Luiz Inácio Lula da Silva assinou o Decreto nº 12.082, de 27 de junho de 2024, que institui a primeira Estratégia Nacional de Economia Circular (ENEC) do país. O decreto estabelece diretrizes e objetivos fundamentais para promover a transição para uma economia mais sustentável e circular. Dentre as diretrizes da Estratégia Nacional de Economia Circular, destacam-se as seguintes (BRASIL, 2023):

Art. 3º São diretrizes da Estratégica Nacional de Economia Circular:

- I - a eliminação da poluição e a redução da geração de rejeitos e resíduos;
- II - a manutenção do valor dos materiais;
- III - a regeneração do meio ambiente;
- IV - a redução da dependência de recursos naturais;
- V - a produção e o consumo sustentáveis;
- VI - o aumento do ciclo de vida de todo e qualquer material; e
- VII - a garantia de uma transição justa, inclusiva e equitativa, que aborde disparidades de gênero, de raça, de etnia e socioeconômicas.

Esse modelo visa não apenas mitigar os impactos ambientais advindos da produção e do consumo, mas também estimular oportunidades econômicas e sociais, promovendo um ciclo produtivo mais equilibrado, renovável e sustentável a longo prazo. Nesse contexto, e com base nas premissas que fundamentam o avanço da economia circular, a sua definição pode ser compreendida como:

Um sistema econômico que se baseia em modelos de negócios que substituem o conceito de “fim da vida” pela redução, alternativamente reutilização, reciclagem e recuperação de materiais em produção/distribuição e processos de consumo, operando assim no nível micro (produtos, empresas, consumidores), nível meso (parques eco-industriais) e nível macro (cidade, região, nação e além), com o objetivo de realizar o desenvolvimento sustentável, o que implica criar qualidade, prosperidade econômica e equidade social, em benefício da atual e das futuras gerações. (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017, p. 224).

A partir dessa concepção, observa-se que diversos países têm adotado estratégias específicas para viabilizar essa transformação, estabelecendo marcos regulatórios específicos, metas de eficiência no uso de recursos e incentivos financeiros para empresas que investem em inovação e circularidade. Entre esses exemplos internacionais, destaca-se a União Europeia, que tem liderado esse movimento por meio do Plano de Ação para a Economia Circular. Esse plano inclui medidas voltadas para a redução do desperdício, o design sustentável de produtos e o incentivo à adoção de processos produtivos mais eficientes (PARDO; SCHWEITZER, 2018).

A China foi pioneira, criando em 2009 a “*Circular Economy Promotion Law*”, que visa melhorar a eficiência no uso de recursos, promover a proteção ambiental e o desenvolvimento sustentável, baseando-se nos princípios dos 3Rs: Reduzir, Reutilizar e Reciclar. A lei é complementada por um plano quinquenal que envolve todos os níveis de governo e foca em três níveis de ação: micro, meso e macro. (CHINA, 2008).

O Japão também avançou, implementando a *Law for the Promotion of Effective Utilization of Resources* em 1991, que obriga os produtores a utilizar materiais reciclados e a incentivar o design de produtos mais reutilizáveis. A União Europeia lançou o plano *Closing the Loop*, com um pacote de 650 milhões de euros para promover a economia circular entre os países membros. (JAPÃO, 1991).

A Holanda implementou o *Waste To Resource Programme* (VANG), que estimula a transição para a economia circular com foco na redução de resíduos e no uso eficiente de recursos. O país também ajustou sua política fiscal para desincentivar o consumo de produtos de curta duração e incentivar a demanda por produtos duráveis. (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2015).

A Alemanha criou o *The German Resource Efficiency Programme* (ProgRess), com foco na cadeia de valor e na sustentabilidade dos recursos. Já a Bélgica, por meio de sua região de Flanders, busca se tornar um território resiliente e sustentável, com foco em reciclagem e

redução do uso de recursos naturais até 2050. (DE GROENE ZAAK, 2015).

A Dinamarca, com o programa Denmark Without Waste, visa aumentar a reciclagem e diminuir a geração de resíduos, enquanto a Finlândia, com seu roadmap para 2025, busca se tornar líder em economia circular, adotando diversas iniciativas, incluindo subsídios e regulamentações ambientais. (DINAMARCA, 2013).

A região de Flanders, na Bélgica, iniciou ações para promover a economia circular, com o objetivo de se tornar um território socialmente justo, resiliente e internacional. O governo local definiu sete prioridades estratégicas para apoiar essa transição, incluindo a elevação de taxas para a deposição de resíduos em aterros sanitários e a imposição de restrições ao despejo de resíduos de demolições. O foco é aumentar a taxa de reciclagem e reduzir a pressão sobre os recursos naturais, com metas estabelecidas para 2050. As ações estão centradas em três áreas principais: compras sustentáveis, cidades circulares e negócios circulares. (IWASAKA, 2018)

A França, em 2013, criou o Instituto Nacional para Economia Circular, com o objetivo de acelerar a transição para a economia circular por meio de parcerias entre os setores público e privado. O instituto colabora com o Ministério de Desenvolvimento Sustentável e promove a troca de informações e expertise. (ADEME, 2015).

O Canadá, por meio da província de Ontario, implementou em 2016 a Resource Recovery and Circular Economy Act, com foco na redução de resíduos, estabelecendo penalidades para o não cumprimento das normas. (CANADÁ, 2016).

Nos Estados Unidos, o USDA BioPreferred Program visa estimular o desenvolvimento de produtos à base de insumos agrícolas renováveis, substituindo os derivados de petróleo e carvão, criando novos mercados e gerando empregos. A cidade de São Francisco, em 2002, adotou a meta Zero Waste, com o objetivo de reduzir os resíduos enviados para aterros e eliminar plantas de incineração, alcançando avanços significativos, embora a meta final não tenha sido atingida. (USDA, 2019).

Na África do Sul, a província de Western Cape criou o Western Cape Industrial Symbiosis Programme (WISP), que incentiva a colaboração entre empresas para compartilhar recursos e transformar resíduos de um processo em matéria-prima para outro. Além disso, o país enfrentou o problema do acúmulo de pneus inutilizados com a criação do REDISA, um programa que impõe uma taxa sobre a produção de pneus, com o valor arrecadado sendo

destinado ao desenvolvimento de planos de coleta e reciclagem. s. (WESTERN CAPE GOVERNMENT, 2019).

Na Austrália, o Australian Packing Covenant (APC) foi estabelecido para mudar a cultura de design de embalagens, incentivando a reciclagem. A legislação aplicada obriga empresas a aderirem ao pacto e a implementar planos de ação, com penalidades para quem não cumprir as regras. (AUSTRALIA, 2017).

## CAPÍTULO 4. INICIATIVAS DE ECONOMIA CIRCULAR NO ESPAÇO

Este capítulo apresenta as principais iniciativas identificadas no cenário internacional focadas na implementação dos princípios da economia circular no setor espacial, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade e eficiência no uso dos recursos.

### 4.1 A ESTRATÉGIA EUROPEIA DE ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR ESPACIAL: PARCERIA ENTRE A ESA E A AIRBUS

Embora a reciclagem tenha se tornado uma prática comum na Terra, sua implementação no espaço ainda é rara. No entanto, um grande número de objetos obsoletos já se encontra em órbita e, teoricamente, poderia ser reciclado. A Agência Espacial Europeia (ESA) está desenvolvendo iniciativas para tornar a reciclagem no espaço uma realidade (ORBIT RECYCLING, 2022).

Durante o evento Clean Space Industry Days, realizado em 2022, a ESA publicou um “white paper” que representou um marco na discussão sobre sustentabilidade espacial. O documento apresentou os resultados do programa “*On-Orbit Manufacture, Assembly and Recycling (OMAR)*”, conduzido em parceria com a indústria espacial europeia. Tal iniciativa propõe a construção de um ecossistema orbital com base nos princípios da economia circular, buscando reformular o paradigma tradicional da exploração espacial ainda amplamente fundamentado em um modelo linear de "extrair-produzir-descartar".

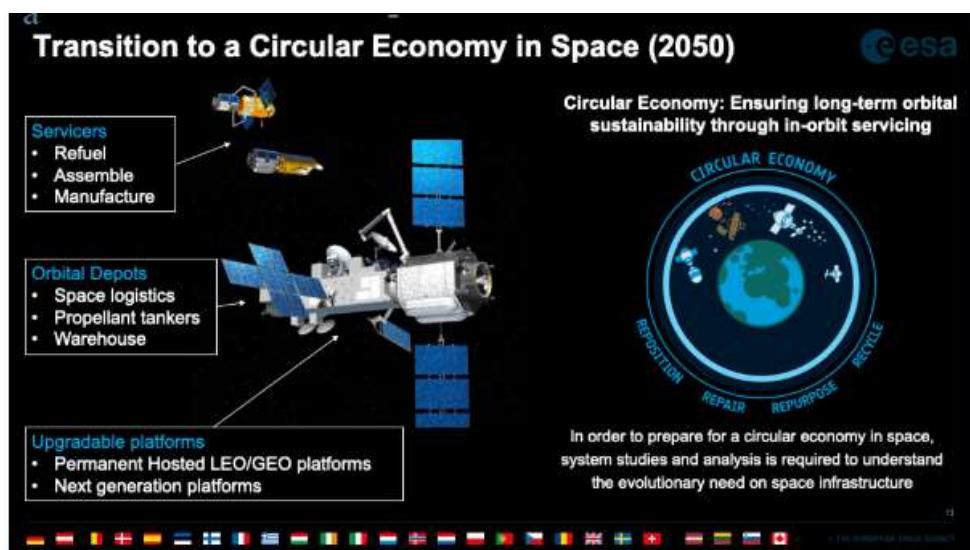


Figura (05) <https://blogs.esa.int/cleanspace/2022/01/10/recycling-in-space-wannabe-or-reality/>

Conforme ilustrado na (Figura 05), o programa OMAR defende a adoção de uma abordagem sistêmica e circular que contemple três pilares fundamentais: A fabricação de estruturas em órbita, reduzindo a dependência de lançamentos terrestres e seus elevados custos;

- a) Manufatura em órbita: construção de estruturas diretamente no espaço, reduzindo a dependência de lançamentos terrestres e seus custos logísticos e ambientais;
- b) Montagem modular em órbita: integração e reconfiguração de satélites e plataformas espaciais em módulos, otimizando recursos e prolongando a vida útil dos ativos;
- c) Reciclagem orbital: reaproveitamento de componentes de satélites desativados ou danificados, transformando-os em insumos para novas construções espaciais.

Entre as principais vantagens apontadas pelos estudos da iniciativa OMAR, destacam-se:

- a) Redução expressiva de custos com lançamentos, devido ao menor envio de massa ao espaço;
- b) Extensão da vida útil de satélites e plataformas, por meio de substituições modulares e manutenção in situ;
- c) Mitigação dos riscos de colisões, ao transformar detritos em recursos úteis;
- d) Estímulo à inovação tecnológica, por meio do desenvolvimento de robótica orbital, manufatura aditiva e novos materiais adaptados ao ambiente espacial.

