

CADERNOS DO IME – Série Estatística

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
ISSN on-line 2317-4536 / ISSN impresso 1413-9022 - v.52, p.1-19, 2022
DOI: 10.12957/cadest.2022.71319

AVALIANDO A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA ATRAVÉS DA ANÁLISE DE CLUSTERS DAS MATRIZES DE ENERGIA ELÉTRICA DE 40 PAÍSES

Ricardo de Melo e Silva Accioly
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
raccioly@ime.uerj.br

Fernanda da Serra Costa
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
fcosta@ime.uerj.br

Resumo

Este artigo avaliou a evolução da composição das matrizes de energia elétrica de um conjunto de países, entre 1992 e 2019, com base nos dados existentes na U.S. Energy Information Administration – EIA. O objetivo foi verificar o possível aumento da participação de fontes renováveis nas matrizes, buscando identificar a contribuição dos países no esforço de transição energética. O número de países da base de dados da EIA varia ano a ano, para este artigo foram selecionados 40 maiores consumidores de energia elétrica em 2019. Os países que compõem o G-20 estão incluídos neste conjunto de dados. Utilizou-se a técnica de análise de clusters para se obter agrupamentos de países e identificar suas alterações ao longo do tempo, com base na composição de suas matrizes (nuclear, combustíveis fósseis e renováveis). O estudo permitiu identificar que, ao longo do período analisado, ocorreram alterações nas matrizes de alguns países na direção da transição energética, mas as matrizes elétricas das duas maiores economias não sofreram alterações significativas, o que reduziu o impacto na matriz elétrica global. Existe um grupo de países que denominamos o “clube dos renováveis”, que manteve no período estudado uma matriz com preponderância de fontes renováveis, e um grupo que denominamos “clube da transição” cujos componentes estão caminhando nesse sentido.

Palavras-chave: Matriz de Energia Elétrica, Transição Energética, Análise de Cluster.

1. Introdução

No último relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (IPCC, 2021), foram considerados cinco cenários ilustrativos, nestes cenários o aumento de temperatura variou de 1,5°C (SSP1-1.9) a 4,5°C (SSP5-8.5). Uma das conclusões foi que o aquecimento global de 1,5°C e 2°C serão excedidos no século XXI caso não ocorram reduções consideráveis de CO₂ e outros gases de efeito estufa nas próximas décadas. Um dos setores da economia com a maior contribuição global na emissão de gases de efeito estufa é o setor de energia (IPCC, 2014). Existem várias opções para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) deste setor. As mudanças climáticas têm sido um grande impulsionador da transição energética.

No que se refere a produção de energia elétrica, o aumento da participação de fontes de energia renováveis é um dos principais direcionadores para se alcançar o objetivo de limitar as emissões de GEE pelas atividades antrópicas e como consequência, reduzir o ritmo das mudanças climáticas. Essa alteração das matrizes de energia elétrica é uma diretriz que cada país tem autonomia para definir os rumos e ritmos de transição, porém as decisões têm impacto local e global. Sendo assim, é interessante avaliar a evolução da composição das matrizes de energia elétrica dos países ao longo do tempo. Cabe destacar que as alterações na composição dessas matrizes nem sempre foram motivadas pelas mudanças climáticas. Por outro lado, como a alteração na composição das matrizes é um processo de médio/longo prazo, neste trabalho analisou-se as matrizes de energia elétrica dos 40 maiores consumidores, no período de 1992 a 2019, representados pelos anos: 1992, 2001, 2010 e 2019. Ao longo do trabalho quando for mencionado matriz, trata-se da matriz de energia elétrica.

A técnica de análise de clusters foi usada com o objetivo de identificar “clubes” de países cujas matrizes de energia elétrica apresentam composições semelhantes. Anteriormente, Yu *et al.* (2015) utilizaram análise de cluster para identificar empiricamente “clubes” de países com intensidades de consumo de energia num universo de 109 países, entre 1971 e 2010. Gostkowski *et al.* (2021), analisaram o consumo de energia em países do grupo Visegrad, 28 países, usando análise de cluster, com o objetivo de identificar mudanças no consumo de energia por setor da economia. Parobek *et al.* (2016), analisaram a utilização de energias renováveis na produção e consumo na União Europeia em 2012.

Este trabalho está estruturado em cinco itens, sendo o primeiro esta introdução. O item 2 descreve os dados utilizados, enquanto o item 3 apresenta a metodologia adotada para a análise de cluster. No item 4 são apresentados e discutidos os resultados alcançados. O item 5 contém as conclusões. Finalmente são apresentadas as referências bibliográficas.

2. Base de Dados

Utilizou-se como fonte de dados as informações disponibilizadas pela U.S. Energy Information Administration – EIA (EIA, 2022), referente a parte internacional, no que tange a geração e consumo de energia elétrica. Para geração de energia elétrica estavam disponíveis informações de 1980 a 2020 detalhadas por fonte primária. Para o consumo de energia elétrica estavam disponíveis o mesmo período, sem o detalhamento por fonte.

Apesar do banco de dados da EIA, referente a geração de energia elétrica, detalhar as fontes de energia renováveis, neste trabalho utilizamos somente o valor total, uma vez que o objetivo não era identificar o crescimento da participação de uma determinada fonte renovável nas matrizes de energia elétrica, mas sim identificar a mudança na participação total desta fonte. Os dados originais, em bilhões de kWh, foram transformados em percentuais por fonte primária de forma a padronizar as informações.

