

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA – UFSM
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTATÍSTICA E
MODELAGEM QUANTITATIVA**

Patrícia Inês Schwantz

**MATRIZ ENERGÉTICA E DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL: UMA ANÁLISE DO INTER-
RELACIONAMENTO DOS PAÍSES DO G7 E BRASIL**

**Santa Maria, RS
2023**

Patrícia Inês Schwantz

**MATRIZ ENERGÉTICA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: UMA
ANÁLISE DO INTER-RELACIONAMENTO DOS PAÍSES DO G7 E BRASIL**

Monografia apresentada ao curso de Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Especialista em Estatística e Modelagem Quantitativa.**

Orientador: Prof. Dr. Adriano Mendonça Souza

**Santa Maria, RS
2023**

Patrícia Inês Schwantz

**MATRIZ ENERGÉTICA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: UMA
ANÁLISE DO INTER-RELACIONAMENTO DOS PAÍSES DO G7 E BRASIL**

Monografia apresentada ao curso de Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Especialista em Estatística e Modelagem Quantitativa.**

Aprovado em 31 de março de 2023.

Adriano Mendonça Souza, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Luciane Flores Jacobi, Dra. (UFSM)

Tailon Martins, Me. (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

RESUMO

MATRIZ ENERGÉTICA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: UMA ANÁLISE DO INTER-RELACIONAMENTO DOS PAÍSES DO G7 E BRASIL

AUTOR: Patricia Inês Schwantz
ORIENTADOR: Adriano Mendonça Souza

A geração e o consumo de energia são um fator crucial para todos os aspectos da vida, mas que vem sendo marcado por um aumento constante na demanda devido ao crescimento populacional e avanços tecnológicos. A geração por algumas fontes de energia apresenta desvantagens principalmente em relação aos impactos negativos na poluição ambiental, causando grandes variações climáticas vividas nos últimos anos que são uma consequência das emissões de gases efeito estufa, entre os quais está a emissão de CO₂. Este estudo teve como objetivo analisar as similaridades entre os países do G7 e Brasil em relação as variáveis de geração e demanda de energia, desempenho econômico, desenvolvimento populacional e emissões de CO₂ no período de 2012 até 2021. Para isso, foi empregada a técnica de Análise de Agrupamento para analisar a relação entre os países estudados e as variáveis com a identificação de similaridades entre si. Ao final do estudo conclui-se que, entre os países do G7, o Brasil possui maior relação com o Canadá quanto a variável de intensidade anual das emissões de CO₂ equivalente, sendo que nas demais categorias não foram estabelecidas relações.

Palavras-chave: Energia. Análise multivariada. Análise de Agrupamento. Cluster. Países do G7.

ABSTRACT

ENERGY MATRIX AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT: AN ANALYSIS OF THE INTERRELATIONSHIP BETWEEN THE G7 COUNTRIES AND BRAZIL

AUTHOR: Patricia Inês Schwantz
ADVISOR: Adriano Mendonça Souza

The generation and consumption of energy is a crucial factor for all aspects of life, but it has been marked by a constant increase in demand due to population growth and technological advances. The generation by some energy sources presents disadvantages mainly in relation to the negative impacts on environmental pollution, causing large climatic variations experienced in recent years that are a consequence of greenhouse gas emissions, among which is the emission of CO₂. This study aimed to analyze the similarities between the G7 countries and Brazil in relation to the variables of energy generation and demand, economic performance, population development and CO₂ emissions in the period from 2012 to 2021. To this end, the cluster analysis technique was used to analyze the relationship between the countries studied and the variables with the identification of similarities between them. At the end of the study it was concluded that, among the G7 countries, Brazil has a greater relationship with Canada regarding the variable of annual intensity of CO₂ equivalent emissions, and in the other categories no relationships were established.

Keywords: Energy. Multivariate analysis. Cluster analysis. Cluster. G7 countries.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva das variáveis com os valores de média, mínimo, máximo, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV).....	28
---	----

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e emissões em g_CO ₂	29
Figura 2 - Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento populacional.	31
Figura 3 - Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e IDH.	32
Figura 4 - Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento econômico.....	34
Figura 5 - Dendrograma com os dados dos países para todas as variáveis.	35
Figura 6 – Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e emissões em g_CO ₂	37
Figura 7 - Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento populacional.	39
Figura 8 - Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e IDH.	41
Figura 9 - Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento econômico.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo Geral	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 MATRIZ ENERGÉTICA	15
2.1.1 Fósseis	17
2.1.2 Hidrelétrica	17
2.1.3 Energia Solar	18
2.1.4 Bioenergia	19
2.1.5 Eólica	20
2.2 ANÁLISE MULTIVARIADA	20
2.2.1 Análise de Agrupamento	21
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	26
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	26
3.2 DADOS	26
3.3 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA	28
4.2 RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS	29
4.2.1 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda e g_CO2	29
4.2.2 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda e crescimento populacional	31
4.2.3 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda e IDH	32
4.2.4 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda e crescimento econômico	33
4.2.5 Análise da relação entre todas as variáveis	35
4.3 RELAÇÃO ENTRE CASOS	37
4.3.1 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda de energia e emissões em g_CO2	37

4.3.2 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento populacional.....	39
4.3.3 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda de energia e IDH.....	40
4.3.4 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento econômico.....	42
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A eletricidade é um dos elementos mais importantes para a prosperidade econômica de qualquer país, tendo um aumento constante na demanda devido ao crescimento populacional e avanços tecnológicos. Segundo Hardisty, Clark e Hynes (2012) e Solarin, Bello e Bekun (2021), a geração de energia elétrica, principalmente por fonte fóssil, também é um dos principais contribuintes para as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), constituindo assim uma grande fonte de preocupação para o aquecimento global e às mudanças climáticas, com ameaças ao desenvolvimento sustentável. Solarin, Bello e Bekun (2021) destacam ainda que, entre as fontes de energia, os combustíveis fósseis ainda dominam a mistura de combustíveis para geração de eletricidade para a maioria das economias do mundo, muito embora existam acordos globais visando estabilizar e reduzir as emissões de carbono e mitigar as mudanças climáticas (GÜRSAN; GOOYERT, 2021).

Embora haja uma forte dependência dos combustíveis fósseis, existem outras matrizes energéticas muito utilizadas para geração de energia, tais como: solar, eólica, hidráulica, biomassa, solar, geotérmica, entre outras. Essas fontes apresentam grande potencial energético e vêm sendo estimuladas na intenção de produzir energia segura e sustentável em todo o mundo. Vale ressaltar, que apesar da tendência de as energias renováveis serem uma solução eficaz para o fornecimento de energia elétrica e produzirem níveis relativamente baixos de emissões de GEE e poluição do ar, sua fabricação e transporte produz algumas emissões e poluentes que também devem ser considerados (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2010).

Conforme a International Energy Agency (IEA, 2022), apesar dos esforços globais para a descarbonização nas atividades do setor de energia, ainda assim, a geração de eletricidade e calor é responsável por mais de 40% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) da combustão de combustível, o principal gás de efeito estufa. As usinas a carvão são responsáveis por mais de 70% das emissões associadas. De acordo com a IEA (2022), as emissões de CO₂ para a geração de energia elétrica são consequência do efeito combinado entre a produção de eletricidade, eficiência na geração total e intensidade de carbono da geração por fontes fósseis.

De outro lado, a energia proveniente de hidrelétricas, de fonte renovável, tem sido considerada como uma alternativa para combater as emissões de GEE, mesmo havendo a emissão de alguns gases poluidores, como o metano (CH₄). Porém, esta fonte de energia está condicionada aos índices pluviométricos, bem como aliado às estratégias adotadas na gestão da escassez hídrica, pois o volume do fluxo de água e a mudança na elevação ou queda de um ponto a outro determinam a quantidade de energia disponível na água em movimento. Em geral,

quanto maior a vazão de água e maior a queda, mais eletricidade uma usina hidrelétrica irá produzir (ALLAN; CASTILLO; CAPPS, 2021).

Acerca da energia obtida por meio da biomassa, a bioenergia, Keller et al. (2018) afirmam que o impacto das emissões de GEE por esta matriz energética dependem da fonte utilizada, do combustível deslocado, do tempo após a colheita da matéria-prima e do destino alternativo. Em relação a energia solar, Makhdoomi e Askarzadeh (2021) dissertam que consiste na maior fonte de energia renovável disponível, mas que devido à natureza intermitente, com a dependência da existência de radiação solar para geração de energia elétrica, deve ser integrada a um sistema de armazenamento de energia. Já a energia eólica, conforme dados da International Renewable Energy Agency - IRENA (2022), cresceu rapidamente desde 2000 e a capacidade instalada global de geração eólica aumentou 98 vezes nas últimas duas décadas, saltando de 7,5 GW em 1997 para cerca de 733 GW em 2018. Entre 2009 e 2019 a produção de energia eólica aumentou em um fator de 5,2 atingindo 1412 TWh.

De modo geral, segundo Voumik et al. (2023), em 2021, a geração de energia e calor teve o maior aumento de emissões CO₂, com um aumento de mais de 900 Mt. No entanto, conforme a IEA (2021), o Grupo dos Sete países mais industrializados do mundo (G7) estão bem posicionados para descarbonizar totalmente seu fornecimento de eletricidade até 2035, acelerando os avanços tecnológicos e lançamentos de infraestrutura necessários para levar os mercados globais de energia a emissões líquidas zero até 2050. O G7 inclui os Estados Unidos, Canadá, França, Alemanha, Itália, Japão e Reino Unido. Em 2021, o G7 foi responsável por quase 40% da economia global, 36% da capacidade global de geração de energia, 30% da demanda global de energia e 25% das emissões globais de CO₂ relacionadas à energia (IEA, 2021).

Segundo a IEA (2021), a energia hidrelétrica é considerada a maior fonte renovável de eletricidade no G7 e no mundo em 2021, e sua produção continua a crescer, principalmente devido à modernização da infraestrutura existente. Além da hidrelétrica, a bioenergia, a geotérmica e a energia solar também contribuem para transições de energia limpa no G7, fornecendo fontes de eletricidade com baixas emissões.

No Brasil, o fornecimento, o uso de energia e a transformação do setor energético brasileiro formam um importante pilar para a transformação econômica pela qual o país vem passando nas últimas décadas (SIMON; NAEGLER; GILS, 2018). Segundo Silveira (2013), em termos energéticos, o Brasil passou de uma forte dependência dos combustíveis fósseis e da biomassa tradicional para uma diversa matriz energética em menos de meio século. Apesar do aumento constante do consumo de energia no país, também ocorre a inserção de sistemas de

energia modernos e inovadores que em grande parte baseados em fontes de energia renováveis. De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia (MME, 2022), estima-se que 46,7% da matriz energética é composta por fontes renováveis (44,7% em 2021), sendo que, na matriz elétrica, essa participação é de mais de 86% em 2022 enquanto em 2021 era de 78,1%, representando um crescimento de 7,9%.

Diante do exposto e considerando que a eletricidade exerce influência sobre fatores econômicos, sociais e ambientais de diversas formas (DANTAMA; ABDULLAHI; INUWA, 2012), verifica-se que, mesmo havendo anuários estatísticos relacionados ao tema, por meio de uma busca nas bases de dados Web of Science e Scopus com os termos “fontes renováveis”, “fontes não renováveis”, “países G7” e “indicadores econômicos”, constata-se que os dados analisados e publicados cientificamente ainda evidenciam uma lacuna de pesquisa no que tange a relação entre os países do G7 e o Brasil e, portanto, o tema será explorado nesta pesquisa. Para isso, foi empregada a Análise de Agrupamento com a pretensão de analisar a relação entre os países e as variáveis selecionadas para identificar similaridades entre si.

1.1 OBJETIVOS

O trabalho é proposto para ser desenvolvido a partir dos objetivos a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar as similaridades entre os países do G7 e Brasil em relação as variáveis de geração e demanda de energia, desempenho econômico, desenvolvimento populacional e emissões de CO₂ no período de 2012 até 2021.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar os grupos semelhantes por meio da Análise de Agrupamento;
- Analisar a relação entre a geração de energia, demanda e emissões de CO₂;
- Analisar a relação entre a geração de energia, demanda e Índice de Desenvolvimento Humano;
- Analisar a relação entre a geração de energia, demanda e indicadores de crescimento populacional;
- Analisar a relação entre a geração de energia, demanda e indicadores econômicos;

1.3 JUSTIFICATIVA

A geração e o consumo de energia são um fator crucial para todos os aspectos da vida, muito embora a geração por algumas fontes de energia como as fósseis, por exemplo, apresenta desvantagens principalmente em relação aos impactos negativos na poluição ambiental. Entre os principais impactos estão as grandes variações climáticas vividas nos últimos anos que são uma consequência das emissões de GEE. Entre os GEE está a emissão de CO₂, sendo a produção de energia elétrica uma das maiores fontes de emissões deste poluente. Nesse sentido, cada vez mais aumentam os incentivos em escala mundial para o uso de fontes de energia renováveis com intuito de alcançar o desenvolvimento sustentável (BILDIRICI; GÖKMENOĞLU, 2017).

Visando traçar um panorama da participação dos países nas emissões globais de CO₂, torna-se necessário e importante analisar os comportamentos similares entre os países do G7 e Brasil relativos as fontes alternativas de energia, incluindo uma comparação dos potenciais impactos da utilização fontes renováveis e fontes fósseis. Portanto, este estudo proporciona contribuições no prisma acadêmico, científico e social.

Do ponto de vista acadêmico, o avanço de pesquisas acerca das matrizes energéticas, principalmente abrangendo fontes renováveis de energia, oferece uma ampla gama de possibilidades de novos estudos e tecnologias, em função das diversas oportunidades que se apresentam de exploração e desenvolvimento. Conforme Auler (2021), na medida em que se reconhece a importância de ampliação das pesquisas e que o interesse científico voltado para a compreensão das novas tecnologias se torna crescente, aumenta ainda mais a necessidade de realização de estudos reflexivos sobre o desenvolvimento sustentável por meio de fonte renováveis de energia.

Numa perspectiva social, entre os vários fatores que proporcionaram o desenvolvimento da humanidade, um dos mais importantes foi o uso da energia elétrica e, por muito tempo, o consumo per capita de eletricidade foi utilizado como indicador para estimar o desenvolvimento dos países. Somado a isso, com o amplo avanço tecnológico e crescimento da população, percebe-se também um aumento na demanda por energia, tornando-se necessário e cada mais urgente garantir que as fontes de energia estejam disponíveis em níveis suficientes e que sejam acessíveis a toda a população (CARDOSO, 2019). Nesse sentido, a geração de energia por fontes renováveis vem se tornando dominante para atender de forma sustentável a demanda crescente da sociedade.

A partir dessa problemática, o presente trabalho busca entender: “**Quais são as relações entre os países do G7 e Brasil quanto as variáveis de geração e demanda de energia, crescimento econômico, desenvolvimento populacional e emissões de CO₂?**” Dessa forma, justifica-se este estudo. Para isso, a escolha da Análise de Agrupamento como método de pesquisa é justificada pelo seu potencial em identificar padrões, estruturas e relações complexas em conjuntos de dados. Esse método é especialmente útil quando há interesse em agrupar observações semelhantes, identificar segmentos de mercado, entender a diversidade de um fenômeno ou explorar a estrutura latente dos dados. Além disso, para a execução da pesquisa optou-se por realizar a Análise de Agrupamento, uma técnica aplicável em diversas áreas, o que a torna uma ferramenta versátil para investigar uma ampla gama de problemas de pesquisa. Ao utilizar a Análise de Agrupamento, é possível obter uma compreensão mais profunda dos dados, revelar *insights* ocultos e embasar decisões tomadas em diversos contextos de pesquisa.