Neste contexto, o pensamento que sustenta a economia circular no espaço remonta à noção de limites ambientais e à ideia de uma economia sem desperdício, introduzidas por Kenneth Boulding, em seu ensaio seminal “*The Economics of the Coming Spaceship Earth* (1966)”, o autor cunhou a metáfora da “economia do astronauta”, segundo a qual os recursos são finitos e os resíduos devem ser geridos com máxima eficiência um conceito que assume especial relevância no contexto orbital contemporâneo.

Essas ideias lançaram as bases para marcos fundamentais da ciência da sustentabilidade moderna, como o conceito das Fronteiras Planetárias (Steffen et al., 2007; 2015a; 2015b) e a reformulação da hipótese de Gaia (Lenton & Latour, 2018). Ambos os marcos propõem que as

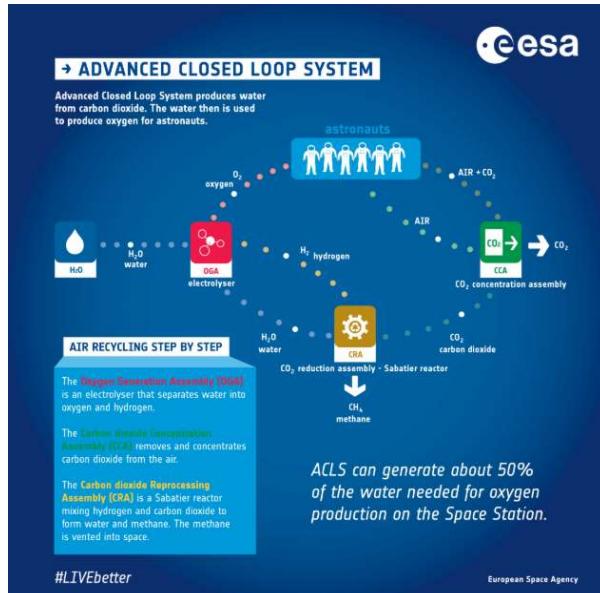
atividades humanas devem respeitar os limites biofísicos do planeta, princípio que se torna ainda mais crucial em ambientes extremos, isolados e com recursos limitados, como o espaço.

Dessa forma, tanto a metáfora proposta por Boulding quanto os modelos científicos contemporâneos convergem para um princípio central da economia circular: a redução absoluta da extração de recursos naturais e da geração de resíduos e emissões (Aguilar-Hernandez et al., 2019; Geissdoerfer et al., 2017; Korhonen et al., 2018; Temesgen et al., 2019). Aplicada ao ambiente orbital, essa lógica se traduz na valorização, reaproveitamento e regeneração dos ativos já existentes transformando detritos espaciais em recursos estratégicos e promovendo a sustentabilidade e a resiliência das infraestruturas espaciais.

A seguir, apresenta-se uma adaptação do conteúdo publicado pela Agência Espacial Europeia (ESA, 2019), que descreve a tecnologia de captura direta de carbono (Direct Air Capture – DAC) desenvolvida em parceria com a Airbus e sua aplicação tanto em ambiente espacial quanto terrestre:

A tecnologia Direct Air Capture (DAC), desenvolvida em parceria pela Airbus e pela Agência Espacial Europeia (ESA), foi inicialmente projetada para remover dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) do ar a bordo da Estação Espacial Internacional (ISS), contribuindo para a regeneração do ar em ambientes fechados. Após os resultados positivos obtidos em ambiente espacial, a tecnologia passou a ser adaptada e aplicada na Terra como solução inovadora para o enfrentamento das mudanças climáticas. A principal contribuição da DAC no contexto terrestre está na sua capacidade de capturar CO<sub>2</sub> diretamente da atmosfera, possibilitando seu uso *in loco* em processos industriais, como a produção de fertilizantes, combustíveis e materiais com emissões negativas. Atualmente, grande parte do CO<sub>2</sub> utilizado na indústria é obtido por meio de métodos de combustão, que além de poluentes, exigem transporte em larga escala, gerando mais emissões e custos logísticos. Ao utilizar filtros sólidos à base de amina, a tecnologia DAC realiza a captura do CO<sub>2</sub> atmosférico e o separa em dois fluxos: um de ar oxigenado, que na ISS é devolvido ao ambiente interno, e outro de CO<sub>2</sub> puro. Essa separação permite que o dióxido de carbono capturado seja reaproveitado diretamente no local de uso, eliminando a necessidade de fornecedores externos e reduzindo significativamente a pegada de carbono das operações industriais. No setor agrícola, por exemplo, a substituição do CO<sub>2</sub> obtido via combustão por CO<sub>2</sub> capturado via DAC representa uma oportunidade de tornar agricultores mais autônomos e sustentáveis, ao mesmo tempo em que se reduz a dependência de cadeias logísticas complexas e emissoras de gases de efeito estufa. (*Adaptado de ESA, 2019*).

Nesse sentido, é possível compreender que o projeto desenvolvido pela ESA em parceria com a Airbus, ao buscar a redução de resíduos por meio da captura e reutilização do dióxido de carbono, se alinha aos princípios da Economia Circular. Essa perspectiva é discutida por Braungart, McDonough e Bollinger (2007), ao defenderem que os sistemas produtivos devem funcionar como um metabolismo técnico, no qual os recursos retornam continuamente para o ciclo produtivo, reduzindo desperdícios e promovendo a regeneração dos materiais.



Sistema ACLS da ESA: novo sistema de suporte de vida regenerativo testado na Estação Espacial Internacional, capaz de capturar dióxido de carbono e recicrá-lo em oxigênio e água. (Figura 06)

[https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/New\\_life\\_support\\_system\\_cleans\\_air\\_during\\_full-house\\_Space\\_Station](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/New_life_support_system_cleans_air_during_full-house_Space_Station). Acesso em: 06 abr. 2025.

Com base na Figura 06, observa-se que o sistema Advanced Closed Loop System (ACLS), desenvolvido pela ESA, realiza a reciclagem do dióxido de carbono presente na Estação Espacial Internacional (ISS), convertendo-o em oxigênio. Tradicionalmente, o oxigênio utilizado na ISS era obtido por meio da eletrólise da água transportada da Terra, um processo oneroso e logicamente limitado. O ACLS, ao reciclar aproximadamente metade do CO<sub>2</sub> emitido, reduz significativamente essa dependência, gerando uma economia estimada de cerca de 400 litros de água por ano, que deixariam de ser enviados à estação (ESA, 2019).

Essa inovação tecnológica ilustra, na prática, como os princípios da economia circular podem ser aplicados de maneira efetiva em ambientes extremos, como o espaço. De acordo com Korhonen et al. (2018), a economia circular é vista como uma abordagem capaz de adaptar processos produtivos para induzir transformações industriais regenerativas, que conduzam à produção e ao consumo sustentáveis. Tais transformações contribuem, inclusive, para o crescimento econômico de forma mais resiliente e duradoura.

Outro projeto promissor da ESA, em parceria com a Thales Alenia Space, concentra-se na análise da viabilidade de uma planta de reciclagem orbital uma infraestrutura em órbita capaz de reaproveitar materiais provenientes de satélites desativados, estágios de foguetes e outros detritos espaciais. A implementação desse conceito representa um avanço significativo rumo à adoção de princípios da economia circular no ambiente espacial, ao reduzir a dependência de

lançamentos a partir da Terra e mitigar a crescente acumulação de resíduos em órbita (ESA, 2024).

O projeto da Thales Alenia Space está estruturado em três frentes principais. A primeira consiste na identificação dos materiais presentes em componentes espaciais que poderiam ser reciclados em microgravidade, tais como ligas metálicas, compostos poliméricos e estruturas modulares. A segunda frente é dedicada à análise de métodos viáveis para reciclagem no ambiente espacial, que é caracterizado por ausência de gravidade, radiação intensa e temperaturas extremas. Entre os processos estudados estão o corte a laser, a separação eletromagnética e a fusão seletiva de metais, com o objetivo de desenvolver técnicas adaptadas às condições hostis do espaço. Por fim, o projeto propõe o desenho preliminar de uma planta orbital de reciclagem, capaz de coletar, processar e reaproveitar materiais, os quais poderiam ser utilizados na manutenção de satélites, na construção de novos módulos espaciais ou no suporte logístico a missões de longa duração (ESA, 2024).

Para viabilizar tecnicamente essa proposta inovadora, foi firmado um contrato entre a Thales Alenia Space e a Agência Espacial Europeia (ESA), no valor aproximado de €100.000 (cem mil euros). Esse acordo está detalhado no portal oficial de atividades da ESA, especificamente na seção dedicada ao projeto intitulado “Recycling Space Plant” (contrato número 4000145492) (ESA, 2024), evidenciando o compromisso institucional com o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para o setor espacial.

No entanto, sob a ótica da economia circular, esses custos devem ser relativizados frente aos benefícios sistêmicos que a iniciativa pode proporcionar. A adoção de soluções circulares no espaço tem potencial para reduzir a dependência de lançamentos contínuos de materiais da Terra, minimizar o acúmulo de resíduos orbitais e promover maior autonomia logística para missões prolongadas.

#### **4.2 INICIATIVAS CIRCULARES PARA A SUSTENTABILIDADE ESPACIAL**

A economia circular tem sido progressivamente incorporada ao setor espacial por meio de iniciativas internacionais que, embora distintas em suas aplicações, compartilham o objetivo comum de promover a regeneração de recursos, a redução de resíduos e a eficiência no uso de materiais. Essa abordagem se contrapõe ao modelo linear tradicional e propõe soluções

inovadoras e sustentáveis adaptadas às exigências do ambiente espacial, onde os recursos são escassos e a logística de reabastecimento é altamente custosa.

No contexto dos sistemas de suporte à vida, destaca-se o projeto MELiSSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative), da Agência Espacial Europeia (ESA), que busca desenvolver um ecossistema artificial capaz de reciclar água, ar e resíduos orgânicos dentro de espaçonaves. Inspirado nos ciclos biogeoquímicos naturais da Terra, o sistema utiliza microrganismos e plantas superiores para regenerar recursos essenciais à vida (Godia et al., 2002). A mesma lógica de regeneração está presente no Environmental Control and Life Support System (ECLSS), utilizado pela NASA na Estação Espacial Internacional (ISS), responsável pelo tratamento de águas residuais e purificação do ar, promovendo inclusive a conversão de fluidos corporais em água potável (NASA, 2021). Ambos os sistemas demonstram como a circularidade pode ser aplicada ao ciclo fechado de recursos vitais, favorecendo a autonomia de missões espaciais de longa duração.

A produção de alimentos em ambiente espacial também se insere nesse contexto, integrando-se aos sistemas regenerativos. O projeto EDEN-ISS, coordenado pelo Centro Aeroespacial Alemão (DLR), investiga tecnologias de cultivo em ambientes isolados e controlados na Antártida, como análogos de missões espaciais (Zabel et al., 2020). De maneira complementar, a NASA desenvolve os sistemas Veggie e Advanced Plant Habitat (APH), voltados à produção de alimentos frescos na ISS. Além de fornecer nutrição, esses sistemas contribuem para a regeneração do ar e o reaproveitamento de nutrientes, reforçando o princípio da economia circular ao utilizar insumos produzidos internamente e minimizar a dependência de suprimentos da Terra.

