
4 POLUIÇÃO DO AMBIENTE ESPACIAL: O PROBLEMA DO LIXO NO ESPAÇO¹

Jean Paulo dos Santos Carvalho

E-mail: jeanfeg@gmail.com

Jackson dos Santos Lima

E-mail: jacksonmusico2@gmail.com

Carine Moreira Gonçalves

E-mail: carinemoreira.fsa@gmail.com

RESUMO

Uns dos impactos da exploração espacial é o fato que em órbita da Terra estão localizados objetos não funcionais de diversos tamanhos. Esses objetos são conhecidos como lixo espacial ou detritos espaciais. O lixo espacial são todos objetos artificiais, incluindo fragmentos e seus elementos, na órbita terrestre ou reentrando na atmosfera, que não são funcionais. O lixo espacial causa uma poluição do ambiente espacial e traz riscos para a exploração do espaço, além disso, pode causar grandes prejuízos a vidas humanas. Esses detritos podem causar danos em satélites ativos na órbita terrestre, e quando retornam para o planeta, os que sobrevivem a reentrada, podem causar prejuízos por consequência da queda de fragmentos em regiões habitacionais ou industriais. Assim, diante dessa problemática fomos motivados a analisar como a comunidade científica está trabalhando na busca de soluções para amenizar essa situação. O objetivo básico deste trabalho é discorrer sobre a temática do lixo espacial, contextualizando os impactos que esses objetos causam na sociedade e os perigos que a exploração espacial está sujeita por causa dos detritos espaciais, além de apresentar algumas tecnologias que estão sendo propostas para contribuir com a solução desse problema. É apresentada uma comparação da evolução dos detritos durante os anos de 2016, 2017, 2018 e 2019 com base nos relatórios da Agência Espacial Europeia (ESA).

Palavras-chave: Lixo Espacial. Ambiente Espacial. Sustentabilidade.

¹ Anais [recurso eletrônico] - Seminário sobre Energias Renováveis, Eficiência Energética e Sustentabilidade - SERES, 30 jul. 2020, Camaçari, Bahia, Brasil.

ABSTRACT

One of the impacts of space exploration is the fact that in orbit of the Earth are located non-functional objects of different sizes. These objects are known as space junk or space debris. Space junk is all artificial objects, including fragments and their elements, in orbit of the Earth or re-entering the atmosphere, which are not functional. The space junk causes pollution of the space environment and brings risks to space exploration, in addition, can cause major damage to human lives. This debris can cause damage to active satellites in Earth orbit, and when they return to the planet, those who survive re-entry, can cause damage as a result of the fall of fragments in residential or industrial areas. Thus, in view of this problem, we were motivated to analyze how the scientific community is working in the search for solutions to alleviate this situation. The basic objective of this work is to discuss the theme of the space junk, contextualizing the impacts that these objects cause in society and the dangers that space exploration is subject because of the space debris, in addition to presenting some technologies that are being proposed to contribute with the solution to this problem. A comparison of the evolution of the debris during the years 2016, 2017, 2018 and 2019 is presented based on the reports of the European Space Agency (ESA).

Keywords: Space Junk. Space Environment. Sustainability.

4.1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade o ser humano sonha em sair do chão, conhecer o que existe além do céu, o que chamamos de ambiente espacial. No século passado houve muitos avanços no campo da ciência espacial, o que possibilitou nossa sociedade explorar o espaço, em 1957 finalmente a humanidade conseguiu ultrapassar essa desafiadora fronteira da atmosfera, assim então se iniciou a Era Espacial. No entanto, essa exploração do espaço gerou uma quantidade muito grande de objetos que não são funcionais, conhecidos como lixo espacial ou detritos espaciais (space debris). O lixo espacial são todos objetos artificiais, incluindo fragmentos e seus elementos, na órbita terrestre ou reentrando na atmosfera, que não são funcionais (ESA, 2020).

O lixo espacial é um problema que tem impactos na exploração do espaço, esses objetos podem causar danos em satélites ativos na órbita terrestre, e quando retornam para o planeta, podem causar prejuízos por consequência da queda de fragmentos, que sobrevivam a reentrada da atmosfera, em regiões habitacionais ou industriais. O objetivo básico deste trabalho é discorrer sobre a temática do lixo espacial, contextualizando os impactos que esses objetos podem causar na sociedade e os perigos que a exploração espacial está sujeita por causa dessa problemática.

O problema do lixo espacial está sendo referenciado na cultura popular, é possível ver diversas obras que abordam a temática, a exemplo do filme Gravidade de 2013, que mostra como uma colisão de objetos pode gerar uma nuvem de partículas que viajam a altíssimas velocidades e que podem trazer riscos a vida de tripulantes em missões espaciais, a estação espacial, e destruir satélites artificiais em operação, que são extremamente caros. Assim, é de extrema importância que a sociedade compreenda os problemas que o lixo espacial pode trazer e as medidas que devem ser tomadas para mitigar esse problema. Além de reconhecer a importância do espaço para o modo de vida da sociedade como conhecemos atualmente.

O principal interesse inicial no espaço era para uso militar no contexto da guerra fria entre Estados Unidos da América (EUA) e a antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS). Com o lançamento do primeiro satélite artificial ao espaço o Sputnik 1 (1957), a antiga URSS saiu na frente da corrida espacial e se destacou entre as demais potências. Assim, incomodou principalmente os Estados Unidos que desejava ser pioneiro na exploração do espaço. Dessa forma, se iniciou a corrida espacial com o investimento em tecnologia espacial por parte dessas duas superpotências, lançando cada vez mais veículos espaciais para o espaço.

Destacando que o Direito Espacial Internacional (DEI) visa impor regras para que nenhum país se aproprie do espaço, além de promover o controle do uso de armas, conceder a liberdade de exploração, definir a responsabilidade em casos de danos causados por objetos espaciais entre outras atribuições (MONSERRAT FILHO, 1997). No âmbito do direito espacial é crucial intensificar a cooperação internacional na exploração e uso do espaço. Para isso, é necessário melhorar os processos de organização das atividades espaciais. Isso envolve o empenho das agências espaciais. Também no âmbito do direito espacial, Paula e Celestino (2019) comentam em seu trabalho que praticamente todas as nações com um alto nível de atividades espaciais adotaram medidas eficientes de mitigação do lixo espacial nas missões lançadas a partir de 2008, no período após a adoção das diretrizes de mitigação. Assim os autores afirmam que essas medidas são promissoras, mas o problema ainda exige muita cautela, dado o número de objetos inoperantes que continuam a poluir as órbitas da Terra e que tendem a aumentar devido às colisões que podem ocorrer entre esses objetos a qualquer momento.