Quanto a escolha de estudar a relação entre os países do G7 e o Brasil, esta é justificada pela importância no cenário econômico e político global. O G7 é uma das principais organizações internacionais, representando uma parcela significativa da economia mundial e influenciando decisões em áreas como comércio, finanças, segurança e meio ambiente. Desse modo, o estudo da relação entre esses países e o Brasil permite compreender qual a relação existente entre eles quanto a geração e demanda de energia, crescimento econômico e populacional, além das emissões de CO₂.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo está organizado do seguinte modo: a introdução a pesquisa, o problema proposto, os objetivos, a justificativa e a estrutura do trabalho, que são apresentados no primeiro capítulo. No segundo capítulo apresenta-se o referencial teórico que serviu como base para o desenvolvimento dessa monografia, abordando as matrizes energéticas estudadas e a técnica de análise multivariada aplicada no estudo. Na sequência, o terceiro capítulo elucida os procedimentos metodológicos para a elaboração da monografia. Nos procedimentos metodológicos, apresenta-se os aspectos relativos à caracterização da pesquisa, caracterização dos dados, etapas do desenvolvimento, assim como, técnica de coleta e análise de dados. O quarto capítulo compreende a etapa de análise e discussão dos resultados e, por fim, no capítulo 5 são expostas as considerações finais do trabalho, envolvendo as conclusões, limitações do trabalho e sugestão de estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados os pressupostos teóricos que nortearam esta pesquisa. Inicialmente, são apresentados conceitos sobre matriz energética com a descrição das fontes de energia fóssil (2.1.1), hidrelétrica (2.1.2), solar (2.1.3), bioenergia (2.1.4) e eólica (2.1.5). Na sequência, apresenta-se uma conceituação sobre análise multivariada, com a descrição sobre a técnica de Análise de Agrupamento (2.2.1).

2.1 MATRIZ ENERGÉTICA

Para Howell (2021), o termo “matriz energética” pode ser definido como sendo a combinação de diversas fontes primárias de energia utilizadas para satisfazer as necessidades energéticas de uma região geográfica. De modo semelhante, Mantovani, Neumann e Edler (2017) definem a matriz energética como sendo uma quantidade de diferentes fontes de energia disponíveis em um território formada por recursos energéticos locais. Howell (2021) destaca que os combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carbono), bem como as inúmeras fontes renováveis (hidráulica, eólica, solar, geotérmica e biomassa) e nuclear são as fontes primárias de energia que costumam formar a matriz energética, sendo utilizadas para geração de energia elétrica, transporte, climatização de instalações residenciais ou comerciais, entre outros.

por meio da análise da matriz energética, é possível realizar o planejamento do setor energético e nesse processo, dentre todas as informações obtidas, a mais importante é a quantidade de recursos naturais que estão sendo utilizados, verificando se a utilização ocorre de forma racional, uma vez que essas informações são de extrema importância para o estabelecimento de políticas para promover qualidade de vida à população (MANTOVANI; NEUMANN; EDLER, 2017).

Conforme Goldemberg e Lucon (2008) e Salgado Junior et al. (2017), desde a década de 1940, o consumo energético vem crescendo em ritmo acelerado ocasionando mudanças na civilização humana, incluindo o aumento da população mundial, industrialização, concentração de população em centros urbanos e expansão de infraestrutura, entre outras. Ademais, Galbiatti-Silveira (2018) e Gehrke, Goretti e Avila (2022) destacam que estas mudanças levam ao aumento constante na demanda por recursos naturais ocasionando mudanças climáticas e, conseqüentemente, interferindo consideravelmente nas matrizes energéticas, um conjunto de fontes de energia disponíveis que atendem à demanda do país ou região.

De modo geral, Galbiatti-Silveira (2018) salienta que as fontes de energia mais utilizadas ainda são os combustíveis fósseis, as usinas nucleares, as grandes hidrelétricas, mesmo já demonstrado na literatura os impactos gerados no meio ambiente. Mas, Vivek et al. (2021) destaca que atualmente já está em desenvolvimento e uso outras fontes de energia renovável, tais como a energia solar, bioenergia e eólica, além de novos modelos otimizados, os quais se apresentam como promissores para o desenvolvimento sustentável. Ademais, as preocupações com as emissões de GEE juntamente com o aumento dos preços de energia levaram a melhorias da legislação facilitando cada vez mais o uso de fontes renováveis. Entre as fontes de energia renovável mais importantes estão a energia hidrelétrica, a energia eólica, a energia solar e a energia de biomassa. Mas, outras fontes de energia, como a energia geotérmica e a energia oceânica, também são classificadas como energias renováveis e produzem uma pequena parcela da eletricidade global (ZONG; CAO; LIU, 2018).

Em relação a geração de energia nos países do G7, segundo Zong, Cao e Liu (2018), todos os países do grupo têm sido muito ativos no desenvolvimento de energia renovável. No entanto, esses países têm se concentrado em duas ou mais fontes de energia por razões econômicas e climáticas. Os autores destacam que o Canadá se concentra na energia hidrelétrica mais do que em qualquer outra fonte de energia renovável enquanto o Reino Unido é responsável pela menor produção de eletricidade a partir de hidrelétrica. Ademais, a energia de biomassa também tem recebido atenção considerável nos últimos anos e, entre os países do G7, os Estados Unidos e, posteriormente, a Alemanha têm o maior investimento em energia desta fonte. Contudo, embora a quantidade de eletricidade produzida a partir de energia de biomassa nos EUA e na Alemanha seja significativa, o Brasil ainda é considerado o país líder no desenvolvimento da energia de biomassa, pois possui muitos recursos que podem ser utilizados como fonte confiável de energia.

O Brasil possui uma matriz energética altamente diversificada, além de apresentar uma grande diversidade de recursos renováveis. Seu grande território fortemente impactado pela alta radiação solar permite que o país se beneficie do potencial da energia solar (HOWELL, 2021). No entanto, barreiras políticas e altos custos tem limitado a exploração da energia solar. De acordo com os dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA, 2018), no caso da energia eólica, em 2018, o Brasil contava com 568 usinas instaladas, sendo complementada com outros 14 GW de capacidade renovável instalada e o Brasil ocupou o terceiro lugar em geração por meio de fontes renováveis (CORTÉS; ARANGO, 2017). Howell (2021) destaca ainda que 83% da matriz elétrica brasileira é oriunda de fontes renováveis e a

participação é liderada pela hidrelétrica (63,8%), seguida pela eólica (9,3%), biomassa e biogás (8,9%) e solar centralizada (1,4%).

As fontes de energia fóssil, hidrelétrica, solar, bioenergia e eólica analisadas neste estudo serão conceituadas brevemente.

2.1.1 Fósseis

Os recursos energéticos globais de combustíveis fósseis incluem petróleo, gás e carvão. Segundo Johnsson et al. (2019), aproximadamente 80% da energia consumida globalmente vem da queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural. Desde a revolução industrial, as sociedades industriais tornaram-se cada vez mais dependentes dos combustíveis fósseis e a lenha fornecia a maior parte da energia térmica. Porém, a fonte fóssil é não renovável e estima-se que, em escala global, ainda haverá carvão por alguns séculos, mas o gás natural e o petróleo serão escassos em apenas algumas décadas. Quando ocorre a queima para obter energia, o carvão, o gás natural ou o petróleo geram compostos gasosos que causam sérios danos na atmosfera (KELEŞ, 2011). Cerca de 75% das emissões de CO₂, gerando fortes impactos ambientais, tais como a acidificação das águas e o aquecimento global (NEVES; ROCHA, 2021).

Bildirici e Gökmenoğlu (2017) destacam que o setor de energia é o principal consumidor mundial de combustíveis fósseis e fonte de emissões de CO₂. Os autores destacam ainda que as emissões de GEE do setor de energia representam cerca de dois terços de todas as emissões antrópicas, e as emissões de CO₂ do setor aumentaram ao longo do último século para níveis cada vez mais altos. Embora as fontes de energia fóssil ainda sejam consideradas abundantes no mundo, grandes avanços feitos em algumas tecnologias-chave e a crescente demanda por proteção ambiental ecológica impulsionam substituição de carvão, petróleo e gás para novas fontes de energia.

2.1.2 Hidrelétrica

A tecnologia hidrelétrica amadurece cada vez mais em escala mundial e o desenvolvimento da mesma é controlado principalmente pelo uso dos recursos hídricos. Salienta-se ainda que as usinas hidrelétricas são planejadas, construídas e operadas levando em consideração os aspectos ambientais e sociais, representando um papel importante no abastecimento mundial de energia e, atualmente, existem mais de 105.000 MW de capacidade hidrelétrica no mundo (BARTLE, 2002; BILDIRICI; GÖKMENOĞLU, 2017).

Segundo Bildirici e Gökmenoğlu (2017), a energia gerada por hidrelétrica oferece vantagens importantes, entre as quais se destacam: a energia hidrelétrica usa a água como fonte geradora, mas não consome água enquanto gera energia; as instalações hidrelétricas produzem benefícios econômicos, sociais e ambientais; proporcionam controle de cheias, abastecimento de água potável, bem como água para irrigação e necessidades industriais, entre outros. Os autores mencionam ainda que, acima de tudo, o consumo de energia hidrelétrica não induz problemas ambientais em comparação com o consumo de energia fóssil.

2.1.3 Energia Solar

A energia produzida pelo sol é proveniente de elétrons que reagem com átomos de hidrogênio e, segundo a Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA, 2016), para cada metro quadrado de superfície da Terra diretamente exposta ao sol, são depositados aproximadamente 1368 Joules de energia por segundo. Parte desta energia é dissipada pela atmosfera antes de chegar na superfície terrestre. Desse modo, ainda é um desafio encontrar formas de armazenar este potencial energético para produzir calor ou energia elétrica.

De acordo com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB (2006), a radiação solar na superfície terrestre chega por radiação direta, sem sofrer nenhum tipo de desvio devido à reflexão e difusão, ou por radiação difusa, após passar por mudanças em sua direção ao passar pela atmosfera. Para aproveitamento da radiação solar, o uso das células fotovoltaicas possibilita converter as regiões ultravioletas e visíveis do espectro solar em energia elétrica.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2008), a descoberta sobre a conversão de fótons em energia ocorreu no ano de 1839 quando o cientista francês Edmond Becquerel observou que quando havia incidência de luz em um eletrodo mergulhado em uma solução eletrolítica, havia geração de energia elétrica. Porém, o primeiro protótipo de célula fotovoltaica foi desenvolvido apenas em 1954 e este protótipo era capaz de converter luz em eletricidade em quantidade suficiente para alimentar equipamentos elétricos. Desse modo, conforme o Observatório de Energias Renováveis para América Latina e Caribe (2013), entre 1950 e 1970, as pesquisas na área se tornaram mais intensas promovendo a pesquisa e o desenvolvimento da energia fotovoltaica como fonte energética e, a maior mudança foi produzida a partir dos anos 1970, em decorrência da crise energética internacional.

Atualmente, existem diversos tipos de células que convertem a energia do sol em energia elétrica, sendo que as mais utilizadas e comercializadas são as de silício monocristalino

e as de silício policristalino. O silício é um metal semicondutor que possui quatro elétrons que se ligam aos elétrons dos átomos vizinhos formando uma rede cristalina. Portanto, quando a célula é exposta a fótons, ocorre a geração de pares elétron-lacuna, que geram uma corrente elétrica através da junção e, se as duas extremidades da célula forem conectadas por um fio, haverá circulação de elétrons (CRESESB, 2006).

2.1.4 Bioenergia

A bioenergia, energia obtida através da biomassa, aparece com destaque nos cenários mais recentes para enfrentar as mudanças climáticas, além de desempenhar um papel significativo e crescente no sistema energético global, sendo responsável por 9,5% do suprimento total de energia primária e cerca de 70% da energia renovável em uso (IEA, 2019; REID; ALI; FIELD, 2020). Mais da metade dessa bioenergia envolve o uso tradicional de biomassa, principalmente em residências para cozinhar e aquecer, bem como em pequenas indústrias. A energia oriunda da biomassa pode contribuir significativamente para a redução das emissões de carbono, especialmente de setores difíceis de descarbonizar, como aviação, transporte pesado e manufatura (REID; ALI; FIELD, 2020).

Creutzig et al. (2015) destacam que os sistemas de bioenergia podem causar efeitos positivos e negativos e sua implantação carece de equilibrar uma série de objetivos ambientais, sociais e econômicos que nem sempre são totalmente compatíveis. As consequências da implementação da bioenergia dependem da tecnologia utilizada, da localização, escalas e ritmo de implementação, da categoria de terra utilizada (floresta, pastagem, terras marginais e terras de cultivo), dos sistemas de governança e dos modelos e práticas de negócios adotados, incluindo como eles se integram ou substituem o uso da terra existente.

Em relação as emissões de CO₂ pela bioenergia, Cherubini et al. (2011) afirmam que as emissões da combustão de biomassa são tradicionalmente consideradas neutras para o clima se o sistema de bioenergia for neutro em termos de fluxo de carbono, ou seja, o CO₂ liberado da combustão do biocombustível é aproximadamente igual à quantidade de CO₂ sequestrado na biomassa. Em comparação com fontes fósseis, salienta-se ainda que a queima de combustíveis fósseis libera carbono que está preso no solo há milhões de anos, enquanto a queima de biomassa emite carbono que faz parte do ciclo biogênico do carbono.

2.1.5 Eólica

Uma fonte importante da energia renovável é a energia eólica devido ao vasto potencial que o vento tem para oferecer, uma vez que o vento é usado convertendo a energia cinética do ar em movimento em eletricidade. Todos os países do mundo experimentam o vento e as turbinas eólicas podem ser instaladas no mar ou em terra (SADORSKY, 2021). O destaque da energia eólica entre as fontes renováveis de energia decorre de sua capacidade de gerar grandes quantidades de energia a custos competitivos (DIÓGENES et al., 2020).

Segundo a IRENA (2022), a quantidade de energia que pode ser obtida do vento depende do tamanho da turbina e do comprimento de suas pás e se a saída é proporcional às dimensões do rotor e ao cubo da velocidade do vento. Quando a velocidade do vento dobra, o potencial de energia eólica aumenta oito vezes. De acordo com os dados da IRENA (2022), a produção de eletricidade eólica em 2016 representou 6% da eletricidade gerada por fontes renováveis. Destaca-se que os resultados poderiam ser ainda maiores, pois muitas partes do mundo têm fortes velocidades de vento, mas os melhores locais para geração de energia eólica às vezes são remotos. Ainda, a energia eólica *offshore* (obtida através da força do vento em alto-mar) oferece um grande potencial de geração de energia, mas ainda é pouco utilizada.

A energia eólica oferece muitas vantagens, o que explica por que é uma das fontes de energia que mais cresce no mundo. Porém, para expandir ainda mais as capacidades da energia eólica e os benefícios da comunidade, pesquisas ainda estão sendo desenvolvidas para solucionar os desafios técnicos e socioeconômicos em apoio a um futuro de eletricidade descarbonizada (JAFARI; BOTTERUD; SAKTI, 2022).

2.2 ANÁLISE MULTIVARIADA

A estatística consiste em uma ferramenta de análise e avaliação de dados que pode ser aplicada em diversas áreas de conhecimento, apresentando estimativas e inferências para previsões e tomada de decisão. Entre as técnicas estatísticas, a análise multivariada abrange um conjunto de métodos que possibilita a caracterização de amostras em estudo por meio de uma multiplicidade de variáveis, analisando alterações e comportamentos em várias propriedades que caracterizam a amostra em análise (VICINI, 2005; 2018). Ou seja, a análise multivariada é uma área da estatística que lida com a análise simultânea de múltiplas variáveis em conjuntos de dados. Diferentemente da análise univariada, que se concentra em uma única variável, a análise multivariada examina as relações entre várias variáveis e busca identificar padrões, estruturas e associações complexas nos dados.

