LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

Decifrando o Desenvolvimento Sustentável: Análise Multicritério para Ranking de Países Integrada dos Indicadores Globais de Sustentabilidade

Miguel Ângelo Lellis Moreira
Universidade Federal Fluminense - UFF
Niterói, RJ 24210-346, Brasil
miguellellis@id.uff.br

Maria Teresa Pereira
Instituto Superior de Engenharia do Porto - ISEP
Porto, 4200-072, Portugal
mtp@isep.ipp.pt

Igor Pinheiro de Araújo Costa
Universidade Federal Fluminense - UFF
Niterói, RJ 24210-346, Brasil
costa_igor@id.uff.br

Carlos Francisco Simões Gomes
Universidade Federal Fluminense - UFF
Niterói, RJ 24210-346, Brasil
cfsg1@bol.com.br

Marcos dos Santos
Instituto Militar de Engenharia - IME
Urca, RJ 22290-270, Brasil
marcosdossantos@ime.eb.br

RESUMO

Este estudo aborda a complexa dinâmica do desenvolvimento sustentável global, enfatizando a necessidade de uma avaliação meticulosa dos indicadores de sustentabilidade em 159 países. Utilizando o método multicritério AHP-Gaussiano e análise estatística descritiva e exploratória, a pesquisa quantifica o desempenho dos países em 18 indicadores críticos, integrando aspectos econômicos, sociais e ambientais. A metodologia aplicada permitiu a construção de um ranking comparativo, destacando a superioridade de nações com políticas ambientais robustas, como os países nórdicos, em contraste com os desafios enfrentados pelos países em desenvolvimento, que mostram pontuações inferiores devido a políticas menos integradas. Os resultados indicam a eficácia do AHP-Gaussiano na identificação de líderes e retardatários em sustentabilidade, servindo como ferramenta para a orientação e construção de políticas públicas mais informadas. Futuras investigações podem enriquecer essas análises através de estudos longitudinais, ampliando a compreensão das trajetórias de desenvolvimento sustentável ao longo do tempo.

PALAVRAS CHAVE. Sustentabilidade Global, Apoio Multicritério à Decisão, Método AHP-Gaussiano.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193888
https://proceedings.science/p/193888?lang=pt-br

ABSTRACT

This study addresses the complex dynamics of global sustainable development, emphasizing the need for a meticulous assessment of sustainability indicators in 159 countries. Using the Gaussian AHP multi-criteria method and descriptive and exploratory statistical analysis, the research quantifies countries' performance in 18 critical indicators, integrating economic, social, and environmental aspects. The methodology applied allowed the construction of a comparative ranking, highlighting the superiority of nations with robust environmental policies, such as the Nordic countries, in contrast to the challenges faced by developing countries, which show lower scores due to less integrated policies. The results indicate the effectiveness of the Gaussian AHP in identifying leaders and laggards in sustainability, serving as a tool for guiding and building more informed public policies. Future investigations can enrich these analyses through longitudinal studies, expanding the understanding of sustainable development trajectories.

KEYWORDS. Global Sustainability. Multi-Criteria Decision Aid. Gaussian AHP Method.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193888
https://proceedings.science/p/193888?lang=pt-br

1. Introdução

A gestão da sustentabilidade envolve um intrincado equilíbrio entre fatores ambientais, sociais e econômicos, colocando em destaque a necessidade de abordagens holísticas na análise de políticas e práticas [Orieno *et al.*, 2024]. Nesse contexto, decisões informadas são necessárias, desde que a sustentabilidade de recursos naturais e o desenvolvimento equitativo dependem de intervenções estratégicas baseadas em avaliações robustas e dados precisos. A interação entre diversos indicadores exige o uso de metodologias analíticas sofisticadas, proporcionando aos responsáveis pela formulação de políticas globais e locais antever as ramificações de suas escolhas em múltiplas escalas [Walzberg *et al.*, 2021].

A adoção de uma abordagem estratégica quanto aos indicadores de sustentabilidade se mostra aliada aos governos, para que estes antecipem tendências e adaptem suas políticas em tempo hábil. Ao se debruçarem sobre esses indicadores, países ao redor do mundo conseguem não apenas mapear progressos e desafios existentes, mas também projetar cenários futuros e desenvolver estratégias proativas [Nash *et al.*, 2020]. Neste cenário, integralizando a análise de dados e monitoramento dos indicadores de desempenho aos processos de tomada de decisão de alto nível, os líderes podem justificar suas escolhas políticas perante a comunidade internacional e a população local, garantindo transparência e apoio público [Settembre-Blundo *et al.*, 2021].

No que tange o monitoramento e uso dos indicadores como apoio à decisão, o uso de metodologias e ferramentas de cunho estatístico, matemático e computacional para análise de dados, se demonstra um processo crucial para a tomada de decisão informada [Sarker, 2021]. Mediante a implementação de modelos axiomáticos como análise de correlação, regressão e técnicas de análise multicritério, os formuladores de políticas podem decifrar complexas interdependências entre os indicadores e entender melhor os impactos de suas decisões [Saura, 2021]. Dada abordagem estatística e matemática não só amplifica a precisão das análises, mas também fornece uma base quantitativa sólida para a avaliação de políticas, minimizando ambiguidades e subjetividades no processo decisório [Peters *et al.*, 2020].

A necessidade de analisar os indicadores de sustentabilidade sob uma perspectiva global é essencial para compreender o posicionamento de um país no contexto do desenvolvimento sustentável mundial. Esta visão abrangente permite que os governos avaliem não apenas o desempenho interno, mas também façam comparações internacionais significativas, identificando pontos fortes e áreas para melhoria em relação a seus pares globais [Arora-Jonsson, 2023]. Tal análise é crucial para estabelecer benchmarks realistas e aspiracionais e para incentivar uma competição saudável entre nações, visando aprimorar práticas sustentáveis. Ao entender onde um país se encontra em uma escala global, os formuladores de políticas podem direcionar recursos e estratégias de maneira mais efetiva, tendo assim o seguinte questionamento: Como viabilizar uma análise para esclarecer o posicionamento de uma nação na vanguarda do desenvolvimento sustentável global?