Vale destacar o Tratado do Espaço (MONSERRAT FILHO, 1997), que versa sobre princípios reguladores das atividades dos Estados na exploração e uso do espaço cósmico, inclusive a Lua e demais corpos celestes. Esse tratado foi inaugurado após o lançamento do Sputnik 1, mas só entrou em vigor e foi assinado 10 anos após o início da Era Espacial (MONSERRAT FILHO, 1997), e esse “código internacional do espaço”, consolidou várias diretrizes entre os EUA, URSS, pelos demais países membros e provocou o surgimento de inúmeras convenções espaciais. A maior preocupação era prevenir que a utilização das atividades espaciais seria de forma negativa, pois acreditavam que seria apenas para benefícios a todos os países e à toda humanidade. Também é mencionado que o espaço pode ser usado para fins militares (MONSERRAT FILHO, 1997), no entanto, é proibido testes nucleares, armas de destruição em massa, instalações de bases e fortificações militares, instalações de armas nos corpos celestes e realizar manobras militares na lua ou em qualquer outro corpo celeste. Existem algumas ações que não são proibidas, como lançar mísseis, instalar alguns tipos de armas que não sejam de destruição em massa (por exemplo, a laser ou feixes de partículas), utilizar pessoal militar em pesquisas científicas ou usar o espaço para vigilância, controle, observação etc. Em Moserrat Filho (2007) o autor discorre sobre o ambiente espacial e o direito espacial, mostrando a preocupação com a possibilidade de uma guerra no espaço por questões ligadas ao domínio do ambiente espacial para colocação de veículos espaciais.

Em Martins (2010) é apresentado um estudo sobre o meio ambiente espacial, mas com enfoque jurídico, em que a autora discorre sobre o ambiente espacial relacionando o direito, em especial o direito espacial, como um importante regulador das atividades espaciais de forma

que essas atividades ocorram sempre levando em conta a sustentabilidade do planeta e das missões espaciais. A autora comentando sobre o Tratado do Espaço, chama a atenção que “as normas específicas, internas e internacionais, devem ser criadas para que haja uma cooperação entre as Nações, com um único esforço comum que é o da proteção ambiental a fim de que a preservação seja um costume habitual e não uma imposição”. Com isso, a autora levanta a questão do direito espacial contribuir com a regulação do ambiente espacial possa considerar a sustentabilidade como um ponto que deve ser considerado.

A sustentabilidade do ambiente espacial é essencial para assegurar a exploração da órbita terrestre com eficiência e responsabilidade. A busca pela sustentabilidade em todas as áreas da exploração de espaços ambientais é atualmente um tema essencial para o sucesso de qualquer empreendimento tecnológico que busca o desenvolvimento econômico e científico. A sustentabilidade detém um conceito amplo que deve ser aplicado ao ambiente de exploração espacial. A comissão de Brundtland definiu o Desenvolvimento Sustentável como “aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de satisfazer suas próprias necessidades” (CASSEN, 1987). Assim, quando a exploração do espaço respeita o princípio do desenvolvimento sustentável, assegura a utilização eficaz e duradoura do ambiente espacial.

4.2 O PROBLEMA DO LIXO ESPACIAL

Os satélites artificiais em órbita da Terra têm aplicações diversas incluindo ciência espacial, observação da Terra, meteorologia, pesquisa climática, telecomunicações, navegação e exploração espacial humana (ESA, 2020). Esses equipamentos possibilitam a coleta de dados científicos, aplicações comerciais e a oferta de diversos serviços essenciais, como o sistema de localização global (GPS) e a internet, além disso, ainda existe muitas possibilidades de exploração futura para aperfeiçoar os serviços existentes e oferecer novos. No entanto, nas últimas décadas, com o aumento das atividades espaciais, o lixo espacial começou a ganhar uma dimensão preocupante (GOMES e SOUZA, 2011). As operações espaciais desde o lançamento do primeiro satélite artificial da Terra, o Sputnik 1, em 4 de outubro de 1957, produziram inevitavelmente detritos espaciais, que foram deixados no espaço próximo à Terra. O primeiro satélite artificial considerado lixo espacial é o Vanguard 1, que foi o segundo satélite lançado pelos EUA. Esse satélite foi colocado em órbita em março de 1958 e interrompeu as transmissões de rádio seis anos depois, assim esse objeto de 1,47 kg permanecerá em órbita da Terra por mais de 200 anos (HALL, 2014). Nesses 62 anos de atividades espaciais, mais de

5.980 lançamentos resultaram em cerca 25.297 objetos rastreados em órbita (ESA, 2020). Durante cada lançamento, apenas uma fração muito pequena da massa total trazida para o espaço consiste na carga útil ativa. Dessa forma, é fato que sempre houve mais lixo espacial em órbita do que satélites operacionais (ESA, 2020).

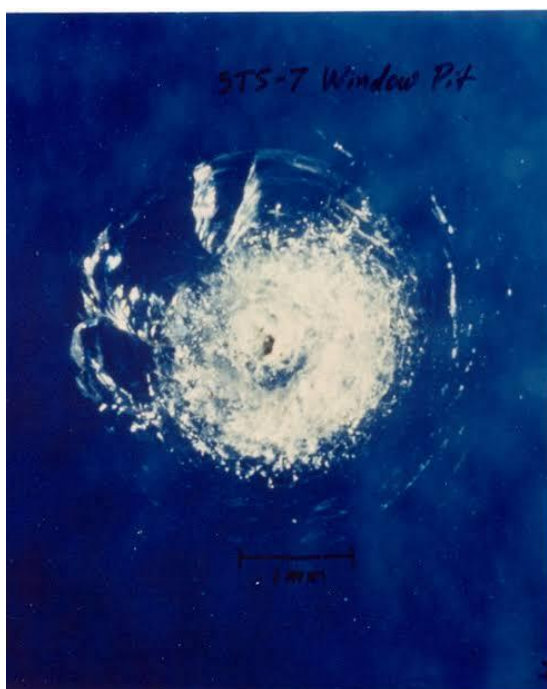
A primeira iniciativa de conscientização do problema do lixo espacial surgiu no início dos anos 1960, com base em atividades iniciais de pesquisa realizadas nos EUA, mas levou algum tempo para alcançar a comunidade internacional. Isso acabou acontecendo em meados da década de 1970 através de conferências organizadas pela Federação Internacional de Astronáutica.