Hair et al. (2009) descrevem que a análise multivariada consiste em todas as técnicas estatísticas que analisam múltiplas medidas sob investigação simultaneamente. Existem várias técnicas de análise multivariada, cada uma com seus próprios objetivos e suposições subjacentes. Alguns dos métodos mais comuns são: Análise de Componentes Principais (PCA), Análise Fatorial, Análise de Agrupamento ou Análise de *Cluster*, Análise Discriminante e Análise de Regressão Multivariada.

A Análise de Componentes Principais (PCA) consiste em uma técnica usada para reduzir a dimensionalidade dos dados, buscando representar as informações contidas em um conjunto de variáveis por um conjunto menor de variáveis não correlacionadas, conhecidas como componentes principais. O PCA é útil para visualizar e resumir dados complexos (NOGAROTTO; LIMA; POZZA, 2020). Para além disso, semelhante ao PCA, a análise fatorial também busca identificar um conjunto menor de variáveis latentes que podem explicar a estrutura observada nos dados. No entanto, a análise fatorial é frequentemente usada quando há um interesse específico em interpretar as variáveis latentes em termos de algum fenômeno subjacente (KNEKTA; RUNYON; EDDY, 2019).

Além destas, a Análise de Agrupamento é uma técnica que procura identificar grupos de observações semelhantes e pode ser considerada uma análise multivariada, pois leva em conta várias variáveis simultaneamente para determinar a similaridade entre as observações (VICINI et al., 2018). Já a análise discriminante é uma técnica usada para encontrar combinação lineares de variáveis que podem discriminar entre grupos predefinidos. A análise discriminante é útil quando o objetivo é classificar novas observações em grupos conhecidos com base em um conjunto de variáveis (LUO et al., 2019). Por fim, a análise de regressão multivariada envolve a utilização de várias variáveis independentes para prever uma variável dependente. Uma análise de regressão multivariada leva em consideração a interação entre as variáveis independentes e sua relação com a variável dependente (GHOSAL et al., 2020).

Esses são apenas alguns exemplos de técnicas de análise multivariada. A escolha da técnica adequada depende do conjunto de dados, dos objetivos da análise e das suposições subjacentes. Neste estudo, para verificar a associação entre as variáveis investigadas empregou-se a técnica de Análise de Agrupamento ou Análise de *Cluster*, a qual é descrita a seguir.

2.2.1 Análise de Agrupamento

A Análise de Agrupamento, do inglês *Cluster Analysis*, é uma técnica da estatística multivariada de reconhecimento de padrões, ou seja, que visa agrupar um conjunto de dados

em subgrupos homogêneos, chamados de agrupamentos, podendo ser caracterizada pelo uso de medidas de semelhança ou dessemelhança entre as variáveis analisadas. O objetivo de uma Análise de Agrupamento geralmente é obter uma descrição simbólica do problema e a identificação de padrões. Os principais algoritmos de agrupamento são apresentados de acordo com as descrições simbólicas: hierarquias, árvores geradoras mínimas, partições e suas representações (DIDAY; SIMON, 1976).

Em outras palavras, a Análise de Agrupamento, é uma técnica estatística utilizada para identificar grupos de objetos ou observações semelhantes em um conjunto de dados. O objetivo é agrupar elementos que sejam semelhantes entre si e diferentes dos elementos de outros grupos, podendo ser aplicada em uma ampla variedade de problemas e domínios, auxiliando na compreensão dos dados e na tomada de decisões controladas. Ademais, a Análise de Agrupamento é amplamente aplicada em diversos campos, como ciências sociais, biologia, marketing, reconhecimento de padrões, entre outros. Ela pode ser utilizada para descobrir estruturas ocultas nos dados, identificar segmentos de mercado, agrupar genes com expressões semelhantes, entre outras aplicações.

Segundo Vicini et al. (2018), a Análise de Agrupamento permite agregar variáveis considerando suas características comuns sem perder as informações primárias dos dados, formando grupos homogêneos intragrupo e heterogêneos intergrupos. Para isso, torna-se necessário elaborar o problema de aglomeração e as variáveis que serão base para o agrupamento. Os autores destacam ainda que, uma vez que a técnica utiliza métodos simples baseados em cálculos de distância, a mesma não requer o conhecimento estatístico prévio para aplicação e, salientam que a técnica não faz distinção entre variáveis dependentes e independentes, bem como não estuda a relação de causa e efeito.

Existem diferentes métodos e algoritmos de Análise de Agrupamento disponíveis, cada um com suas próprias características e suposições subjacentes. Alguns dos algoritmos mais comumente usados incluem: K-means, hierárquico, DBSCAN, Mistura de Gaussianas e *Spectral Clustering*. O K-means é um dos algoritmos mais populares de Análise de Agrupamento, o qual atribui objetos a grupos de forma iterativa, minimizando a soma dos quadrados das distâncias dos objetos para os centroides dos grupos (HARTIGAN; WONG, 1979). Por conseguinte, Valli (2022) descreve que o método hierárquico permite construir uma árvore hierárquica de agrupamentos, onde os objetos são combinados em grupos sucessivos, podendo ser aglomerativo (começando com objetos individuais e combinando-os em grupos maiores) ou divisivo (começando com todos os objetos em um único grupo e dividindo-os em grupos menores).

Ademais, o DBSCAN é um algoritmo de agrupamento baseado em densidade que permite identificar regiões densas de pontos em meio a regiões de menor densidade. Esse método é capaz de encontrar grupos de formas arbitrárias e é menos sensível a valores atípicos do que o K-means (HAHSLER; PIEKENBROCK; DORAN, 2019). De outro lado, Mistura de Gaussianas é um modelo probabilístico que assume que os dados foram gerados por uma combinação de distribuições gaussianas, sendo útil para encontrar grupos que possuem uma distribuição semelhante. E, por fim, o *Spectral Clustering* consiste em um método que utiliza técnicas de álgebra linear para realizar uma Análise de Agrupamento mapeando os dados para um espaço de baixa dimensão e, em seguida, realiza a divisão em grupos (VON LUXBURG, 2007). Destaca-se que após realizar uma Análise de Agrupamento, é comum realizar uma avaliação dos resultados obtidos, o que pode incluir métricas de avaliação interna, como a Coeficiente de Silhueta sugerido por Scaldelai, Santos e Matioli (2022), que mede a qualidade dos agrupamentos, ou avaliações externas, como a validação externa por meio de rótulos conhecidos.

Conforme Malhotra (2001), para a realização da Análise de Agrupamento deve-se partir da formulação do problema, seguido pelo tratamento de dados e posterior escolha de um coeficiente de semelhança. Após, executa-se a escolha do processo de aglomeração e, por fim, faz-se a análise e interpretação dos resultados obtidos. Vicini et al. (2018) complementam que é recomendado a padronização dos dados para evitar influências no resultado final do estudo por variáveis com unidades de medida muito diferentes, além de reduzir as diferenças entre os grupos que descrevem os conglomerados. Ao se realizar a Análise de Agrupamento é importante realizar a padronização das variáveis, evitando-se o efeito de escalas de medidas entre uma variável e outra. Dada uma matriz de dados com p variáveis ($j = 1, 2, 3, \dots, p$) e n objetos ($i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$), onde o valor do j -ésima variável e i -ésimo objeto serão denotados por X_{ij} , sendo X uma variável com distribuição normal e o valor padronizado será representado por Z_{ij} . Salienta-se ainda que as variáveis padronizadas possuem média 0 e a variância constante 1, um caso particular da distribuição normal muito usado na prática (VICINI, 2005; VICINI et al., 2018) e representado pela função apresentada na Equação 1.

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (1)$$

Sendo cada i fixo, onde $i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$ e $j = 1, 2, 3, \dots, p$.

Entre as medidas de similaridade e dissimilaridade que podem ser empregadas na Análise de Agrupamento está o coeficiente de distância euclidiana, a qual corresponde a distância entre dois pontos do plano (VICINI et al., 2018). Malhotra (2001) recomenda que quando se usa quadrados das distâncias euclidianas, é fundamental utilizar os métodos de Ward e dos centróides. O método de Ward, também conhecido como método da mínima variância, consiste em um procedimento de encadeamento hierárquico de ligação, combinando agrupamentos com um grupo de observações. Desse modo, minimiza-se o quadrado da distância euclidiana e as médias dos *clusters* (HAIR et al., 2009).

Para a análise dos resultados da Análise de Agrupamento são gerados dendrogramas. Um dendrograma é uma representação gráfica de uma árvore hierárquica resultante de uma análise de agrupamento usado para visualizar a estrutura de agrupamento dos dados, mostrando como as observações são agrupadas e como os grupos se subdividem em subgrupos. O eixo vertical de um dendrograma representa a medida de dissimilaridade entre as observações ou grupos e, quanto mais baixo um ponto ou grupo está no eixo vertical, mais similar ele é em relação aos outros pontos ou grupos. Ainda, os pontos ou grupos são conectados por linhas horizontais ou verticais, e o comprimento dessas linhas indica a dissimilaridade entre os pontos ou grupos.

Ademais, a estrutura de um dendrograma é formada pelos chamados "nós". Cada nó representa uma fusão de pontos ou grupos em um estágio específico da análise hierárquica. Os nós mais baixos no dendrograma representam como observações individuais ou grupos iniciais, enquanto os nós mais altos representam grupos maiores que são formados à medida que as observações são agrupadas. Destaca-se que um dendrograma pode ser interpretado de diferentes modos, dependendo do tipo de Análise de Agrupamento realizado. Se for uma análise para aglomerativa, começando com observações individuais e combinando-as em grupos maiores, a interpretação do dendrograma começa pelos nós mais baixos e segue para os nós mais altos. Se for uma análise para divisão, começando com um grupo único e dividindo-o em grupos menores, uma interpretação do dendrograma é realizada de cima para baixo (MOITA NETO; MOITA, 1998).

Portanto, o dendrograma consiste em uma ferramenta valiosa para visualizar e interpretar a estrutura de agrupamento dos dados. Ele permite identificar quais observações estão mais próximas umas das outras, quais grupos são semelhantes e como os grupos se subdividem. Além disso, o dendrograma pode ser usado para determinar o número adequado de grupos a serem considerados, identificando onde ocorrem as maiores diferenças na dissimilaridade entre os grupos. De forma complementar da análise de um dendrograma, pode-

se usar as linhas de fenon, um método utilizado para verificar o número ideal de *clusters* em uma análise de agrupamento hierárquico, o qual se baseia na observação das diferenças de altura nas linhas de fusão no dendrograma. As linhas de fenon são linhas horizontais que são orientadas em um determinado nível do dendrograma, com o objetivo de encontrar uma solução ótima em termos de número de clusters (OLIVEIRA; RODRIGUES, 2019). Assim, para determinar o número ideal de clusters, pode-se traçar várias linhas de fenon em diferentes níveis do dendrograma e avaliar as mudanças na estrutura de agrupamento entre os cortes. Normalmente, se escolhe o nível em que as diferenças de altura são mais pronunciadas e as linhas de fenon cruzam várias linhas de fusão.

Na próxima seção serão detalhados os procedimentos metodológicos empregados para cumprir os objetivos propostos nesta pesquisa.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesta seção apresentam-se os procedimentos metodológicos aplicados no desenvolvimento desta pesquisa. Primeiramente, é definida a caracterização da pesquisa, na sequência, apresenta-se a descrição dos dados analisados e, por fim, apresenta-se a técnica de análise de dados.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A metodologia proposta para esta pesquisa é baseada em uma abordagem quantitativa, por meio de análise multivariada. Segundo Freitas Mussi et al. (2019), a pesquisa quantitativa possibilita a identificação de indicadores e tendências por meio de dados representativos, cujo interesse é direcionado para o coletivo analisando em detalhes o que pode ser predominante como característica de um grupo de variáveis ou indivíduos. De modo semelhante, Creswell (2012) descreve que a pesquisa quantitativa consiste em uma compilação de dados numéricos em larga escala contendo a descrição do problema de pesquisa pela análise de tendências visualizáveis a partir dos dados da pesquisa ou a partir da explicação do problema de pesquisa estabelecido previamente por meio da discussão da relação entre as variáveis envolvidas no estudo.

Na pesquisa quantitativa, a análise estatística multivariada corresponde ao ramo da estatística que abrange a análise simultânea das amostras e das variáveis, permitindo extrair resultados que a análise univariada não é capaz de mostrar. Entre as possibilidades de aplicação da técnica destaca-se a capacidade de reduzir a representação dimensional de dados, arranjando-os em estrutura que facilita a visualização de todo o conjunto dos resultados, com a manutenção das informações relevantes e eliminação das irrelevantes e/ou redundantes (MAIA; SILVA; LIBÂNIO, 2019).

3.2 DADOS

A base de dados foi composta pelos países do G7 (Estados Unidos, a Alemanha, a França, o Canadá, a Itália, o Japão e o Reino Unido) e Brasil. As variáveis selecionadas representam a geração de energia (por fonte fóssil, hidrelétrica, solar, bioenergia e eólica), intensidade anual das emissões de CO₂ equivalente, demanda per capita de energia anual, crescimento populacional, Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e desempenho econômico.

Os dados de geração de cada matriz energética anual (TWh), intensidade anual das emissões de CO₂ equivalente por kWh (gCO₂e por kWh, nos resultados chamados de g_CO₂) e a demanda per capita de energia anual (MWh) foram extraídos da plataforma da *Ember Climate* (<https://ember-climate.org/data/data-tools/data-explorer/>). A variável de crescimento populacional selecionada para o estudo foi densidade populacional (pessoas por quilômetro quadrado de área terrestre), a qual foi retirada do *The World Bank Indicators* (THE WORLD BANK, 2022).

Os dados de Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e os dados econômicos relacionados ao Produto Interno Bruto - PIB per capita (€) - foram obtidos da base de dados *Country Economy* (<https://pt.countryeconomy.com>). Salienta-se que os dados analisados abrangem o período de 2012 a 2021 com coletas anuais.

3.3 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

Os dados obtidos das plataformas foram organizados por país e ano (2012 a 2021) em uma planilha eletrônica. Após a validação dos dados, utilizou-se o software *Statistica 10.0* para a análise dos resultados da pesquisa. Inicialmente, realizou a análise descritiva e a padronização das variáveis, uma vez que as variáveis possuíam unidades de medidas diferentes.

O próximo passo foi realizar a análise de agrupamento para encontrar os agrupamentos das variáveis com base na similaridade entre elas. O método de aglomeração utilizado foi a hierárquica de Ward e a métrica foi a distância euclidiana, com a pretensão de encontrar comportamentos similares entre as variáveis e os países. Além disso, adotou-se como limite de significância a linha de feilon.

Os dados foram analisados para identificar a relação entre os países e entre variáveis. As análises foram divididas em 5 categorias diferentes, que são: análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda e g_CO₂; análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda e crescimento populacional; análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda e IDH; análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda e crescimento econômico e uma análise da relação entre todas as variáveis juntas.

Na próxima seção apresenta-se os resultados da análise dos dados e a discussão dos mesmos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, apresentam-se os resultados procedentes da análise dos dados. Em primeiro momento, apresenta-se a descrição da amostra e em seguida, são apresentados e discutidos os resultados da análise entre países e, posteriormente, entre variáveis.

