

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

CONFEÇÃO DE DISPOSITIVOS PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE EM MANUFATURAR INSTRUMENTOS LABORATORIAIS COM O USO DE FILAMENTO PET RECICLÁVEL

PEDRO HENRIQUE ADEGAS¹, PAULO CESAR MIORALLI², CRISTIANO DONIZETI
FERRARI³, LUISMAR BARBOSA DA CRUZ JUNIOR⁴

¹ Graduando em Técnico em Mecatrônica, Aluno do Programa PIBIFSP, IFSP, Campus Catanduva, pedro.adeegas@aluno.ifsp.edu.br.

² Doutor em Engenharia Mecânica, Docente, IFSP, Campus Catanduva, mioralli@ifsp.edu.br.

³ Especialista em Docência no Ensino Superior, Docente, IFSP, Campus Catanduva, cferrari@ifsp.edu.br.

⁴ Pós-doutorando em Física e Ciência dos Materiais, Colaborador, IFSC-USP, Campus São Carlos, luismar@alumni.usp.br. Área de conhecimento (Tabela CNPq): 1.05.01.00-2 Física Geral

RESUMO: Anualmente, o Brasil gera milhões de toneladas de resíduos plásticos no Brasil, sendo reciclado apenas 1% dessa quantidade, tornando-se necessária a discussão de maneiras criativas para a reutilização destes resíduos para reduzir os impactos do descarte inadequado. Recentemente, os plásticos PET têm ganhado destaque como alternativa para a criação de filamentos para impressão 3D sustentáveis em conjunto com o crescimento da utilização de equipamentos de laboratórios para pesquisa e ensino de disciplinas do ensino médio na área de ciências da natureza. Nesse sentido, este trabalho propõe a confecção de dispositivos que permitam uma posterior análise de viabilidade quanto ao uso de filamentos PET recicláveis para a manufatura de instrumentos laboratoriais utilizados como instrumentação no ambiente de ensino. Para subsidiar esse intento, um triturador e uma extrusora de plásticos PET recicláveis estão sendo construídas. Adicionalmente, alguns modelos 3D *open-source* de equipamentos laboratoriais focados ao ensino de física e química estão sendo impressos com filamento comercial, visando uma análise de possibilidade de uso do modelo em aulas práticas e sua confecção futura a partir de filamentos PET recicláveis. Tal viabilidade, se comprovada posteriormente, oferecerá uma alternativa mais sustentável para a produção de materiais educacionais.

PALAVRAS-CHAVE: triturador; extrusora; impressão 3D; reciclagem.

DEVICE DESIGN FOR ANALYZING THE FEASIBILITY OF MANUFACTURING LABORATORY INSTRUMENTS USING RECYCLABLE PET FILAMENT

ABSTRACT: Every year, Brazil generates millions of tons of plastic waste, with only 1% of this amount being recycled. This makes it necessary to discuss creative ways to reuse this waste to reduce the impacts of improper disposal. Recently, PET plastics have gained prominence as an alternative for the creation of sustainable 3D printing filaments, together with the growth in the use of laboratory equipment for research and teaching of high school subjects in the area of natural sciences. In this sense, this work proposes the creation of devices that allow a subsequent feasibility analysis regarding the use of recyclable PET filaments for the manufacture of laboratory instruments used as instrumentation in the educational environment. To support this intent, a shredder and an extruder for recyclable PET plastics are being built. Additionally, some open-source 3D models of laboratory equipment focused on teaching physics and chemistry are being printed with commercial filament, aiming at an analysis of the possibility of using the model in practical classes and its future production from recyclable PET filaments. Such viability will offer a more sustainable alternative for the production of educational materials.

KEYWORDS: shredder; extruder; 3D printing; recycling.

INTRODUÇÃO

Atualmente, os plásticos PET (Politereftalato de etileno) vêm se popularizando devido a sua versatilidade na indústria. Contudo, o aumento da demanda dos materiais plásticos e a má administração de seus resíduos representam desafios para sustentabilidade global. Segundo a *World Wide Fund for Nature* (WWF, 2019), o Brasil produz cerca de 11,3 milhões de toneladas de resíduos plásticos por ano, onde apenas 1,28% são devidamente reciclados, fazendo com que a parcela não reciclada seja descartada no meio ambiente, acarretando em sérios problemas ecológicos.

