

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Estimativa do Potencial de Aquecimento Global associado a Produção de Gás Liquefeito Renovável obtido através da rota HVO no Brasil

AUTORES:

Natália de Almeida Menezes, Larissa Thaís Bruschi, Moisés Teles dos Santos, Luiz Kulay

INSTITUIÇÃO:

Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP)
Pesquisa & Desenvolvimento, Copa Energia

ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL DA PRODUÇÃO DE GÁS LIQUEFEITO RENOVÁVEL ATRAVÉS DA ROTA HVO NO BRASIL

Resumo

O Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) é um combustível bastante versátil, composto por propano e butano, e que se presta principalmente a cocção nos âmbitos residencial e comercial. Sua origem fóssil motivou a busca por sucedâneos menos agressivos para o meio ambiente. Uma das opções promissoras desse elenco consiste no Gás Liquefeito Renovável (GLR), que como o designativo sugere, consiste em uma versão parcialmente renovável ao GLP. Este biocombustível pode ser produzido desde diferentes rotas de conversão, sendo o hidrotratamento de óleos vegetais (HVO) uma das tecnologias mais consolidadas. A principal vantagem do GLR em relação ao par fóssil reside em suas reduzidas emissões de Gases de Efeito Estufa; no entanto, para que possa se qualificar como combustível de baixo carbono, seu Potencial de Aquecimento Global (PAG) precisa ser avaliado segundo uma perspectiva sistêmica, como aquela proporcionada pela abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Além de escassos na literatura, estudos relacionando ACV a GLR atêm-se em sua maioria às especificidades da produção e distribuição, considerando aspectos geográficos, temporais e tecnológicos. Esta pesquisa – que é complementar a uma parceria público-privada estabelecida para a concepção de modelo de exploração de GLR no Brasil –, espera contribuir para o preenchimento daquela lacuna, avaliando impactos de PAG causados pelo GLR dentro de um escopo do tipo *‘berço-a-distribuição’*. Nesse contexto, o combustível é obtido a partir do hidrotratamento de óleo de soja por H₂ produzido em refinaria de petróleo. Por se tratar de uma análise comparativa, foram formulados cenários que diferem entre si quanto a área de cultivo de soja (diferentes estados brasileiros), as distâncias de transporte, e o critério de alocação de cargas ambientais (energia, massa e valor econômico) entre os produtos proporcionados pela rota HVO, que além do GLR gera diesel verde. Para cada cenário, foram estimados consumos de recursos e emissões de rejeitos das etapas de (i) cultivo agrícola, (ii) extração e refino do óleo vegetal, (iii) hidrotratamento, e (iv) envio do produto final ao centro distribuição. Os ciclos de vida de itens como geração/distribuição de utilidades foram também incorporados aos arranjos. A modelagem ambiental foi realizada com o auxílio do software SimaPro – v. 9.5.0.1, e fez uso de inventários complementares disponíveis na Base de Dados Ecoinvent. Os resultados variam consideravelmente, mostrando a importância de se considerar parâmetros como expansão do cultivo agrícola, distâncias percorridas de transporte ao longo da cadeia de suprimentos, e o critérios de alocação. Como próximos passos do projeto, deseja-se ampliar os cenários avaliados com a inclusão de outras matérias-primas (p.e., óleo de palma), fontes de H₂ de origem renovável (casos de eletrólise de água, e reforma a vapor do biometano), e prospecção de outras regiões para implantação da biorrefinaria que instala o processo HVO. Além disso, serão avaliados efeitos sobre outras categorias de impactos afora o PAG, uma vez que o desempenho ambiental do GLR não deve ficar restrito a este recorte da matéria ambiental a despeito de seu caráter de essencialidade.