Neste cenário, a Pesquisa Operacional (PO), em forma de ciência, desempenha um papel fundamental no que tange fornecer técnicas de avançadas de análise no processo de tomada de decisão e avaliação quantitativa dos indicadores globais de sustentabilidade (Kurniawati e Cakravastia, 2023]. Em específico, os modelos de Apoio Multicritério à Decisão (AMD), oriundos da PO, integrados à modelos estatísticos, favorecem uma análise abrangente que considere múltiplos critérios simultaneamente. Essas técnicas permitem a incorporação de diversas variáveis, cada uma refletindo diferentes aspectos da sustentabilidade, como impactos ambientais, sociais e econômicos, tornando possível a observação quantitativa das variáveis no que tange a compreensão detalhada do desempenho de uma nação em comparação com seus pares, mas também identificando áreas estratégicas para intervenção e melhoria, potencializando a posição de uma nação no cenário global da sustentabilidade [Tia *et al.*, 2023].

Neste estudo, será proposto uma avaliação sistemática de um conjunto de 159 países sob a luz de 18 indicadores de sustentabilidade. Como apoio metodológico será realizado uma análise exploratória das variáveis mediante estatística descritiva, sendo combinada com a implementação do método AHP-Gaussiano para a construção de uma ordenação dos países frente aos seus

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193888
https://proceedings.science/p/193888?lang=pt-br

desempenhos individuais em cada indicador de sustentabilidade, assim como performar um índice composto que reflita a performance sustentável global de cada país. Desta forma, dado processo metodológico busca por contribuir com a literatura existente, favorecendo uma sistemática de comparação entre nações, mas também servindo como uma ferramenta para formuladores de políticas, incentivando a adoção de estratégias mais favoráveis no que tange o alcance dos objetivos associados ao desenvolvimento sustentável.

O estudo em discussão é estruturado dentro de quatro seções. Estando a Seção 1 apresentando a contextualização do estudo, a Seção 2 se dedica a explorar aspectos de referencial bibliográfico e proposta metodológica integrando análise estatística exploratória e modelagem multicritério para avaliação das variáveis de sustentabilidade e dos países com base nos seus respectivos índices de desenvolvimento. Na Seção 3 será exposta uma descrição da situação problemáticas e das variáveis utilizadas como base de avaliação, proporcionando na sequência o estudo exploratório das variáveis e aplicação multicritério pelo método AHP-Gaussiano. Por fim, a Seção 4 se dedica apresentação das considerações finais e propostas de trabalhos futuros.

2. Material e Métodos

A tomada de decisão em ambientes complexos requer uma abordagem multidimensional que transcenda os aspectos técnicos e subjetivos em uma abordagem estruturada para direcionamento estratégico [Bayanati *et al.*, 2022]. É imperativo incorporar variáveis socioeconômicas, ambientais e normativas para fundamentar as escolhas estratégicas de forma sustentável. Assim, esses ambientes demandam a adoção de metodologias analíticas robustas e adaptáveis, capazes de manejar a diversidade e a interdependência destes fatores críticos. Tais metodologias permitem uma avaliação holística que apoia a sustentabilidade e resiliência organizacional em decisões de longo alcance [Aziz *et al.*, 2023].

O direcionamento estratégico sob a ótica sustentável se apresenta como crucial no contexto da agenda global, harmonizando o progresso econômico com a proteção ambiental e a equidade social. Essas decisões devem refletir uma integração de políticas que atendam às necessidades presentes sem comprometer a capacidade das futuras gerações [Kutty *et al.*, 2020]. Desta forma, o desenvolvimento de políticas sustentáveis se torna desafiador no que tange a implementação de estratégias alinhadas sob a luz dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável praticados pela Organização das Nações Unidas [Hossin *et al.*, 2023].

A adoção de abordagens sistêmicas e baseadas em evidências científicas para avaliar e priorizar ações é fundamental, sendo imprescindível que tais decisões sejam direcionadas com uma visão holística, considerando os múltiplos impactos em todas as dimensões da sustentabilidade [Serafini *et al.*, 2022]. Portanto, a eficácia na tomada de decisão sustentável requer uma colaboração transnacional e a participação de múltiplos stakeholders, visando a coerência e a integração de esforços em escala global. Neste contexto, a sustentabilidade torna-se um filtro crítico através do qual as decisões são avaliadas, considerando os resultados imediatos e os impactos de longo prazo nos aspectos ambientais, sociais e econômicos [Torkayesh *et al.*, 2022].

Considerando a complexidade intrínseca aos problemas no âmbito da sustentabilidade e a necessidade de gerar consenso entre os entes participantes no processo de análise e tomada de decisão, é imprescindível que as ações sejam avaliadas e direcionadas de maneira estruturada, transparente e confiável [Jacques *et al.*, 2024]. Nesse cenário, os modelos multicritério se demonstram favoráveis para o atendimento dessas demandas, operando como suporte essencial aos processos decisórios em questão. Esses modelos permitem a integração de múltiplas perspectivas e critérios, facilitando a deliberação e a escolha informada, corroborando na implementação de políticas e práticas sustentáveis em escala global [Cinelli, Coles e Kirwan, 2014].

A integração de modelagens multicritério, no que tange a avaliação de desempenhos dos indicadores de sustentabilidade, proporciona o direcionamento estratégico de uma nação, viabilizando a identificação de áreas prioritárias e alocação recursos de maneira ótima, alinhando ações com as metas de desenvolvimento sustentável. O emprego de técnicas de modelagem multicritério, é viabilizado a quantificação de desempenhos em variados aspectos da

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193888
https://proceedings.science/p/193888?lang=pt-br

sustentabilidade, como ambiental, econômico e social, corroborando para uma visão integrada e balanceada [Colapinto *et al.*, 2020].