Recentemente, os laboratórios de pesquisa vêm empregando cada vez mais o uso de equipamentos impressos em 3D, possibilitando a criação de diferentes equipamentos laboratoriais como suportes de bancada, seringas (Wijnen *et al.*, 2014), e micromanipuladores (Baden *et al.*, 2015). Porém, é notório que esses equipamentos, em sua maioria, utilizam filamentos derivados de materiais não reciclados, como por exemplo o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), gerando mais resíduos plásticos provenientes da produção.

Os plásticos PET vêm sendo utilizados em projetos de reciclagem na engenharia em construção civil (Skibicki; Pultorak; Kaszynska, 2021), sendo principalmente reutilizados para produção de filamentos reciclados (Ror; Negi; Mishra, 2023). Nesse sentido, é possível vislumbrar a viabilidade de produzir equipamentos laboratoriais didáticos de baixo custo e de fácil acessibilidade a partir de filamentos PET. Visando ratificar essa viabilidade, este trabalho foca na construção de um triturador e de uma extrusora para plásticos PET recicláveis, ao mesmo tempo em que confecciona alguns modelos 3D *open-source* de equipamentos laboratoriais impressos com filamento comercial. A análise dos resultados obtidos na confecção parcial destes dispositivos permite obter indícios quanto à exequibilidade da proposta.

MATERIAL E MÉTODOS

Um triturador está sendo construído com a finalidade de processar plásticos PET recicláveis. A viabilidade desse processamento constitui-se na primeira etapa para que instrumentos laboratoriais de ensino possam ser posteriormente confeccionados. Em geral, um triturador é um aparato mecânico utilizado para fragmentar materiais em unidades menores a partir de cargas aplicadas que excedem a resistência do material, fragmentando-o. Os modelos desse equipamento costumam apresentar um *design* parecido em relação aos componentes, que são: eixo e conjunto de lâminas, elemento motor e de transmissão, componente de alimentação (funil) e elemento estrutural (Wong *et al.*, 2022). O elemento mais complexo de um triturador é o conjunto de eixo e lâminas, pois além de afetar diretamente na eficiência do equipamento, esse elemento necessita de manutenções constantes devido ao desgaste relacionado ao uso contínuo. A trituração do plástico PET é feita pelo equipamento por meio do conjunto de facas, que aplica uma tensão no material até que ele se quebre. O conjunto de facas pode ter arranjos diferentes, tornando-se necessário encontrar um arranjo vantajoso para a trituração dos resíduos. O tamanho final dos flocos é ditado por uma peneira presente no equipamento, a qual permite a passagem apenas de flocos com o tamanho predefinido ou menores.

O triturador em desenvolvimento é baseado no equipamento produzido pelo projeto *Precious Plastic* (Borges, 2017), uma organização que tem como foco a disponibilização de projetos abertos para a reciclagem de materiais plásticos tais como trituradores, injetoras, extrusoras, dentre outros. O modelo em questão foi escolhido pela simplicidade de manuseio, facilidade para a obtenção dos materiais para a construção, montagem simples e custo relativamente baixo quando comparado com trituradores comerciais do mesmo porte. A Figura 1 ilustra equipamentos para a reciclagem de plástico produzidos pelo projeto *Precious Plastic*.

Uma extrusora também está sendo desenvolvida para conformação de plástico PET, sendo um equipamento presente em muitos processos de transformação de termoplásticos. Segundo Harper (2000), a extrusão é um processo de transformação dos polímeros onde se amolece um material termoplástico sólido que em seguida é forçado em uma matriz com seção transversal definida, fazendo com que o material se conforme no orifício, adquirindo seu formato. A extrusora deve entregar um fluxo constante e propriedades homogêneas de viscosidade, temperatura e pressão na matriz durante o transporte e plastificação do material polimérico.



Figura 1. Equipamentos para reciclagem de plástico do projeto *Precious Plastic* (Borges, 2017).