Palavras-chave: ACV, GLP, Gás Liquefeito Renovável

Abstract

Liquefied Petroleum Gas (LPG) is a versatile fuel made of propane and butane, commonly used for cooking in homes and businesses. Because of its fossil-based nature, there's an interest in finding more environmentally friendly alternatives. Renewable Liquefied Gas (RLG) is one such promising option, being a partially renewable version of LPG. This biofuel can be produced using different methods, with the hydrotreating of vegetable oils (HVO) being a well-established technology. Compared to traditional LPG, RLG has lower greenhouse gas emissions, but to be considered a low-carbon fuel, its Global Warming Potential (GWP) needs to be evaluated using a Life Cycle Assessment (LCA) approach. However, limited research connects LCA to RLG, mostly focusing on production and

distribution specifics, considering geographic, temporal, and technological aspects. As part of a public-private partnership to develop an RLG model in Brazil, this study aims to evaluate the GWP impacts of RLG from production to distribution. In this study, RLG is obtained through the hydrotreatment of soybean oil using H₂ produced in an oil refinery. Different scenarios were formulated, varying in soybean cultivation area (different Brazilian states), transportation distances, and criteria for allocating environmental loads among the products of the HVO route, which also generates green diesel. For each scenario, resource consumption and emissions were estimated for agricultural cultivation, oil extraction and refining, hydrotreatment, and product delivery to the distribution center. Environmental modeling was done using SimaPro software – v. 9.5.0.1, and inventories in the Ecoinvent Database were utilized. Results varied significantly, highlighting the importance of considering agricultural expansion and transportation distances. Future steps in the project include expanding scenarios by including other raw materials (e.g., palm oil), renewable H₂ sources (water electrolysis and steam reforming of biomethane), and exploring other regions for biorefinery implementation. Additionally, other environmental impact categories beyond GWP will be assessed, as the environmental performance of RLG should cover a broader range of environmental concerns.

Keywords: LCA, LPG, Renewable Liquid Gas

Introdução

A busca por combustíveis renováveis vem crescendo ao redor do mundo, não apenas com o propósito de reduzir a dependência de fontes fósseis, mas também como resultado da preocupação global com as Mudanças Climáticas. O Brasil desempenha um papel de grande importância neste cenário, pelo fato de dispor de uma matriz energética com forte presença de fontes renováveis, e de produzir em escala econômica biocombustíveis como biodiesel e bioetanol, que já consolidaram seu espaço no mercado nacional (NOGUEIRA, 2018). No entanto, outros combustíveis líquidos que fazem parte da rotina diária dos brasileiros ainda não contam com sucedâneos renováveis, mesmo que tal caráter se manifeste de forma parcial. Esse é o caso do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), um combustível bastante versátil, composto por propano e butano (ANP, 2020), usado majoritariamente para atividades de cocção nos âmbitos residencial e comercial. Muito embora conhecido de forma corriqueira por ‘gás de cozinha’, as aplicações do GLP se estendem além disso, servindo de combustível em fornos industriais, carregador de energia em ciclos de geração de calor, secante, ou mais genericamente, como matéria-prima química, propelente de aerossóis, ou combustível para empilhadeiras (SINDIGÁS, 2021).

Rotas de conversão envolvendo matérias-primas de base biológica permitem sintetizar uma alternativa parcialmente renovável ao GLP, conhecido no meio industrial e pela comunidade científica como Gás Liquefeito Renovável (GLR), versão *drop-in* do congênere fóssil composta em essência por biopropano e biobutano (WLGA, 2024). O hidrotratamento de óleos vegetais (HVO) está entre as rotas tecnológicas mais bem consolidadas e estabelecidas mundialmente de síntese de GLR. Em linhas gerais, esta rota consiste em hidrogenar, sob condições controladas, os triglicerídeos presentes nos óleos vegetais, gerando diesel verde como produto principal e GLR como coproduto (VÁSQUEZ; SILVA; CASTILLO, 2017).

Muito embora os combustíveis parcialmente renováveis sejam alternativas promissoras em termos de sustentabilidade ambiental, avaliar seu Potencial de Aquecimento Global (PAG) segundo uma perspectiva sistêmica, como aquela proporcionada pela técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), é essencial para garantir que estes sejam referendados como solução para mitigação do Aquecimento Global (MIRANDA; KULAY, 2023). Além disso, dado que impactos ambientais são próprios de cada

ciclo de vida, estudos de caso voltados a condições e arranjos específicos envolvendo o GLR devem ser realizados para suportar ações de uma gestão consciente, moderna e necessária desses ativos.