Dada abordagem também auxilia na exposição de interdependências e trade-offs entre os diferentes indicadores, permitindo que decisões sejam tomadas com uma compreensão mais profunda dos impactos de cada escolha. Além disso, ao monitorar o progresso e ajustar estratégias de acordo com análises quantitativas e qualitativas, se possibilita a países e cidades gerenciar suas escolhas de maneira mais dinâmica e informada aos desafios globais, promovendo uma gestão sustentável e adaptativa de seus recursos e políticas [Singh, Upadhyay e Powar, 2022].

2.1 Proposta Metodológica

O modelo metodológico em proposição traz a integração de análise exploratória estatística junto a metodologia multicritério, proporcionando em um primeiro momento a análise dos indicadores de sustentabilidade de forma individual e correlacionada, possibilitando a combinação dos respectivos desempenhos para construção de uma performance global de uma alternativa frente as demais do conjunto estabelecido. No cenário em avaliação, será considerado a avaliação de 159 países sob a luz de 18 indicadores de sustentabilidade [Islam, 2023].

Considerando o tratamento dos dados captados, utiliza-se para estruturação da avaliação 17 indicadores de sustentabilidades obtidos no ano de 2023, sendo adicionado um indicador de desempenho macro com base no avanço percentual de desempenho de cada país dos anos 2000 até 2023. Estando a conjunto de dados estruturado, se inicial uma análise por estatística descritiva em prol de compreender as distribuições presentes nas variáveis de maior relevância, buscando a percepção de relação entre estas. De forma complementar será performado uma correlação de Pearson para observação de relação positiva ou negativa entre as variáveis presentes no modelo.

Após o estudo individual das variáveis, o método AHP-Gaussiano será implementado avaliando o conjunto de nações frente aos critérios estabelecidos, sendo estes representantes dos indicadores de sustentabilidade. O modelo multicritério aplicado proporcionará o esclarecimento dos pesos dos indicadores frente a sua variabilidade assim como viabilizar a construção de um ranking global dos países no que tange o desenvolvimento sustentável global.

Para um melhor detalhamento da proposta metodológica, a Figura 1 traz uma estrutura gráfica representante das análises e implementação multicritério ao conjunto de dados em discussão. Dado processo metodológico se torna favorável para entender como diferentes nações se posicionam em relação a práticas sustentáveis e permite uma análise comparativa que pode influenciar decisões políticas e estratégicas locais e globais.

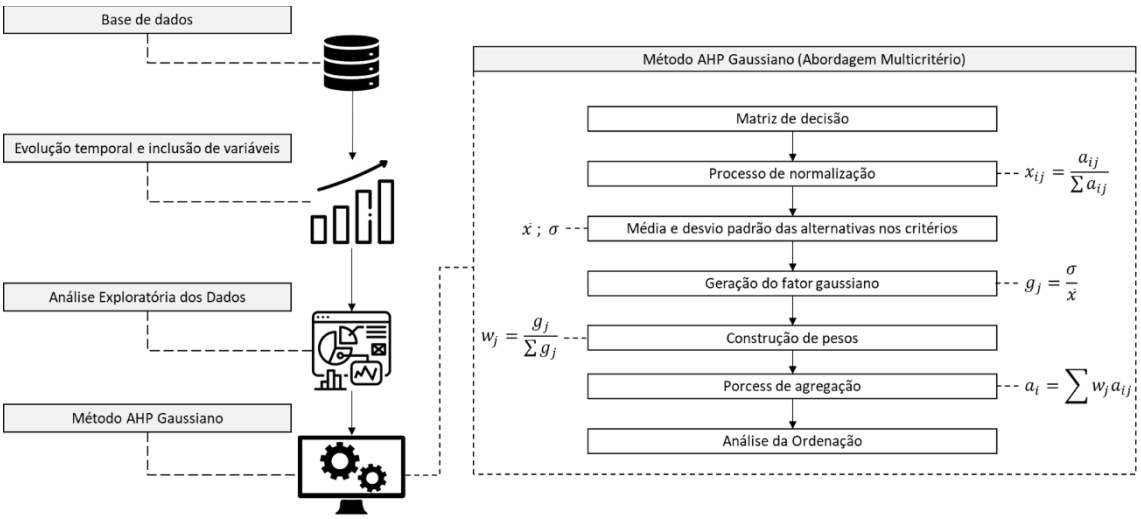


Figura 1 – Proposta metodológica de avaliação

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193888
https://proceedings.science/p/193888?lang=pt-br

2.2 Método AHP-Gaussiano

O método AHP-Gaussiano é apresentado como uma variação do método AHP [Saaty, 1986], quando este é considerado para dados de natureza quantitativa, sendo observações métricas já em sua origem. O modelo axiomático em questão, foi proposto por Santos, Costa and Gomes [2021], em prol de viabilizar a construção dos mesos mediante a variância obtida entre os desempenhos das variáveis nos critérios de avaliação [Costa *et al.* 2021].

Baseado em sua modelagem matemática, considera-se um conjunto de alternativas *A*, onde $a_{ij} \in A, i \dots n$, e um conjunto de critério *C*, onde $c_j \in C, j \dots k$. Para cada c_j deve ser considerado a monotonicidade do critério. No que tange aos índices, i representa a posição da alternativa sob um total de n alternativas no conjunto, de forma similar, j representa a posição do critério dentro do conjunto de elementos formado por k critérios. Neste cenário, utiliza-se a Equação (1) para maximização e (2) para minimização, e na sequência normalização por (3).