A extrusora em construção nesse trabalho é inspirada nos modelos *Recyclebot* (Woern, 2018) e no projeto *Lyman extruder* (Thingiverse, 2014). Tais modelos agregam baixo custo de desenvolvimento, escalabilidade, facilidade de manutenção, facilidade de manuseio, simplicidade e flexibilidade. A Figura 2 apresenta os modelos de extrusoras *Recyclebot* e *Lyman extruder*, respectivamente. Para a extrusão no equipamento confeccionado, é recomendada a utilização de flocos poliméricos com tamanho entre 1 e 5 milímetros (Wagner; Mount; Giles, 2014). Foi escolhido o tamanho máximo de 3,5 mm para o material triturado.

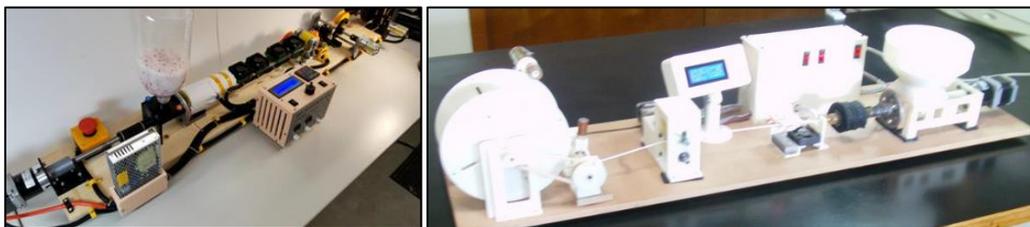


Figura 2. Projetos de extrusoras: *Recyclebot* (Woern, 2018) e *Lyman extruder* (Thingiverse, 2014).

Para a validação da instrumentação e dos filamentos também serão utilizados modelos 3D disponíveis em acervos de comunidades digitais, de forma gratuita e *open-source*. Pretende-se reproduzir instrumentos adaptáveis para laboratório de física, química, mecânica e eletrônica de acordo com a necessidade do campus no qual este trabalho está sendo realizado. Os modelos selecionados são identificados, armazenados e catalogados em um *drive*. Para a impressão dos modelos, será utilizada uma impressora 3D FDM (*Fused Deposition Modeling*) da *Creality*, modelo *Ender 3*, que pode extrudar a uma temperatura máxima de 255°C em sua matriz.

Os materiais utilizados para a prototipagem rápida por meio de objetos 3D para impressão FDM são basicamente polímeros termoplásticos. Os mais usados hoje em dia são o PLA (Polí ácido láctico) e o ABS (Acrilonitrila estireno butadieno) devido as suas características adequadas para o processo e facilidade de impressão. A impressão de instrumentos laboratoriais com um desses polímeros comerciais pode fornecer um panorama quanto à utilidade dos instrumentos e quanto à possibilidade de impressão 3D usando PET, posto a sua similaridade com o material comercial e sua popularização.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Triturador

Uma estrutura-base para a confecção da parte principal do triturador foi cedida por um docente do Instituto Federal de São Paulo – IFSP. Adequações nessa estrutura conjuntamente com outras implementações no projeto resultaram nos seguintes componentes presentes no triturador: eixo, facas para trituração, contra facas, componente estrutural, componentes de acionamento (motores, contadores e redução) e uma peneira para a seleção do tamanho dos flocos triturados. Todas as peças e componentes estruturais do triturador são oriundos de equipamentos usados, muitos deles descartados por empresas do setor industrial. Alguns componentes foram submetidos a processos de usinagem e/ou soldagem para adequações e ajustes. Também haviam componentes com oxidação, a qual foi eliminada por um processo de abrasão a partir de um tratamento individual para cada elemento. As Figuras 3(a) e 3(b) mostram a estrutura principal do triturador e a peneira do equipamento.

O triturador com a montagem completa, incluindo sistema de redução, deve triturar os resíduos a uma taxa de rotação de 70 a 90 rpm. O equipamento também poderá triturar outros tipos de materiais poliméricos, como polipropileno, nylon e poliestireno, estendendo seu uso para outros materiais de resíduo plástico. Sua estrutura final é constituída de peças de aço SAE 1045, garantindo resistência ao sistema. Foi realizado ainda um processo de têmpera nas lâminas para garantir maior dureza.