A maior parte da massa de um foguete se transforma em detritos espaciais em poucos minutos. Na maioria dos lançamentos do início da exploração espacial, os estágios superiores, coberturas da carga útil e anéis adaptadores, eram descartados nas órbitas da Terra, não havia a preocupação em descartar esses objetos. Além disso, a carga útil final também acabava como detritos espaciais após o término da missão. Por consequência dessas ações, os 1957 satélites em operação atualmente, compreendem apenas cerca de 6% do número total de objetos conhecidos feitos pelo homem no espaço, maiores que 10 centímetros (ESA, 2020). Agora, mais recentemente, aumentou bastante a preocupação com a questão do lixo espacial e, com isso, os agentes lançadores têm se preocupado com a questão da sustentabilidade, por exemplo, a empresa Space Exploration Technologies Corporation (SpaceX) construiu o estágio principal de seus veículos de lançamento de forma que possa ser reutilizado em outros lançamentos, assim evitando que esse objeto seja descartado na órbita da Terra (REDDY, 2018). Vale destacar que os estágios superiores continuam sendo descartados no espaço se transformando em lixo espacial.

Um fator que gera detritos consiste nos eventos de fragmentação em órbita. Assim o problema do lixo espacial coloca em risco as missões no espaço orbital terrestre e os satélites ativos. Esse acúmulo de detritos pode criar cinturões que podem inutilizar diversas órbitas (MEHRHOLZ et al., 2002). O efeito pelo qual a geração do lixo espacial através de colisões e explosões em órbita poderia levar a um grande aumento na quantidade de objetos artificiais no espaço, numa reação em cadeia que tornaria o voo espacial muito perigoso para a conduta, foi sugerido por Donald Kessler em 1978. Para comprovar essa afirmação, existe o fato que desde o início da era espacial até o final de 2018, já foram confirmados 536 eventos de fragmentação em órbita (ESA, 2020). Dessa forma, o cenário proposto por Kessler se mostra cada vez mais plausível, pois a população atual de detritos atingiu um nível de instabilidade que se não houver interferência, as colisões se tornarão a maior fonte de geração de fragmentos de detritos em um

futuro próximo (LIOU; JOHNSON, 2006), como podemos ver no filme de ficção científica Gravidade. Um fato que ilustra o problema enfrentado na exploração do espaço por causa do lixo espacial é o que ocorreu durante as primeiras 88 missões de ônibus espaciais, entre 1981 e 1998, em que mais de 70 janelas de ônibus espaciais tiveram que ser substituídas por causa de impactos de lixo espacial. Por exemplo, durante a missão STS-7 de 1983, um chip de 0,2 mm atingiu uma janela do ônibus espacial Challenger e criou o buraco de 0,4 mm de diâmetro como mostrado na Figura 1 (HALL, 2014).

Figura 1 - Buraco causado pelo chip de 0,2 mm no ônibus espacial Challenger



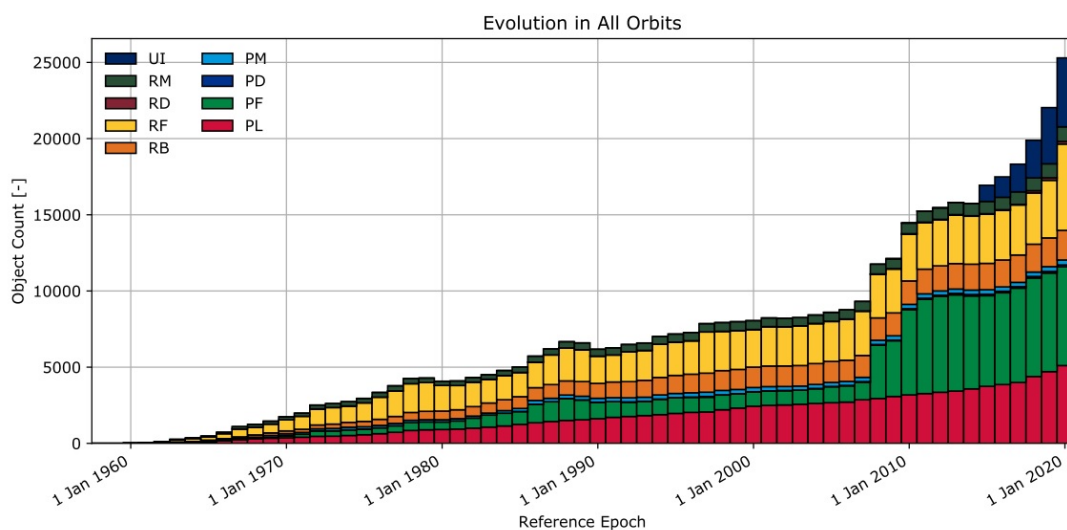
Fonte: Repositório digital da NASA.

O problema do lixo espacial tornou-se um tema que atraiu a atenção do público recentemente, quando um satélite de comunicação americano ativo, o Iridium 33 de 950 kg, colidiu com o satélite inativo russo, o Cosmos 2251, na região da Sibéria, produzindo mais de 1800 fragmentos e formando uma nuvem de detritos. Dois anos mais tarde em 11 janeiro de 2007 a espaçonave Chinesa Fengyun-1C foi atingida por um míssil balístico de teste pelo governo Chinês, formando 2500 novos fragmentos, outro evento que despertou a consciência do público sobre o problema. Como consequências desses dois eventos, o risco de colisões mais que dobrou para os satélites que orbitam em altitudes de 700 a 800 km. Em 2014, as agências operadoras de satélites artificiais têm executado dezenas de manobras de prevenção de colisões para proteger seus satélites de observação e satélites científicos nessa região (HALL, 2014).

Nos últimos anos, a investigação científica do problema do lixo espacial tornou-se um tópico de pesquisa independente dentro do campo da pesquisa espacial. Iniciaram-se programas de observação para investigar a população atual do lixo espacial e, ao mesmo tempo, foram desenvolvidos modelos para entender as fontes e a evolução da população. O lixo espacial, uma vez criado, não pode ser removido facilmente do ambiente espacial da Terra. Em março de 2015, foi conhecido as órbitas de cerca de 17000 objetos individuais. Os tamanhos mínimos rastreados são cerca de 10 cm na órbita baixa terrestre e 1 m na órbita geoestacionária. Apenas cerca de 1957 desses objetos são satélites ativos. Modelos estatísticos estimam que existem cerca de 750000 de objetos maiores que 1 cm e mais de um trilhão de fragmentos maiores que 0,1 mm (ESA, 2020).