Apesar da análise das composições das matrizes, em forma padronizada, nos trazer informações relevantes sobre como a transição energética está se processando nos países, ela não permite avaliar o impacto da transição energética de forma global, uma vez que estes números isoladamente não refletem o peso de cada país em termos de consumo de energia elétrica.

Em relação ao número de países que compunham o banco de dados, houve mudanças durante o período disponível, principalmente após a dissolução da União das Repúblicas Socialistas Soviéticas. Em função disso, adotou-se como ano base para início dos estudos o ano de 1992, a partir do qual as mudanças foram menos significativas. Devido a ocorrência da pandemia por COVID-19, no final de 2019, e o aumento de dados ausentes, não foi considerado o ano de 2020. Dessa forma, os anos analisados foram 1992, 2001, 2010 e 2019.

Os 40 países selecionados para a análise correspondem aos 40 maiores consumidores de energia elétrica em 2019. Neste conjunto estão incluídos os países que compõem o G-20.

3. Metodologia

A análise de clusters é uma técnica de mineração de dados, não supervisionada, em que se busca definir agrupamentos em que haja similaridade entre os dados. O termo não supervisionado indica que não temos informações sobre qual seria o agrupamento correto para aquele dado, ou seja, não temos classes previamente definidas que rotulem os dados. A análise de cluster nos permite explorar os dados e separá-los em grupos representativos. Os grupos definidos podem ser considerados como candidatos potenciais para formação de uma classe ou “clube”.

Seja um conjunto de dados com n observações, $D = \{x_1, \dots, x_n\}$, que desejamos agrupar em k diferentes grupos disjuntos, $C = \{C_1, \dots, C_k\}$. Existem diversos paradigmas e métodos para se obter clusters, como pode ser visto em Henning *et al.* (2016). Neste artigo vamos utilizar um tipo denominado como categórico (exclusivo ou “crisp”), em que a partição dos dados requer que estes pertençam a um único cluster. A motivação desta escolha é porque estamos interessados também nas mudanças ocorridas, ao longo do tempo, nos agrupamentos de países. Nossas análises estão centradas nos três núcleos que compõem a matriz elétrica: nuclear, combustíveis fósseis e renováveis. Queremos analisar as mudanças dos países nos agrupamentos compostos por estes três núcleos ao longo do tempo.

Os métodos de partição são na sua maioria baseados em algum cálculo de distância. O método de cálculo de distância mais comum é o da distância Euclidiana. No caso do plano Cartesiano esta distância é dada por (1):

$$dist(A, B) = \sqrt{(A_x - B_x)^2 + (A_y - B_y)^2} \quad (1)$$

Inicialmente foi considerado o método das k -médias, que é uma das opções mais simples e clássicas para se obter estas partições exclusivas. Considerando um número pré-definido de clusters, k , o método busca encontrar k centroides que representem os dados próximos a este centroide. Para avaliar a proximidade é usada a distância Euclidiana quadrática, ou erro quadrático, conforme (2),

$$E = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1, x_j \in C_i}^n dist(x_j, c_i)^2 \quad (2)$$

Onde:

E , que representa a variação dentro do cluster,
é o erro quadrático de todos os dados em D ,
 c_i é o centroide do cluster C_i .

Otimizar a variação dentro do cluster é algo computacionalmente desafiador. Han *et al* (2012) apontam que este é um problema “NP-hard”, mesmo nos espaços Euclidianos de duas dimensões. O algoritmo das k -médias é um algoritmo guloso, que conforme Meila (2007) tem convergência garantida, mas não garante a convergência para o ótimo global, ou seja, muitas vezes terminando em um ótimo local. Ele pode simplificarmente ser representado por,

1. Selecione arbitrariamente k pontos iniciais como centroides;
2. Repita
 - a) Forme k clusters assinalando cada dado ao centroide mais próximo;
 - b) Recalcule o valor do centroide de cada um dos clusters;
3. Até a convergência ser alcançada.

Para avaliar o k -médias foram considerados quatro metodologias para obtenção dos clusters: Hartigan e Wong, Lloyd, Forgy e MacQueen (MORISSSETE & CHARTIER 2013), pois conforme podemos ver em Henning *et al.* (2016), não existe uma metodologia que possa garantir melhores resultados que as demais. O método k -médias é afetado por dois problemas, a escolha arbitrária (aleatória) dos centroides iniciais e a questão do número de clusters. Arthur e Vassilvitskii (2007) propuseram uma solução para a questão das sementes iniciais, criando o algoritmo k -médias++, que simplificarmente usa o seguinte procedimento: ele seleciona, aleatoriamente, apenas o primeiro centroide a partir dos dados, cada centroide subsequente é selecionado com uma probabilidade proporcional à sua contribuição para a redução do erro das seleções anteriores. Uma adaptação deste método foi usada neste artigo.

A qualidade dos clusters obtidos, em situações em que não existe uma resposta correta para a classificação, pode ser obtida através de medidas intrínsecas (HAN *et al.* 2012). Em geral, métodos intrínsecos avaliam um cluster examinando o seu grau de separação e compactação. O coeficiente denominado silhouette (ROUSSEEUW, 1987) é uma medida deste tipo.