Neste contexto, realizou-se este estudo de ACV com o propósito de avaliar o PAG do GLR para um escopo de aplicação do *berço-a-distribuição* do produto no Brasil. Para efeito de análise admitiu-se que o processamento do combustível se daria por hidrotratamento de óleo de soja com H₂ originário do refino de petróleo (ECOINVENT, 2019). Por se tratar de uma comparação, foram formulados cenários variando a área de cultivo de soja (diferentes estados brasileiros), distâncias de transporte, e critérios para alocação de cargas ambientais (energia, massa, e valor econômico) entre os produtos proporcionados pela rota HVO. Para cada cenário, criou-se um modelo específico e capaz de descrever consumos de recursos e emissões das etapas de (i) cultivo agrícola de soja, (ii) extração e refino do óleo vegetal, (iii) hidrotratamento, e (iv) envio do produto final ao centro distribuição. Operações complementares – como as de geração e distribuição de utilidades – foram também incorporadas a cada arranjo.

Espera-se que esta investigação possa auxiliar processos de tomada de decisão conduzidos com a expectativa de introduzir do Gás Líquido Renovável no mercado brasileiro, consolidando-o como uma alternativa parcialmente renovável ao GLP fóssil, e promovendo sua produção em escala econômica no país a médio prazo.

Metodologia

Este estudo seguiu diretrizes metodológicas estabelecidas na norma ABNT ISO 14044 (ABNT, 2009) que discorre sobre elementos necessários à realização de estudos de ACV. A fim de propiciar condições para a já mencionada comparação entre cenários, a técnica de ACV foi aplicada sob o enfoque atribucional, e sempre considerando a ‘*distribuição de 1,0 kg de GLR até o centro de consumo*’ como o Fluxo de Referência (FR) para o Sistema de Produto (SP) em avaliação (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), que em essência, constituiu-se de sua cadeia de suprimentos, desde as origens da soja na agricultura (considerando inclusive o óleo cru junto a reservas *offshore* no litoral brasileiro, que produz combustível para as máquinas agrícolas utilizadas no cultivo da soja), até a distribuição do produto acabado aos centros de distribuição.

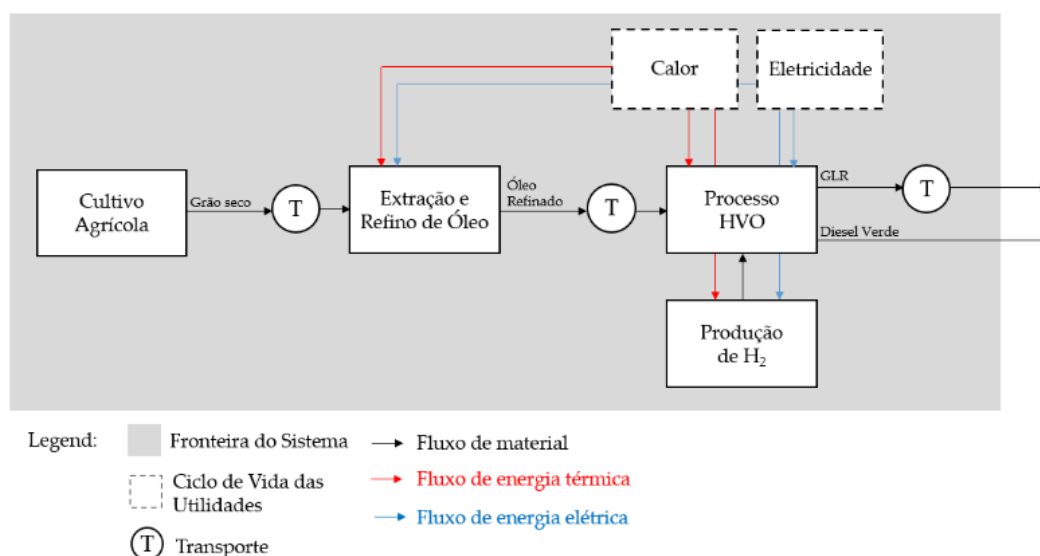


Figura 1: Fluxograma do Sistema de Produto em avaliação.