A Figura 2 apresenta a evolução do número de objetos nas órbitas da Terra desde o início da exploração espacial até o ano da publicação do relatório da Agência Espacial Europeia (AEE) em 2020 (ESA, 2020). Esses objetos incluem lixo espacial e satélites em funcionamento, o lixo espacial forma um número relevante no total de objetos nas órbitas terrestres. Os tipos de objeto estão classificados em cores: na cor azul escuro, objetos indefinidos; em verde escuro, objetos relacionados a missão de foguete; em marrom detritos de foguete; em amarelo, detritos de fragmentos de foguete; em laranja, corpos de foguete; em azul claro, objetos relacionados à missão de carga útil; em azul, detritos relacionados à carga útil; em verde claro, fragmentos de carga útil e em vermelho, satélites operacionais. É possível notar na Figura 2 que o número de objetos que são classificados como lixo espacial é muito superior ao número de objetos considerados como carga útil.

Figura 2 - Crescimento no número de objetos no decorrer dos anos por tipo de objeto

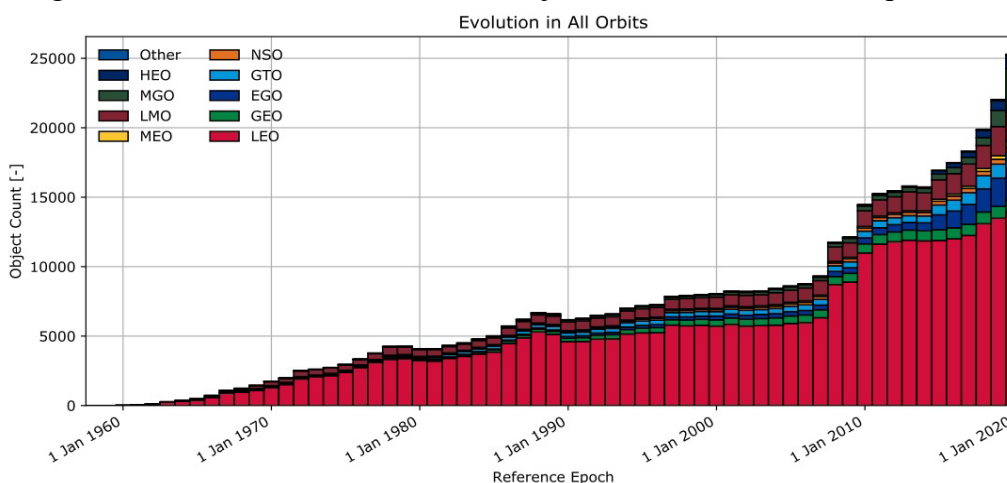


Fonte: Relatório da ESA sobre ambiente espacial (2020).

A NASA (2020) afirma que a crescente população de lixo espacial aumenta o perigo potencial para todos os satélites funcionais, no entanto, a Estação Espacial Internacional (EEI), e espaçonaves tripuladas correm um maior risco com as colisões. Todos os objetos orbitam a velocidades altíssimas, por exemplo, 28.163,52 km/h, essa velocidade é suficiente para que um detrito com dimensões milimétricas possa causar danos a um satélite ativo ou uma espaçonave em missão. Os objetos no ambiente espacial são divididos em duas categorias amplas: aquelas que podem ser rastreadas até um evento de lançamento e para as quais a natureza pode ser identificada e aquelas para as quais isso não é possível. Esses detritos maiores são formados por estágios de foguetes e satélites desativados (ESA, 2020). Como complementa Sampaio *et al.* (2014), o lixo espacial, no geral, é composto de alumínio de estruturas de espaçonaves, zinco e óxidos de titânio de revestimentos de controle térmico, e seus tamanhos variam de vários metros a uma fração de micrômetro de diâmetro.

As regiões do espaço onde os detritos são localizados pode ser dividido em três categorias principais: a Órbita Baixa Terrestre, a Órbita Média Terrestre e a Órbita Geoestacionária Terrestre. Na órbita baixa terrestre são conhecidas as órbitas individuais de todos os objetos maiores que 10 centímetros. Para peças menores, há apenas informações estatísticas limitadas, como a estimativa do número total de imagens de um determinado intervalo de tamanho em regiões específicas da órbita. No anel geoestacionário, se localizam a maioria dos satélites de comunicação comercial, uma população substancial de detritos no tamanho de um intervalo de 0,1 á 1 m foi descoberta nos últimos anos. Em altitudes mais elevadas, as informações sobre os detritos menores se tornam mais escassas (ESA, 2020). Ainda segundo Gomes e Souza (2011), a densidade desses detritos artificiais orbitando a Terra é maior do que a densidade de meteoroides.

Figura 3 - Crescimento do número de objetos no decorrer dos anos por órbita



Fonte: Relatório da ESA sobre ambiente espacial (2020).

As principais órbitas terrestres são: Órbita Geoestacionária (GEO), Órbita Geossíncrona Inclínada (IGO), Órbita Geoestacionária Estendida (EGO), Órbita dos satélites de navegação (NSO), Órbita de Transferência (GEO-MEO), Órbita Terrestre Média (GMO), Órbitas de cruzamento (MEO-GEO), Órbita baixa da Terra (LEO), Órbita Terrestre de Alta Altitude (HAO), Órbitas de cruzamento (MEO-GEO), Órbita Terrestre Excêntrica (LMO), Órbitas de cruzamento (LEO-MEO), Órbita indefinida (UFO), Órbitas de Fuga (ESO). A Figura 3 apresenta um gráfico da distribuição do lixo espacial nessas órbitas. É possível notar que o número de objetos na Órbita Baixa da Terra, onde fica localizada a EEI, é muito superior à quantidade de objetos nas demais órbitas. No entanto, por estarem mais próximos à superfície terrestre são mais fáceis para rastrear as suas trajetórias, assim no caso dos objetos maiores é possível manobrar o satélite operacional para evitar uma colisão. Em 2009 ocorreu um pico no crescimento do número de lixo espacial em órbita, por conta da colisão entre o satélite ativo Iridium 33, que foi lançado em 14 de setembro de 1997, e o satélite Kosmos-2251 que estava fora de serviço desde de 1995. Essa colisão elevou o número de objetos em órbita de 14000 para 16000 por conta dos fragmentos gerados pela colisão (VIEIRA NETO e WINTER, 2012).