Seja um conjunto de dados com n observações, $D = \{x_1, \dots, x_n\}$, que desejamos agrupar em k diferentes grupos disjuntos, $C = \{C_1, \dots, C_k\}$. Para cada dado $x_i \in D$ é calculada a distância média entre x_i e todos os outros dados no cluster em que x_i pertence, ou seja, uma avaliação da distância média dentro do cluster que será denominada de a_{ik} . A seguir é calculada a distância média de x_i com relação aos clusters a que ele não pertence, ou seja, uma avaliação da distância média entre clusters que será denominada de d_{ik} . Seja b_{ik} o menor valor de d_{ik} , que vai representar a diferença de x_i com relação ao seu vizinho mais próximo. O coeficiente de silhouette para x_i é dado por $S_i = (b_{ik} - a_{ik})/\max\{a_{ik}, b_{ik}\}$. A média dos S_i fica entre -1 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor é o resultado, pois isto indica que o cluster contendo x_i tem dissimilaridade baixa e ao mesmo tempo é distante dos outros clusters.

O coeficiente silhouette será usado para definir o número ótimo de clusters, ou seja, o valor de k que der o maior valor do coeficiente será o k ótimo. Neste artigo será usada como referência inicial o primeiro inteiro maior que valor de $1,5\sqrt{n}$, a partir do qual será selecionado o número máximo de clusters a ser avaliado. A combinação do k-médias++ e o uso do coeficiente de silhouette será o método de definição dos clusters.

A primeira abordagem utilizando k-médias se mostrou instável, com obtenção de diferentes conjuntos de cluster, a depender da metodologia utilizada e da semente inicial. Como podemos ver em Henning *et al* (2017) existem algumas vantagens em se usar o algoritmo de k-medoides. Henning *et al* (2017) apontam que o algoritmo é mais robusto, pode ser aplicado a outros cálculos de distância não dependendo da distância Euclidiana e sob certas condições é mais predisposto a encontrar a solução ótima. O k-médias usa a distância Euclidiana quadrática enquanto o k-medoides usa a distância Euclidiana padrão. Outra diferença é que os medoides são selecionados dos dados analisados e não são uma média do cluster.

Neste artigo, optou-se então por utilizar o algoritmo de partição ao redor de medoides (PAM) (KAUFMAN & ROUSSEEUW 1990), que pode ser simplificado por,

1. Selecione arbitrariamente k pontos iniciais como medoides;
2. Repita
 - a) Forme k clusters assinalando cada dado ao medoide mais próximo;

b) Para cada medoide k , $k = 1, 2, \dots, K$ considere todos os outros pontos que não sejam medoides. Troque k por um destes e recalcule o custo total.

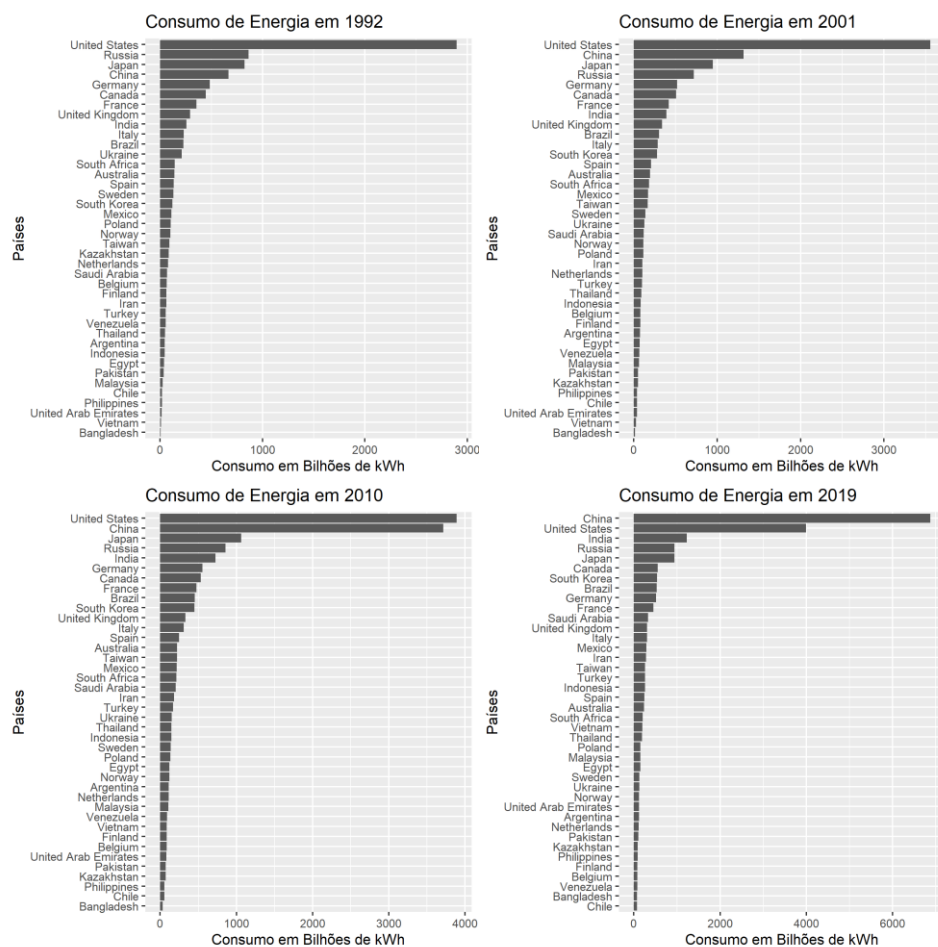
3. Até a convergência ser alcançada.