Outro eixo fundamental é a reciclagem de materiais e a manufatura aditiva. A instalação Additive Manufacturing Facility (AMF), operada pela empresa Redwire na ISS, permite a fabricação de peças e ferramentas diretamente em órbita, eliminando a necessidade de envio de componentes sobressalentes. O projeto Refabricator, desenvolvido pela NASA em parceria com a Tethers Unlimited, vai além ao combinar impressão 3D com reciclagem de plásticos já utilizados, fechando o ciclo de materiais sólidos (Prater et al., 2019). Essas iniciativas exemplificam como a circularidade pode ser aplicada à gestão de resíduos sólidos no espaço, transformando-os em novos recursos úteis.

A reutilização de veículos lançadores também reflete os princípios da economia circular, ao ampliar o ciclo de vida dos ativos e reduzir o consumo de materiais e energia. A empresa SpaceX, com os foguetes Falcon 9 e Starship, estabeleceu um novo paradigma ao permitir o reaproveitamento de primeiros estágios, reduzindo os custos de lançamento e os resíduos gerados (Musk, 2017). A Blue Origin, com o New Shepard, adota abordagem semelhante, promovendo poucos controles e reutilização. Esses avanços se conectam diretamente a outras iniciativas voltadas ao prolongamento da vida útil de sistemas espaciais, como a missão OSAM-1 (On-orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing), da NASA, que pretende realizar reabastecimento, reparos e montagem de satélites em órbita (NASA, 2022). Em paralelo, o satélite OneSat, desenvolvido pela Airbus, apresenta arquitetura modular e reconfigurável, permitindo sua reutilização em diferentes missões, o que reduz a necessidade de novos lançamentos e contribui para a eficiência do uso de recursos.

A gestão de detritos espaciais é outro aspecto essencial dentro da lógica da economia circular, considerando que o acúmulo de lixo orbital compromete a sustentabilidade das atividades espaciais. A missão ClearSpace-1, contratada pela ESA, propõe capturar e desorbitar objetos inoperantes por meio de um braço robótico (ESA, 2020). A startup japonesa Astroscale, com o projeto ELSA-d, desenvolve tecnologias de acoplamento e remoção ativa de detritos, testando soluções que poderão futuramente viabilizar não apenas a limpeza do ambiente orbital, mas também o reaproveitamento de componentes descartados.

Por fim, a utilização de recursos in-situ (ISRU) representa uma das estratégias mais promissoras para viabilizar sistemas circulares fora da Terra. A NASA, por meio do programa Artemis, prevê a extração e uso de recursos lunares como o regolito e o gelo d'água para produção de oxigênio, água e propelente (NASA, 2020). A ESA, com a proposta do Moon Village, planeja desenvolver um habitat lunar autossuficiente que utiliza recursos locais para garantir a subsistência humana. A China também avança nesse campo com a missão Chang'e 5, que já trouxe amostras lunares para a Terra, permitindo o estudo de sua composição e o desenvolvimento de tecnologias aplicáveis ao uso local desses materiais.

Em conjunto, esses projetos ilustram a aplicação sistêmica dos princípios da economia circular ao setor espacial. Ao integrar estratégias de regeneração, reaproveitamento e extensão de ciclo de vida de recursos e sistemas, as iniciativas internacionais estão contribuindo para tornar as atividades espaciais mais sustentáveis, resilientes e economicamente viáveis. Esses

avanços não apenas ampliam as capacidades operacionais das agências e empresas espaciais, como também servem de referência para a adoção de modelos circulares em outros setores da economia terrestre.

Neste sentido, para melhor visualizar as diversas iniciativas internacionais que incorporam os princípios da economia circular ao setor espacial, apresenta-se a seguir uma tabela com os principais projetos mencionados nesta seção, organizados por categoria temática.

Tabela 02 – Iniciativas Circulares no Setor Espacial

Categoria	Projeto/Iniciativa	Instituição/Empresa	Descrição
Sistemas de Suporte à Vida	MELiSSA	ESA	Ecossistema artificial para reciclagem de água, ar e resíduos orgânicos em espaçonaves.
	ECLSS	NASA	Sistema de suporte vital da ISS que trata águas residuais e purifica o ar.
Produção de Alimentos	EDEN-ISS	DLR	Cultivo de alimentos em ambientes isolados como análogos de missões espaciais.
	Veggie e APH	NASA	Sistemas de produção de alimentos frescos na ISS, integrados a sistemas regenerativos.
Reciclagem e Manufatura Aditiva	AMF (Additive Manufacturing Facility)	Redwire	Impressão 3D de peças e ferramentas na ISS, reduzindo dependência da Terra.
	Refabricator	NASA & Tethers Unlimited	Combina impressão 3D com reciclagem de plásticos usados em órbita.
Reutilização e Extensão de Vida Útil	Falcon 9 / Starship	SpaceX	Reutilização de primeiros estágios de foguetes,

			reduzindo custos e resíduos.
	New Shepard	Blue Origin	Foguete reutilizável com pouso controlado.
	OSAM-1	NASA	Missão para reabastecimento, reparo e montagem de satélites em órbita.
	OneSat	Airbus	Satélite modular e reconfigurável, reutilizável para diferentes missões.
Gestão de Detritos Espaciais	ClearSpace-1	ESA	Captura e desorbitação de objetos inoperantes com braço robótico.
	ELSA-d	Astroscale	Tecnologia de remoção ativa de detritos e possível reaproveitamento futuro.
Uso de Recursos In-Situ (ISRU)	Programa Artemis	NASA	Uso de recursos lunares (regolito, gelo d'água) para produção de insumos essenciais.
	Moon Village	ESA	Projeto de habitat lunar autossuficiente com uso de recursos locais.
	Chang'e 5	CNSA (China)	Retorno de amostras lunares para estudo e aplicação em tecnologias ISRU.

**Fonte:** elaborado pela autora 2025

Como demonstra a Tabela 02, a economia circular está em diversas frentes, desde sistemas de suporte à vida até a reutilização de veículos e gestão de detritos. Essas iniciativas ilustram como os princípios da circularidade são aplicáveis mesmo em ambientes extremos, servindo também como referência para modelos sustentáveis em outras áreas da economia terrestre.

## 4.2 PROJETO REMOVEDEBRIS: UM ESTUDO DE CASO EM REMOÇÃO ATIVA DE DETRITOS ESPACIAIS

Outra iniciativa em andamento é a missão RemoveDEBRIS, que surgiu da crescente preocupação com a sustentabilidade do ambiente espacial e impulsionou o desenvolvimento de tecnologias voltadas para a mitigação de detritos orbitais.

Nesse contexto, a missão representa um marco na demonstração de estratégias de remoção ativa de detritos espaciais (Active Debris Removal – ADR). Concebida como um experimento tecnológico em larga escala, a missão foi desenvolvida por um consórcio europeu liderado pela Universidade de Surrey, com financiamento da Comissão Europeia por meio do programa Horizonte 2020. Lançada em 2 de abril de 2018 para a Estação Espacial Internacional (ISS) e, posteriormente, implantada em órbita, a RemoveDEBRIS teve como objetivo principal testar, em ambiente real, a eficácia de múltiplas abordagens inovadoras para a captura e remoção de detritos em órbita baixa terrestre (AGLIETTI et al., 2020).

A missão foi estruturada em diferentes experimentos práticos, cada um representando uma abordagem distinta para lidar com objetos espaciais não controlados. A primeira demonstração, ilustrada na Figura 07, consistiu na captura de um CubeSat por meio de uma rede lançada pela plataforma principal. Apesar de algumas variações em relação ao planejado, como uma velocidade maior do que a esperada e uma leve rotação do alvo, a operação foi bem-sucedida, com a captura realizada a aproximadamente 11 metros de distância, superando a distância inicialmente prevista de 7 metros (AGLIETTI et al., 2020).

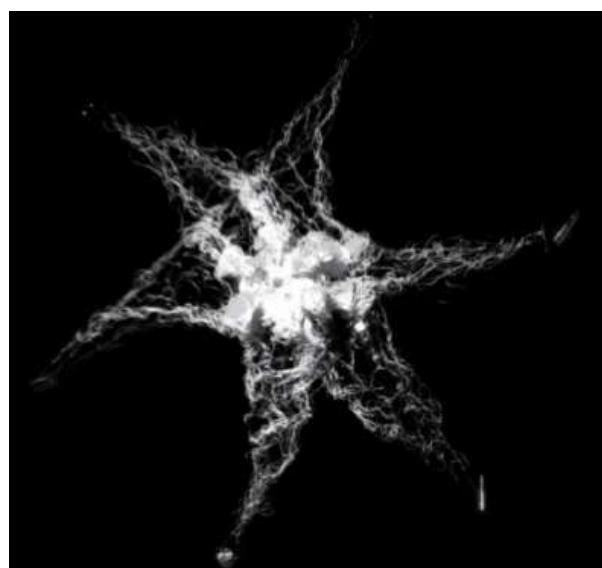


Figura 07 – Teste de captura de detritos espaciais utilizando rede de contenção. . Disponível:

Na sequência, foi realizada a demonstração da tecnologia de Navegação Baseada em Visão (VBN), evidenciada na Figura 08. Utilizando câmeras ópticas e um sistema LiDAR, a equipe conseguiu rastrear um segundo CubeSat, demonstrando a eficácia dos algoritmos de rastreamento mesmo em condições desafiadoras de iluminação e fundo. O sistema LiDAR, além disso, provou ser uma ferramenta precisa para a medição de distâncias, reforçando seu potencial para futuras missões de encontro e acoplamento no espaço (AGLIETTI et al., 2020).



Figura 08- Detecção de detritos espaciais em órbita por sensores ópticos. Disponível:  
<https://inria.hal.science/hal-02286751v1>. Acesso em: 01 maio 2025.

Posteriormente, a missão RemoveDEBRIS testou uma técnica de captura por arpão, representada na Figura 09. A experiência envolveu o disparo de um arpão contra um alvo fixo instalado na espaçonave, demonstrando com sucesso a viabilidade desse mecanismo para a captura de detritos. Mesmo diante de uma instabilidade causada pela oscilação do braço de suporte, o sistema se mostrou robusto, conseguindo capturar o alvo conforme planejado (AGLIETTI et al., 2020).

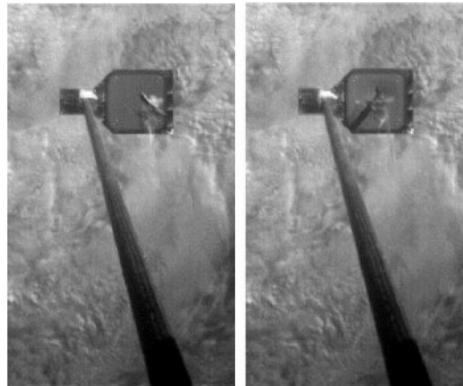


Figura 09 – Técnica de captura de detritos utilizando braço robótico em órbita. Disponível: <https://inria.hal.science/hal-02286751v1>. Acesso em: 01 maio 2025.