4.2.1 Soluções em desenvolvimento para mitigação de detritos espaciais

As principais agências espaciais questionam se existe uma solução viável para o lixo espacial. Pesquisadores do mundo inteiro estão em uma corrida contra o tempo para encontrarem uma tecnologia para solucionar o problema do lixo espacial, antes que ocorra o agravamento desse problema.

Nesta seção, é apresentado o cenário atual das pesquisas sobre novas tecnologias que estão em desenvolvimento com a finalidade de mitigar o problema do lixo espacial, assim, é possível entender como esse problema está sendo discutido no meio científico. Algumas medidas e acordos internacionais contribuíram para a busca de soluções para o problema do lixo espacial. Em 2002 foi criado o Comitê de Coordenação de detritos espaciais. Onde foram publicadas as Diretrizes de Mitigação de detritos espaciais, que serve de base para documentos oficiais (ESA, 2020). O Subcomitê Técnico e Científico do Comitê das Nações Unidas sobre o uso pacífico do espaço sideral criou um conjunto de diretrizes acordadas internacionalmente para a sustentabilidade em longo prazo das atividades espaciais. Essas diretrizes contêm recomendações sobre as estruturas de políticas e regulamentações para atividades espaciais, a segurança das operações espaciais, regras de compromisso para cooperação internacional, capacitação e conscientização para pesquisa e desenvolvimento técnico e científico (ESA,

2020). Existem muitos estudos que visam, no geral, analisar o uso da tecnologia da vela solar para lidar com o problema do lixo espacial. A vela solar consiste em um objeto com uma grande área superficial e pequena massa, que se movimenta usando a luz do Sol, ver, por exemplo, MacInnes (1999) e Tresaco et al. (2016). Diferente de uma vela solar, um foguete comum necessita de uma quantidade de combustível para se movimentar e o satélite artificial precisa de combustível para realizar manobras, em especial, para evitar colisões com detritos. Em Lima (2019) é feito um estudo da possibilidade de aplicação da vela solar, em que simulações numéricas foram realizadas para propagar detritos espaciais na órbita geoestacionária, mostrando que ao aumentar as dimensões do detrito, através do uso de uma vela solar, provoca um aumento da excentricidade orbital, o que contribuiu para a reentrada do detrito na atmosfera da Terra.

A Surrey Satellite Technology Ltd. e o Centro Espacial Surrey na Universidade de Surrey no Reino Unido desenvolveram a nave espacial RemoveDebris que contém experimentos e demonstrações de tecnologia de remoção do lixo espacial, fornecidos por várias empresas aeroespaciais europeias. Em 2 de abril de 2018 foi realizado o lançamento dessa espaçonave que foi implantada na EEI. O propósito dessa missão foi demonstrar a eficácia de novas soluções, como redes e arpões na captura e remoção do lixo espacial em órbita. A missão foi composta por uma plataforma principal, que implantou dois cubos que simularam dois pedaços de lixo espacial como alvos para demonstrar algumas das tecnologias, tais como: captura líquida, captura de arpão, navegação baseada em visão, desorbitação por arrasto com vela solar. Um desses experimentos testou a capacidade de um arpão, que pode ser disparado a 20 metros por segundo, para capturar detritos espaciais em órbita. O mecanismo de captura de rede consiste em quatro pesos voadores em cada canto de uma rede. O peso voador é chamado de bala, que é disparada por um sistema de molas. Essas quatro balas ajudam a expandir a rede grande, envolvendo assim o detrito alvo. Essa opção é muito flexível, pois mesmo que os detritos estejam girando ou tenham uma forma irregular será possível capturá-los com a rede, o que aumenta a eficácia dessa tecnologia (SHAN; GUO; GILL, 2016). A Raytheon Technologies e a Universidade de Michigan estão estudando um sistema de Eliminação de Detritos Espaciais (SpaDE) para remover detritos da órbita disparando jatos concentrados de gases atmosféricos no caminho de detritos direcionados. O projeto SpaDE está investigando o uso de pulsos concentrados de gases atmosféricos para acelerar a taxa de reentrada de detritos localizados na órbita baixa da Terra criando um arrasto temporário que faz com que os detritos entrem novamente na atmosfera mais cedo do que ocorreria naturalmente (NASA, 2019). A EEI também recebeu recentemente uma ferramenta para detectar detritos espaciais. Essa

tecnologia é conhecida como sensor de lixo espacial, um sensor de impacto montado no exterior da EEI para monitorar impactos causados por detritos espaciais de pequeno tamanho. Os escudos de proteção atualmente são adotados apenas na EEI e não são eficazes para detritos maiores que 1 cm (LETIZIA; COLOMBO; LEWIS, 2015). A AEE está adequando, através do projeto CleanSat, o desenvolvimento de satélites, para que sejam construídos de forma que queimem completamente durante a reentrada na atmosfera da Terra. Assim garantindo que o satélite seja inteiramente destruído durante a reentrada no final da sua vida útil. Esse novo cenário evidencia a importância de buscar soluções que possibilitem a reentrada de detritos na atmosfera ou quando isso não for possível alterar a órbita do detrito para evitar colisões. Com isso é possível notar uma preocupação com a sustentabilidade na indústria de construção de satélites, pois a reentrada de objetos espaciais pode trazer riscos à população e contaminação de ambientes por materiais poluentes liberados com a queda desses objetos (ESA, 2020).

Figura 4 - Módulo PAM-D que caiu no deserto da Arábia Saudita



Fonte: Galeria oficial do programa de detritos orbitais da NASA.