A análise baseou-se em dados secundários coletados junto a fontes consistentes, como artigos científicos e relatórios oficiais que tratam do tema, ou mesmo da Base de Dados Ecoinvent. No caso específico do processo HVO esse elenco foi incrementado por dados e informações obtidos por Ramirez (2023) a partir de modelagem computacional.

A cobertura geográfica estabelecida para o estudo considerou que a soja seria procedente dos cinco principais estados produtores do país; quais sejam: Goiás (GO), Mato Grosso do Sul (MS), Mato Grosso (MT), Paraná (PR) e Rio Grande do Sul (RS). Assumiu-se também que as unidades de extração (prensagem a quente, com ação de solventes), e refino (degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização) do óleo de soja, estariam distantes das áreas de cultivo em 20 km, como ocorre em GO, MT, PR e no RS. A exceção ficou por conta dos processamentos praticados no MS, para os quais um levantamento realizado a esse respeito revelou que aquelas plantas se situam, em média, a 90 km das fazendas. Outra diretriz estabelecida para o estudo, admitiu que a unidade de produção de HVO estaria alocada em Paulínia, junto ao complexo petroquímico constituído no entorno da Refinaria Planalto de Paulínia (REPLAN) – SP, onde o H₂ é obtido via reforma a vapor de gás natural. Nesse arranjo, o produto final deve percorrer 130 km em caminhões tanque antes de ser armazenado nas proximidades da capital de São Paulo, que aparece como candidato natural a ser o principal centro consumidor de GLR do país. Em todos os modelos a logística de distribuição é realizada por modal rodoviário, usando caminhões classe EURO 4 com mais de 20 t de capacidade de carga. As distâncias percorridas estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1: Distâncias médias utilizadas na modelagem das operações de transporte.

Região de cultivo de soja	Distância (km)		
	Fazenda → Extração e Refino do óleo	Extração e Refino do óleo → Hidrotratamento	Hidrotratamento → Central de Distribuição
GO	20	825	
MS	90	1000	
MT	20	1825	130
PR	20	920	
RS	20	1330	

A multifuncionalidade existente entre diesel verde e GLR foi tratada por alocação, que consiste em procedimento recomendado pela ABNT ISO 14044 (ABNT, 2009) para tratamento de situações dessa natureza em estudos de ACV atribucional. Dado que ambos os produtos são combustíveis, decidiu-se por aplicar o critério de conteúdo energético, calculado considerando-se os Poder Calorífico Inferior (PCI) do GLR (46,3 MJ/kg) e do diesel (44 MJ/kg) para repartição de cargas ambientais entre aqueles coprodutos. Destaque-se, por fim, que os valores de PAG foram estimados com auxílio de SimaPro – v. 9.5.0.1, uma ferramenta computacional de uso regular durante a realização de estudos de ACV. O PCI também foi usado para descrever o potencial energético associado a 1,0 kg de GLR na forma – ou seja, dentro de especificações –, que lhe permitem ser usado como bem de consumo.

Resultados e Discussão

Os Potenciais de Aquecimento Global que foram calculados para os cinco cenários em avaliação aparecem expressos na Tabela 2 em termos de gramas de CO₂ equivalente por MJ de energia associada a 1,0 kg de GLR (gCO_{2eq}/MJ).

Tabela 2: Potencial de Aquecimento Global com alocação baseada no conteúdo energético.

Cenário	Referência: Região de cultivo de soja	gCO _{2eq} /MJ
C1	GO	82,7
C2	MS	56,4
C3	MT	151
C4	PR	47,9
C5	RS	82,5

Uma análise daqueles valores indicou que os PAGs dos cinco cenários investigados variam consideravelmente entre si, na medida em que a diferença entre extremos de desempenho foi de cerca de três vezes. O GLR obtido a partir de soja cultivada no PR (cenário C4) acumulou o melhor resultado de toda a série (47,9 gCO_{2eq}/MJ), seguido por aquele manufaturado a partir de grãos produzidos no MS (C2), superado pelo vencedor em 15%. No outro extremo aparece o GLR obtido de soja processada no MT (C3), com 151 gCO_{2eq}/MJ, como a alternativa menos recomendável para suprimento da demanda de São Paulo deste combustível, ao menos no que se refere a este recorte da matéria ambiental. Destaque-se, por fim, a equivalência de performances registrada entre GO (C1) e RS (C5).