4.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA

A estatística descritiva das variáveis com os valores de média, mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação são apresentadas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Estatística descritiva das variáveis com os valores de média, mínimo, máximo, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV)

Variável	Média	Mínimo	Máximo	DP	CV (%)
Bioenergia (TWh)	31,31	5,30	63,99	19,11	61,03
Eólica (TWh)	61,93	4,84	379,77	79,55	128,45
Fóssil (TWh)	545,42	35,68	2779,02	826,31	151,50
Hidrelétrica (TWh)	155,68	4,7	411,19	151,74	97,47
Solar (TWh)	25,73	0,01	163,70	31,08	120,79
Demanda (MWh)	1009,17	310,27	4243,29	1207,60	119,66
g_CO ₂ (gCO ₂ por kWh)	331110,90	448,03	801650,00	177827,55	53,71
Densidade Populacional	155,54	3,9	350,10	120,57	77,52
IDH	0,89	0,74	0,95	0,06	6,74
PIB per capita (€)	33676,43	5994,00	58492,00	11834,84	35,14

g_CO₂ = intensidade anual das emissões de CO₂ equivalente por kWh; IDH = Índice de Desenvolvimento Humano; PIB = Produto Interno Bruto.

Fonte: Autora (2023).

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 1, verificou-se que a menor média de geração de energia corresponde a fonte de energia solar (25,73), a qual possui um coeficiente de variação de 120,79% enquanto a maior média corresponde a fonte fóssil (545,42) a qual possui um coeficiente de variação de 151,50%. É possível afirmar que as médias não são representativas porque possivelmente os dados tem tendência, principalmente por se tratar de fonte renovável, pois cresceu e vem crescendo muito nos últimos anos e o CV elevado confirma isso, o que está relacionado ao fato de que os países produzem mais energia por uma determinada fonte de energia (fóssil). Ademais, cabe destacar que o sinal negativo nos dados relacionados a população representa um decréscimo populacional.

4.2 RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS

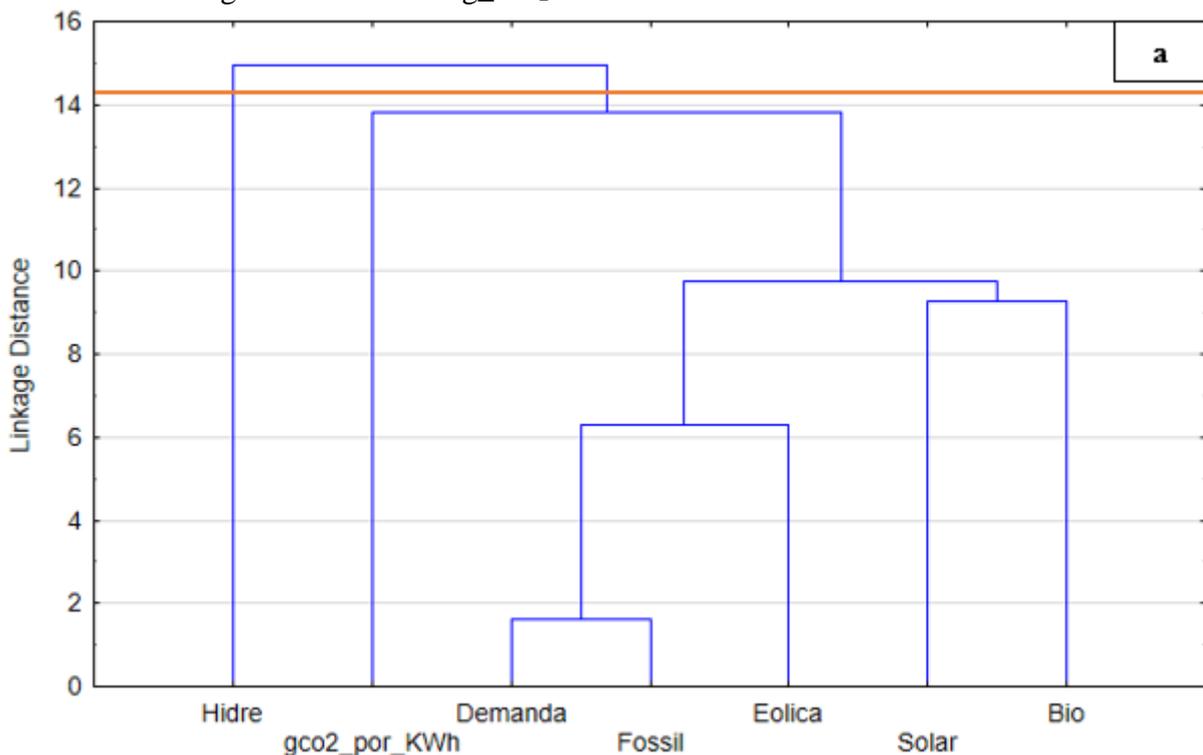
Ao realizar a análise de agrupamento, o primeiro procedimento consistiu em analisar o dendrograma que ilustra as aglomerações que foram feitas em níveis sucessivos, permitindo fazer uma primeira avaliação visual de quantos grupos (*clusters*) foram formados pelas variáveis em cada categoria. Para isso, serão apresentados em sequência um dendrograma com os dados dos países do G7 e Brasil e outro dendrograma apenas com os dados dos países do G7, na intenção de verificar como o comportamento com e sem as informações do Brasil. Cabe salientar que, no dendrograma, o eixo x apresenta as observações e no eixo y as distâncias ou medida de similaridade.

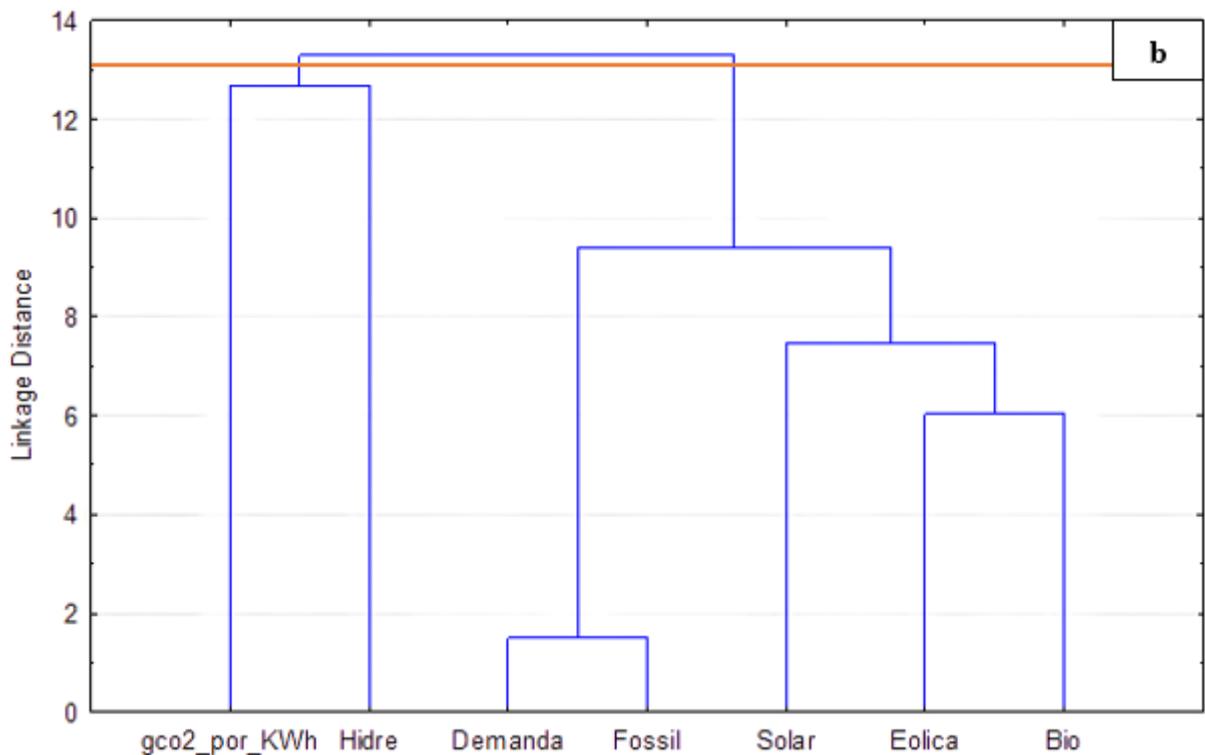
Conforme mencionado nos aspectos metodológicos, as análises foram divididas em 5 categorias diferentes. A seguir apresenta-se a categoria que abrange a análise da relação geração por matrizes energéticas, demanda e g_CO₂.

4.2.1 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda e g_CO₂

Na Figura 1 apresenta-se o dendrograma para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e emissões de g_CO₂, onde a Figura 1a corresponde a análise incluindo os dados dos países do G7 e Brasil e Figura 1b apenas com os dados dos países do G7.

Figura 1 - Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e emissões em g_CO₂.





Hidre = Hidrelétrica; Bio = Biomassa.

Fonte: Autora (2023)

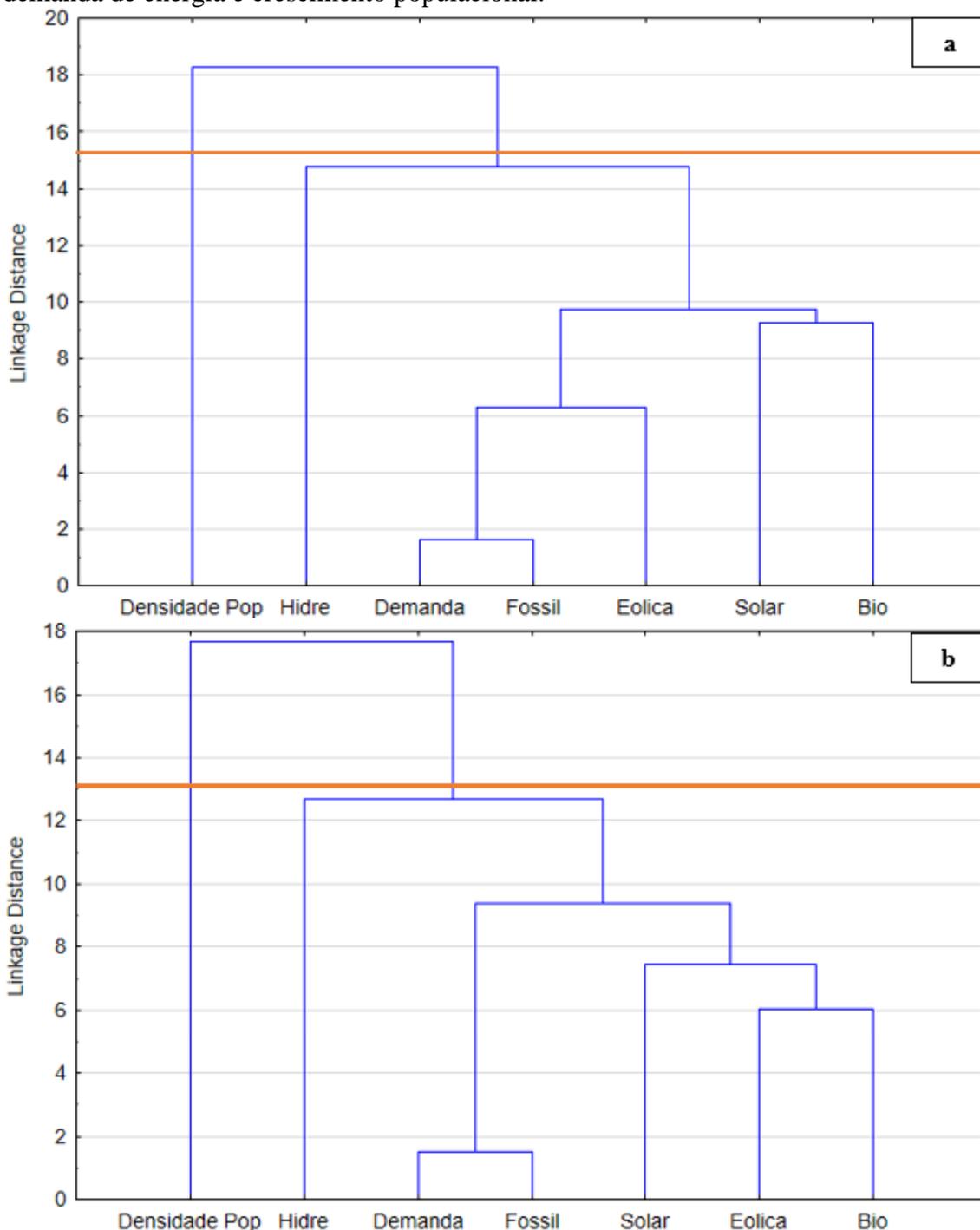
Ao analisar a Figura 1a gerada com os dados dos países do G7 e Brasil, observa-se que a energia gerada por hidrelétrica possui ligação com as emissões de g_CO_2 , uma vez que a hidrelétrica possui altura muito próxima das emissões de g_CO_2 apresentando apenas uma unidade de distância. A demanda de energia está diretamente relacionada com a fonte fóssil, provavelmente por ser a fonte de energia que responde mais rapidamente a demanda, e são as variáveis que apresentam maior similaridade, pois a altura de ligação é a mais baixa em ambos os cenários, com e sem a presença do Brasil, provavelmente isso ocorre por estas duas variáveis apresentarem as maiores médias. A energia solar possui mais semelhança com a bioenergia, ficando no ramo das energias renováveis.

Ao analisar a Figura 1b que não inclui os dados do Brasil, verifica-se que a intensidade das emissões de CO_2 está diretamente relacionada com a energia gerada por hidrelétrica. Também se percebe que, sem os dados do Brasil, ocorre uma inversão a energia eólica passa a ter mais semelhança com a bioenergia. Já a demanda de energia continua relacionada com a fonte fóssil.

4.2.2 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda e crescimento populacional

Na Figura 2 apresenta-se o dendrograma para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento populacional, sendo que a Figura 2a inclui os dados dos países do G7 e Brasil e a Figura 2b apenas com os dados dos países do G7.

Figura 2 - Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento populacional.



Hidre = Hidrelétrica; Bio = Biomassa.