Por fim, a missão buscou realizar a implantação de uma vela de arrasto com o objetivo de acelerar a desorbitação do satélite, conforme experimentado na Figura 09. Apesar de uma falha parcial no mecanismo de implantação ter comprometido o sucesso completo dessa demonstração, os dados coletados foram valiosos para o aprimoramento de futuras tecnologias, como as velas de arrasto posteriormente utilizadas no projeto *InflateSAIL* (AGLIETTI et al., 2020).

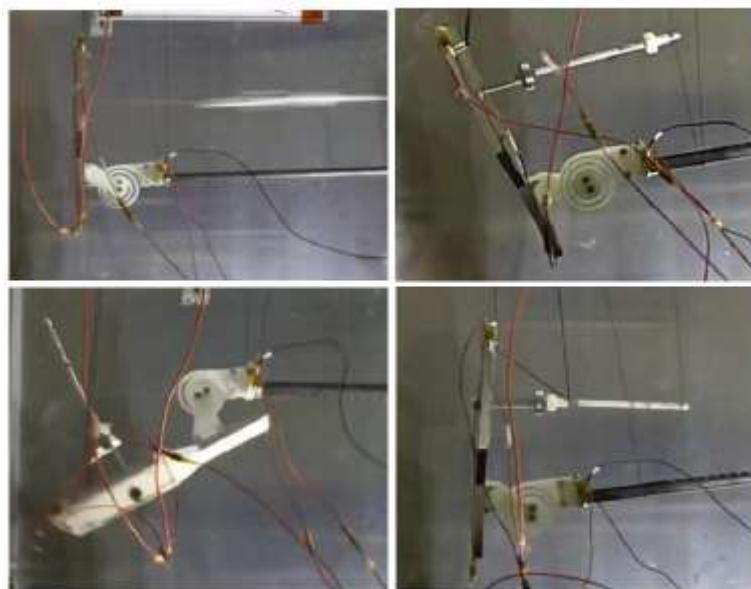


Figura 10 – Experimento de captura de detritos com mecanismos de acoplamento em ambiente simulado. Disponível: <https://inria.hal.science/hal-02286751v1>. Acesso em: 01 maio 2025

Em síntese, a missão RemoveDEBRIS cumpriu seus objetivos ao validar diversas tecnologias de remoção ativa de detritos, enfrentando e superando desafios técnicos relevantes. Os resultados e as lições aprendidas contribuíram significativamente para o avanço da área de mitigação de detritos espaciais, além de estimular uma maior conscientização internacional

acerca da importância da preservação do ambiente orbital para a continuidade segura das atividades espaciais humanas.

Em termos de custos, a missão RemoveDEBRIS foi estimada em cerca de 15 milhões de euros, valor relativamente modesto quando comparado ao potencial risco econômico e operacional representado pelos detritos espaciais para satélites ativos e infraestrutura orbital. Sob a ótica da economia circular, esse investimento pode ser interpretado não apenas como um gasto necessário para mitigar danos, mas como uma etapa inicial de uma transição mais ampla rumo a um modelo sustentável de gestão do ambiente espacial.

Nesse sentido, os resultados e simbolismos da missão vão além dos aspectos técnicos e financeiros. A missão demonstra que o espaço não pode mais ser tratado como um repositório ilimitado de recursos ou descartes. A reutilização de componentes, a prevenção da geração de novos detritos e o reaproveitamento de órbitas podem se tornar estratégias economicamente viáveis no longo prazo. Assim, RemoveDEBRIS simboliza uma mudança de paradigma: do uso linear e extrativista do espaço para uma abordagem regenerativa e preventiva, alinhada aos princípios da economia circular, que valoriza a manutenção do valor dos ativos em uso, a minimização de perdas e a inovação em prol da sustentabilidade.

#### **4.3 Projeto Active Debris Removal Vehicle (ADRV)**

Outro projeto de destaque no cenário internacional é o ADRV (Active Debris Removal Vehicle), desenvolvido pela NASA, com o objetivo de enfrentar o crescente desafio representado pelos grandes detritos espaciais em órbita baixa. Segundo a (NASA, 2020) o projeto propõe a criação de um sistema capaz de localizar, capturar e remover objetos orbitais de maneira segura e controlada, assegurando que o processo não resulte em fragmentação adicional.

Além da inovação técnica, o projeto busca oferecer uma solução escalável e replicável, com potencial para múltiplas missões, contribuindo assim para a sustentabilidade de longo prazo do ambiente orbital (NASA, 2020). Entre as tecnologias embarcadas estão sistemas avançados de controle de espaçonaves, caracterização remota de alvos e mecanismos robustos de captura e liberação. Essa abordagem integrada visa aumentar a eficácia das operações de remoção e reduzir significativamente o risco de colisões futuras, contribuindo de forma concreta para a mitigação do lixo espacial (NASA 2020).

Complementando essa iniciativa, o projeto ADRV incorpora diversos desenvolvimentos tecnológicos da NASA, incluindo um novo sistema de controle de espaçonaves, um sistema de caracterização de objetos de detritos e um mecanismo de captura e liberação. Além de sua aplicação na remoção de lixo orbital, essas tecnologias também possuem potencial para serem utilizadas em operações de manutenção de satélites e em manobras de ajuste orbital, ampliando seu alcance e relevância no contexto da economia circular espacial.

Outro ponto positivo do projeto é que devido ao seu pequeno fator de forma, até oito ADRVs podem ser lançados em uma única carga útil, permitindo missões de remoção de detritos orbitais de alto impacto dentro do mesmo grupo de inclinação (NASA 2020).

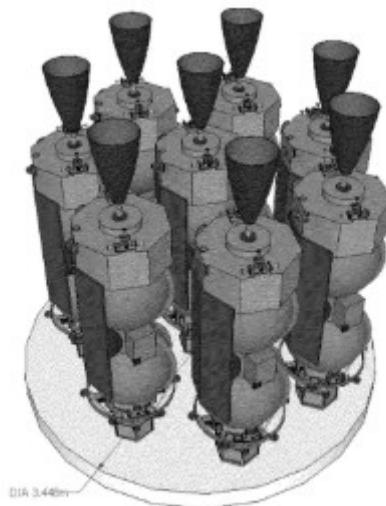


Figura 11 ADRVs Disponível <https://technology.nasa.gov/patent/MSC-TOPS-90>

Segundo a NASA (2020), os principais benefícios do sistema ADRV incluem:

Protege os ativos espaciais e terrestres contra o risco de exposição a detritos; o pequeno formato permite custos de lançamento reduzidos; oito ADRVs podem ser lançados em uma única carga útil, permitindo múltiplas missões; o sistema de propulsão hipergólico bipropelente pode atingir altas frações de massa para operações eficientes de manobra e remoção; o design do sistema de captura e liberação (CARS) pode capturar de forma adaptativa uma variedade de alvos não cooperativos não projetados para captura; desenvolvido para ser uma alternativa de baixo custo a outros sistemas propostos de remoção de detritos orbitais. (NASA, 2025)

Diante desse cenário, observa-se que o ADRV representa um modelo inteligente e funcional de aplicação dos princípios da economia circular no setor espacial, ao viabilizar o reaproveitamento do espaço orbital por meio da remoção ativa de detritos. Trata-se de uma

iniciativa que contribui diretamente para a preservação do meio ambiente orbital um aspecto crucial para a continuidade segura da exploração espacial e das atividades de telecomunicações.

Além disso, é importante ressaltar que projetos dessa natureza reafirmam o papel da NASA como agente inovador e liderança global na proposição de soluções sustentáveis frente aos desafios da nova era espacial.

#### **4.4 Outras iniciativas e o cenário brasileiro**

Além das iniciativas lideradas por empresas privadas e agências espaciais ocidentais, observa-se também o envolvimento crescente de países como China e Rússia na gestão do ambiente orbital. A Administração Espacial Nacional da China (CNSA), por exemplo, mantém centros especializados para a observação de detritos espaciais e tem buscado fortalecer sua atuação por meio de parcerias estratégicas. Em 2018, a CNSA firmou com a corporação estatal russa Roscosmos o “Acordo sobre Cooperação no Campo do Monitoramento de Detritos Espaciais e Uso Prático dos Dados Coletados”, com o objetivo de desenvolver conjuntamente capacidades técnicas voltadas à vigilância orbital e à notificação de eventos de conjunção entre objetos espaciais (CNSA, 2018).

De acordo com análises do Center for Naval Analyses (CNA), essa aliança também pode ter implicações geopolíticas, considerando a natureza dual das tecnologias empregadas, com aplicações tanto civis quanto militares, como o rastreamento de satélites adversários e a consolidação de sistemas de alerta precoce (CNA, 2023; Air University, 2023). Tais ações evidenciam como o contexto internacional tem se reorganizado em torno de iniciativas de governança espacial, nas quais a cooperação técnica se converte em instrumento de projeção de poder e de preservação da segurança operacional em órbita.

Embora os detalhes específicos sobre os resultados operacionais dessa cooperação não estejam amplamente disponíveis em fontes públicas, a assinatura do acordo entre a CNSA e a Roscosmos representa um passo significativo na colaboração internacional para o monitoramento de detritos espaciais. A participação ativa de ambas as agências no Comitê de Coordenação Interagências sobre Detritos Espaciais (IADC) também evidencia o compromisso conjunto com a mitigação dos riscos associados ao crescente número de objetos em órbita.

O Brasil, por meio da Agência Espacial Brasileira (AEB), tem avançado significativamente na implementação de medidas regulatórias voltadas à mitigação de detritos espaciais. A promulgação da Lei nº 14.946, de 31 de julho de 2024, representa um marco

importante nesse processo, ao estabelecer diretrizes gerais para a condução das atividades espaciais no país. Essa legislação inclui dispositivos específicos que atribuem aos operadores a responsabilidade de adotar ações preventivas destinadas a reduzir o risco de geração de detritos orbitais. Nesse sentido, o Artigo 35 da referida lei dispõe que: Conforme preceitua o Art. 35 da Lei nº 14.946/2024:

A atividade espacial deverá ser planejada e realizada de forma a atenuar a geração de detritos espaciais.

§ 1º O operador espacial deverá planejar a atividade espacial e a mitigação de detritos espaciais de maneira a reduzir o risco de colisões em órbita.

§ 2º Para as atividades espaciais civis, caberá à AEB emitir regulamentos específicos que visem a mitigar a geração de detritos." (BRASIL, 2024, art. 35)

Já o Art. 36 dispõe que:

"Incumbirá ao Comando da Aeronáutica, com o apoio da AEB, a coordenação dos meios para a consciência situacional espacial dos artefatos e dos detritos espaciais.

Parágrafo único. Ao Comando da Aeronáutica caberá:

I - recorrer a parcerias nacionais ou internacionais para o cumprimento do disposto no caput, quando julgar necessário;

II - aplicar a consciência situacional espacial, com os sistemas próprios e com os insumos que as parcerias nacionais e internacionais correlatas gerarem;

III - consolidar as informações provenientes dos diversos operadores espaciais nacionais e internacionais." (BRASIL, 2024, art. 36)

Essa preocupação regulatória interna encontra respaldo na crescente articulação internacional, a qual tem promovido a sustentabilidade das atividades espaciais como uma prioridade estratégica global. Contudo, apesar dos avanços normativos, persistem lacunas importantes no contexto nacional. Não há, até o momento, diretrizes obrigatórias no ordenamento brasileiro que determinem a destinação sustentável dos satélites ao final de sua vida útil. Mesmo nos casos de missões financiadas com recursos públicos, não se exige a adoção de práticas internacionalmente reconhecidas para a mitigação de detritos, como a reentrada controlada, a transferência para órbita cemitério ou o uso de mecanismos passivos de desorbitação.