Em 21 de janeiro de 2001, um terceiro estágio do Delta 2, conhecido como PAM-D, reentrou na atmosfera no Oriente Médio. A carcaça de motor de titânio do PAM-D, pesando cerca de 70 kg, caiu na Arábia Saudita a cerca de 240 km da capital de Riad. Esse foi um dos estágios que foi usado para lançar um satélite de GPS em 1993. Na Figura 4 temos uma fotografia do módulo PAM-D (NASA, 2020). O descarte pós-missão amplamente defendido pelas principais agências espaciais do mundo tem como impacto, no longo prazo, a diminuição do crescimento de futuras populações de detritos. No entanto, essa solução será insuficiente para restringir a população de detritos da Terra. Somente a remediação do ambiente espacial da

Terra, com a remoção de objetos grandes existentes em órbita, pode evitar problemas futuros para pesquisa, turismo e comercialização do espaço. Em 2006, nenhuma técnica de remediação demonstrava ser tecnicamente e economicamente viável (LIOU; JOHNSON, 2006). Hoje com o avanço da tecnologia possa ser que novas soluções viáveis sejam confirmadas e adotadas nos próximos anos.

4.3 RESUMOS DE ALGUMAS TECNOLOGIAS E NÚMEROS DE DETRITOS

Nesta seção, apresentamos um resumo das tecnologias de mitigação do lixo espacial e mostramos gráficos da evolução do lixo espacial nos últimos 4 anos. Na Quadro 1 apresentamos um resumo de algumas soluções propostas para amenizar o problema do lixo espacial. Destaque especial para a Vela Solar que é um mecanismo propulsor que utiliza a energia do Sol, que é uma fonte de energia limpa e abundante, como combustível. Portanto, uma tecnologia sustentável e eficiente para mitigação do lixo espacial, como mostrado em Lima (2019).

Quadro 1 - Resumo das soluções para o lixo espacial

(continua)

Tecnologia Utilizada	Função	Descrição	Fonte
e.Deorbit	Lançar uma rede metálica para recolher uma quantidade de lixo controlada	A uma distância segura, tenta-se envolver o nosso alvo de captura com a rede e direcioná-lo à atmosfera da Terra para ser incinerado.	ESA, 2018
Vela Solar	Empurra os objetos para atmosfera	A vela solar consiste em um objeto com uma grande área superficial e pequena massa, que permite realizar movimento utilizando a pressão de radiação solar como fonte de propulsão a partir da conservação de momento linear das colisões dos fótons com a superfície da vela.	LEIPOLD, 2003
Balões de Hélio	Diminuir a altitude do satélite	Lançar satélites com o balão vazio e dobrado a bordo, ao fim da vida útil desses satélites o balão seria inflado com hélio e aumentaria a resistência de órbita do satélite.	REVISTA GALILEU, 2020

Quadro 1 - Resumo das soluções para o lixo espacial

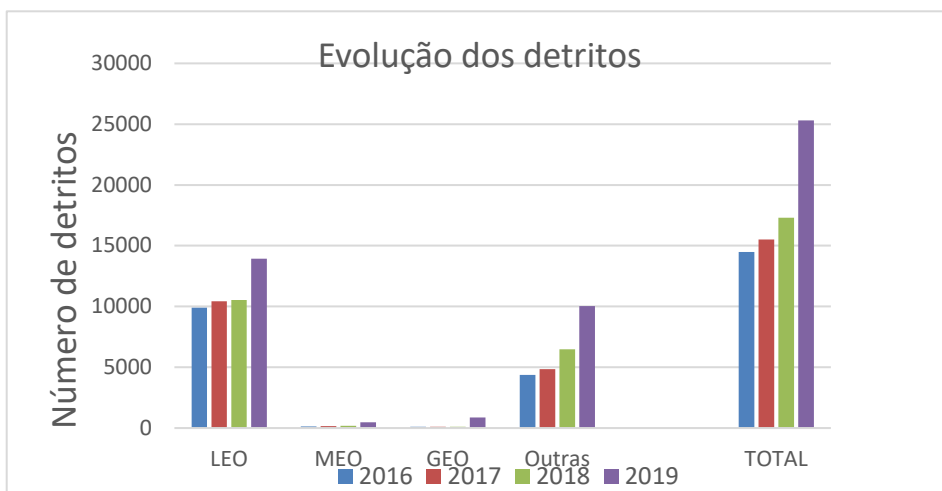
(conclusão)

Raios tratores	Mover objeto sem nenhum contato	São disparados dois feixes de Bessel lado a lado fazendo com que eles se cruzam criando um padrão alternado de regiões claras e escuras, essa variação faz a partícula ser empurrada, esse feixe de luz funciona como uma correia transportadora, levando continuamente a partícula.	INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2020
Teia de espuma pegajosa	Prender o objeto na espuma	Criar uma “teia de aranha” pegajosa com espuma polimérica, a ideia é levar o objeto para a atmosfera.	ZAP.AEIYOU, 2020

Fonte: Elaboração própria (2020).

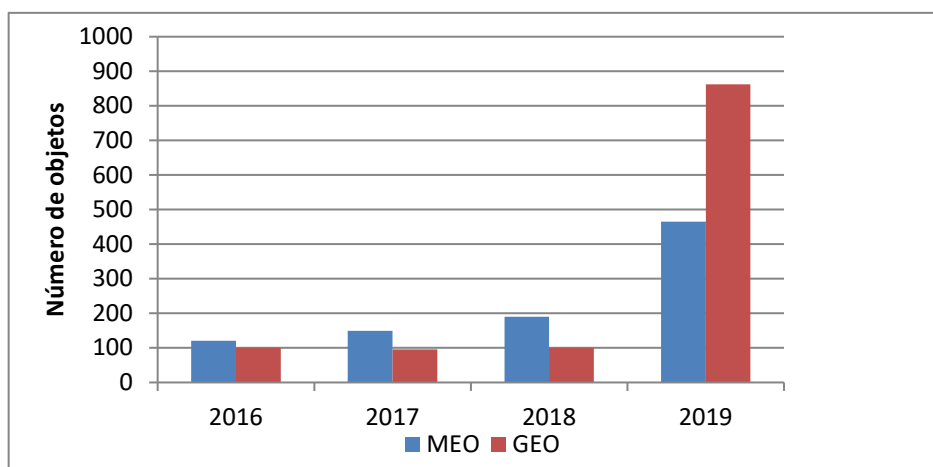
Agora, mostramos uma comparação com dados dos relatórios da ESA (2017, 2018, 2019 e 2020), para observarmos a evolução dos detritos em diferentes órbitas da Terra. Esses relatórios têm como base os dados colhidos no ano anterior ao qual são publicados. A Figura 5 apresenta um comparativo na evolução dos detritos no intervalo de quatro anos. É perceptível o aumento no número de detritos ao longo desse período, reforçando o que já foi exposto e comprova a necessidade de encontrar uma solução alternativa para amenizar a situação do ambiente espacial. Os objetos utilizados nas Figuras 5 e 6 podem ser classificados como: carga útil (satélites operacionais), fragmentos de carga útil, detritos de carga útil, objeto relacionado à missão de carga útil, corpo de foguete, detritos de fragmentação de foguetes, detritos de foguetes e objetos relacionados à missão de foguete.