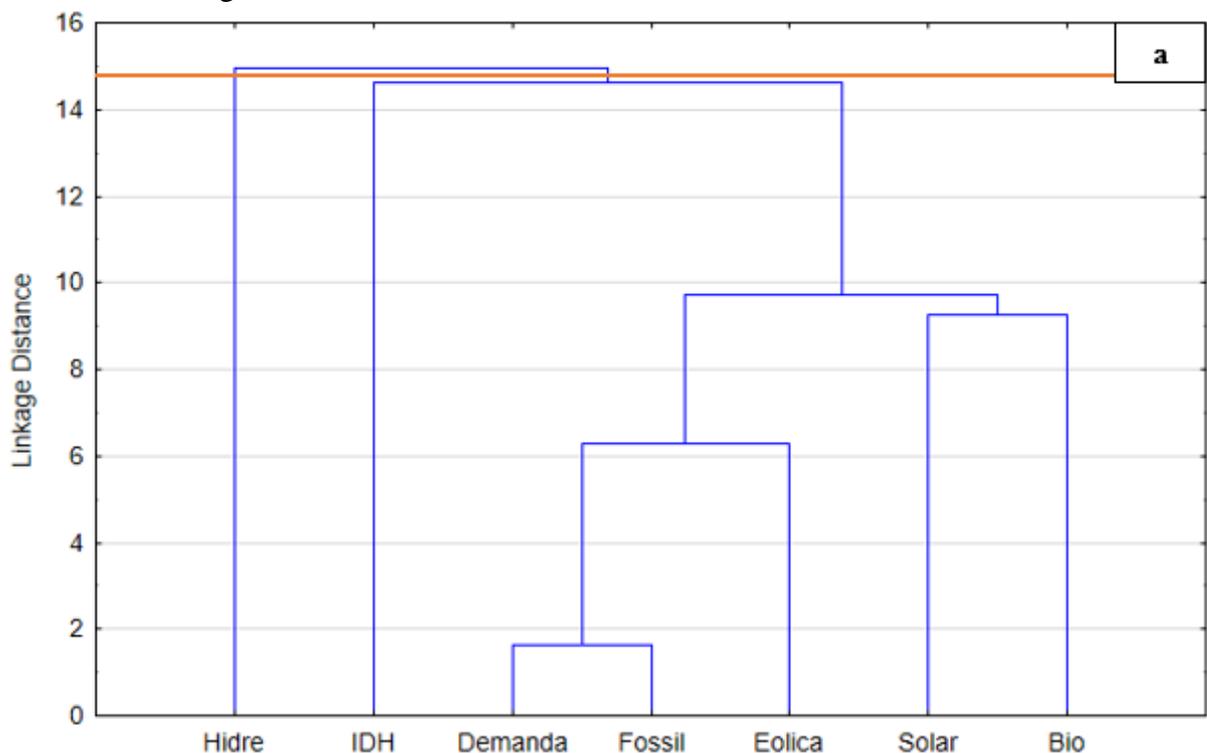
Fonte: Autora (2023)

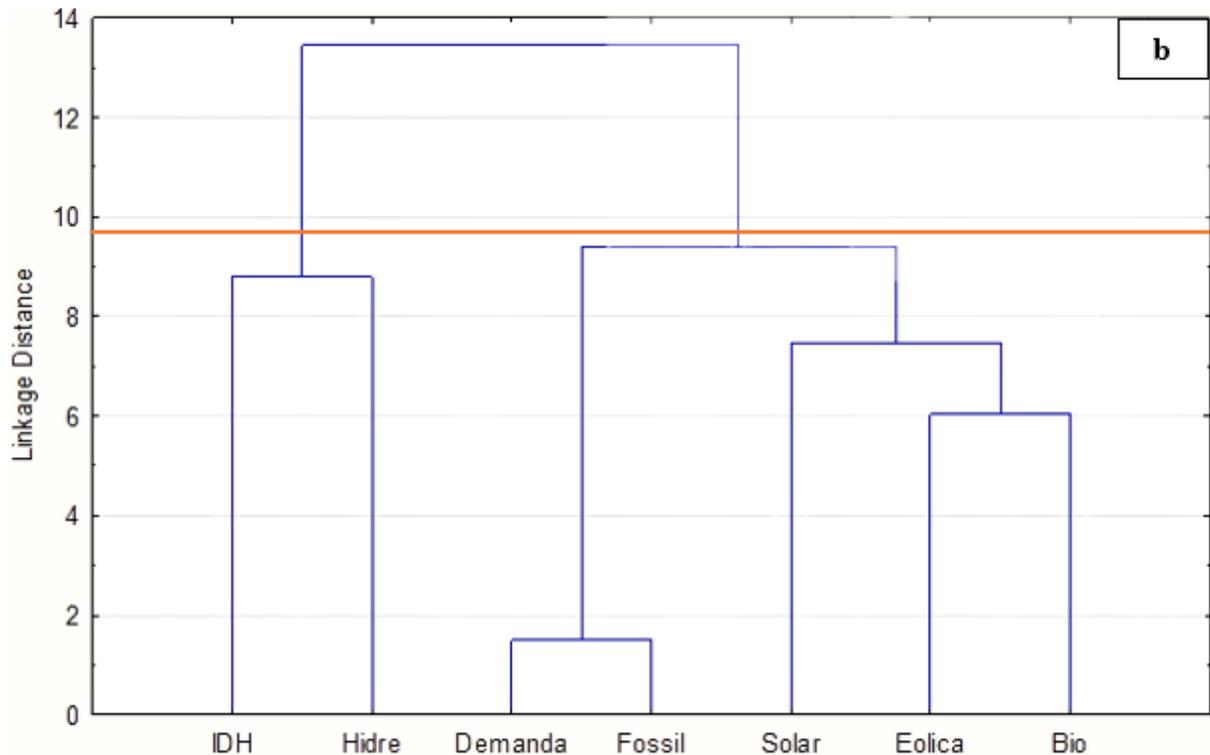
A partir da Figura 2a, verifica-se que a densidade populacional está bem mais alta, mostrando uma menor similaridade entre as variáveis. Ainda em relação ao dendrograma da Figura 2a, é possível observar que a demanda de energia está relacionada com a energia oriunda de combustíveis fósseis e a energia solar possui semelhança com a bioenergia. Quando se analisa a Figura 2b, sem os dados do Brasil, verifica-se que a demanda de energia continua relacionada com a fonte fóssil e ocorre uma inversão onde a energia eólica passa a ter mais semelhança com a bioenergia, análogo ao que ocorre na análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda e g_{CO_2} .

4.2.3 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda e IDH

Na Figura 3 apresenta-se o dendrograma para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e IDH, sendo que a Figura 3a inclui os dados dos países do G7 e Brasil e a Figura 3b apenas com os dados dos países do G7.

Figura 3 - Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e IDH.





Hidre = Hidrelétrica; Bio = Biomassa.

Fonte: Autora (2023)

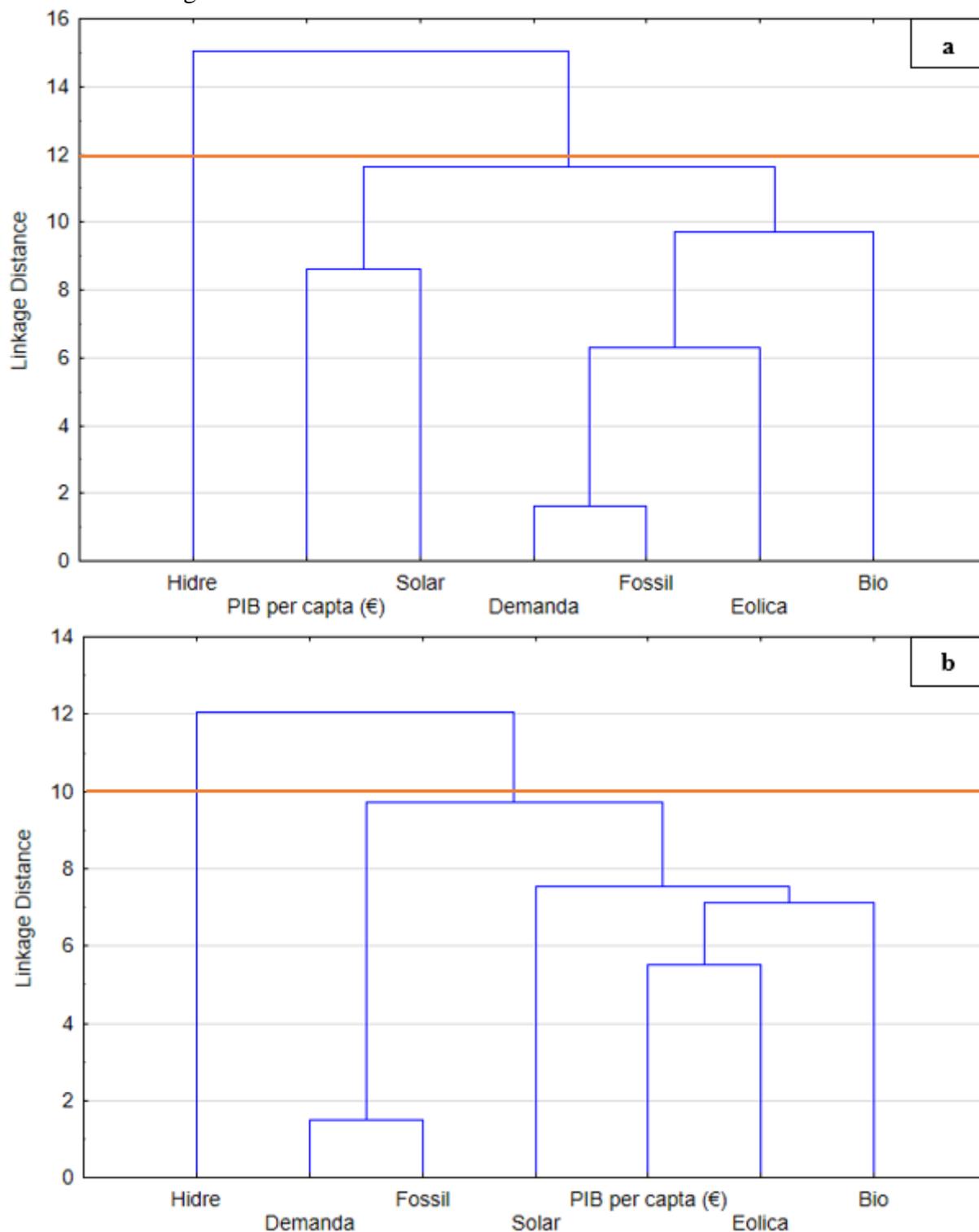
A partir da Figura 3a, observa-se que existe uma relação entre o IDH e a geração de energia por Hidrelétrica, uma vez que a hidrelétrica possui altura muito próxima do IDH. Além disso, a demanda de energia está relacionada com a energia oriunda de combustíveis fósseis e a energia solar possui semelhança com a bioenergia, análogo aos resultados das categorias anteriores.

Ao analisar a Figura 3b, verifica-se que continua existindo uma relação entre o IDH e a geração de energia por Hidrelétrica, bem como a demanda de energia continua relacionada com a energia oriunda de combustíveis fósseis. Contudo, quando a análise ocorre sem o Brasil, ocorre uma inversão a energia eólica passa a ter mais semelhança com a bioenergia.

4.2.4 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda e crescimento econômico

Na Figura 4 apresenta-se o dendrograma para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento econômico, sendo que a Figura 4a inclui os dados dos países do G7 e Brasil e a Figura 4b apenas com os dados dos países do G7.

Figura 4 - Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento econômico.



Hidro = Hidrelétrica; Bio = Biomassa.

Fonte: Autora (2023)

Ao analisar as Figuras 4a e 4b, verifica-se que a hidrelétrica está bem mais alta, mas, devido à distância, pode-se dizer que a quantidade de energia gerada por hidrelétrica apresenta

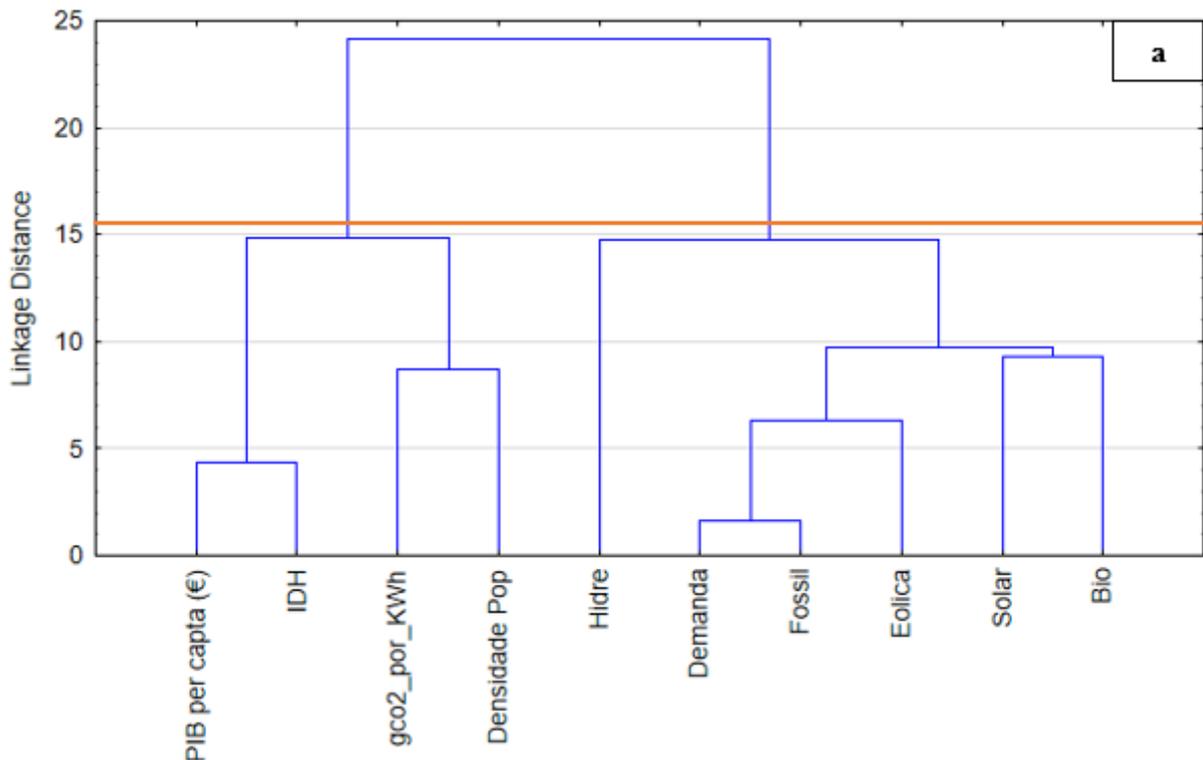
dissimilaridade em relação as demais variáveis. Ademais, ao analisar o dendrograma com os dados dos países do G7 e Brasil (Figura 4a), observa-se que os dados econômicos de PIB per capita (€) está relacionado com a energia solar e a demanda de energia está relacionada com a geração de energia fóssil.

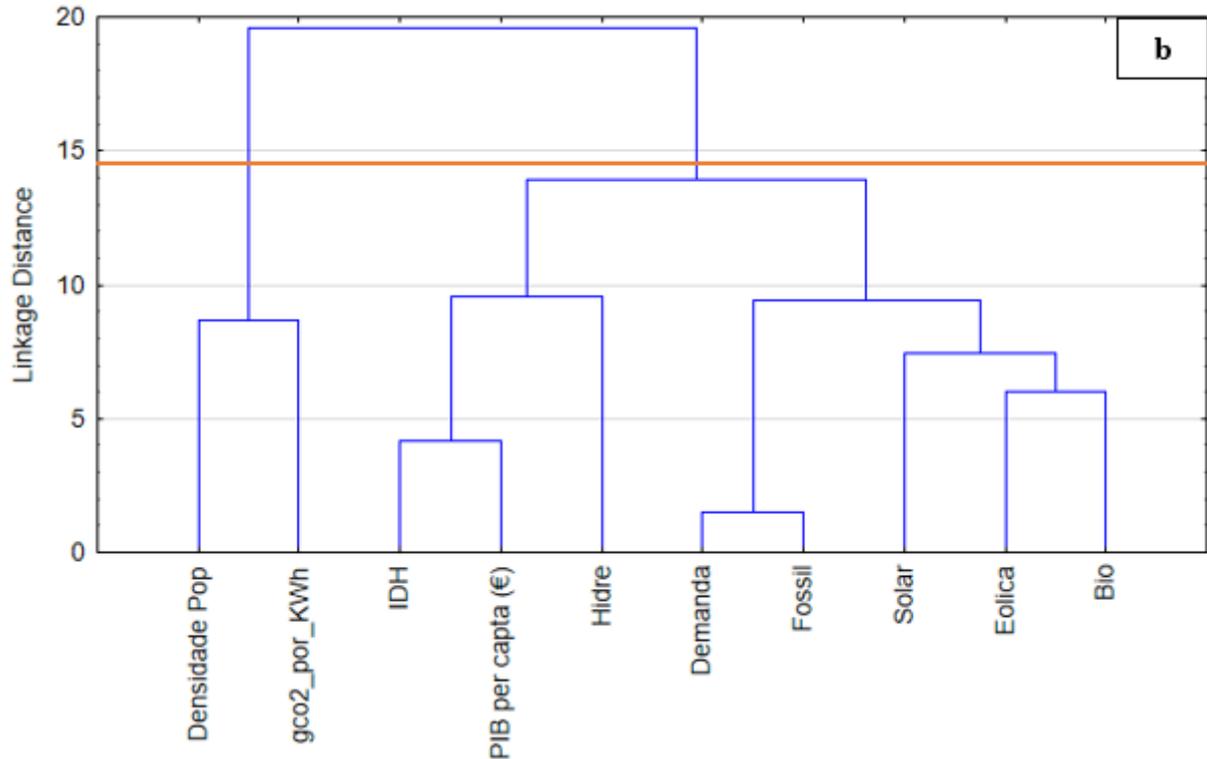
Em relação ao dendrograma sem os dados do Brasil (Figura 4b) observa-se que existe uma relação entre a demanda de energia e a fonte fóssil, enquanto o PIB per capita (€) está relacionado com a geração de energia eólica, seguido pela bioenergia e, posteriormente pela energia solar.