Em linhas gerais, todos os perfis de comportamento podem ser explicados a partir da associação entre as distâncias de deslocamento percorridas para efeito de transporte do produto acabado, e, principalmente de suas matérias-primas, e entre as intervenções antrópicas que cercam o cultivo da soja.

Em relação às distâncias percorridas, a prevalência do modal rodoviário no transporte de gêneros em um país de dimensões continentais como o Brasil acarreta muitas vezes em deslocamentos por grandes distâncias, do que decorrem de forma imediata, expressivo consumo de óleo diesel e emissões de CO₂ de origem fóssil, a despeito do grau de sofisticação do sistema de motorização dos veículos. Este fator comprometeu de forma determinante o resultado de C3, dado que, o óleo de soja foi transportado ao longo de 1825 km antes de ser processado na unidade de hidrotratamento, ainda que o deslocamento fosse realizado em caminhão classe EURO 4.

Em termos tecnológicos, o cultivo de soja no Brasil é conduzido segundo práticas relativamente padronizadas. Assim sendo, no nível regional, o cultivo agrícola terá seu desempenho influenciado por fatores como tipo de solo (ou latossolo), ou índice pluviométrico regional, além dos efeitos causados pela sua expansão sobre outras áreas. Nesse âmbito, as condições disponíveis no PR são bastante favoráveis, principalmente porque o efeito da expansão do cultivo agrícola é atenuado já que a soja avança sobre áreas outrora antropizadas (pasto ou outra cultura agrícola). Por outro lado, no caso do MT, a cultura de soja tem se instalado, nos últimos anos e sempre de forma legalizada, também sobre biomas naturais de floresta primária. Isto contribuiu de forma determinante para o melhor desempenho ambiental encontrado no C4 (PR) e para o pior desempenho encontrado no C3 (MT). No caso do Mato

Grosso do Sul, a expansão do cultivo da soja também se dá sobre áreas já antropizadas, mas suas maiores distâncias percorridas contribuem para que sua performance ambiental seja maior do que a encontrada no C4 (PR). Os estados Goiás e Rio Grande do Sul apresentaram performances ambientais muito próximas pois para ambos há avanço do cultivo da soja tanto sobre áreas já antropizadas quanto sobre biomas naturais, contribuindo para que seus resultados sejam intermediários dentro o conjunto.

Análise de Sensibilidade

Durante a condução do estudo, notamos que o critério de alocação exerceu uma influência muito significativa sobre os desempenhos para PAG dos cenários analisados. Assim sendo e seguindo diretrizes sugeridas pela ABNT ISO 14044 (ABNT, 2009) para o tema, realizamos uma Análise de Sensibilidade aplicando critérios de alocação baseados em massa e valor econômico para distribuir cargas ambientais entre GLR e diesel verde. Por não disporem ainda de mercados consolidados no Brasil, a verificação envolvendo seus valores econômicos foi conduzida a partir de dados coletados em Johnson (2017).

Tabela 3: Análise de Sensibilidade dos resultados de PAG variando o critério de alocação.

Critério de Alocação	Referência: Região de cultivo de soja	gCO _{2eq} /MJ
Conteúdo Energético	GO	82,7
	MS	56,4
	MT	151
	PR	47,9
	RS	82,5
Quantidade de Massa	GO	78,8
	MS	53,8
	MT	144
	PR	45,8
	RS	78,6
Valor Econômico	GO	38,7
	MS	26,3
	MT	70,6
	PR	22,5
	RS	38,4

A Análise de Sensibilidade apontou que o uso do critério massa para tratamento da situação de multifuncionalidade existente entre GLR e diesel verde acarreta resultados semelhantes no nível de tendência àqueles obtidos com o critério de conteúdo energético. Tal constatação não chega, no entanto, a surpreender em virtude da proximidade existente entre valores de PCI dos combustíveis.