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_i a_{ij}} \; \forall \, Max c_j \tag{1}$$

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}^{-1}}{\sum_i a_{ij}} \; \forall \, Min c_j \tag{2}$$

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{1=i}^{n} x_{ij}} \tag{3}$$

Considerando o processo de normalização dos valores de x_{ij}, o processo é sequenciado para a obtenção da média $\overline{x_j}$ nos critérios e dos valores respectivos aos desvios padrões σ_j. Obtidos os valores, realiza-se a construção do fator gaussiano respectivo a cada critério, conforme exposto na Equação (4).

$$g_j = \frac{\sigma_j}{\bar{x}} \tag{4}$$

Por fim, obtêm-se os pesos nos critérios e realiza-se o processo de agregação das alternativas, possibilitando a construção dos desempenhos globais das variáveis, conforme exposto pelas equações (5) e (6), respectivamente.

$$w_j = \frac{g_j}{\sum g_j} \tag{5}$$

$$a_i = \sum w_j \, x_{ij} \tag{6}$$

Com os desempenhos globais, é possibilitado à ordenação das alternativas considerando a variável de maior pontuação como a mais favorável, e a de menor pontuação como a menos favorável ao processo decisório. No cenário de avaliação de países no âmbito do desenvolvimento sustentável, a análise se baseia em construir uma ordenação das nações de destaque mundial no que diz a respeito o desenvolvimento dos indicadores de sustentabilidade.

3. Estudo de Caso

Tendo como base de reflexão os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável [Islam, 2023], o estudo de caso apresenta a avaliação de um conjunto de 159 países frente a análise de 18 indicadores de desempenho. Estas variáveis apresentam um reflexo integrado do desenvolvimento sustentável de cada nação, baseados em desenvolvimento econômico, social e de meio-ambiente. Para o processo de avaliação, se utilizou da linguagem R para procedimentos estatísticos e do software online Gaussian AHP [Moreira, Santos e Gomes, 2021] para implementação do modelo multicritério.

Os 18 critérios analisados representam variáveis de importância global no que tange a representatividade quantitativa de quanto um país está evoluindo frente a cada tipo diferente de indicador, na sequência é realizada a descrição de cada indicador a ser analisado, sendo eles:

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193888
https://proceedings.science/p/193888?lang=pt-br

- Desenvolvimento Sustentável Temporal (*Time_inc*): Variável que reflete o índice de crescimento global de uma nação sob aspectos de sustentabilidade, considerando os anos entre 2000 e 2023;
- Erradicação da Pobreza (*Ind_1*): Avalia os esforços para erradicar a pobreza em todas as suas formas e em todos os lugares;
- Fome Zero (*Ind_2*): Mede o progresso em direção a um mundo sem fome, melhorando a nutrição e promovendo a agricultura sustentável;
- Saúde e Bem-estar (*Ind_3*): Refere-se à garantia de uma vida saudável e promoção do bem-estar para todos em todas as idades;
- Educação (*Ind_4*): Enfoca a obtenção de uma educação de qualidade inclusiva e equitativa, e a promoção de oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos;
- Igualdade de Gênero (*Ind_5*): Visa alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas;
- Água Limpa e Saneamento (*Ind_6*): Concentra-se em garantir a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos;
- Energia Acessível e Limpa (*Ind_7*): Aborda o acesso a energia acessível, confiável, sustentável e moderna para todos;
- Trabalho Digno e Crescimento Econômico (*Ind_8*): Promove o crescimento econômico sustentável, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todos;
- Indústria, Inovação e Infraestrutura (*Ind_9*): Constrói infraestrutura resiliente, promove a industrialização inclusiva e sustentável, e fomenta a inovação;
- Desigualdades Reduzidas (*Ind_10*): Visa reduzir a desigualdade dentro de e entre os países;
- Cidades e Comunidades Sustentáveis (*Ind_11*): Torna as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis;
- Consumo e Produção Responsável (*Ind_12*): Assegura padrões de consumo e produção sustentáveis;
- Ação Climática (*Ind_13*): Toma medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos.
- Vida Abaixo da Água (*Ind_14*): Conserva e utiliza de maneira sustentável os oceanos, os mares e os recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável;
- Vida na Terra (*Ind_15*): Protege, restaura e promove o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerencia as florestas de forma sustentável, combate a desertificação, e interrompe e reverte a degradação da terra e a perda de biodiversidade;
- Paz, Justiça e Instituições Fortes (*Ind_16*): Promove sociedades pacíficas e inclusivas para o desenvolvimento sustentável, fornece acesso à justiça para todos e constrói instituições eficazes, responsáveis e inclusivas em todos os níveis;
- Parcerias para os Objetivos Globais (*Ind_17*): Reforça os meios de implementação e revitaliza a parceria global para o desenvolvimento sustentável.

3.1. Análise Exploratória dos Dados

Iniciando o processo de análise exploratória dos dados, se observou divergência quanto as funções de distribuições respectivas a cada variável do cenário em avaliação. A Figura 2 ilustra os padrões de distribuição para variáveis de desenvolvimento sustentável temporal, saúde e bem-estar, educação, Energia acessível e limpa, desigualdades reduzidas, e ação climática. Esses padrões proporcionam a identificação de possíveis desafios específicos e oportunidades para intervenções direcionadas em cada área.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193888
https://proceedings.science/p/193888?lang=pt-br