Foi utilizado um motor da marca JP Motores Elétricos para automatizar a trituração dos plásticos. O componente possui uma potência de 2 CV e uma rotação máxima de 1700 rpm. Para o acoplamento do motor, foi necessário confeccionar um sistema de redução para reduzir a alta rotação do motor transmitida para o eixo do triturador. Este sistema foi feito utilizando três pares de relação para motos, que possuem uma coroa de 44 dentes e um pinhão de 14 dentes. Para o acoplamento dos componentes do sistema de transmissão foram produzidos dois flanges a partir de dois tarugos de aço retirados de um eixo de aço SAE 1020 de 1 polegada de diâmetro soldados a uma chapa de aço. As Figuras 3(c) e 3(d) apresentam o motor utilizado e um dos flanges construídos para o sistema de acoplamento.

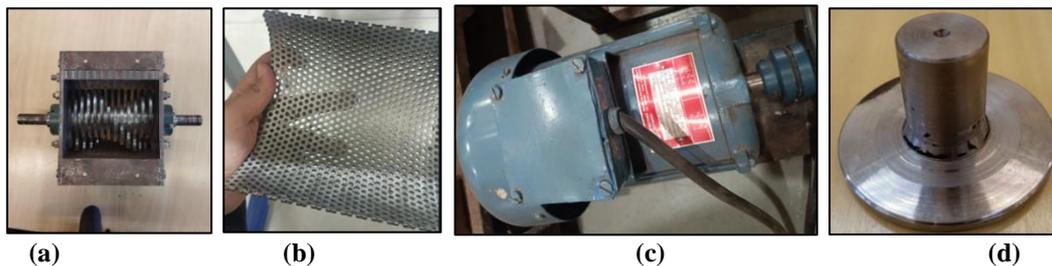


Figura 3. (a) Estrutura principal do triturador; (b) peneira do triturador; (c) motor utilizado para automatizar a trituração; (d) um dos flanges para o sistema de acoplamento.

Para o elemento estrutural do triturador, está sendo realizado a produção do apoio do equipamento com a utilização de uma carteira quebrada, reaproveitando sua estrutura metálica. A estrutura servirá para manter o triturador alto, fazendo com que os flocos de PET caiam da peneira e também servirá para o apoio do motor e do sistema de transmissão, mantendo o sistema um pouco mais compacto. Após a montagem completa do sistema de trituração, os flocos de PET triturado deverão sair do equipamento com tamanho menor ou igual a 3,5 mm, sendo selecionados pela peneira presente no triturador e posteriormente encaminhados à extrusora, a qual ainda está em processo de construção.

A Extrusora

A extrusora será do tipo de parafuso único cuja rosca transportadora do polímero constitui-se em uma broca espiral para madeira de 20 mm de diâmetro, com 460 mm de comprimento. O material triturado é encaminhado ao barril da extrusora, este confeccionado a partir de um tubo de aço carbono e no qual o material será aquecido em zonas até chegar ao bico de extrusão. O material deverá ser extrudado a uma temperatura de 215 a 250 °C para que ocorra a extrusão sem a perda de propriedades do material. O filamento deverá sair a uma espessura de 1,75 mm com uma tolerância baixa, para que seja compatível com a maioria das impressoras 3D comerciais atuais.

Para o sistema de acionamento da extrusora será usado um motor para vidros elétricos compatíveis com motores *Mabuchi* da fabricante *Almapy*. O motor funciona com tensão de 12 V, consome uma corrente de 1,4 A, produz uma força de aproximadamente 9 N.m e possui uma rotação máxima de 60 rpm.

O sistema de controle do aquecimento será composto pelas seguintes partes: resistência, termopar, controlador de temperatura e relé de estado sólido (SSR). A resistência é do tipo coleira de mica com potência de 200 W e tensão de 200 V por motivos de praticidade. O controlador de temperatura será um termostato PID modelo rex C-100 com leitura de temperaturas em uma faixa de 0 a cerca de 1300 °C, possuindo entradas compatíveis com diversos tipos de termopares, tem baixo consumo de energia e funciona em 220 V. Para a medição das temperaturas será utilizado um termopar tipo K com capacidade de medir até 400 °C.