Entretanto, no plano internacional, as normas técnicas da Organização Internacional de Normalização (ISO) têm servido como instrumentos de referência para a padronização de boas práticas. A norma ISO 27852:2024 “Space systems Estimation of orbit lifetime”, estabelece diretrizes para a estimativa do tempo de permanência de satélites e objetos em órbita. O cálculo da vida útil orbital é feito com base em fatores como a altitude de operação, densidade atmosférica, atividade solar e coeficiente balístico da estrutura. Embora não imponha prazos obrigatórios, a norma fornece subsídios técnicos essenciais para decisões de projeto, operação e destinação final dos satélites (ISO 2024).

De forma complementar, a ISO 24113:2019 “Space systems Space debris mitigation requirements” define exigências mínimas para a mitigação de detritos espaciais, incluindo a recomendação de que satélites em órbitas baixas sejam removidos no prazo máximo de 25 anos após o término de sua operação. Tal recomendação reflete a convergência com as diretrizes estabelecidas pelo Comitê Interagências de Coordenação de Detritos Espaciais (IADC) e é considerada atualmente um padrão mínimo para o gerenciamento responsável de missões espaciais (ISO 2019).

Essas normas técnicas são reforçadas pelas Diretrizes da ONU para a Sustentabilidade de Longo Prazo das Atividades no Espaço Exterior, elaboradas no âmbito do Comitê das Nações Unidas para o Uso Pacífico do Espaço Exterior (COPUOS). Tais diretrizes enfatizam que as ações humanas no espaço devem ser conduzidas de modo a preservar sua utilização para as futuras gerações, incorporando princípios de precaução, responsabilidade compartilhada e transparência.

O princípio da precaução destaca a necessidade de avaliar previamente os riscos associados a operações espaciais que possam gerar impactos ambientais ou criar perigos, buscando evitar danos irreversíveis ao ambiente espacial. Por sua vez, a responsabilidade compartilhada reconhece que o espaço é um patrimônio comum da humanidade, cuja preservação depende da cooperação internacional e do comprometimento conjunto dos Estados em adotar práticas que minimizem riscos e impactos adversos (UNITED NATIONS, 2019).

A transparência, outro pilar essencial das diretrizes, incentiva a divulgação clara e o compartilhamento de informações relativas a lançamentos, trajetórias orbitais e medidas de mitigação de detritos espaciais. Essa abertura informacional visa reduzir a possibilidade de colisões e prevenir mal-entendidos que possam gerar conflitos no ambiente espacial. Além disso, as diretrizes recomendam explicitamente a adoção de medidas técnicas para a mitigação da geração de detritos espaciais, como o planejamento para a desorbitação de satélites ao término de sua vida útil e o desenvolvimento de tecnologias para a remoção desses resíduos (UNITED NATIONS, 2019).

Essas orientações vêm em complemento aos tratados espaciais tradicionais, especialmente o Tratado do Espaço Exterior de 1967, reforçando o compromisso internacional de garantir o uso pacífico do espaço. O COPUOS, enquanto principal fórum multilateral para a formulação dessas normas, desempenha papel fundamental na consolidação de um regime de

governança espacial adaptado aos desafios contemporâneos, que incluem o aumento expressivo do número de satélites, a crescente presença do setor privado e a ameaça representada pelos detritos orbitais (VIOLANTE, 2020).

Nesse cenário, a publicação da Estratégia Nacional de Economia Circular (ENEC), em 2024, pelo Governo Federal, configura-se como um marco estruturante na promoção de uma transição sistêmica para modelos de desenvolvimento mais sustentáveis e resilientes. Lançada sob a coordenação do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), a ENEC constitui uma diretriz transversal de governo voltada à consolidação de um novo paradigma econômico, no qual o aproveitamento eficiente de recursos, a extensão do ciclo de vida de produtos e a minimização de resíduos tornam-se elementos centrais da política industrial brasileira (BRASIL, 2024).

Inserida no escopo da Nova Indústria Brasil (NIB), a ENEC reforça a centralidade da economia circular como vetor estratégico para a reindustrialização nacional, contemplando setores prioritários, entre os quais se destaca o complexo econômico-industrial da defesa e aeroespacial. Tal direcionamento institucional expressa uma inflexão relevante na política pública, ao reconhecer o potencial de aplicação dos princípios circulares em áreas de alta intensidade tecnológica, como o setor espacial.

Nesse sentido, a incorporação de diretrizes circulares à formulação de políticas espaciais representa não apenas um alinhamento normativo e estratégico às agendas internacionais de sustentabilidade e governança global dos bens comuns orbitais, mas também uma oportunidade concreta de reposicionar o Programa Espacial Brasileiro em consonância com os imperativos contemporâneos de inovação verde, soberania tecnológica e responsabilidade socioambiental (BRASIL, 2024).

Assim, a Estratégia Nacional de Economia Circular não apenas orienta uma nova abordagem no campo industrial e ambiental, mas também abre uma janela de oportunidade para a (AEB) consolidar-se como agente articulador de políticas públicas sustentáveis no domínio espacial, promovendo sinergias entre ciência, tecnologia, inovação e preservação ambiental. Ao articular os fundamentos da economia circular aos objetivos estratégicos do setor aeroespacial, o Brasil pode fortalecer sua posição no cenário internacional como um ator comprometido com a sustentabilidade do ambiente espacial e com a governança responsável dos recursos orbitais.

Essa orientação encontra respaldo nos compromissos assumidos pelo país no âmbito da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, das Nações Unidas, que estabelece uma visão integrada de progresso econômico, justiça social e proteção ambiental (NAÇÕES UNIDAS, 2015). Nesse contexto, o setor espacial brasileiro pode contribuir de forma significativa para o alcance de diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) e o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), reforçando a importância de incorporar princípios de circularidade como eixo estruturante de sua estratégia de desenvolvimento.

#### **4.5 Perspectivas para a economia circular no setor espacial**

O mercado global voltado ao monitoramento e à remoção de detritos espaciais tem experimentado uma trajetória de crescimento expressiva, impulsionada pelo aumento exponencial das atividades orbitais e, consequentemente, pela intensificação da presença de resíduos nas diferentes camadas da órbita terrestre. De acordo com estimativas da *Fortune Business Insights* (2024), o valor desse mercado foi avaliado em aproximadamente US\$ 1,016 bilhão em 2023, com projeções que indicam a duplicação desse montante até 2032, alcançando US\$ 2,068 bilhões. Tal expansão reflete uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 8,2% no período analisado, evidenciando o fortalecimento da demanda por soluções tecnológicas voltadas à segurança e à sustentabilidade do ambiente espacial.

Esse crescimento é atribuído, em grande medida, à ampliação da consciência global sobre os riscos associados à permanência de detritos orbitais, bem como aos avanços tecnológicos em sensores, algoritmos de rastreamento orbital e sistemas de remoção ativa (Global Market Insights, 2023). A intensificação da exploração espacial, especialmente com o lançamento recorrente de satélites comerciais, tem resultado em um aumento substancial na quantidade de objetos não funcionais em órbita, os quais representam um desafio crescente para a operação segura das infraestruturas espaciais. Atualmente, estima-se a existência de cerca de 20.000 fragmentos de grandes dimensões rastreados, além de milhões de fragmentos menores, que, embora mais difíceis de detectar, constituem ameaças relevantes às missões em curso (Markets and Markets, 2023).

Além disso, um dos principais fatores que contribuem para essa crescente acumulação de detritos é a proliferação de megaconstelações, como as operadas pela SpaceX (Starlink) e

pela OneWeb, que intensificam o tráfego na órbita terrestre baixa (LEO, na sigla em inglês). Essa região, por sua vez, concentra a maior parte das atividades espaciais contemporâneas, sejam elas comerciais, científicas ou de defesa que apresenta criticidade particular devido à sua alta densidade orbital e à dificuldade de mitigação de colisões, o que reforça a importância de soluções integradas de monitoramento e remoção de detritos (Fortune Business Insights, 2024).

Outro ponto importante é que o mercado de serviços voltados à gestão de detritos espaciais pode ser segmentado com base em diferentes critérios, incluindo o tipo de serviço prestado (monitoramento ou remoção), o tamanho dos fragmentos, o tipo de órbita e o perfil do usuário final. Dentre esses critérios, os detritos com dimensões entre 1 mm e 10 cm constituem um dos maiores desafios técnicos, dado que são difíceis de rastrear com os sistemas atuais, mas possuem energia cinética suficiente para causar danos severos a satélites em operação (Global Market Insights, 2023). Assim, o desenvolvimento de tecnologias capazes de detectar e mitigar esses fragmentos menores tornou-se prioridade estratégica para diversos atores do setor espacial.

No que se refere aos perfis de usuários, o mercado é dividido entre operadores comerciais cuja preocupação central é a proteção das constelações e da continuidade dos serviços prestados e entidades governamentais, notadamente as vinculadas ao setor de defesa, para as quais o monitoramento e a mitigação de detritos orbitais são componentes críticos da segurança nacional (Markets and Markets, 2023). A integração dessas necessidades, tanto comerciais quanto estratégicas, tem incentivado o surgimento de novas soluções tecnológicas e o fortalecimento de parcerias internacionais no enfrentamento do problema.

Nesse contexto, destaca-se o papel de empresas inovadoras, conforme detalhado no capítulo 2 que vêm liderando o desenvolvimento de tecnologias voltadas à mitigação ativa de detritos espaciais. Entre os principais agentes desse ecossistema, sobressaem-se a Astroscale Holdings (Japão), que realiza missões demonstrativas de remoção de objetos orbitais, e a ClearSpace (Suíça), parceira da Agência Espacial Europeia (ESA) em projetos-piloto voltados à captura e desorbitamento de satélites inoperantes. Outras corporações de relevância no setor incluem Northrop Grumman, Lockheed Martin Corporation, D-Orbit e Airbus SAS, que têm investido em soluções diversas, como braços robóticos, redes captoras e sistemas autônomos de propulsão para desorbitamento seguro (Fortune Business Insights, 2024).

Dessa forma, observa-se que o mercado de monitoramento e remoção de detritos espaciais não apenas reflete a crescente complexidade da atividade espacial contemporânea, como também revela uma tendência clara de consolidação de um setor econômico emergente, marcado pela inovação, cooperação internacional e pelo fortalecimento de políticas voltadas à sustentabilidade do ambiente orbital.

A seguir, na tabela 03 apresenta-se os principais projetos voltados à remoção de detritos espaciais. Os dados evidenciam não apenas a complexidade tecnológica envolvida e a diversidade de atores institucionais comprometidos com o tema, mas também a magnitude dos investimentos necessários para viabilizar soluções escaláveis e alinhadas aos princípios da circularidade no setor espacial.