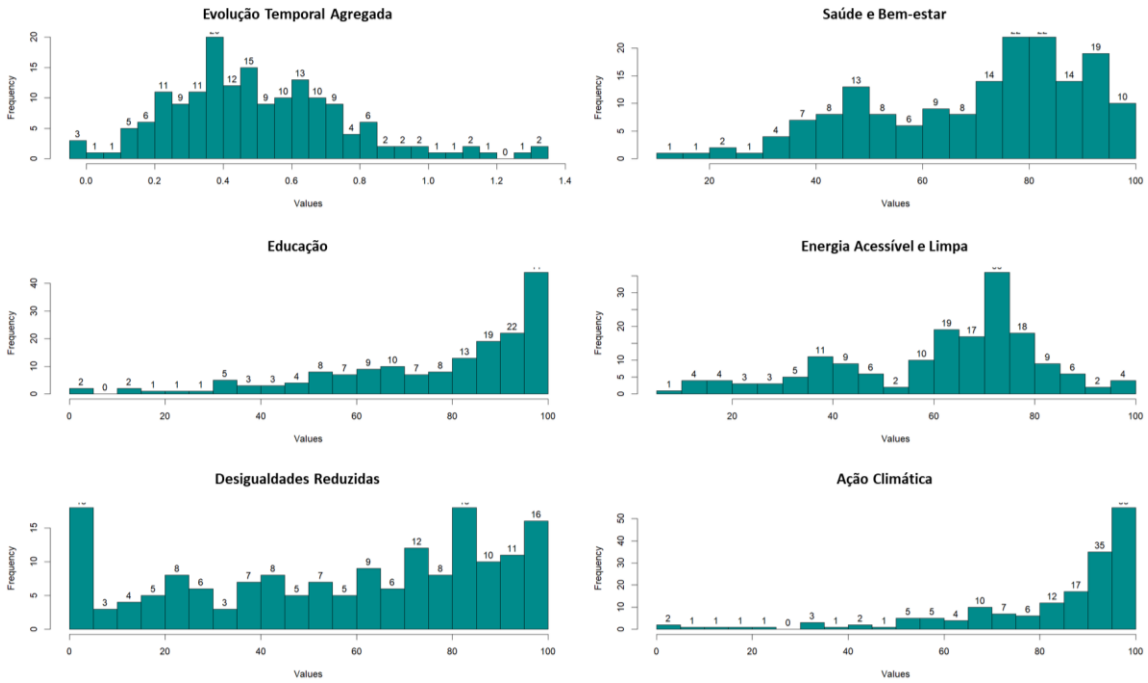


Figura 2 – Distribuições de um conjunto parcial das variáveis de sustentabilidade

De forma análoga, agora considerando os valores quantitativos normalizados mediante a técnica estatística de *z-score*, onde se normaliza os valores de um conjunto de dados tendo a média destes valores como zero, a Figura 3 demonstra a variabilidade das variáveis analisadas via *boxplot*, expondo assim o ponto de 1ª quartil, mediana e 3º quartil dos valores quantitativos. Observa-se que algumas variáveis tendem a trazer uma distribuição normal, entretanto, não sendo válido para todas, sendo favorável observar a correlação destas.

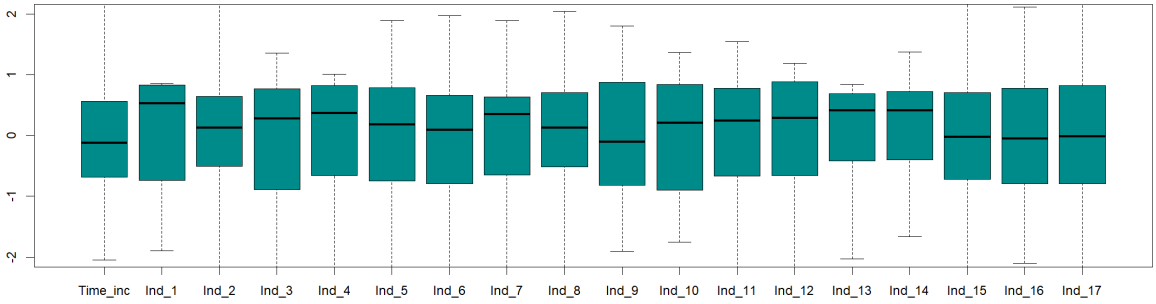


Figura 3 – *Boxplot* de variabilidade das variáveis de sustentabilidade

Havendo a necessidade de exploração das correlações entre as variáveis, foi efetivado então uma correlação de Pearson das variáveis, conforme demonstrado na Figura 4 mediante mapa de calor. Mediante a técnica em questão, se possibilitou esclarecer a relação quantitativa entre as 18 variáveis do modelo de avaliação.

Quando analisado a primeira variável, destinada ao crescimento temporal dos índices de sustentabilidade, se observa uma ausência de alta correlação com as variáveis, seja em caráter positivo ou negativo. Desta forma, pode-se dizer que este aspecto reflete que o desempenho global se constrói não apenas sendo destaque em uma única variável, as tendo desempenhos equilibrados entre todas do conjunto. Outro ponto de interesse se reflete entre as variáveis de consumo e produção responsável (*Ind_12*) e ação climática (*Ind_13*), expondo alta correlações entre si, porém, refletindo correlações negativas com as demais do conjunto. Analisando as demais variáveis do conjunto, índices medianos e altos de correlações são identificados, explorando que o desenvolvimento de um indicador pode corroborar na melhora de performance de outras variáveis.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193888
https://proceedings.science/p/193888?lang=pt-br