O número de clusters no caso do PAM também foi obtido através do silhouette.

4. Aplicação

Na Figura 1 é apresentado o consumo de energia elétrica dos 40 países analisados nos anos de 1992, 2001, 2010 e 2019. Destaca-se o crescimento do consumo da China aos longos dos anos, superando e muito o consumo dos Estados Unidos da América – EUA, em 2019. Tanto a China como os EUA são consumidores destacados no cenário global atual, portanto, mudanças nas suas matrizes teriam impacto significativo em termos globais.

Figura 1 – Evolução do consumo de energia nos 40 principais países consumidores



Fonte: Os autores

Devido a grande diferença na geração total de energia elétrica dos 40 países analisados, para cada ano analisado, os dados de geração energia elétrica de cada país foram normalizados usando a seguinte sistemática (3),

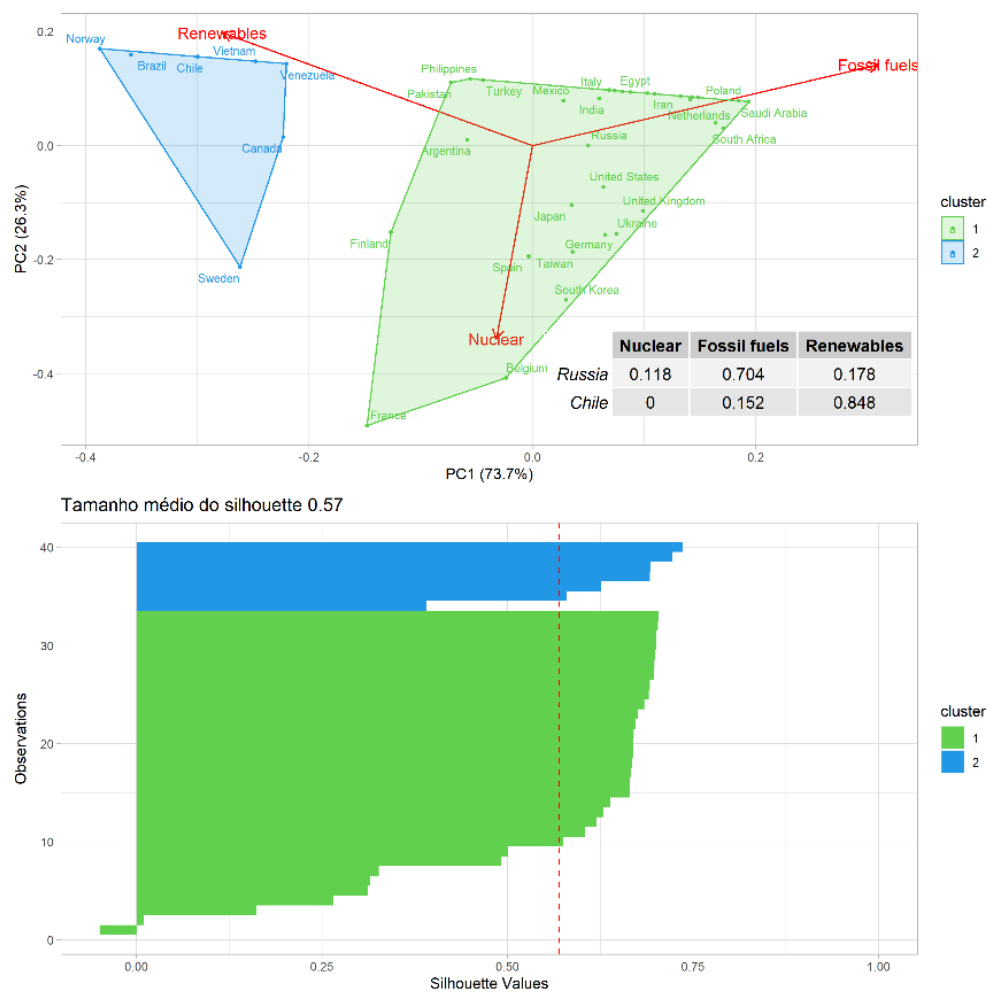
$$V_{norm_{i}ano_j} = \frac{V_{matriz_{i}ano_j}}{\sum_{i=1}^3 V_{matriz_{i}ano_j}} \quad (3)$$

Onde $V_{matriz_{i}ano_j}$ corresponde à geração de energia elétrica em bilhões de kWh produzida pela fonte $i \in \{nuclear, combustível, renováveis\}$ na matriz do país, no ano $j \in \{1992, 2001, 2010, 2019\}$ e $\sum_{i=1}^3 V_{matriz_{i}ano_j}$ corresponde a geração de energia elétrica total do país no ano j .

Dessa forma, a soma das gerações de energia elétrica normalizadas das fontes de cada país é sempre um. Isto permitiu avaliar as mudanças nos percentuais de participação de cada fonte nas matrizes de cada país, bem como evitou distorções devido a magnitude dos valores.