Para o chaveamento comandado pelo controlador, será utilizado um relé de estado sólido com corrente máxima de funcionamento de 40 A, entradas de 3 a 32 V em corrente contínua e tensão de saída

de 24 a 380 V em corrente alternada. Todos os componentes do sistema de aquecimento, excluindo apenas a resistência, estão em licitação para a aquisição, sendo estimada sua chegada para o mês de outubro. A Figura 4 mostra o tubo da extrusora e o estado atual do bico de extrusão (medidas em mm).

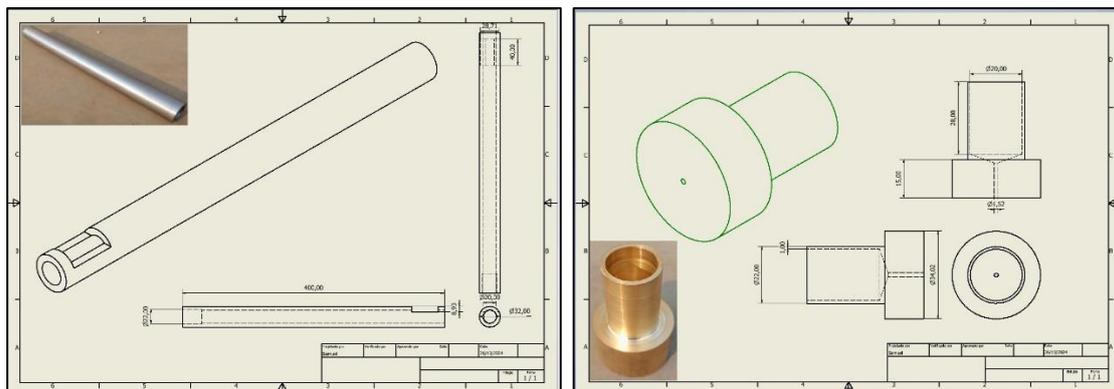


Figura 4. Tubo da extrusora e estado atual do bico de extrusão.

Impressão de Modelos 3D

O desenvolvimento de equipamentos 3D se mostra de extrema utilidade no ambiente escolar, diminuindo os custos de vários equipamentos laboratoriais e didáticos, beneficiando locais com baixa acessibilidade destes tipos de equipamento e aumentando a produtividade das instituições de ensino. Dentre os modelos adquiridos, foram impressos até o momento um suporte para tubos *falcon* e uma caixa de redução didática para o ensino de sistemas de transmissão por engrenagens, mostrados na Figura 5. Para o suporte, foram necessárias cerca de 18 horas de impressão e para a caixa de engrenagens, cerca de 2 horas. Ambos os modelos foram produzidos com filamento comercial ABS e se demonstraram funcionais, passando pelo processo prático de validação visual e tátil.

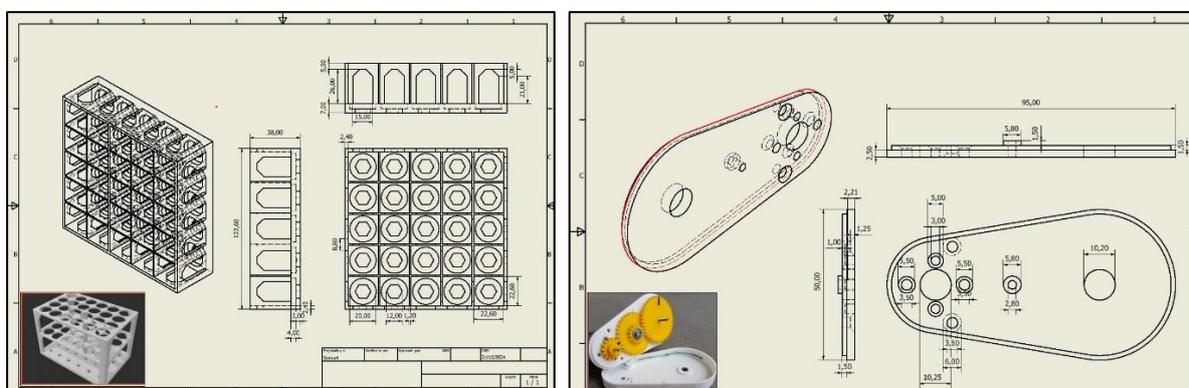


Figura 5. Suporte para tubos *falcon* e caixa de redução didática impressos em 3D.