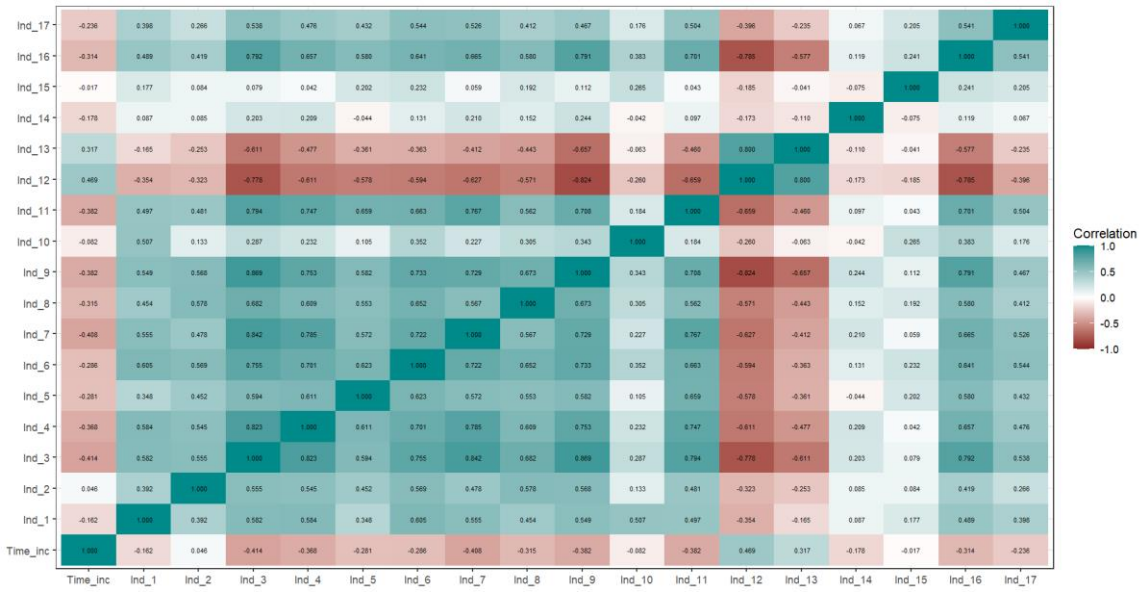


Figura 4 – Mapa de calor referente a correlação das variáveis de sustentabilidade

3.2. Análise Multicritério

Realizada a exploração parcial dos dados, mediante técnicas estatísticas, torna-se possível a implementação do método AHP-Gaussiano para a construção do ranking de desempenho dos países em conformidade aos critérios de avaliação. Neste cenário, mediante a variabilidade dos índices de desempenhos particulares, se possibilita a construção dos fatores gaussianos e pesos dos critérios, seguindo a estrutura axiomática proposta pelo modelo em implementação. A Tabela 1 apresentam o desvio padrão, fator gaussiano e peso de cada critério analisado.

Tabela 1 – Construção das métricas de avaliação pelo método AHP-Gaussiano

Variáveis	Desvio Padrão	Fator Gaussiano	Peso
Desenvolvimento Sustentável Temporal	0,0031	0,5240	0,0901
Erradicação da Pobreza	0,0031	0,5267	0,0906
Fome Zero	0,0011	0,1802	0,0310
Saúde e Bem-estar	0,0017	0,2880	0,0495
Educação	0,0018	0,2985	0,0513
Igualdade de Gênero	0,0015	0,2561	0,0440
Água Limpa e Saneamento	0,0013	0,2168	0,0373
Energia Acessível e Limpa	0,0019	0,3271	0,0562
Trabalho Digno e Crescimento Econômico	0,0009	0,1454	0,0250
Indústria, Inovação e Infraestrutura	0,0030	0,5087	0,0874
Desigualdades Reduzidas	0,0034	0,5695	0,0979
Cidades e Comunidades Sustentáveis	0,0015	0,2466	0,0424
Consumo e Produção Responsável	0,0012	0,1998	0,0344
Ação Climática	0,0015	0,2555	0,0439
Vida Abaixo da Água	0,0036	0,6016	0,1034
Vida na Terra	0,0013	0,2133	0,0367
Paz, Justiça e Instituições Fortes	0,0015	0,2483	0,0427
Parcerias para os Objetivos Globais	0,0012	0,2107	0,0362

Analisando a Tabela 1, com base nas métricas construídas, a maior variabilidade é identificada nas variáveis de Desenvolvimento Sustentável Temporal, Erradicação da Pobreza, Desigualdades Reduzidas, e Vida Abaixo da Água. Neste cenário, dadas variáveis representam maiores influências frente as demais, não apresentando uma percepção subjetiva, mas considerando fatores quantitativos de variabilidade para avaliação dos desempenhos individuais dos países. Ressalta-se que dada técnica busca por favorecer variáveis que consigam melhor expor a diferença

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193888
https://proceedings.science/p/193888?lang=pt-br

entre as alternativas de um processo de avaliação, favorecendo assim os critérios que apresentam maior variabilidade entre os desempenhos locais das alternativas.

Tendo em posse dos pesos dos critérios, o processo de ponderação é proporcionado e então viabilizado a função de agregação e construção do ranking dos países, mediante suas respectivas utilidades. A Tabela 2 expõem a ordenação global dos países.