Para realizar as análises de cluster utilizamos o software livre R versão 4.2.0 e o pacote cluster (MAECHLER *et al.* 2022). Começando com o ano de 1992, a análise de cluster através do PAM, resultou em dois grandes agrupamentos. Na parte superior da Figura 2, são apresentados os dois clusters, com os correspondentes medoides, e na parte inferior se vê o gráfico silhouette. Pode-se observar que para a formação dos clusters o foco foi a predominância de combustíveis fósseis ou renováveis, tendo pouco peso a fonte nuclear. Isto pode ser percebido no gráfico da composição dos clusters, onde estão representadas as componentes principais. Note que os países com maior participação da fonte nuclear em sua matrizes encontram-se mais isolados, como por exemplo Bélgica e França. Este comportamento foi refletido no gráfico do silhouette (parte inferior da Figura 2), onde o único elemento com valor negativo de silhouette corresponde a França, que neste ano possuía uma matriz elétrica com 73% de nuclear. O valor médio do coeficiente de silhouette foi de 0,57, que conforme Kaufman e Rousseeuw (1990), está numa faixa que indica que uma estrutura razoável foi encontrada. O cluster com predominância de combustível fóssil era composto por 33 países, enquanto, o cluster com predominância de renováveis era composto por apenas 7 países. Os medoides neste caso foram a Rússia e o Chile cuja composição das matrizes se encontra na parte superior da Figura 2 à direita.

Figura 2 – Agrupamentos resultantes dos dados dos 40 países analisados no ano de 1992

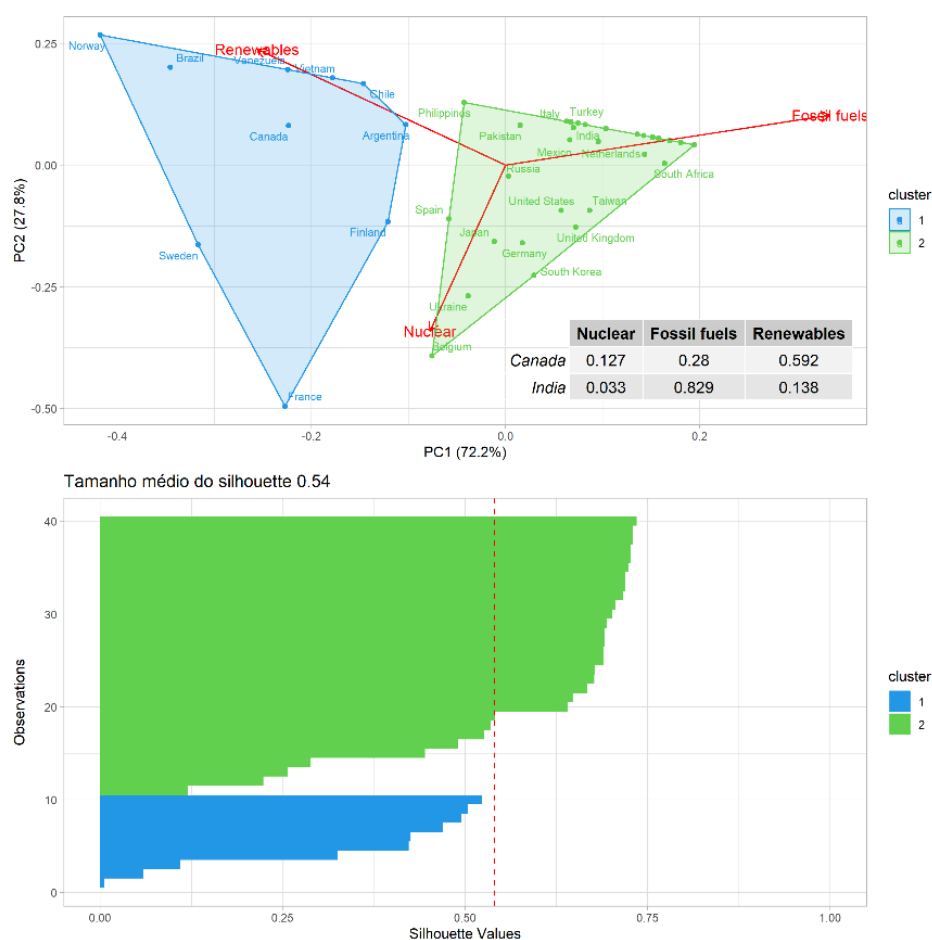


Fonte: Os autores

Em 2001 a análise de cluster através do PAM, também resultou em dois grandes agrupamentos (Figura 3). As principais mudanças com relação ao ano de 1992 foram a alteração dos países representantes dos medoides, em especial no cluster predominantemente renovável, que reduziu a participação de renováveis e aumentou a participação de nuclear e combustíveis fósseis. Entretanto, é importante entender o que levou a essa alteração, os países com maior participação de renováveis, com exceção da Noruega, aumentaram a participação de combustíveis fósseis, reduzindo a participação de renováveis. Em especial o Chile, que era o medoide em 1992, e em 2001 manteve 0% de nuclear, entretanto alterou de 15% para 44% combustíveis fósseis e consequentemente, de 85% de renováveis para 56%. Essas alterações fizeram com que a Argentina, Finlândia e França migrassem para esse cluster. Cabe destacar que, a matriz da Argentina, que em

1992 era composta de 13% nuclear, 51% de combustível fóssil e 36% de renováveis, passou para 8% nuclear, 49% combustível fóssil e 43% renováveis. Desta forma, a divisão dos países neste dois clusters resultou em 30 países no cluster com predominância de combustíveis fósseis e 10 países no cluster com predominância de renováveis. O valor médio do coeficiente de silhouete foi de 0,54, indicando que uma estrutura razoável foi encontrada.