CONCLUSÕES

O projeto concentra-se na concepção e implementação de soluções sustentáveis para otimizar processos e aprimorar a instrumentação no ambiente ensino, visando oferecer uma alternativa mais sustentável para a produção de materiais educacionais, ao mesmo tempo em que busca criar um acervo de modelos 3D personalizados para atender às necessidades específicas de laboratórios escolares. Esses modelos podem enriquecer os materiais didáticos existentes, proporcionando recursos visuais e interativos que melhoram a compreensão dos conceitos pelos alunos.

A construção do triturador e da extrusora ainda está em desenvolvimento, mas em bom andamento. A impressora 3D utilizada para a confecção de modelos de instrumentos laboratoriais está em perfeitas condições de funcionamento para que, posteriormente, possa receber material PET reciclável para conformação de modelos.

Com base no andamento do projeto, incluindo a construção do triturador e da extrusora, além da impressão de instrumentos laboratoriais didáticos com o uso de filamento comercial, espera-se que haja

viabilidade para que material PET descartado para reciclagem possa ser usado para o desenvolvimento dos filamentos de impressora 3D. Como descartados, pode-se propor o uso de garrafas de bebidas carbonatadas, com a indicação de material PET segundo a norma NBR 13.230, pois são amostras de fácil acesso e processo de reciclagem simples, podendo ser encontradas sem dificuldades em centros de compra e venda de reciclados.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

P.H.A. e C.D.F. procederam com os experimentos. L.B.C.JR. possibilitou a metodologia e contribuição com aplicações. P.C.M. atuou com contribuições intelectuais significativas. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Ao programa PIBIFSP/IFSP e à FAPESP pelo suporte.

REFERÊNCIAS

BADEN, T.; CHAGAS, A. M.; GAGE, G. J.; MARZULLO, T. C.; PRIETO-GODINO, L. L.; EULER, T. Open Labware: 3-D Printing Your Own Lab Equipment. **PLOS Biology**, v. 13, n. 3, p. e1002086, 2015.

BORGES, L. **Precious Plastic**: a revolucionária forma de reciclar plástico! Autossustentável, 2017. Disponível em: <https://autossustentavel.com/2017/11/precious-plastic-maquina-reciclagem-plastico.html>. Acesso em 04 set. 2024.

HARPER, C. A. **Modern plastics handbook**. New York: Mcgraw-Hill, 2000.

ROR, C. K.; NEGI, S.; MISHRA, V. Development and characterization of sustainable 3D printing filaments using post-consumer recycled PET: processing and characterization. **Journal of Polymer Research**, v. 30, n. 9, number 365, 2023.

SKIBICKI, S.; PULTORAK, M.; M KASZYNSKA. Evaluation of material modification using PET in 3D concrete printing technology. **IOP Conference Series Materials Science and Engineering**, v. 1044, n. 1, p. 012002, 2021.

THINGIVERSE. **Lyman/Mulier Filament Extruder V5**. 2014. Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:380987>. Acesso em 04 set. 2024.

WAGNER, J. R.; MOUNT, E. M.; GILES, H. F. **Extrusion: the definitive processing guide and handbook**. 2. ed. Kidlington, Oxford; Waltham, Ma: William Andrew, 2014.

WIJNEN, B.; HUNT, E. J.; ANZALONE, G. C.; PEARCE, J. M. Open-Source Syringe Pump Library. **PLoS ONE**, v. 9, n. 9, p. e107216, 2014.

WOERN, A. L.; McCASLIN, J. R.; PRINGLE, A. M.; PEARCE, J. M. RepRapable Recyclebot: open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament. **HardwareX**, v. 4, p. e00026, 2018.

WONG, J. H.; GAN, J. H.; CHUA, B. L.; GAKIM, M.; SIAMBUN, N. J. Shredder machine for plastic recycling: a review paper. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1217, n. 1, p. 012007, 2022.

WWF - World Wide Fund for Nature. **Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico**. 2019. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>. Acesso em 04 set. 2024.