Figura 5 - Comparação dos dados dos relatórios da ESA (2017, 2018, 2019 e 2020)



Fonte: Elaboração própria (2020).

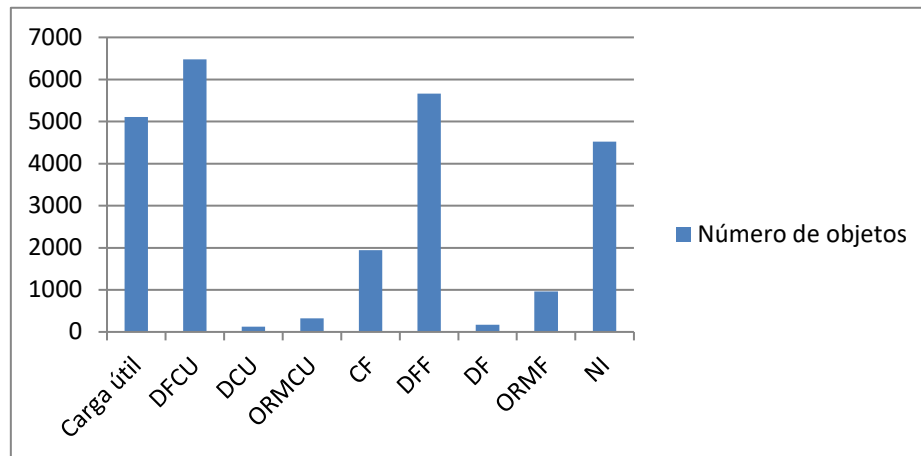
Figura 6 - Comparação dos dados dos relatórios da ESA (2017, 2018, 2019 e 2020)



Fonte: Elaboração própria (2020).

Note que os números de detritos catalogados nas órbitas MEO e GEO são muito menores quando comparado com as demais órbitas, dessa forma a Figura 6 mostra essas duas órbitas separadamente para se ter uma melhor ideia do número de detritos. Observe que na órbita GEO o número de detritos praticamente não sofreu alterações entre os anos de 2016 a 2018, mas em 2019 houve um forte crescimento. O baixo número de detritos na órbita GEO quando comparados aos outros tipos de órbita se deve ao fato que nesta órbita os satélites possuem um tempo de vida útil mais longo, pois são menos afetados pelas forças perturbadoras provenientes da Terra e do efeito do arrasto atmosférico, por ser uma órbita de alta altitude, ou seja, estão numa região bem distante da superfície da Terra, cerca de 42.000 km de altitude. Pelo menor número de satélites artificiais lançados para esta região. Mas, também pela dificuldade de catalogar os detritos no anel geostacionário, principalmente os menores. Na Figura 7 mostramos a relação entre o tipo de objeto e o número de objetos rastreados em todas as órbitas da Terra, como é possível observar a quantidade de lixo espacial é bastante superior a de objetos funcionais.

Figura 7 - Número de objetos por tipo com base no relatório da ESA (2020)



Fonte: Elaboração própria (2020).

- Carga útil: Objeto espacial projetado para executar uma função específica no espaço, excluindo a funcionalidade de lançamento. Isso inclui satélites operacionais, bem como objetos de calibração.
- DFCU: Detritos de fragmentação de carga útil, objetos espaciais fragmentados ou liberados involuntariamente de uma carga útil como detritos espaciais para os quais sua gênese pode ser rastreada até um evento único. Esta classe inclui objetos criados quando uma carga explode ou quando colide com outro objeto.
- ORMCU: Objetos relacionados à missão de carga útil, objetos espaciais liberados como detritos espaciais que serviam para o funcionamento de uma carga útil. Exemplos comuns incluem capas para instrumentos ópticos ou ferramentas de astronautas.
- DCU: Detritos de carga útil, objetos espaciais fragmentados ou acidentalmente liberados de uma carga útil como resíduos espaciais para os quais a origem não é clara, mas as propriedades orbitais ou físicas permitem uma correlação com uma fonte.
- CF: Corpo do foguete, objeto espacial projetado para executar funcionalidades relacionadas ao lançamento; isso inclui os vários estágios orbitais dos veículos lançadores, mas não as cargas que liberam elas próprias cargas menores.
- DFF: Detritos de fragmentação de foguetes, objetos espaciais fragmentados ou liberados involuntariamente de um corpo de foguete como detritos espaciais para os quais sua gênese pode ser rastreada até um evento único. Esta classe inclui objetos criados quando um veículo de lançamento explode.
- DF: Detritos de foguetes, objetos espaciais fragmentados ou liberados involuntariamente de um corpo de foguete como detritos espaciais para os quais a

origem não é clara, mas as propriedades orbitais ou físicas permitem uma correlação com uma fonte.

- ORMF: Objetos relacionados à missão de foguetes, objetos espaciais liberados como detritos espaciais que serviam para a função de um corpo de foguete. Exemplos comuns incluem blindagens e motores.
- NI: Objetos não identificados.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, é contextualizado o problema do lixo espacial. A partir desse estudo é possível compreender a importância de divulgação do problema do lixo espacial e suas consequências para nossa sociedade. Como podemos extrair dessas informações, é necessário que as agências espaciais e empresas do setor aeroespacial se preparem tecnicamente e também de acordo com o direito espacial para cada vez mais possibilitar missões sustentáveis ao ambiente espacial. Para que possamos usar o espaço de forma sustentável e duradoura é necessário investir em tecnologias para a mitigação do lixo espacial visando a exploração do ambiente espacial sustentável, pois do jeito que os detritos estão atualmente em torno da Terra podem prejudicar as futuras missões espaciais, incluindo o turismo espacial, os satélites em operação e ainda podendo causar danos a sociedade.

4.5 AGRADECIMENTOS

Patrocinado pelo CNPq - Brasil. Os autores agradecem ao CNPq pelos contratos 307724/2017- 4, 420674/2016-0 e ao PIBIC da UFRB.