4.2.5 Análise da relação entre todas as variáveis

Por fim, realizou-se a análise do dendrograma para todas as variáveis, o qual é mostrado na Figura 5, sendo que a Figura 5a inclui os dados dos países do G7 e Brasil e a Figura 5b apenas com os dados dos países do G7.

Figura 5 - Dendrograma com os dados dos países para todas as variáveis.





Hidre = Hidrelétrica; Bio = Biomassa.

Fonte: Autora (2023)

Ao analisar os dendrogramas mostrados nas Figuras 5a (com os dados dos países do G7 e Brasil) e 5b (sem dados do Brasil), constata-se que o número de *clusters* que expressa a mínima heterogeneidade dentro dos grupos de variáveis é igual a 5 em ambos. Ademais, por meio da Figura 5a os *clusters* indicam similaridade entre PIB per capita (€) e IDH, densidade populacional e emissões em g_CO₂, demanda de energia e energia gerada por fonte fóssil, além da energia solar e bioenergia. Já por meio da Figura 5b, apesar de os *clusters* também indicarem similaridade entre densidade populacional e emissões em g_CO₂, PIB per capita (€) e IDH, e entre demanda de energia e energia gerada por fonte fóssil, surge uma relação da energia eólica e bioenergia.

Analisando a relação entre as variáveis, os resultados demonstraram que existe uma relação das variáveis de intensidade anual das emissões de CO₂, crescimento populacional, IDH e crescimento econômico com a geração de energia por hidrelétricas, o que pode ser justificado pelo fato de a energia por hidrelétrica ainda ser a maior fonte renovável de eletricidade nos países do G7 (IEA, 2021). Além disso, foi predominante nos resultados a relação entre a demanda per capita de energia anual e a geração por fonte fóssil. Observou-se semelhanças entre a energia solar, bioenergia e energia eólica, o que pode estar relacionada aos valores semelhantes da geração de energia por estas fontes renováveis.

A seguir apresenta os resultados da análise da relação entre países.

4.3 RELAÇÃO ENTRE CASOS

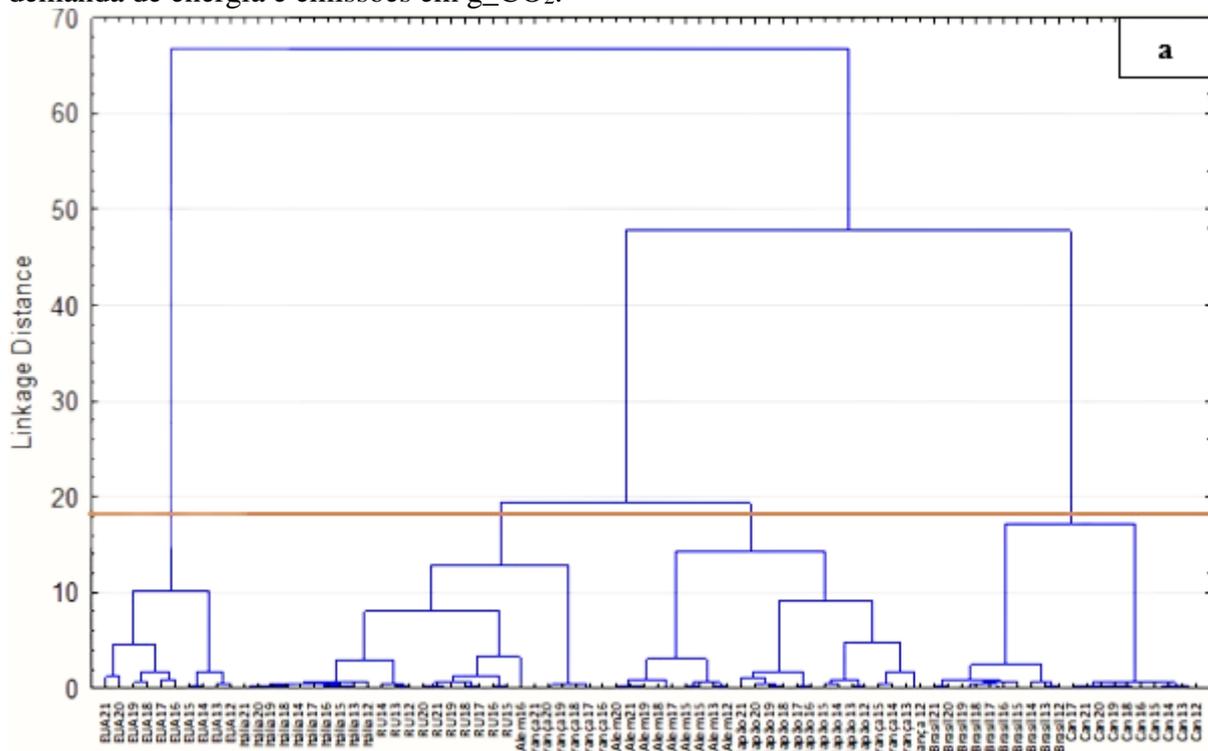
Nesta seção serão apresentados os resultados da análise dos dendrogramas que ilustram as fusões ou divisões que foram feitas em níveis sucessivos para os casos (países). Do mesmo modo que na seção anterior, no eixo x são apresentadas as observações e no eixo y tem-se as distâncias, que é a medida de dissimilaridade. Ressalta-se que, conforme mencionado nos aspectos metodológicos, para a análise da relação entre países aplicou-se a regra de amalgamação utilizada foi ligação simples com distância euclidiana, e o corte é mostrado com uma linha na cor laranja.

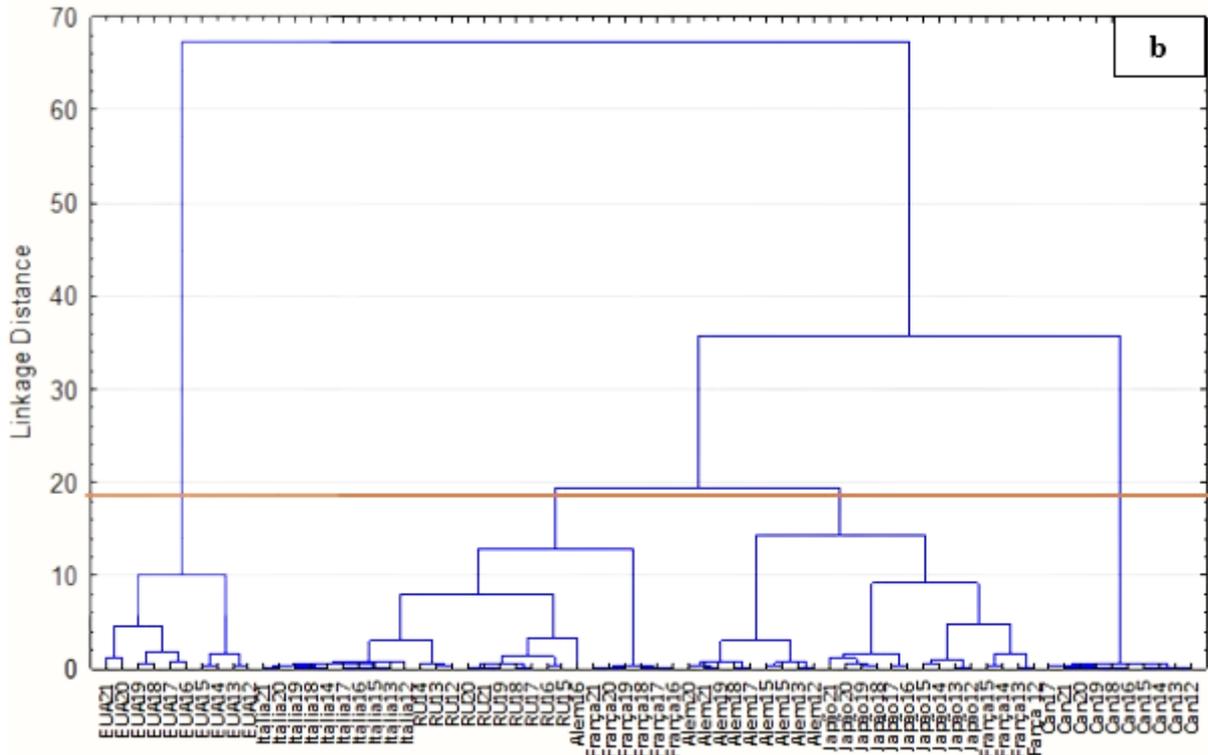
Sendo assim, a seguir apresenta-se a categoria de análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda de energia e emissões em g_CO₂.

4.3.1 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda de energia e emissões em g_CO₂

Na Figura 6 apresenta-se o dendrograma para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e emissões em g_CO₂, sendo que a Figura 6a inclui os dados dos países do G7 e Brasil e a Figura 6b apenas com os dados dos países do G7.

Figura 6 – Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e emissões em g_CO₂.





Fonte: Autora (2023)

O dendrograma gerado com os dados dos países do G7 e Brasil (Figura 6a) mostra que o número de agrupamentos de países para os componentes para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e emissões em g_CO_2 são de 4 grupos. Após esse número de grupos acontece um salto no dendrograma, os mesmos indicam que já se alcançou o número final de *clusters*. Além disso, cabe destacar que o Brasil e Canadá formam o mesmo *cluster*, indicando similaridades entre ambos os países. Analisando os dados brutos, percebe-se que ambos os países possuem os menores valores de emissões em g_CO_2 .

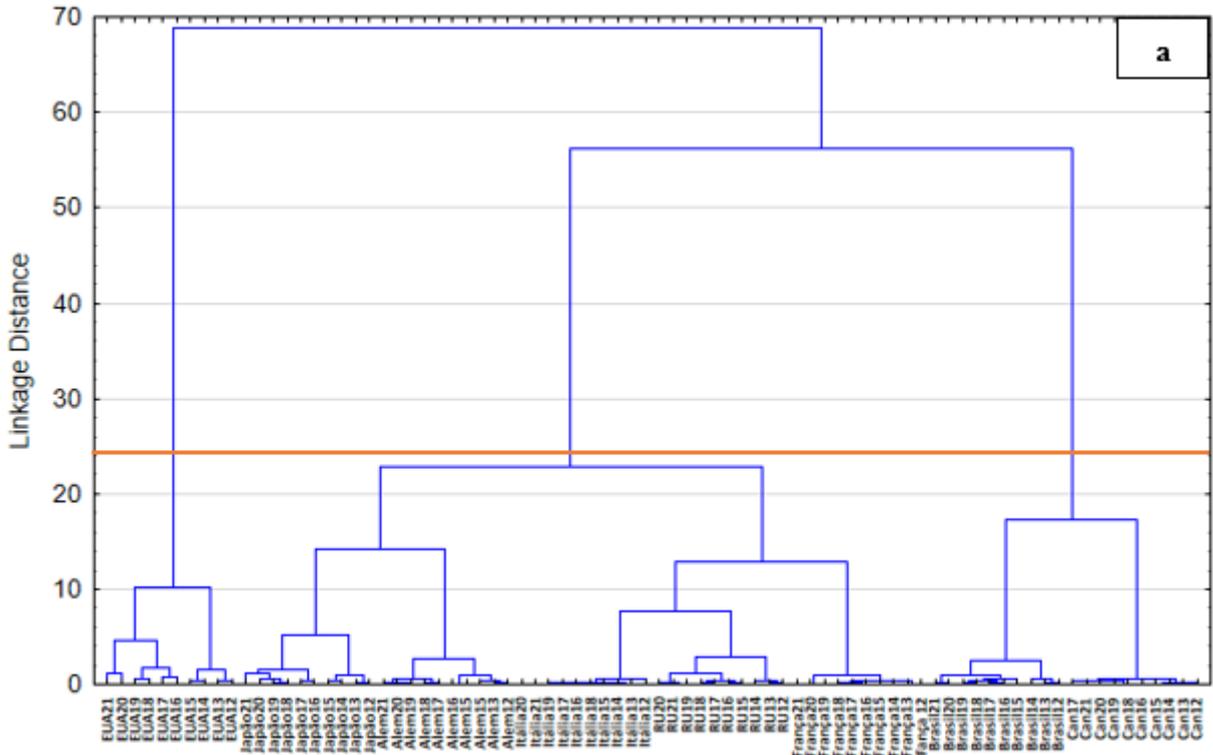
De outro lado, ao analisar o dendrograma gerado sem os dados do Brasil (Figura 6b) verifica-se que o número de agrupamentos de países para os componentes para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e emissões em g_CO_2 permanecem em 4 grupos, porém o Canadá passa a formar um *cluster* sozinho e o restante dos *clusters* não sofreram alterações. Observa-se ainda que, em ambas as análises os dados da França no período de 2012 a 2015 formaram um *cluster* juntamente com Japão (em todo o período estudado) e Alemanha (exceto o ano de 2016), indicando similaridades com os países deste grupo no período.

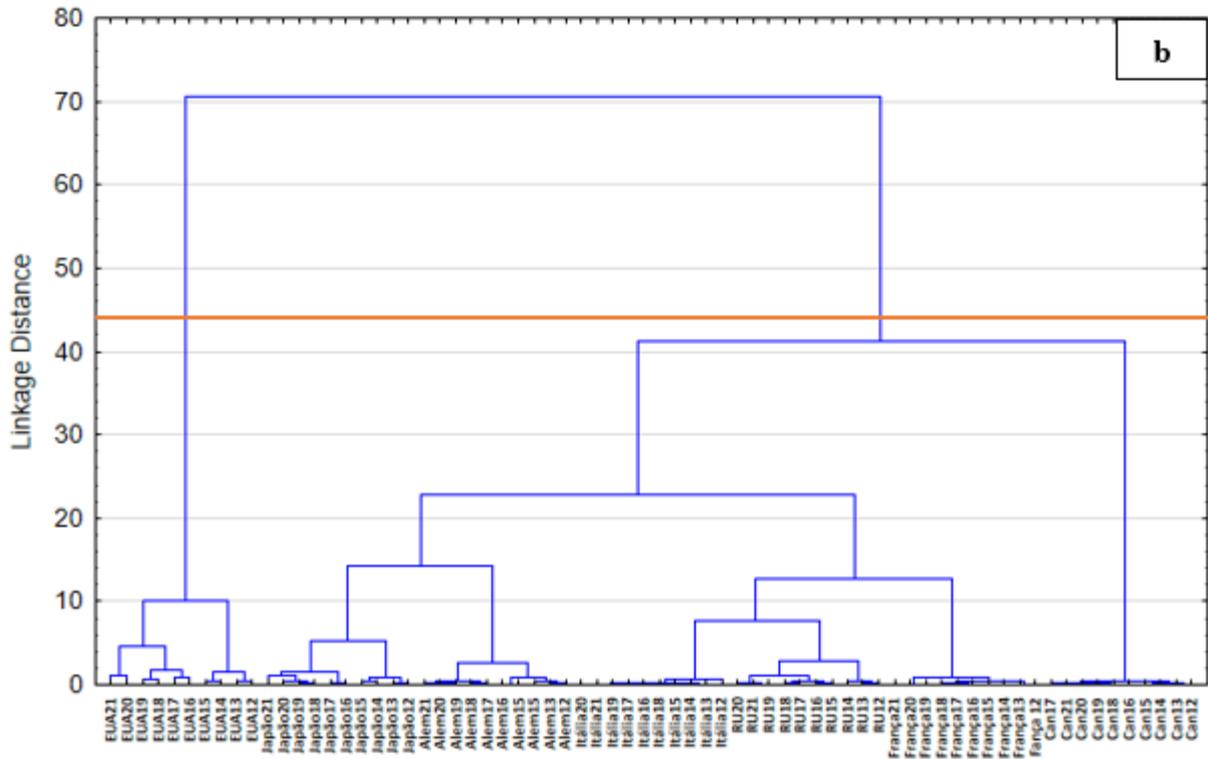
De modo semelhante, a Alemanha com os dados de 2016 ficou em um *cluster* diferente estando posicionada ao lado da Reino Unido no *cluster* formado pelo país juntamente com a Itália (em todo o período estudado) e França (de 2016 a 2021), indicando similaridades com os países deste grupo.