Tabela 2 – Ranking de países mediante o método AHP-Gaussiano

Países	Utilidades	Países	Utilidades	Países	Utilidades
Finlândia	0,800	Peru	0,654	Guiné	0,542
Estônia	0,794	Argentina	0,652	Bolívia	0,542
Dinamarca	0,785	República Eslovaca	0,652	Honduras	0,541
Croácia	0,775	Suíça	0,651	Paraguai	0,541
Alemanha	0,774	El Salvador	0,651	Nigéria	0,537
Suécia	0,768	Moldávia	0,650	Gana	0,536
Polônia	0,764	Montenegro	0,649	Omã	0,532
Noruega	0,758	Líbano	0,646	Cingapura	0,524
França	0,758	Luxemburgo	0,644	Mongólia	0,522
Eslovênia	0,758	Hungria	0,640	Tanzânia	0,521
Letônia	0,749	Bangladesh	0,639	Benim	0,515
Bélgica	0,746	Brasil	0,637	Guiana	0,513
Irlanda	0,745	Equador	0,631	Belize	0,513
Reino Unido	0,742	Nova Zelândia	0,630	Togo	0,512
Romênia	0,741	Butão	0,629	Cuba	0,511
Espanha	0,737	Azerbaijão	0,629	Mali	0,510
Portugal	0,736	México	0,629	Ruanda	0,508
Grécia	0,736	Senegal	0,629	Suriname	0,508
Emirados Árabes Unidos	0,730	Sérvia e Montenegro	0,628	Camarões	0,507
Islândia	0,726	Ucrânia	0,627	Guatemala	0,503
Itália	0,725	Mauritânia	0,625	Djibuti	0,499
Lituânia	0,723	Costa do Marfim	0,624	Venezuela	0,497
Países Baixos	0,718	Sri Lanka	0,624	Trinidad e Tobago	0,494
Canadá	0,718	Egito	0,623	Libéria	0,493
Coreia do Sul	0,715	Belarus	0,623	Barbados	0,488
Japão	0,710	Índia	0,623	Botsuana	0,483
Malta	0,710	Costa Rica	0,622	Moçambique	0,477
Austrália	0,709	Cabo Verde	0,621	Etiópia	0,475
Uruguai	0,698	Gabão	0,617	Brunei Darussalam	0,475
Chile	0,694	Nepal	0,617	Congo	0,472
Tailândia	0,693	Filipinas	0,613	Sudão	0,467
Estados Unidos	0,690	Arábia Saudita	0,607	Essuatíni	0,460
Bósnia e Herzegovina	0,687	Colômbia	0,601	Bahrein	0,460
República Tcheca	0,685	República do Quirguistão	0,600	Madagascar	0,459
Marrocos	0,683	Armênia	0,599	Comores	0,456
Maldivas	0,683	Panamá	0,595	Bahamas	0,454
República Dominicana	0,682	Cazaquistão	0,589	Haiti	0,453
Fiji	0,682	Maurícia	0,588	Kuaite	0,444
Geórgia	0,680	São Tomé e Príncipe	0,588	Oceânia	0,434
Rússia	0,679	Gâmbia	0,587	Turquemenistão	0,431
Chipre	0,678	Quênia	0,584	Uganda	0,431
Tunísia	0,675	Jamaica	0,582	Somália	0,430
Vietnam	0,674	Namíbia	0,579	Lesoto	0,427
Áustria	0,670	Uzbequistão	0,575	Nova Guiné	0,426
Albânia	0,669	Myanmar	0,573	Angola	0,417
Israel	0,667	Nicarágua	0,572	Níger	0,412
China	0,666	Paquistão	0,569	Síria	0,412
Bulgária	0,663	Iraque	0,568	Burundi	0,411
Argélia	0,660	Serra Leoa	0,563	Afeganistão	0,386
Indonésia	0,660	Catar	0,558	Zâmbia	0,383
Malásia	0,657	Tajiquistão	0,556	Zimbábue	0,376
Irã	0,657	África do Sul	0,549	Chade	0,362
Jordânia	0,656	Camboja	0,549	Sudão do Sul	0,229

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193888
https://proceedings.science/p/193888?lang=pt-br

Considerando os resultados obtidos, se observa um padrão distintivo em relação ao desempenho dos países no índice de sustentabilidade. Países nórdicos e algumas nações europeias, como Finlândia, Estônia, Dinamarca, Alemanha e Suécia, lideram o ranking, destacando-se com altas pontuações. Estes países são conhecidos por suas políticas ambientais proativas e sistemas de governança eficazes que enfatizam a sustentabilidade em várias dimensões, incluindo gestão de recursos naturais, educação de qualidade e infraestrutura sustentável. A consistência desses países em manter altos padrões de sustentabilidade podem ser atribuída a um forte compromisso político e social com o desenvolvimento sustentável. Este padrão sugere que a integração de políticas sustentáveis de longo prazo e investimentos em tecnologia verde são favoráveis para o alcance de bons índices nos indicadores de sustentabilidade.

Por outro lado, os resultados demonstram que muitos países em desenvolvimento, incluindo grandes economias como Brasil, México e Índia, encontram-se em posições mais baixas no ranking. Esses países enfrentam desafios significativos, como disparidades sociais, problemas ambientais e necessidades de desenvolvimento econômico que ainda não estão plenamente alinhadas com os princípios da sustentabilidade. A baixa pontuação dessas nações reflete a complexidade dos desafios que enfrentam em equilibrar crescimento econômico com práticas ambientais e sociais sustentáveis.

Sob aspectos de limitação da discussão trazida neste estudo, é reconhecido que a pesquisa reside na dependência dos dados disponíveis, que podem variar significativamente em qualidade e atualidade entre diferentes países. Isso pode afetar a precisão das análises e, consequentemente, a construção do ranking sob aspectos de sustentabilidade. Além disso, o método AHP-Gaussiano, apesar de se demonstrar favorável, opera a construção dos pesos dos critérios utilizando de forma estrita a variabilidade das observações nas variáveis, o que pode gerar um viés técnico na construção e interpretação dos resultados.

A complexidade e a interdependência dos indicadores de sustentabilidade também apresentam desafios, pois mudanças em um indicador podem influenciar outros de maneiras não previstas sob aspectos globais de desenvolvimento. Entretanto, a metodologia aplicada se demonstra benéfica na capacidade de incorporar uma variedade de indicadores e sintetizá-los em um índice composto, facilitando uma comparação clara e quantitativa entre as nações. Além disso, o uso de uma abordagem multicritério ajuda a destacar as áreas em que cada país excela ou precisa de melhorias, apoiando o processo decisório para os líderes globais no que tange a formulação de políticas públicas para o desenvolvimento sustentável global.

4. Conclusão

O estudo em questão aborda a complexa questão da sustentabilidade global, reconhecendo a necessidade de uma análise detalhada dos indicadores de sustentabilidade para favorecer a compreensão dos desempenhos específicos dos países nas métricas globais. A problemática central investiga como os países se posicionam no desenvolvimento sustentável mediante um conjunto diversificado de indicadores, reconhecendo a importância de estratégias que possam antecipar tendências e adaptar políticas de forma favorável a cada cenário observado.

Como proposta metodológica, a abordagem adotada traz uma integração de análise estatística exploratória junto ao método multicritério AHP-Gaussiano, proporcionando uma análise holística e quantitativa dos indicadores de sustentabilidade de 159 países. Dado modelo matemático foi escolhido por sua viabilidade de integrar diversas variáveis e considerar a variabilidade entre elas, proporcionando uma análise comparativa e a formação de um ranking. Desta forma, além de se proporcionar a análise das funções de distribuição das variáveis, assim como suas respectivas correlações, a integração dos índices em uma utilidade comum, mediante modelagem multicritério, favoreceu a construção do ranking de desempenho dos países sob aspectos de sustentabilidade.