O uso de valor econômico também mantém a ordem original de preferência de cenários, com $C4 \rightarrow C2 \rightarrow C1 \approx C5 \rightarrow C3$. Por outro lado, os impactos individualizados de PAG associados a cada alternativa mostraram-se bastante mais baixos do que os obtidos se usando critérios físicos, justamente em função da disparidade entre os preços de mercado de diesel verde e GLR, que reflete em uma alocação econômica de 97% (diesel verde) vs 3% (GLR) (JOHNSON, 2017). Esse achado remete a um impasse bastante conhecido dos praticantes de ACV: o valor econômico consiste da expressão mais frequente do grau de significância de certo produto para a sociedade; por outro lado, não parece razoável que seus impactos sobre o ambiente devam ser condicionados por componentes que a eles não estão diretamente relacionadas – como demanda, oportunidade, região, ou disponibilidade –, mas que são determinantes para estabelecer seu preço em diferentes mercados.

Conclusões

Este estudo buscou avaliar o PAG do GLR para um escopo de aplicação do *berço-a-distribuição* do produto no Brasil tendo como matéria-prima óleo de soja obtido através do cultivo da oleaginosa em diferentes regiões do país. A iniciativa nos permitiu concluir que, muito embora os resultados variassem consideravelmente em função da origem do óleo de soja, o GLR apresenta-se como biocombustível promissor, ao menos no que se refere àquele impacto ambiental.

O GLR produzido com soja cultivada no PR obteve o melhor resultado de toda a série, seguido daquele manufaturado com grãos produzidos no MS. Já o combustível manufaturado com soja do MT aparece como a alternativa menos recomendável para suprimento da demanda de São Paulo.

A variação de resultados observada entre os diferentes cenários mostra a importância de se considerar parâmetros como produtividade agrícola, distâncias percorridas de transporte ao longo da cadeia de suprimentos, e o critérios de alocação em análise desta natureza. Como próximos passos, deseja-se ampliar os cenários avaliados com a inclusão de novas matérias primas (caso de óleo de palma), e fontes de hidrogênio (de origem renovável, obtido de eletrólise de água, e reforma a vapor do biometano), e outras regiões de implantação da biorrefinaria, onde ocorre o processo HVO. Além disso, serão avaliados efeitos sobre outras categorias de impactos afora o PAG, uma vez que o desempenho ambiental do GLR não pode ficar restrito a este recorte a despeito de seu caráter de essencialidade.

Referências Bibliográficas

ABNT. **ABNT NBR ISO 14044 : Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

ANP. **Resolution 825**. Brazilian National Agency for Petroleum, Natural Gas and Biofuels, 2020. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-825-de-28-de-agosto-de-2020-274891354>>. Acesso em: 7 ago. 2022

ECOINVENT. **Ecoinvent Database - Hydrogen production, gaseous, petroleum refinery operation BR**, 2019.

JOHNSON, E. A carbon footprint of HVO biopropane. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 11, n. 5, p. 887–896, 2017.

MIRANDA, D. S.; KULAY, L. A prospective study on the environmental feasibility of supplying electricity to the Brazilian Amazon through biogas power generation. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 55, 2023.

NOGUEIRA, A. R. **Avaliação do desempenho ambiental de biodiesel produzido a partir de gordura animal segundo diferentes abordagens para situações de multifuncionalidade**. Tese de Doutorado—São Paulo: Universidade de São Paulo (USP), 2018.

RAMIREZ, B. B. Modelagem de Processos de Produção de bioGLP. **Universidade de São Paulo**, 2023.

SINDIGÁS. **Sobre o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)**. Disponível em: <https://www.sindigas.org.br/?page_id=12>. Acesso em: 13 jul. 2024.

VÁSQUEZ, M. C.; SILVA, E. E.; CASTILLO, E. F. **Hydrotreatment of vegetable oils: A review of the technologies and its developments for jet biofuel production**. **Biomass and Bioenergy**. Elsevier Ltd, 2017.

WLGA. **Renewable Liquid Gas**. Disponível em: <<https://www.worldliquidgas.org/key-focus-areas/renewable-liquid-gas/>>. Acesso em: 9 jul. 2024.