Figura 3 – Agrupamentos resultantes dos dados dos 40 países analisados no ano de 2001

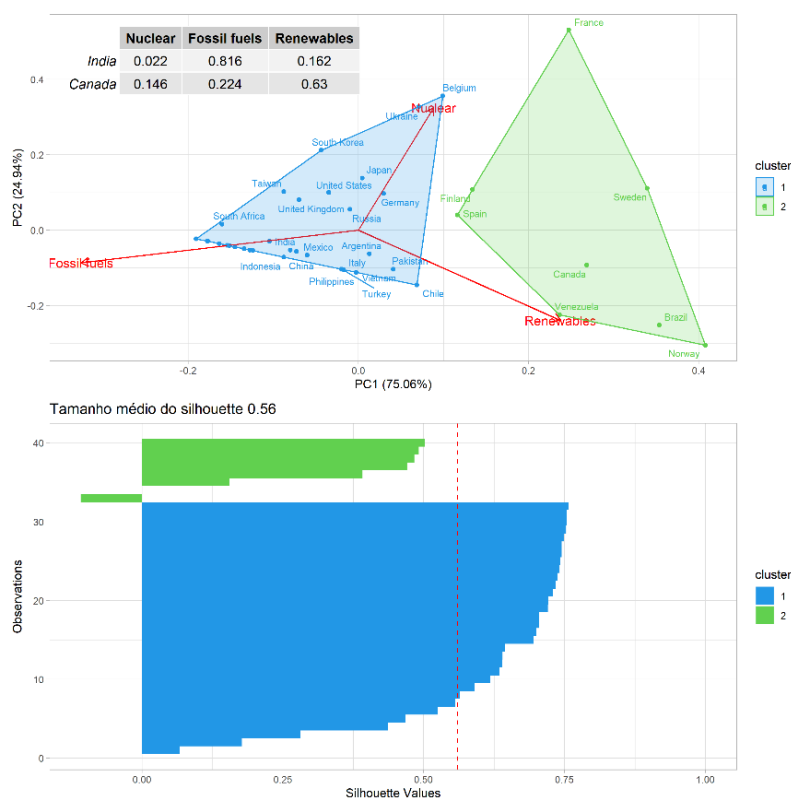


Fonte: Os autores

Em 2010 apesar de ter sido mantido apenas dois grandes agrupamentos (Figura 4) e os mesmos países como medoides que em 2001, ocorreram mudanças na composição dos clusters. Em relação aos países medoides, praticamente não houve alterações na matriz da Índia, já na matriz do Canadá houve ligeiro aumento da participação de renováveis (3%). O Chile, a Argentina e o Vietnam migraram para o cluster com predominância de combustíveis fósseis, enquanto, a Espanha migrou para o cluster com

predominância de renováveis. O Chile continuou a tendencia de aumento da participação dos combustíveis fósseis em detrimento dos renováveis, alcançando 58% de combustíveis fósseis em sua matriz. Já a Argentina que tinha apresentado aumento na participação das fontes renováveis em 2001, seguiu o movimento do Chile aumentando a participação dos combustíveis fósseis na sua matriz, passando de 49% para 62%. A mudança na matriz do Vietnam foi ainda mais significativa, enquanto em 2001 sua matriz apresentava 39% de combustíveis fósseis e 61% de renováveis, em 2010 a participação dos combustíveis fósseis passou para 70% e a participação das renováveis caiu para 30%, invertendo a composição da matriz. Por outro lado, a Espanha fez um movimento de redução da participação da nuclear e combustíveis fósseis com o consequente aumento das renováveis. Em 2001 sua matriz apresentava 27% de nuclear, 52% de combustíveis fósseis e 22% de renováveis, já em 2010 passou para 21%, 45% e 34% respectivamente. Isto resultou em 32 países no cluster de predominância de combustíveis fósseis e 8 no cluster de predominância de renováveis. O valor médio do coeficiente de silhouette foi de 0,56, indicando que uma estrutura razoável foi encontrada.