**Tabela 03. Projetos de Remoção de Detritos Espaciais, Custos Estimados**

Projeto	País(es) Envolvido(s)	Tecnologia Principal	Custo Estimado	Ano de Referência
RemoveDEBRIS	Reino Unido / União Europeia	Rede, arpão, vela de arrasto, navegação baseada em visão	15 milhões de libras	2018
ClearSpace-1	Suíça / ESA	Robô com braços para captura e desorbitação	€ 86 milhões	2020
ADRV	Estados Unidos (NASA)	Robótica para captura, remoção e manutenção orbital	US 2 bilhões	2020–2024

Fonte: Elaboração própria com base em dados de relatórios técnicos e institucionais.

Nesse contexto, tais iniciativas, como a missão RemoveDEBRIS, o projeto Active Debris Removal Vehicle (ADRV) da NASA e outras plataformas de remoção ativa, demonstram uma aplicação prática e coerente dos princípios da Economia Circular no setor espacial. Esses projetos não apenas desenvolvem tecnologias voltadas à captura e eliminação de objetos em desuso na órbita terrestre, mas também refletem os pilares circulares de prevenção, reintegração e prolongamento do ciclo de vida de sistemas.

A incorporação de dispositivos como velas de arrasto e sistemas de desorbitação automática representa a materialização do princípio de projetar para prevenir a geração de resíduos, ao passo que a indução da reentrada controlada desses objetos na atmosfera garante sua reintegração segura à biosfera. Ademais, o desenvolvimento de plataformas modulares e escaláveis, capazes de serem adaptadas a diferentes missões, está em consonância com o ideal circular de “prolongar a vida útil de produtos e evitar o consumo excessivo de novos recursos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013)”. Esse design não só preserva os recursos, mas também aponta para uma abordagem mais sistêmica e regenerativa, na qual o foco não está apenas na remoção dos detritos, mas na restauração da funcionalidade do ambiente orbital como um todo.

Dessa forma, observa-se que os projetos de remoção de detritos espaciais não apenas respondem a desafios técnicos e ambientais imediatos, mas também representam instrumentos efetivos de operacionalização dos princípios da Economia Circular no setor espacial, contribuindo para a construção de um ecossistema orbital mais resiliente, sustentável e colaborativo. Esse movimento de integração internacional e adoção de práticas circulares indica um futuro promissor, no qual o espaço se mantém acessível, seguro e eficiente para as gerações vindouras.

No entanto, para que essa transição ganhe escala global, é necessário considerar as diferentes capacidades e prioridades nacionais. A implementação de estratégias circulares no setor espacial não ocorre de forma homogênea, pois depende de fatores estruturais, como o nível de desenvolvimento tecnológico, os compromissos ambientais assumidos e os interesses econômicos predominantes em cada país.

Nesse sentido, com base em análises da UNOOSA (2023), do Space Foundation (2024) e da ESA (2022), é possível identificar três grandes perfis de nações potencialmente mobilizadas por iniciativas de economia circular no setor espacial:

- Países Emergentes com programas espaciais em desenvolvimento, como Brasil, África do Sul e Índia. Nestes países, a economia circular representa uma estratégia de otimização de recursos e fortalecimento da autonomia tecnológica. O Plano Nacional de Atividades Espaciais (PNAE 2022–2031) brasileiro, por exemplo, já estabelece diretrizes voltadas à sustentabilidade (AEB, 2022).

- Países com forte compromisso ambiental e tradição tecnológica, como França, Alemanha e Japão. Nessas nações, a agenda climática é transversal e tende a orientar investimentos em tecnologias limpas, inclusive no setor espacial.
- Potências espaciais com alta atividade orbital e presença de grandes operadoras privadas, como Estados Unidos e China. Nesses casos, a preservação da segurança orbital é tratada como uma questão econômica e estratégica. A NASA, por exemplo, desenvolve programas voltados à reentrada controlada e à reutilização de componentes.

Nesse contexto, caso uma empresa deseje investir na economia circular no setor espacial, é fundamental que ela alinhe suas estratégias de inovação e sustentabilidade a oportunidades reais do mercado orbital. De acordo com a Net Zero Insights (2025), empresas que buscam liderar a transição circular devem não apenas implementar práticas internas, mas também “atuar, advogar e avançar”, influenciando políticas públicas e ampliando a escala de suas soluções por meio de alianças estratégicas. Isso envolve o desenvolvimento de tecnologias que incorporem princípios circulares desde a fase de projeto como modularidade, reutilização de componentes e capacidade de desorbitação autônoma até a oferta de serviços voltados à mitigação de detritos ou à extensão da vida útil de satélites.

Em síntese, a adoção de princípios da economia circular no setor espacial não se limita ao plano conceitual, mas encontra respaldo em iniciativas concretas, mercados em expansão e diferentes modelos nacionais e internacionais, o que reforça sua relevância como caminho viável para um futuro espacial mais sustentável.

## CONCLUSÃO

Esta dissertação teve como propósito central analisar a viabilidade e os benefícios da adoção de estratégias baseadas na economia circular para a gestão de detritos espaciais. A partir da análise desenvolvida, foi possível constatar que, apesar de incipiente no contexto do espaço exterior, a economia circular apresenta-se como uma proposta promissora para repensar o uso de recursos, por meio da redução, reutilização, regeneração e reaproveitamento de materiais. Trata-se de uma abordagem alternativa e estratégica diante dos desafios crescentes relacionados à poluição orbital.

No decorrer da pesquisa, evidenciou-se que o arcabouço jurídico internacional ainda não acompanha adequadamente a complexidade das atividades espaciais contemporâneas. A indefinição da fronteira entre o espaço aéreo e o espaço exterior, somada à ausência de um regime internacional específico sobre detritos espaciais, compromete a responsabilização e dificulta ações coordenadas de mitigação.

Na análise dos detritos espaciais, foram examinadas suas principais fontes, formas de classificação e padrões de distribuição nas distintas órbitas terrestres, com base em dados técnicos e relatórios provenientes de agências espaciais internacionais. Os dados analisados indicam que a poluição orbital alcançou níveis críticos, comprometendo significativamente a segurança das operações espaciais, especialmente no que se refere à integridade de satélites ativos.

O estudo evidenciou, ainda, que, apesar da existência de tecnologias emergentes voltadas à mitigação e à remoção ativa de detritos, tais soluções permanecem em fase inicial de desenvolvimento, apresentando aplicação limitada e carecendo de respaldo jurídico-normativo e de políticas públicas internacionais coordenadas que viabilizem sua ampla adoção.

Diante desse contexto, a pesquisa aprofundou-se nos fundamentos teóricos da economia circular, ressaltando sua divergência em relação ao modelo linear convencional, baseado na lógica de extração, uso e descarte. Observa-se que a economia circular propõe uma reestruturação sistêmica dos processos produtivos, com foco na eficiência do uso de recursos, na extensão do ciclo de vida dos produtos e na minimização de resíduos. No decorrer da análise, constatou-se que algumas iniciativas internacionais, notadamente no contexto europeu, vêm consolidando diretrizes promissoras nesse campo. Destaca-se, nesse sentido, a Estratégia de

Economia Circular da Agência Espacial Europeia (ESA), desenvolvida em parceria com a Airbus, como um exemplo concreto de incorporação de práticas sustentáveis no setor aeroespacial. Contudo, ainda que representem avanços significativos, tais iniciativas permanecem limitadas em escopo e abrangência, concentrando-se em regiões específicas e enfrentando desafios para sua consolidação em nível global, especialmente no que diz respeito à padronização normativa e à adoção coordenada entre diferentes países e agências espaciais.

No contexto brasileiro no que se refere à incorporação da economia circular nas atividades espaciais revela desafios significativos e estruturais que dificultam a implementação de práticas sustentáveis nesse setor. O primeiro obstáculo refere-se à carência de formação técnica e sensibilização ambiental entre os atores que atuam nas áreas científica, industrial e institucional do setor espacial. Ainda predomina uma lógica produtiva linear, centrada na extração, uso e descarte, sem considerar alternativas de reaproveitamento, regeneração ou extensão do ciclo de vida de componentes. O conceito de detritos espaciais como externalidade ambiental crítica ainda é pouco compreendido e debatido nos círculos técnicos nacionais, limitando o potencial de inovação sustentável nas fases iniciais de planejamento e desenvolvimento de missões espaciais.

O segundo desafio diz respeito à dificuldade de formular estratégias integradas que transcendam fronteiras institucionais e setoriais. A economia circular requer uma abordagem sistêmica e colaborativa, envolvendo agências governamentais, universidades, centros de pesquisa, setor privado e organizações da sociedade civil. No entanto, o contexto brasileiro ainda apresenta um elevado grau de fragmentação institucional, com iniciativas pontuais, pouco articuladas e com baixa capacidade de escala. A ausência de um modelo de governança interinstitucional impede a construção de agendas comuns, a definição de indicadores de circularidade e o aproveitamento de sinergias entre os diversos elos da cadeia espacial.

O terceiro entrave identificado é a inexistência de uma demanda social consolidada por práticas sustentáveis no setor espacial. Diferentemente de áreas como energia, agricultura ou resíduos urbanos, onde a pressão da opinião pública e de movimentos sociais impulsionou mudanças regulatórias e comportamentais, o setor espacial permanece relativamente invisível ao debate público. A percepção social do espaço como território estratégico e ambientalmente vulnerável ainda é limitada, o que dificulta a mobilização política e institucional em torno da sustentabilidade orbital. Nesse sentido, o fortalecimento da consciência pública e o

engajamento da sociedade civil são fundamentais para impulsionar políticas circulares e legitimar ações estatais de fomento à inovação ambiental.

A superação desses desafios exige uma atuação coordenada e multissetorial. Instituições como a Agência Espacial Brasileira (AEB), universidades, institutos de pesquisa e empresas do setor aeroespacial devem assumir o protagonismo na criação de mecanismos institucionais que favoreçam a economia circular. Isso inclui a formulação de políticas públicas claras, o fortalecimento de incentivos fiscais e financeiros voltados à sustentabilidade, a promoção de programas de capacitação e o desenvolvimento de projetos-piloto com foco na reutilização de componentes, extensão da vida útil de satélites e gestão inteligente de resíduos orbitais.

Sob uma perspectiva crítica, pode-se afirmar que os conceitos da economia circular são não apenas aplicáveis, mas necessários ao setor espacial. O espaço não é um ambiente infinito e inatingível; ao contrário, é um bem comum cuja sustentabilidade depende de ações conscientes e cooperativas. A adoção da economia circular contribui para prolongar a vida útil de satélites, reduzir a geração de lixo orbital e promover a inovação em design e engenharia aeroespacial. No entanto, sua plena aplicação exige mudanças estruturais, tanto no nível técnico quanto institucional.

Como perspectiva para pesquisas futuras, sugere-se o aprofundamento do debate sobre a criação de um regime internacional específico para o gerenciamento de detritos espaciais, bem como o estudo de modelos de financiamento e incentivo à inovação verde no setor aeroespacial. Além disso, destaca-se a importância de analisar o papel de países em desenvolvimento, como o Brasil, na construção de uma governança espacial mais equitativa e comprometida com os princípios da sustentabilidade.