REFERÊNCIAS

CASSEN, R. **Our Common Future**: Report of the World Commission on Environment and Development. Oslo, Noruega: JSTOR, 1987.

ESA. ESA's Annual Space Environment Report, Darmstadt, Germany: ESA, 2017.

_____. ESA's Annual Space Environment Report, Darmstadt, Germany: ESA, 2018.

_____. ESA's Annual Space Environment Report, Darmstadt, Germany: ESA, 2019.

_____. ESA's Annual Space Environment Report, Darmstadt, Germany: ESA, 2020.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Raio trator espacial prestes a se tornar realidade.

Disponível em: <http://inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=raio-trator-espacial-realidade&id=010130121027#.X6W7wGhKjIV>. Acesso em: 06 nov. 2020.

GOMES, M. L. M.; SOUZA, M. L. d. O. **Modelagem e simulação de detritos espaciais.**

Chichester, UK: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, CNPQ, 2011.

HALL, L. The History of Space Debris. **Space Traffic Management Conference**, 19, 2014.

Disponível em: <https://commons.erau.edu/stm/2014/thursday/19>. Acesso em: 06 nov. 2020.

LETIZIA, F.; COLOMBO, C.; LEWIS, H. G. Analytical model for the propagation of small-debris-object clouds after fragmentations. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, v. 38, n. 8, p. 1478-1491, 2015.

LEIPOLD, M. *et al.* Solar sail technology development and demonstration. **Acta astronautica**, v. 52, n. 2-6, p. 317-326, 2003.

LIMA, Jackson dos Santos. **Uso da vela solar e das perturbações orbitais naturais para remoção de detritos espaciais.** 2019. 60 f. Monografia - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Feira de Santana, 2019.

LIU, J. C.; JOHNSON, N. L. Risks in space from orbiting debris. **SCIENCE-NEW YORK THEN WASHINGTON**, v. 1, n. 1, p. 340-340, 2006.

MARTINS, C. F. M. **Meio ambiente espacial: com enfoque jurídico.** 1 ed. São Paulo: Letras Jurídicas, 2010.

MEHRHOLZ, D. *et al.* Detecting, tracking and imaging space debris. **ESA Bulletin** (0376-4265), n. 109, p. 128-134, 2002.

MONSERRAT FILHO, J. **Direito e Política na Era espacial: podemos ser mais justos no espaço do que na Terra?.** São Paulo: Vieira & Lent, 2007.

_____. **Introdução ao Direito Espacial.** Associação Brasileira de Direito Aeronáutico e Espacial. Brasília, 1997.

NASA. **Space Debris and Human Spacecraft.** Disponível em: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/news/orbital_debris.html. Acesso em: 16 out. 2019.

_____. **Breakup M. PAM-D Debris Falls in Saudi Arabia.** Disponível em: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/news/orbital_debris.html. Acesso em: 12 jul. 2020.

PAULA, M. B. de; CELESTINO, C. C. The impact of space law and space debris mitigation measures on the debris scenario around the earth. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1365, n. 1, p. 012022, oct. 2019.

REDDY, Vidya Sagar. The spacex effect. **New Space**, v. 6 n. 2, p. 125-134, 2018.

REVISTA GALILEU. **Balões gigantes podem ajudar a limpar lixo espacial.** Disponível em: <http://revistagalileu.globo.com/Revista/Common/0,,EMI160702-17770,00->

BALOES+GIGANTES+PODEM+AJUDAR+A+LIMPAR+LIXO+ESPACIAL.html. Acesso em: 06 nov. 2020.

SAMPAIO J. C.; WNUK E.; VILHENA DE MORAES R., FERNANDES S. S. Resonant orbital dynamics in LEO region: Space debris in focus. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2014, p. 1-12, jan. 2014. Article ID 929810, 12 pages, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2014/929810>. Acesso em: 06 nov. 2020.

SHAN, M.; GUO, J.; GILL, E. Review and comparison of active space debris capturing and removal methods. **Progress in Aerospace Sciences - Elsevier**, v. 80, p. 18-32, 2016.

TRESACO, E.; ELIPE, A.; CARVALHO, J. P. S. Frozen orbits for a solar sail around mercury. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, v. 39, n. 7, p. 1659–1666, 2016.

VIEIRA NETO E., WINTER O. Orbital Envelope for Debris Generated by a Satellite Breakup: A stochastic Study, 39th COSPAR Scientific Assembly. Held 14-22 jul. 2012, in Mysore, India. Abstract F5.3-4-12, p. 2088, 2012.

ZAP.AEIYOU. **Empresa russa tem uma solução para se livrar do lixo espacial**. Disponível em: <https://zap.aeiou.pt/teia-espuma-pegajosa-lixo-espacial-330234>. Acesso em: 06 nov. 2020.

MINI CURRÍCULO E CONTRIBUIÇÕES AUTORES

TÍTULO DO ARTIGO	POLUIÇÃO DO AMBIENTE ESPACIAL: O PROBLEMA DO LIXO NO ESPAÇO
RECEBIDO	04/12/2020
AVALIADO	23/01/2021
ACEITO	15/04/2021

AUTOR 1	
PRONOME DE TRATAMENTO	
NOME COMPLETO	Jean Paulo dos Santos Carvalho
INSTITUIÇÃO/AFILIAÇÃO	Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB
CIDADE	
ESTADO	Bahia
PAÍS	Brasil
RESUMO DA BIOGRAFIA	Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciência e Tecnologia em Energia e Sustentabilidade
AUTOR 2	
PRONOME DE TRATAMENTO	
NOME COMPLETO	Jackson dos Santos Lima
INSTITUIÇÃO	Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB
CIDADE	
ESTADO	Bahia
PAÍS	Brasil
RESUMO DA BIOGRAFIA	Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciência e Tecnologia em Energia e Sustentabilidade
AUTOR 3	
PRONOME DE TRATAMENTO	
NOME COMPLETO	Carine Moreira Gonçalves
INSTITUIÇÃO	Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB
CIDADE	
ESTADO	Bahia
PAÍS	Brasil
RESUMO DA BIOGRAFIA	Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciência e Tecnologia em Energia e Sustentabilidade
CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES NO ARTIGO	Todos os autores contribuíram na mesma proporção.

Endereço de Correspondência dos autores	Autor 1: jeanfeg@gmail.com Autor 2: jacksonmusico2@gmail.com Autor 3: carinemoreira.fsa@gmail.com
---	--