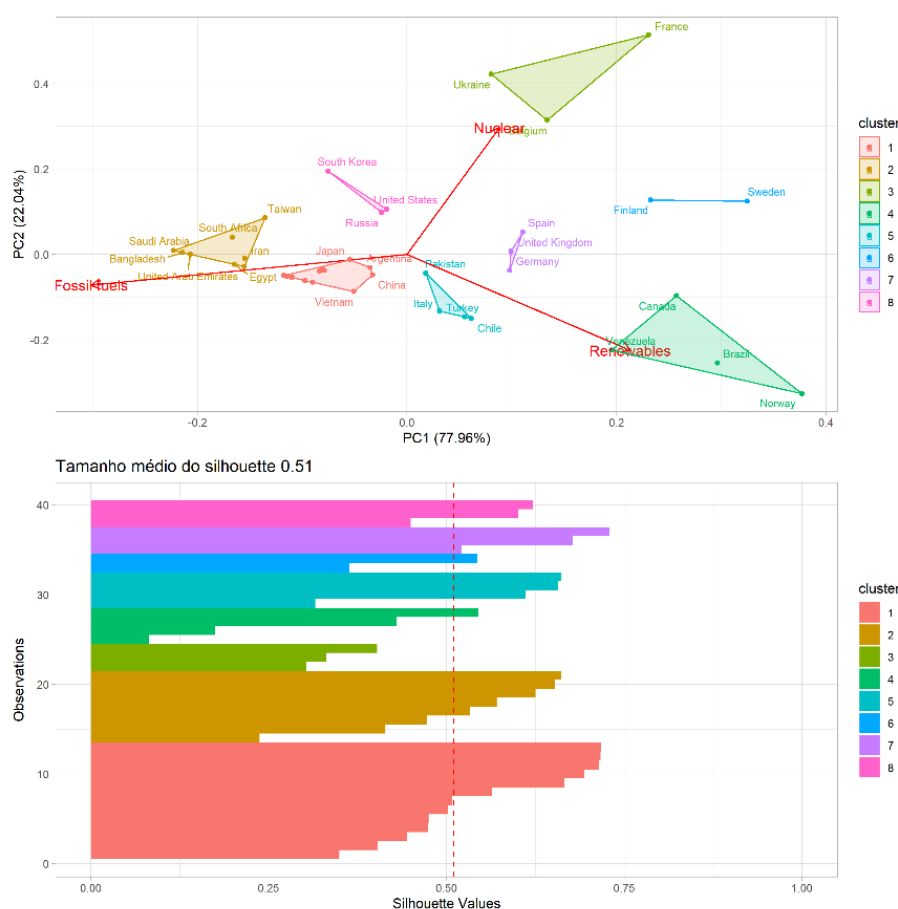
Figura 4 – Agrupamentos resultantes dos dados dos 40 países analisados no ano de 2010



Fonte: Os autores

Finalmente, em 2019 as alterações das matrizes elétricas de alguns países levaram a que a análise de cluster resultasse em 8 clusters (Figura 5). Este número de clusters teve como consequência um maior detalhamento das diferenças nas composições das matrizes dos 40 países analisados. O valor médio do coeficiente de silhouette foi de 0,51, indicando que uma estrutura razoável foi encontrada. Na parte superior da Figura 5 é visível a presença de dois clusters, mais isolados, que estão situados nas extremidades das componentes principais que representam as fontes nuclear e renováveis. No cluster relativo às fontes renováveis, o medoide é representado pelo Brasil com 2% nuclear, 15% combustível fóssil e 83% renováveis na composição de sua matriz, os países que compõem este cluster, além do Brasil, são Canadá, Venezuela e Noruega. Estes países apresentam mais de 60% em renováveis nas suas matrizes, cabe destacar que sempre apresentaram predominância desta fonte em suas matrizes, podendo ser definidos como o “clube dos renováveis”.

Figura 5 – Agrupamentos resultantes dos dados dos 40 países analisados no ano de 2019



Fonte: Os autores

Em relação ao cluster com predominância nuclear, cujo medoide é a Bélgica que apresenta a seguinte composição de sua matriz 47% de nuclear, 30% de combustível fóssil e 23% de renováveis, compõe este grupo, além da Bélgica, a França com 70% de nuclear, e a Ucrânia com 54% de nuclear. Estes países sempre tiveram predominância de nuclear em suas matrizes, portanto, poderiam ser definidos como o “clube nuclear”. Destaca-se que, em 2010 a França apresentava 76% de nuclear, a redução de 6% desta fonte foi consequência da migração para renováveis.

Em relação a predominância de combustíveis fósseis, a análise de cluster não resultou em um único agrupamento, mas sim em três. O primeiro, cujo medoide é o Egito com uma matriz com 0% nuclear, 90% combustíveis fósseis e 10% renováveis, é composto por 8 países incluindo o Egito, destacando-se a Arábia Saudita, Emirados Árabes Unidos e África do Sul, todos esses países apresentam mais de 80% de combustíveis fósseis em suas matrizes e menos de 6% de renováveis. O segundo cluster, cujo medoide é a Índia, cuja matriz é formada por 3% nuclear, 76% de combustível fóssil e 21% de renováveis (cuja participação de renováveis vem aumentando 14% (2001) e 16% (2010)), é composto por 13 países, destacando-se Austrália, Japão e China, todos com mais de 67% de combustível fóssil, e entre 15% e 30% de renováveis em suas matrizes. O terceiro cluster, cujo medoide é a Rússia, com 18% de nuclear, 63% combustível fóssil e 19% de renovável em sua matriz, é formado por mais dois países, Estados Unidos com 62% de combustível fóssil, 19% de nuclear e 19% de renováveis, e Coreia do Sul com 70% combustível fóssil, 25% de nuclear e 5% de renováveis. Comparando-se os dois últimos grupos com predominância de combustíveis fósseis, observa-se que o último grupo, além de apresentar um menor percentual de combustíveis fósseis, há uma troca entre renováveis e nuclear. Os três agrupamentos com predominância de combustíveis fósseis, não formam um clube uniforme, mas ainda assim, poderiam ser definidos como o “clube dos combustíveis fósseis”.