4.3.2 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento populacional

Na Figura 7 apresenta-se o dendrograma para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento populacional incluindo os dados dos países do G7 e Brasil, sendo que a Figura 7a inclui os dados dos países do G7 e Brasil e a Figura 7b apenas com os dados dos países do G7.

Figura 7 - Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento populacional.





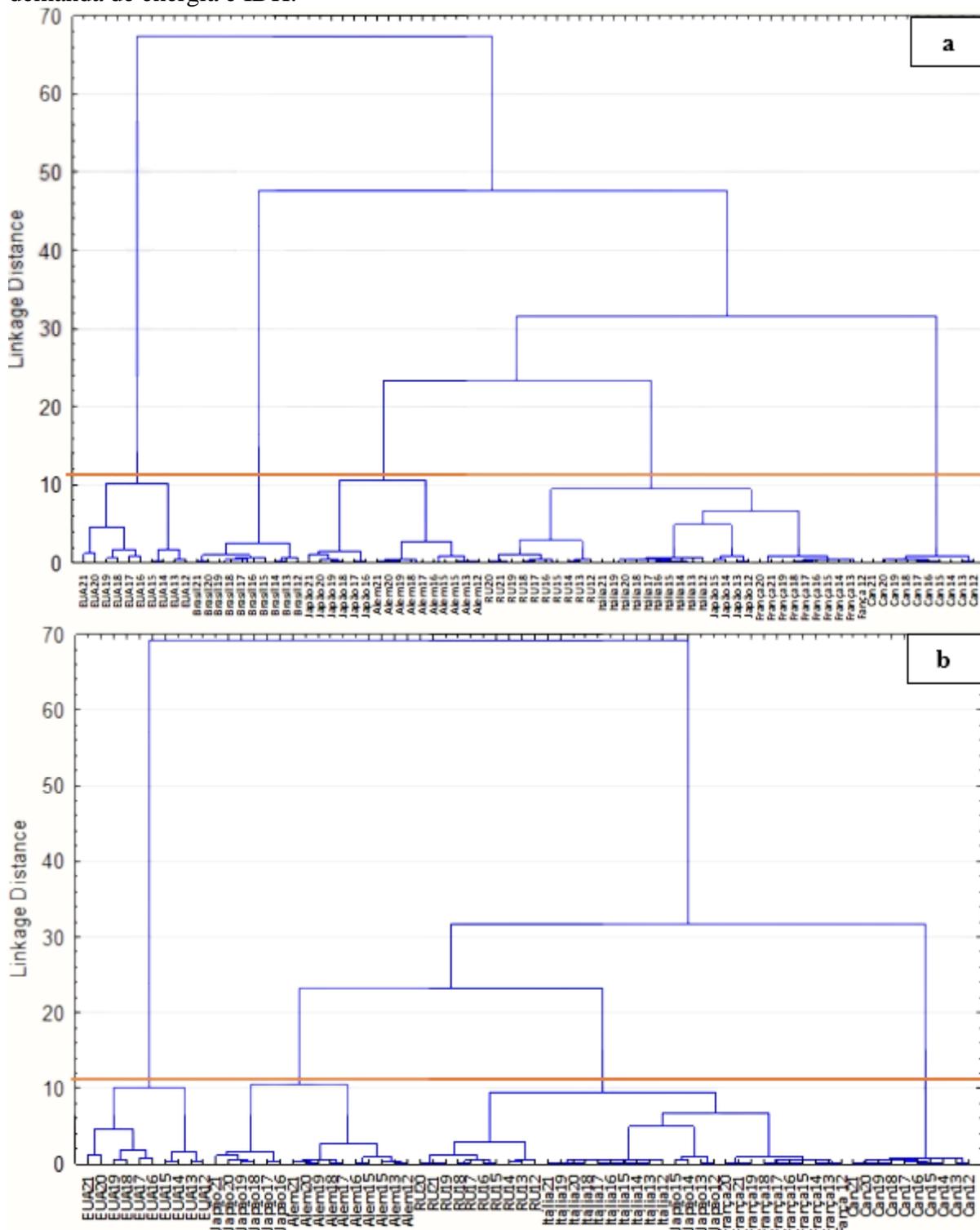
Fonte: Autora (2023)

O dendrograma gerado com os dados dos países do G7 e Brasil (Figura 7a) mostra que o número de agrupamentos de países para os componentes para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento populacional são de 4 grupos. Após esse número de grupos acontece um salto no dendrograma, os mesmos indicam que já se alcançou o número final de *clusters*. Além disso, cabe destacar que o Brasil formou um *cluster* sozinho com ligação ao *cluster* do Canadá, indicando similaridades mais próximas a esse país. Por conseguinte, ao analisar o dendrograma gerado sem os dados do Brasil (Figura 7b) verifica-se que o número de agrupamentos de países para os componentes para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento populacional permaneceu em 4 grupos mesmo o Brasil sendo retirado da análise.

4.3.3 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda de energia e IDH

Na Figura 8 apresenta-se o dendrograma para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e IDH incluindo os dados dos países do G7 e Brasil, sendo que a Figura 8a inclui os dados dos países do G7 e Brasil e a Figura 8b apenas com os dados dos países do G7.

Figura 8 - Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e IDH.



Fonte: Autora (2023)

Analisando o dendrograma gerado com os dados dos países do G7 e Brasil (Figura 8a) mostra que o número de agrupamentos de países para os componentes para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e IDH são de 5 grupos. Após esse número de grupos acontece

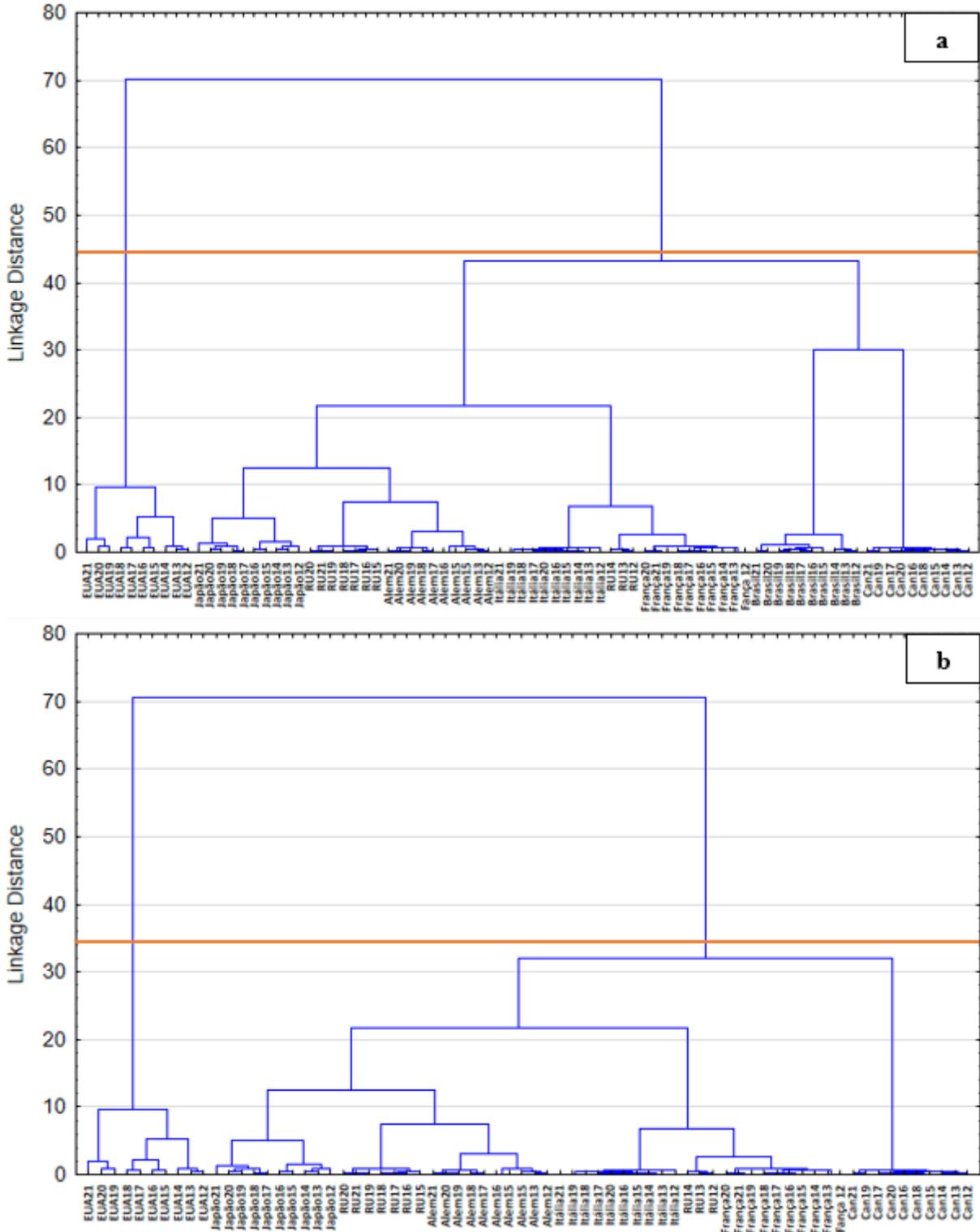
um salto no dendrograma, os mesmos indicam que já se alcançou o número final de *clusters*. Além disso, cabe destacar que o Brasil formou um *cluster* sozinho e se posicionou entre os EUA e Japão (de 2016 a 2021), indicando similaridades mais próximas a esses países.

Por conseguinte, ao analisar o dendrograma gerado sem os dados do Brasil (Figura 8b) verifica-se que o número de agrupamentos de países para os componentes para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e IDH reduziu para 4 grupos, uma vez que o Brasil que formava um *cluster* sozinho foi retirado da análise. Observa-se ainda que, em ambas as análises, os dados do Japão no período de 2012 a 2015 formaram um *cluster* juntamente com França (em todo o período estudado) e Itália (em todo o período estudado), indicando similaridades com os países deste grupo no período. No período de 2016 a 2021 os dados do Japão se agruparam ao *cluster* da Alemanha (em todo o período estudado), indicando similaridades com este país.

4.3.4 Análise da relação entre geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento econômico

Na Figura 9 apresenta-se o dendrograma para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento econômico incluindo os dados dos países do G7 e Brasil, sendo que a Figura 9a inclui os dados dos países do G7 e Brasil e a Figura 9b apenas com os dados dos países do G7.

Figura 9 - Dendrograma com os dados dos países para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento econômico.



Fonte: Autora (2023)

Analisando o dendrograma gerado com os dados dos países do G7 e Brasil (Figura 9a) mostra que o número de agrupamentos de países para os componentes para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento econômico são de 5 grupos. Após esse número

de grupos acontece um salto no dendrograma, os mesmos indicam que já se alcançou o número final de *clusters*. Destaca-se que o Brasil formou um *cluster* sozinho e se posicionou entre o Canadá e a França, indicando similaridades mais próximas a esses países.

Por conseguinte, ao analisar o dendrograma gerado sem os dados do Brasil (Figura 9b) verifica-se que o número de agrupamentos de países para os componentes para geração por matrizes energéticas, demanda de energia e crescimento econômico reduziu para 4 grupos, uma vez que o Brasil que formava um *cluster* sozinho foi retirado da análise. Observa-se ainda que, em ambas as análises, os dados da Reino Unido no período de 2012 a 2014 formaram um *cluster* juntamente com França (em todo o período estudado) e Itália (em todo o período estudado), indicando similaridades com os países deste grupo no período. No período de 2015 a 2021 os dados da Reino Unido se agruparam ao *cluster* da Alemanha (em todo o período estudado), indicando similaridades com este país.

De modo geral, ao analisar a geração de energia pelas matrizes energéticas e a demanda em relação a intensidade anual das emissões de CO₂ equivalente, verificou-se que quando o Brasil participa das análises estabelece uma relação com o Canadá, uma vez que os dois países formaram um *cluster*, indicando similaridades entre si. Ainda, analisando os dados brutos, percebe-se que ambos os países possuem os menores valores de emissões em g_CO₂. Ao encontro disso, Mohsin et al. (2019), ao realizarem um estudo para medir o desempenho energético de alguns países, afirmam que o Brasil diminuiu sua dependência de energia estrangeira, cuja redução foi atribuída à redução de 7% no consumo de petróleo e ao aumento da produção de petróleo e gás. Essa redução no consumo também provocou redução de 4% nas emissões de CO₂ (MILUTINOVIĆ et al., 2017). Além disso, Mohsin et al. (2019) destacam que as políticas de ponta do Canadá estão fortalecendo sua segurança energética e sustentabilidade ambiental, tomando como exemplo a redução do uso de usinas elétricas movidas a carvão por meio de sua regulamentação rigorosa sobre usinas movidas a carvão pelo país. Tais apontamentos corroboram com os achados do presente estudo quanto a relação existente entre Brasil e Canadá.

Cabe destacar ainda que, entre os países do G7, a Alemanha está mudando para o fornecimento de energia renovável e, nessa transição, um número cada vez maior de sociedades e regiões está definindo suas metas para atingir a autossuficiência energética promovendo o comércio transfronteiriço de energia renovável, o que é considerado como um dos principais pilares da transformação do sistema de energia.

Na sequência, ao analisar a geração de energia pelas matrizes energéticas e a demanda em relação ao crescimento populacional percebeu-se que o Brasil formou um *cluster* sozinho,

indicando que não há similaridades diretas com os países do G7. No entanto, cabe salientar que o *cluster* do Brasil se posicionou entre o Canadá e França, indicando similaridades mais próximas a esses países. As similaridades entre o Brasil, a França e o Canadá podem estar relacionadas a algumas semelhanças no crescimento populacional em aspectos de imigração, principalmente, pois, no geral, esses países têm experimentado um crescimento populacional relativamente estável ao longo dos anos, embora em ritmos diferentes. No Brasil, a combinação de altas taxas de natalidade e imigração tem contribuído para o crescimento contínuo da população (TAVARES; NETO, 2020). Na França tem se percebido um aumento no número de imigrantes, o que tem contribuído para a diversidade étnica e cultural do país (HUTTER; KRIESI, 2022), enquanto que o Canadá se assemelha devido a sua política de identidade aberta e acolhedora, o que tem contribuído para o aumento da diversidade étnica e cultural em seu território (GUO-BRENNAN; GUO-BRENNAN, 2019).

De modo semelhante as análises com crescimento populacional, nas análises de geração de energia pelas matrizes energéticas e a demanda em relação ao IDH e, após, em relação ao crescimento econômico o Brasil também formou um *cluster* sozinho, indicando que não há similaridades diretas com os países do G7. Porém, em relação ao IDH o Brasil ficou posicionado entre os EUA e Japão (de 2016 a 2021) e em relação ao crescimento econômico se posicionou entre o Canadá e a França, indicando similaridades mais próximas a esses países. Portanto, é possível concluir que, entre os países do G7, o Brasil possui maior relação com o Canadá quanto a variável de intensidade anual das emissões de CO₂ equivalente, sendo que nas demais categorias não foram estabelecidas relações.