Conclui-se, portanto, que a transição para uma economia circular no setor espacial é tecnicamente possível, juridicamente desejável e ambientalmente urgente. No entanto, sua concretização depende de um esforço coletivo, coordenado e sustentado no tempo. Esta pesquisa oferece uma contribuição inicial a esse debate, esperando fomentar novos estudos e ações que integrem sustentabilidade e tecnologia na preservação do espaço como patrimônio comum da humanidade.

## REFERÊNCIAS

AEB – Agência Espacial Brasileira. Disponível em: <[www.aeb.gov.br](http://www.aeb.gov.br)>. Acesso em: 16 jan. 2025.

AGUILAR-HERNANDEZ, G. A. et al. The circularity gap of nations: A multiregional analysis of waste generation, recovery, and stock depletion in 2011. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 151, 2019, Article 104452. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104452>. Acesso em: 02 mar. 2025.

ANDERSEN, M. S. An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability Science*, v. 2, n. 1, p. 133–140, 2007.

AIR UNIVERSITY. (2023). China-Russia Space Cooperation. Disponível em: <https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/CASI/documents/Research/Space/2023-05-08%20China%20Russia%20Space%20Cooperation-2.pdf>

AIRBUS. *OneSat: A software-defined satellite*. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/products-services/space/telecommunications/onesat>. Acesso em: 27 maio 2025.

ASTROSCALE U.S. INC. Our Work in the U.S.. 2023. Disponível em: <https://astroscale.com/astroscale-u-s/>. Acesso em: 6 maio 2025.

ASTROSCALE. *ELSA-d Mission*. 2021. Disponível em: <https://astroscale.com/elsa-d/>. Acesso em: 27 maio 2025.

ALTIUS SPACE MACHINES. Altius Overview. 2023. Disponível em: <https://www.altius.space> . Acesso em: 6 maio 2025.

AUSTRALIA. *Australian packaging covenant*. 2017. Disponível em: <https://www.environment.gov.au/system/files/resources/936c31e6-749b-4298-a457-24808a76cc15/files/australian--packaging-covenant-2017.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2025.

BARBOSA, V. G. et al. Economia circular como instrumento socioeconômico e ambiental. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, v. 17, n. 6, e7623, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.6-219>. Acesso em: 08 mar. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.946, de 31 de julho de 2024. Dispõe sobre a regulação das atividades espaciais no Brasil e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1 ago.

2024. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2023-2026/2024/lei/l14946.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14946.htm). Acesso em: 15 maio 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Estratégia Nacional de Economia Circular: 2024–2030. Brasília: MDIC, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/participamaisbrasil/enec>. Acesso em: 20 maio 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Nova Indústria Brasil: política industrial para o desenvolvimento sustentável. Brasília: MDIC, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/industria/nova-industria-brasil>. Acesso em: 20 maio 2025.

BRASIL. Lei nº 14.946, de 12 de abril de 2024. Dispõe sobre a Política Nacional de Espaço. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2023-2026/2024/lei/l14946.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14946.htm). Acesso em: 25 junho 2026.

BOULDING, K. E. The economics of the coming spaceship earth. In: JARRETT, H. (Ed.). *Environmental Quality in a Growing Economy*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1966.p.3-14. Disponível em: [http://arachnid.biosci.utexas.edu/courses/THOC/Readings/Boulding\\_SpaceshipEarth.pdf](http://arachnid.biosci.utexas.edu/courses/THOC/Readings/Boulding_SpaceshipEarth.pdf). Acesso em: 03 abr. 2025.

BRASIL. Decreto nº 11.413, de 13 de fevereiro de 2023. Institui a Estratégia Nacional de Economia Circular. *Diário Oficial da União*, seção 1, Brasília, DF, ano 160, n. 32, p. 1, 14 fev. 2023. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.413-de-13-de-fevereiro-de-2023-465933563>. Acesso em: 05 abr. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Estratégia Nacional de Economia Circular – ENEC. Brasília: MDIC, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/enec>. Acesso em: 25 maio 2025.

BRIAN WESSEL, O Estado de Direito no Espaço Exterior: Os Efeitos de Tratados e Acordos Não Vinculantes no Direito Espacial Internacional , 35 Hastings International & Comp . L. Rev. 289 (2012). Disponível em: [https://repository.uclawsf.edu/hastings\\_international\\_comparative\\_law\\_review/vol35/iss2/1](https://repository.uclawsf.edu/hastings_international_comparative_law_review/vol35/iss2/1)

BUHR, Alexandre Dittrich. Direito Espacial: Lições Preliminares e Avançadas. São Paulo: Conceito, 2012.  
<https://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:rede.virtual.bibliotecas:livro:2012;000940227>

CANADÁ. *Resource recovery and circular economy Act*. 2016. Disponível em: <https://www.ontario.ca/laws/statute/16r12>. Acesso em: 02 mar. 2025.

CHINA. *Circular economy promotion law.* 2008. Disponível em: [http://www.fdi.gov.cn/1800000121\\_39\\_597\\_0\\_7.html](http://www.fdi.gov.cn/1800000121_39_597_0_7.html). Acesso em: 02 mar. 2025.

CRUZ, Paulo Márcio et al. Economia circular como alternativa à economia linear: desafios e contribuições à sustentabilidade. *Revista de Estudos Constitucionais, Hermenêutica e Teoria do Direito (RECHTD)*, v. 16, n. 1, p. 90-112, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.4013/rechtd.2024.161.05>. Acesso em: 02 mar. 2025.

CLEARSPACE. Clear Space-1Mission. 2023. Disponível em: <https://clearspace.today/mission/>. Acesso em: 6 maio 2025.

CNSA – China National Space Administration. Agreement on Cooperation in the Field of Space Debris Monitoring and Practical Use of Collected Data, 2018. Disponível em: <https://www.cnsa.gov.cn>. Acesso em: 01 maio 2025.

CNA. (2023). China-Russia Space Cooperation. Center for Naval Analyses. Disponível em: <https://www.cna.org/reports/2023/06/china-russia-space-cooperation-may-2023>

DE GROENE ZAAK. *Governments going circular: Dutch sustainability business association.* 2015. Disponível em: [https://www.greengrowthknowledge.org/sites/default/files/downloads/resource/government\\_s-going-circular.pdf](https://www.greengrowthknowledge.org/sites/default/files/downloads/resource/government_s-going-circular.pdf). Acesso em: 02 mar. 2025.

DINAMARCA. *Ministry of Environment and Food of Denmark. Denmark without waste.* 2013. Disponível em: <https://eng.mst.dk/air-noise-waste/waste/denmark-without-waste/>. Acesso em: 21 mar. 2025.

D-ORBIT. ION Satellite Carrier. 2023. Disponível em: <https://www.orbitfab.com/news/rafti-flight-qualified/> em: 6 maio 2025.

DAWSON, L. (2017). *The Politics and Perils of Space Exploration: Who Will Compete, Who Will Dominate?* Cham: Springer.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Towards the Circular Economy Vol. 1: An Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition.* 2013. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Uma economia circular no Brasil: Uma abordagem exploratória inicial*. 2017. Acesso em: 18 out. 2025.

Disponível em: <https://depositorioceds.espm.edu.br/uma-economia-circular-no-brasil-uma-abordagem-exploratoria-inicial/>

ESA – European Space Agency. *New life support system cleans air during full-house Space Station*. 2019. Disponível em:

[https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/New\\_life\\_support\\_system\\_cleans\\_air\\_during\\_full-house\\_Space\\_Station](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/New_life_support_system_cleans_air_during_full-house_Space_Station). Acesso em: 06 abr. 2025.

ESA – Clean Space. Towards a Circular Economy in Space. 10 dez. 2024. Disponível em: <https://blogs.esa.int/cleanspace/2024/12/10/towards-a-circular-economy-in-space>. Acesso em: 15 maio 2025.

ESA – EUROPEAN SPACE AGENCY. ClearSpace-1: ESA signs contract for first debris removal mission. 2020. Disponível em: [https://www.esa.int/Safety\\_Security/Clearspace-1](https://www.esa.int/Safety_Security/Clearspace-1). Acesso em: 27 maio 2025.

ESA – EUROPEAN SPACE AGENCY. ESA Contract 4000145492 – Recycling Space Plant. 2024. Disponível em: <https://activities.esa.int>. Acesso em: 27 maio 2025.

ESA. *ESA's Annual Space Environment Report*. Darmstadt, Germany: ESA, 2021. Disponível em: [https://space-economy.esa.int/article/33/what-is-the-space-economy#\\_ftn1](https://space-economy.esa.int/article/33/what-is-the-space-economy#_ftn1). Acesso em: 19 jan. 2025.

ESA. *ESA's Annual Space Environment Report*. Darmstadt, Germany: ESA, 2022. Disponível em: [https://space-economy.esa.int/article/33/what-is-the-space-economy#\\_ftn1](https://space-economy.esa.int/article/33/what-is-the-space-economy#_ftn1). Acesso em: 19 jan. 2025.

ESA. *ESA purchases world-first debris removal mission from start-up*. 2020. Disponível em: [https://www.esa.int/Space\\_Safety/ESA\\_purchases\\_world-first\\_debris\\_removal\\_mission\\_from\\_start-up](https://www.esa.int/Space_Safety/ESA_purchases_world-first_debris_removal_mission_from_start-up). Acesso em: 14 maio 2025.

ESA. *Space debris mitigation: The case for a code of conduct*. 2020. Disponível em: [https://www.esa.int/Safety\\_Security/Space\\_Debris/Space\\_debris\\_by\\_the\\_numbers](https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers). Acesso em: 18 jan. 2025.

ESA. *TheZero Debris Charter*. Disponível em:

[https://www.esa.int/Space\\_Safety/Clean\\_Space/The\\_Zero\\_Debris\\_Charter](https://www.esa.int/Space_Safety/Clean_Space/The_Zero_Debris_Charter). Acesso em: 20 mar. 2025.

ESA – European Space Agency. Recycling Space Plant. ESA Activities, 2024. Disponível em: <https://activities.esa.int/4000145492> em: 25 maio 2025.

---

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *Closing the Loop: an EU action plan for the circular economy*. 2015. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>. Acesso em: 19 mar. 2025.

---

EUROPEAN SPACE AGENCY. *ClearSpace-1: First debris removal mission*. 2023. Disponível em: [https://www.esa.int/Safety\\_Security/ClearSpace-1](https://www.esa.int/Safety_Security/ClearSpace-1). Acesso em: 6 maio 2025.

FGVCES. Experiências e reflexões sobre a gestão do ciclo de vida de produtos nas empresas brasileiras: Ciclos 2015 e 2016. 2017. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/items/fb41054d-4d1c-43eb-bc27-efe4e57b6974>. Acesso em 05 mai. 2024.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. (2024). Space Debris Monitoring and Removal Market Size, Share, Growth. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/space-debris-monitoring- and-removal-market-104070>

FERREIRA-SNYMAN, M. P. (2021). Challenges to the Prohibition on Sovereignty in Outer Space - A New Frontier for Space Governance. Potchefstroom Electronic Law disponívél: DOI: <http://dx.doi.org/10.11606/1984-4867.v34i1p204-216>

GEISSDOERFER, M. et al. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 757–768, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>. Acesso em: 28 mar. 2025.