Os resultados do estudo revelaram que países com políticas sustentáveis bem-estruturadas, como os países nórdicos e alguns estados europeus, lideram o ranking de sustentabilidade. Esses países demonstraram uma capacidade superior de integrar preocupações ambientais, econômicas e sociais em suas políticas e práticas governamentais. Por outro lado, foi

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193888
https://proceedings.science/p/193888?lang=pt-br

evidenciado que países em desenvolvimento enfrentam desafios significativos, refletindo-se em pontuações mais baixas no índice de sustentabilidade, apontando para a necessidade urgente de políticas mais robustas e apoio internacional.

Por fim, o estudo demonstra uma adequabilidade do método AHP-Gaussiano como modelo de apoio à decisão na construção do ranking dos países, podendo ser considerado como instrumento de suporte na construção de políticas públicas, viabilizando o esclarecimento do posicionamento de uma dada nação frente as demais no âmbito geopolítico global. As limitações identificadas, especialmente a dependência de dados atualizados e a dependência técnica para a construção dos pesos dos critérios, sugerem a necessidade de futuras investigações para refinar a metodologia, sendo proposto a expansão do estudo com base na inclusão de análises longitudinais que possam rastrear mudanças no desempenho dos países ao longo do tempo, e a experimentação com outras metodologias multicritério para validar e comparar os resultados obtidos.

Referências

ARORA-JONSSON, S. The sustainable development goals: A universalist promise for the future. *Futures*, v. 146, p. 103087, 2023.

AZIZ, S. *et al.* Emerging trends and approaches for designing net-zero low-carbon integrated energy networks: A review of current practices. *Arabian Journal for Science and Engineering*, p. 1–23, 2023.

BAYANATI, M. *et al.* Prioritize Strategies to Address the Sustainable Supply Chain Innovation Using Multicriteria Decision-Making Methods. *Complexity*, v. 2022, 2022.

CINELLI, M.; COLES, S. R.; KIRWAN, K. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological indicators*, v. 46, p. 138–148, 2014.

COLAPINTO, C. *et al.* Environmental sustainability and multifaceted development: multi-criteria decision models with applications. *Annals of Operations Research*, v. 293, n. 2, p. 405–432, 2020.

COSTA, I. P. DE A. *et al.* Bibliometric Studies on Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Applied in Personnel Selection. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, v. 341, n. 119–125, 29 out. 2021. Disponível em: <https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/FAIA210239>.

HOSSIN, M. A. *et al.* Analyzing the Progress of China and the World in Achieving Sustainable Development Goals 7 and 13. *Sustainability*, v. 15, n. 19, p. 14115, 2023.

ISLAM, S. *Sustainable Development Data up to 2023*. . [S.l.]: Kaggle. , 2023

JACQUES, E. DE A. *et al.* Smart City Actions Integrated into Urban Planning: Management of Urban Environments by Thematic Areas. *Applied Sciences*, v. 14, n. 8, p. 3351, 2024.

KURNIAWATI, D. A.; CAKRAVASTIA, A. A review of halal supply chain research: Sustainability and operations research perspective. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, v. 6, p. 100096, 2023.

KUTTY, A. A. *et al.* A system thinking approach for harmonizing smart and sustainable city initiatives with United Nations sustainable development goals. *Sustainable Development*, v. 28, n. 5, p. 1347–1365, 2020.

MOREIRA, M. Â. L.; SANTOS, M. DOS; GOMES, C. F. S. *Gaussian AHP Software Web (v.1)*. . [S.l.]: Posity. , 2021

NASH, K. L. *et al.* To achieve a sustainable blue future, progress assessments must include interdependencies between the sustainable development goals. *One Earth*, v. 2, n. 2, p. 161–173, 2020.

ORIENO, O. H. *et al.* Sustainability in project management: A comprehensive review. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, v. 21, n. 1, p. 656–677, 2024.

PETERS, E. *et al.* Product decision-making information systems, real-time big data analytics, and deep learning-enabled smart process planning in sustainable industry 4.0. *Journal of Self-Governance and Management Economics*, v. 8, n. 3, p. 16–22, 2020.

SAATY, T. L. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. *Management science*, v. 32, n. 7, p. 841–855, 1986.

SANTOS, M.; COSTA, I. P. DE A.; GOMES, C. F. S. Sensitivity analysis of multicriteria decision between standard deviation and average in the selection of construction of warships: a new approach to the AHP method. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 2021.

SARKER, I. H. Data science and analytics: an overview from data-driven smart computing, decision-making

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193888
https://proceedings.science/p/193888?lang=pt-br

and applications perspective. *SN Computer Science*, v. 2, n. 5, p. 377, 2021.

SAURA, J. R. Using data sciences in digital marketing: Framework, methods, and performance metrics. *Journal of Innovation & Knowledge*, v. 6, n. 2, p. 92–102, 2021.

SERAFINI, P. G. *et al.* Sustainable development goals in higher education institutions: a systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, v. 370, p. 133473, 2022.

SETTEMBRE-BLUNDO, D. *et al.* Flexibility and resilience in corporate decision making: a new sustainability-based risk management system in uncertain times. *Global Journal of Flexible Systems Management*, v. 22, n. Suppl 2, p. 107–132, 2021.

SINGH, S.; UPADHYAY, S. P.; POWAR, S. Developing an integrated social, economic, environmental, and technical analysis model for sustainable development using hybrid multi-criteria decision making methods. *Applied energy*, v. 308, p. 118235, 2022.

TIAN, G. *et al.* A survey of multi-criteria decision-making techniques for green logistics and low-carbon transportation systems. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 20, p. 57279–57301, 2023.

TORKAYESH, A. E. *et al.* Integrating life cycle assessment and multi criteria decision making for sustainable waste management: key issues and recommendations for future studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 168, p. 112819, 2022.

WALZBERG, J. *et al.* Do we need a new sustainability assessment method for the circular economy? A critical literature review. *Frontiers in Sustainability*, v. 1, p. 620047, 2021.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193888
https://proceedings.science/p/193888?lang=pt-br