A seguir apresenta-se as considerações finais sobre a pesquisa

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta pesquisa foi analisar as similaridades entre os países do G7 e Brasil em relação as variáveis de geração e demanda de energia, crescimento econômico, desenvolvimento populacional e emissões de CO₂ no período de 2012 até 2021. Para isso, utilizou-se a metodologia de análise multivariada com emprego da técnica de Análise de Agrupamento permitindo a avaliação simultânea das variáveis ao longo do tempo com informações sobre geração de energia por fonte fóssil, hidrelétrica, solar, bioenergia e eólica, demanda per capita de energia anual, intensidade anual das emissões de CO₂ equivalente, crescimento populacional, Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e crescimento econômico.

Ao analisar a relação entre as variáveis, os resultados mostraram que há relação das variáveis de intensidade anual das emissões de CO₂, crescimento populacional, IDH ou desempenho econômico com a geração de energia por hidrelétricas, o que pode ser justificado pelo fato de a energia por hidrelétrica ainda ser a maior fonte renovável de eletricidade nos países do G7 e no mundo (IEA, 2021). Predominante nos resultados a relação entre a demanda per capita de energia anual e a geração por fonte fóssil. Observou semelhanças entre a energia solar, bioenergia e energia eólica, o que pode estar relacionada aos valores semelhantes da geração de energia por estas fontes renováveis.

No que tange a análise da relação entre casos (países), quanto a intensidade anual das emissões de CO₂ equivalente, o Brasil e Canadá formaram o mesmo cluster, indicando similaridades entre ambos os países, e analisando os dados brutos percebe-se que ambos os países possuem os menores valores de emissões em g_CO₂. Em relação a análise da geração de energia pelas matrizes energéticas e a demanda em relação ao crescimento populacional percebeu-se que o Brasil formou um *cluster* sozinho, indicando que não houveram similaridades diretas com os países do G7. No entanto, cabe salientar que o *cluster* do Brasil se posicionou entre o Canadá e França, indicando similaridades mais próximas a esses países.

Ao analisar a geração de energia pelas matrizes energéticas e a demanda em relação ao crescimento populacional percebeu-se que o Brasil formou um *cluster* sozinho, indicando que não há similaridades diretas com os países do G7. No entanto, cabe salientar que o *cluster* do Brasil se posicionou entre o Canadá e França, indicando similaridades mais próximas a esses países.

Quanto as análises da geração de energia pelas matrizes energéticas e a demanda em relação ao crescimento populacional, ao IDH e, após, em relação ao crescimento econômico,

os resultados evidenciaram que o Brasil formou um *cluster* sozinho nas três categorias, indicando que não há similaridades diretas com os países do G7. Porém, nas análises em relação ao crescimento populacional o *cluster* do Brasil se posicionou entre o Canadá e França, enquanto em relação ao IDH *cluster* do Brasil ficou posicionado entre os EUA e Japão (de 2016 a 2021) e em relação ao crescimento econômico se posicionou entre o Canadá e a França, indicando similaridades mais próximas a esses países.

Conclui-se que, entre os países do G7, o Brasil possui maior relação com o Canadá quanto a variável de intensidade anual das emissões de CO₂ equivalente, sendo que nas demais categorias não foram estabelecidas relações. Para estudos futuros, sugere-se a ampliação do estudo com aplicação da técnica de análise de componentes principais visando analisar a combinação linear e gerar índices para o agrupamento das variáveis, além de ampliara as análises para países do BRICS.

REFERÊNCIAS

ALLAN, J. D.; CASTILLO, M. M.; CAPPS, K. A. **Stream ecology**: structure and function of running waters. Springer Nature, 2021.

ABEEólica. Associação Brasileira de Energia Eólica. **Dados de energia eólica**. 2018. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 26 de fevereiro de 2023.

AULER, D. Freire, fermento entre os oprimidos: continua sendo? **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, p. e33706-1–30, 2021.

BARTLE, A. Hydropower potential and development activities. **Energy policy**, v. 30, n. 14, p. 1231-1239, 2002.

BILDIRICI, M. E.; GÖKMENOĞLU, S. M. Environmental pollution, hydropower energy consumption and economic growth: Evidence from G7 countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 68-85, 2017.

CHERUBINI, F.; PETERS, G. P.; BERNTSEN, T.; STRØMMAN, A. H.; HERTWICH, E. CO₂ emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming. **Gcb Bioenergy**, v. 3, n. 5, p. 413-426, 2011.

CORTÉS, S.; LONDOÑO, A. A. Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. **Revista Ciencias Estratégicas**, v. 25, n. 38, p. 375-390, 2017.

COUNTRY ECONOMY. Consult the latest published data on the main economic and sociodemographic variables by country and region. Disponível em: <https://pt.countryeconomy.com>. Acesso em: 17 de outubro de 2022.

CRESWELL, J. W. Educational research: planning. **Conducting, and evaluating**, v. 260, n. 1, p. 375-382, 2012.

CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica**. Rio de Janeiro, 2006.

CREUTZIG, F.; RAVINDRANATH, N. H.; BERNDES, G.; BOLWIG, S.; BRIGHT, R.; CHERUBINI, F.; ... MASERA, O. Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. **Gcb Bioenergy**, v. 7, n. 5, p. 916-944, 2015.

DANTAMA, Y. U.; ABDULLAHI, Y. Z.; INUWA, N. Energy consumption-economic growth nexus in Nigeria: An empirical assessment based on ARDL bound test approach. **European Scientific Journal**, v. 8, n. 12, 2012.

DIDAY, E.; SIMON, J. C. Clustering analysis. **Digital pattern recognition**, p. 47-94, 1976.

DIÓGENES, J. R. F.; CLARO, J.; RODRIGUES, J. C.; LOUREIRO, M. V. Barriers to onshore wind energy implementation: A systematic review. **Energy Research & Social Science**, v. 60, p. 101337, 2020.

EMBER CLIMATE. **Data Explorer**. Disponível em: <https://ember-climate.org/data/data-tools/data-explorer/>. Acesso em: 24 de setembro de 2022.

FREITAS MUSSI, R. F.; MUSSI, L. M. P. T.; ASSUNÇÃO, E. T. C.; NUNES, C. P. Pesquisa Quantitativa e/ou Qualitativa: distanciamentos, aproximações e possibilidades. **Revista Sustinere**, v. 7, n. 2, p. 414-430, 2019.

GEHRKE, P.; GORETTI, A. A. T.; AVILA, L. V. Impacts of the energy matrix on Brazilian sustainable development. **Revista de Administração da UFSM**, v. 14, p. 1032-1049, 2022.

GALBIATTI-SILVEIRA, P. Energy and climate changes: the social and environmental impacts of the hydroelectric and the diversification of the Brazilian energy source. **Opini3n Jur3dica**, v. 17, n. 33, p. 123-147, 2018.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. S3o Paulo: Editora da USP, 2008.

GHOSAL, S.; SINHA, B.; MAJUMDER, M.; MISRA, A. Estimation of effects of nationwide lockdown for containing coronavirus infection on worsening of glycosylated haemoglobin and increase in diabetes-related complications: a simulation model using multivariate regression analysis. **Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews**, v. 14, n. 4, p. 319-323, 2020.

GUO-BRENNAN, L.; GUO-BRENNAN, M. Building welcoming and inclusive schools for immigrant and refugee students: Policy, framework and promising praxis. In: **Education, immigration and migration**, Emerald Publishing Limited, p. 73-93, 2019.

GÜRSAN, C.; GOOYERT, V. The systemic impact of a transition fuel: Does natural gas help or hinder the energy transition? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 138, p. 110552, 2021.

HAHSLER, M.; PIEKENBROCK, M.; DORAN, D. DBSCAN: Fast density-based clustering with R. **Journal of Statistical Software**, v. 91, p. 1-30, 2019.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **An3lise multivariada de dados**. Bookman editora, 2009.

HARDISTY, P. E.; CLARK, T. S.; HYNES, R. G. Life cycle greenhouse gas emissions from electricity generation: a comparative analysis of Australian energy sources. **Energies**, v. 5, n. 4, p. 872-897, 2012.

HARTIGAN, J. A.; WONG, M. A. A k-means clustering algorithm. **Applied statistics**, v. 28, n. 1, p. 100-108, 1979.

HOWELL, D. H. Energy Matrix: Implications and advances in Latin America and the Caribbean. In: Are we advancing in the transition of the energy matrix in Latin America? Analysis and considerations. **Policy brief on trade and environment**, n. 13, 2021.

HUTTER, S.; KRIESI, H. Politicising immigration in times of crisis. **Journal of Ethnic and Migration Studies**, v. 48, n. 2, p. 341-365, 2022.

IEA. International Energy Agency. **Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer**. IEA, Paris. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>. Acesso em: 28 de outubro de 2022.

IEA. International Energy Agency. **Achieving Net Zero Electricity Sectors in G7 Members**. IEA, 2021. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9a1c057a-385a-4659-80c5-3ff40f217370/AchievingNetZeroElectricitySectorsinG7Members.pdf>. Acesso em: 24 de outubro de 2022.

IEA. International Energy Agency. **Key world energy statistics 2019**. 81p. 2019.

IRENA. International Renewable Energy Agency. **Energia eólica**. 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>. Acesso em: 24 de fevereiro de 2023.

JAFARI, M.; BOTTERUD, A.; SAKTI, A. Decarbonizing power systems: A critical review of the role of energy storage. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 158, p. 112077, 2022.

KELLER, V.; LYSENG, B.; ENGLISH, J.; NIET, T.; PALMER-WILSON, K.; MOAZZEN, I.; ... ROWE, A. Coal-to-biomass retrofit in Alberta—value of forest residue bioenergy in the electricity system. **Renewable energy**, v. 125, p. 373-383, 2018.

KELEŞ, S. Fossil energy sources, climate change, and alternative solutions. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 33, n. 12, p. 1184-1195, 2011.

KNEKTA, E.; RUNYON, C.; EDDY, S. One size doesn't fit all: Using factor analysis to gather validity evidence when using surveys in your research. **CBE—Life Sciences Education**, v. 18, n. 1, 2019.

LUO, F.; ZHANG, L.; ZHOU, X.; GUO, T.; CHENG, Y.; YIN, T. Sparse-adaptive hypergraph discriminant analysis for hyperspectral image classification. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 17, n. 6, p. 1082-1086, 2019.

MAIA, K. P.; SILVA, G. A.; LIBÂNIO, M. Aplicação de análise multivariada no estudo da frequência de amostragem e do número de estações de monitoramento de qualidade da água. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, p. 1013-1025, 2019.

MALHOTRA, N. K. **Pesquisa de marketing: uma orientação aplicada**. Bookman Editora, 2001.

MANTOVANI, P. R. A.; NEUMANN, P. N.; EDLER, M. A. R. Matriz Energética Brasileira: Em busca de uma nova alternativa. **Revista interdisciplinar de ensino, pesquisa e extensão**, v. 4, n. 1, 2017.

MILUTINOVIĆ, B.; STEFANOVIĆ, G.; ĐEKIĆ, P. S.; MIJAILOVIĆ, I.; TOMIĆ, M. Environmental assessment of waste management scenarios with energy recovery using life cycle assessment and multi-criteria analysis. **Energy**, v. 137, p. 917-926, 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Serviços e Informações do Brasil. **Geração de energia por fontes renováveis cresce em 2022**. 2022. Disponível em: <http://bit.ly/3XWJUbp>. Acesso em: 24 de fevereiro de 2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Sistemas híbridos**: soluções energéticas para a Amazônia. Brasília, Brasil, 390 p. 2008.

MOHSIN, M.; RASHEED, A. K.; SUN, H.; ZHANG, J.; IRAM, R.; IQBAL, N.; ABBAS, Q. Developing low carbon economies: an aggregated composite index based on carbon emissions. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 35, p. 365-374, 2019.

MOITA NETO, J. M.; MOITA, G. C. Uma introdução à análise exploratória de dados multivariados. **Química nova**, v. 21, p. 467-469, 1998.

NOGAROTTO, D. C.; LIMA, M. R. G.; POZZA, S. A. Análise de componentes principais para verificar relação entre variáveis meteorológicas e a concentração de MP10. **HOLOS**, v. 1, p. 1-17, 2020.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. **The Power of Renewables**: Opportunities and Challenges for China and the United States. Washington, DC: Natl. Acad. Press. 256p., 2010.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Sun Fact Sheet**. USA, 2016.

NEVES, F. G. G. R.; ROCHA, C. F. D. **A evolução da energia solar na matriz elétrica brasileira**: perspectivas de implementação e impacto positivo na sustentabilidade. Editora Appris, 2021.

OBSERVATÓRIO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS PARA AMÉRICA LATINA E CARIBE. **Energia Solar Fotovoltaica**: Programa de capacitação em energias renováveis. [S.l.], 2013.

OLIVEIRA, T. J. A.; RODRIGUES, W. Uma análise espacial da estrutura produtiva no interior do Brasil: os clusters do agronegócio. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 50, n. 1, p. 153-170, 2019.

ONU. Organização das Nações Unidas. **ONU-Habitat: população mundial será 68% urbana até 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3ZtI42V>. Acesso em: 24 de fevereiro de 2023.

REID, W. V.; ALI, M. K.; FIELD, C. B. The future of bioenergy. **Global change biology**, v. 26, n. 1, p. 274-286, 2020.

SCALDELAI, D.; SANTOS, S. R.; MATIOLI, L. C. Índice de Densidade da Clusterização: Uma Nova Métrica para Validação Interna de Agrupamentos. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 9, n. 1, 2022.

SADORSKY, P. Wind energy for sustainable development: Driving factors and future outlook. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, p. 125779, 2021.

SILVEIRA, Semida. Bioenergy in Brazil—from traditional to modern systems. Biomass as energy source: resources, systems and applications, **Leiden**, v. 4, 2013.

SIMON, S.; NAEGLER, T.; GILS, H. C. Transformation towards a renewable energy system in Brazil and Mexico—Technological and structural options for Latin America. **Energies**, v. 11, n. 4, p. 907, 2018.

SOLARIN, S. A.; BELLO, M. O.; BEKUN, F. V. Sustainable electricity generation: the possibility of substituting fossil fuels for hydropower and solar energy in Italy. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 28, n. 5, p. 429-439, 2021.

TAVARES, J. M. S.; NETO, C. P. Aspectos do crescimento populacional: estimativas e uso de indicadores sócio demográficos. **Formação (Online)**, v. 27, n. 50, 2020.

VALLI, M. Análise de cluster. **Augusto Guzzo Revista Acadêmica**, n. 4, p. 77-87, 2002.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. 215f. Monografia (Especialização) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

VICINI, L.; SOUZA, A. M.; MORALES, F. E. C.; SOUZA, F. M. Técnicas Multivariadas Exploratórias: Teorias e Aplicações no Software Statistica©. Editora UFSM, 2018.

VIVEK, C. M.; RAMKUMAR, P.; SRIVIDHYA, P. K.; SIVASUBRAMANIAN, M. Recent strategies and trends in implanting of renewable energy sources for sustainability—A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 8204-8208, 2021.

VON LUXBURG, U. A tutorial on spectral clustering. **Statistics and computing**, v. 17, p. 395-416, 2007.

VOUMIK, L. C.; ISLAM, M. A.; RAY, S.; MOHAMED YUSOP, N. Y.; RIDZUAN, A. R. CO2 Emissions from Renewable and Non-Renewable Electricity Generation Sources in the G7 Countries: Static and Dynamic Panel Assessment. **Energies**, v. 16, n. 3, p. 1044, 2023.

WORLD BANK. **Development Data**. Disponível em: <https://databank.worldbank.org/home>. Acesso em: 24 de setembro de 2022.

ZONG, H.; CAO, Y.; LIU, Z. Energy security in Group of Seven (G7): a quantitative approach for renewable energy policy. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**, v. 13, n. 3, p. 173-175, 2018.