GENG, Y.; DOBERSTEIN, B. Developing the circular economy in China: Challenges and opportunities for achieving 'leapfrog development'. *The International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, v. 15, n. 3, p. 231-239, 2008.

GONÇALVES, T. M.; BARROSO, A. F. F. A economia circular como alternativa à economia linear. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, 11., 2019, São

CRISTÓVÃO, SE. Anais [...]. São Cristóvão, SE, 2019. p. 265-272. <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/12561>

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 2016.

GLOBAL Market Insights. (2023). Space Debris Removal Services Market Size and Forecast. Disponível em: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/space-debris-removal-services-market>

GMCLOG. (2023, fevereiro 27). *Economia linear x circular: diferenças e impactos ao meio ambiente* [Diagrama]. Recuperado em 3 de maio de 2025, Disponível: <https://gmclog.com.br/2023/02/27/economia-linear-x-circular-diferencias-e-impactos-ao-meio-ambiente/>

IWASAKA, Fernanda Yumi. Políticas públicas e economia circular: levantamento internacional e avaliação da política nacional de resíduos sólidos. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2018.

ISO 24113:2019 – Space systems – Space debris mitigation requirements. Geneva: ISO, 2021. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/83494.html>. Acesso em: 22 maio 2025.

ISO 27852:2024 – Space systems – Estimation of orbit lifetime. Geneva: ISO, 2021. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/83494.html>. Acesso em: 22 maio 2025.

JAPÃO. *Law for the promotion of effective utilization of resources*. 1991. Disponível em: [http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/regulation\\_europe/35-LawforPromotionofEffectiveUtilizationofResources.pdf](http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/regulation_europe/35-LawforPromotionofEffectiveUtilizationofResources.pdf). Acesso em: 07 abr. 2025.

KENNEDY, J. F. (1963). John F. Kennedy Quote. Libquotes. Recuperado de [https://libquotes.com/john-f-kennedy/quote/lbo5p1q#google\\_vignette](https://libquotes.com/john-f-kennedy/quote/lbo5p1q#google_vignette)

KENNEDY, J. F. John F. Kennedy Quote. Libquotes. 1963. Recuperado de: <https://libquotes.com/john-f-kennedy/quote/lbo5p1q>.

KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, v. 143, p. 37-46, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>. Acesso em: 08 jan. 2025.

LIXO. In: *Novo Dicionário da Língua Portuguesa*. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: [http://www.uol.com.br/aurelio/index\\_result.html?stype=k&verbete=lixo&x=21&y=5](http://www.uol.com.br/aurelio/index_result.html?stype=k&verbete=lixo&x=21&y=5). Acesso em: 19 jan. 2025.

LYALL, Francis; LARSEN, Paul B. *Space Law: A Treatise*. 2. ed. Abingdon: Routledge, 2017. Disponível: [https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2022/aac\\_105c\\_22022crp/aac\\_105c\\_22](https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2022/aac_105c_22022crp/aac_105c_22)

LEOLABS. LeoLabs Global Radar Network. 2023. Disponível em: <https://www.leolabs.space>. Acesso em: 6 maio 2025.

NET ZERO INSIGHTS. The Investors Accelerating the Shift to a Circular Economy. 2025. Disponível em: <https://netzeroinsights.com/resources/leading-investors-accelerating-the-shift-to-a-circular-economy/>. Acesso em: 26 jun. 2025.

MURRAY, A.; SKENE, K.; HAYNES, K. The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *Journal of Business Ethics*, v. 140, n. 3, p. 369–380, 2017.

MOMENTUS. Sustainable Propulsion Solutions. 2021. Disponível em: <https://momentus.space>. Acesso em: 6 maio 2025.

MARKETS and Markets. (2023). Space Debris Removal Market by Solution, Orbit, End User, and Region Global Forecast to 2030. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/space-debris-removal-market-179602300.html>

MUSK, Elon. Making Humans a Multiplanetary Species. *New Space*, v. 5, n. 2, p. 46–61, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1089/space.2017.29009.emu>.

NAÇÕES UNIDAS. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Assembleia Geral das Nações Unidas, A/RES/70/1, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 25 maio 2025.

NASA. *Commercial Market Assessment for Crew and Cargo Systems*. 2010. Disponível em: <https://standards.nasa.gov/standard/osma/nasa-std-871914>. Acesso em: 3 out. 2021.

NASA. *Space Debris and Human Spacecraft*. 2021. Disponível em: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv17i3.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2025.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. Active Debris Removal Vehicle (ADRV) Concept Study. NASA Technical Report, 2020. Disponível em: <https://www.nasa.gov>. Acesso em: 01 maio 2025.

NASA. *Spacecraft to Remove Orbital Debris*. 2020. Disponível em: <https://technology.nasa.gov/patent/MSC-TOPS-90>. Acesso em: 13 maio 2025.

NASA. *Environmental Control and Life Support System (ECLSS)*. 2021. Disponível em: <https://www.nasa.gov/feature/environmental-control-and-life-support-system-eclss>. Acesso em: 27 maio 2025.

NASA. *OSAM-1: On-Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing*. 2022. Disponível em: <https://nexus.gsfc.nasa.gov/OSAM-1.html>. Acesso em: 27 maio 2025.

NASA. *Refabricator: 3D Printing and Recycling in Space*. 2019. Disponível em: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/news/refabricator](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/refabricator). Acesso em: 27 maio 2025.

NASA. *Using the Moon's Resources for Artemis*. 2020. Disponível em: <https://www.nasa.gov/specials/artemis/>. Acesso em: 27 maio 2025.

NOBRE, Gustavo Cattelan; TAVARES, Elaine. The quest for a circular economy final definition: A scientific perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 314, n. 127973.

NORTHROP GRUMMAN. MEV-1 Mission Extension Vehicle Successfully Docks. 2020. Disponível em: <https://canaltech.com.br/espaco/northrop-grumman-consegue-acoplar-equipamento-de-manutencao-a-satelite-em-orbita-182636/>. Acesso em: 6 maio 2025.

ORBIT RECYCLING. 2022. Disponível em: <https://www.corporatevision-news.com/winners/orbit-recycling/>. Acesso em: 02 abr. 2025.

OKADA, Nobu. Global implementation of active debris removal. Viena: United Nations Office for Outer Space Affairs, 2025. Apresentação técnica no 61st session of the Scientific and Technical Subcommittee of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space – COPUOS/STSC. Disponível em:

[https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2025/ListOfTechnicalPresentations/2\\_Tuesday4th/AM1\\_-](https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2025/ListOfTechnicalPresentations/2_Tuesday4th/AM1_-)

[JAPAN Item5 Global implementation of active debris removal Nobu Okada as of 2 Feb.pdf](#) Acesso em: 14 maio 2025.

PAÍSES BAIXOS. *Netherlands Circular Economy*. 2021. Disponível em: <https://www.government.nl/topics/circular-economy>. Acesso em: 12 mar. 2025.

PRATER, T. et al. Refabricator: Demonstrating a closed-loop additive manufacturing system on the International Space Station. *AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2019-4427>.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE DIREITO AEROESPACIAL. Núcleo de Estudos de Direito Espacial – NEDE. Disponível em: <https://sbda.org.br/nede/>. Acesso em: 2 maio 2025.

SPACE NEWS. SpaceX's reusable Falcon 9: What are the real cost savings for customers? Disponível em: <https://spacenews.com/spacexs-reusable-falcon-9-what-are-the-real-cost-savings-for-customers/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

STEFFEN, W. et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, v. 347, n. 6223, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1259855>. Acesso em: 12 mar. 2025.

SKYRORA. Eco-friendly Rocketry and Skyrora XL. 2023. Disponível em: [https://cream.org.br/cream\\_site/startup-escocesa-quer-produzir-combustivel-para-foguetes-a-partir-de-residuos-plasticos/](https://cream.org.br/cream_site/startup-escocesa-quer-produzir-combustivel-para-foguetes-a-partir-de-residuos-plasticos/) Acesso em: 6 maio 2025.

SILVA, Solange Teles da. Para entender Direito Ambiental Internacional. Belo Horizonte: Del Rey, 2010.

SPACEFACTS. Spaceflights. Disponível em: [www.spacefacts.de](http://www.spacefacts.de). Acesso em: 19 jun de 2010.

SPACE FOUNDATION. The Space Report 2024 Q2: Space Economy Grows to US\$ 570 billion in 2023. Colorado Springs: Space Foundation, 18 jul. 2024. Disponível em: <https://www.spacefoundation.org/2024/07/18/the-space-report-2024-q2/>. Acesso em: 26 jun. 2025.

SUEZ. *A circular economy for space*. 2021. Disponível em: <https://www.suez.com/en/our-solutions/waste-management/circular-economy-for-space>. Acesso em: 23 mar. 2025.

TAN, B.; LO, C.; OZTURK, M. The circular economy concept in the space industry: A comprehensive literature review. *Space Policy*, v. 61, p. 101438, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2022.101438>. Acesso em: 25 abr. 2025.

TERRA. Astronave RemoveDebris pode ser esperança para limpeza de lixo espacial. 2018. Disponível em: <https://www.terra.com.br/byte/astronave-removedebris-pode-ser-esperanca-para-limpeza-de-lixo-espacial,f3eafabc2c0fa80d7c8b9fcf3e507d1j1n78gv0.html>. Acesso em: 14 maio 2025.

UNEP United Nations Environment Programme. *Circular Economy and the Global Environment*. 2020. Disponível em: <https://www.unep.org>.

UNITED NATIONS OFFICE FOR OUTER SPACE AFFAIRS. *Report of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space: Addendum - Responses to the set of questions provided by the Working Group on the Definition and Delimitation of Outer Space*. Document A/AC.105/889/Add.2, 2002. Disponível em: [https://www.unoosa.org/pdf/reports/ac105/AC105\\_889Add2E.pdf](https://www.unoosa.org/pdf/reports/ac105/AC105_889Add2E.pdf). Acesso em: 2 maio 2025.

UNITED NATIONS OFFICE FOR OUTER SPACE AFFAIRS – UNOOSA. UNOOSA Annual Report 2023. Viena: UNOOSA, 2024. Disponível em: [https://www.unoosa.org/documents/pdf/annualreport/UNOOSA\\_Annual\\_Report\\_2023.pdf](https://www.unoosa.org/documents/pdf/annualreport/UNOOSA_Annual_Report_2023.pdf). Acesso em: 26 jun. 2025.

UNITED NATIONS OFFICE FOR OUTER SPACE AFFAIRS (UNOOSA). Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. Vienna: United Nations, 2021. Disponível em: [https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2021/stspace/stspace79\\_0\\_html/st\\_space\\_79E.pdf](https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2021/stspace/stspace79_0_html/st_space_79E.pdf). Acesso em: 20 maio 2025.

VIOLANTE, Cristiano. Governança global e a nova corrida espacial: entre a sustentabilidade e a militarização. *Revista da Escola de Guerra Naval*, v. 26, n. 2, p. 431–453, 2020.