Existem ainda três agrupamentos que não apresenta uma clara predominância por uma das três fontes em suas matrizes. Um desses agrupamentos é composto apenas pela Finlândia com 34% de nuclear, 17% de combustível fóssil e 49% de renováveis, e a Suécia com 39% de nuclear, 1% combustível fóssil e 60% de renováveis em suas matrizes. Esses dois países se distinguem dos demais por apresentarem percentuais altos de renováveis, mas também de nuclear, suas matrizes apresentam mais de 80% de

participação dessas duas fontes. Pela análise temporal de suas matrizes, apresentadas na Tabela 1, verifica-se que ambos estão num processo de redução da fonte nuclear, porém com trajetórias distintas. Enquanto a Suécia, que já em 1992 tinha uma pequena participação de combustíveis fósseis, vem migrando lentamente para as renováveis, a Finlândia inicialmente migrou para combustíveis fósseis e em 2019 observou-se um redirecionamento para renováveis, num sentido claro de limpar sua matriz.

Tabela 1: Matrizes de energia elétrica da Finlândia e Suécia.

Nota: N=Nuclear, CF=Combustíveis Fósseis e R=Renováveis

País	1992			2001			2010			2019		
	N	CF	R	N	CF	R	N	CF	R	N	CF	R
Finlândia	0,33	0,31	0,36	0,30	0,39	0,30	0,28	0,40	0,31	0,34	0,17	0,48
Suécia	0,43	0,04	0,53	0,44	0,04	0,53	0,38	0,05	0,57	0,39	0,01	0,60

Fonte: Os autores

Outro agrupamento que não apresenta clara preponderância de uma fonte na matriz é formado por Reino Unido (17% nuclear, 43% combustível fóssil e 40% renovável), Espanha (21% nuclear, 40% combustível fóssil e 39% renovável) e Alemanha (12% nuclear, 45% combustível fóssil e 43% renovável). Neste agrupamento, diferentemente do anterior os países se destacam por apresentarem um equilíbrio entre combustíveis fósseis e renováveis. Pela análise temporal de suas matrizes (Tabela 2) percebe-se que os três países estão num processo de migração para aumento do percentual de renováveis com consequente redução dos percentuais de nuclear e combustíveis fósseis em suas matrizes. Entretanto os processos têm sido bastante diferentes, enquanto a Espanha iniciou sua transição em 2001, migrando da fonte nuclear para renovável, a Alemanha iniciou esse processo mais tardiamente, em 2010, porém reduzindo os percentuais de nuclear e combustível fóssil. O último desses três países a iniciar a transição foi o Reino Unido, porém de forma agressiva, que até 2010 não apresentava alterações significativas na composição de sua matriz, porém em 2019 apresenta uma grande redução no percentual de combustível fóssil com grande aumento de renováveis. Esses três países poderiam compor o “clube da transição”.

Tabela 2: Matrizes de energia elétrica da Alemanha, Espanha e Reino Unido.

Nota: N=Nuclear, CF=Combustíveis Fósseis e R=Renováveis

País	1992			2001			2010			2019		
	N	CF	R	N	CF	R	N	CF	R	N	CF	R
Alemanha	0,30	0,65	0,05	0,30	0,62	0,08	0,22	0,59	0,19	0,12	0,44	0,43
Espanha	0,36	0,51	0,13	0,27	0,51	0,22	0,21	0,45	0,34	0,21	0,40	0,39
R. Unido	0,24	0,74	0,02	0,24	0,73	0,03	0,16	0,76	0,08	0,16	0,43	0,40

Fonte: Os autores

Finalmente, o último agrupamento que não apresenta clara preponderância de uma fonte na matriz é formado por Turquia (0% nuclear, 54% combustível fóssil, 46% renováveis), Chile (0% nuclear, 53% combustíveis fósseis, 47% renováveis), Itália (0% nuclear, 58% combustíveis fósseis e 42% renováveis) e Paquistão (8% nuclear, 59% combustíveis fósseis, 34% renováveis). Entre os três grupos sem predominância de fonte em suas matrizes, este agrupamento é o que tem mais proximidade com os agrupamentos com predominância de combustíveis fósseis, apesar de apresentarem menos de 60% desta fonte em suas matrizes. Além disso, se destacam dos outros dois pela quase ausência de nuclear. Numa análise temporal de suas matrizes (Tabela 3), observa-se que as trajetórias desses países são bem distintas, sendo os extremos a Itália e o Chile. Enquanto a Itália partiu de 22% de renováveis em sua matriz em 1992, chegando à 42% em 2019, reduzindo a participação dos combustíveis fósseis, o Chile partiu de 85% de renováveis em 1992 atingindo 47% em 2019, o que levou a um aumento do percentual de combustíveis fósseis na sua matriz.

Tabela 3: Matrizes de energia elétrica do Chile, Itália, Paquistão e Turquia.

País	1992			2001			2010			2019		
	N	CF	R	N	CF	R	N	CF	R	N	CF	R
Chile	0,00	0,15	0,85	0,00	0,44	0,56	0,00	0,58	0,42	0,00	0,53	0,47
Itália	0,00	0,78	0,22	0,00	0,79	0,21	0,00	0,72	0,28	0,00	0,58	0,42
Paquistão	0,01	0,54	0,45	0,03	0,70	0,27	0,03	0,62	0,35	0,08	0,59	0,34
Turquia	0,00	0,59	0,41	0,00	0,58	0,42	0,00	0,72	0,28	0,00	0,54	0,46

Fonte: Os autores

A China e os EUA não se destacaram na análise da composição dos agrupamentos ao longo do tempo, no entanto, os dois países são relevantes em termo de consumo e produção de energia elétrica (nominais), pois representam 28,9% e 16,7% do consumo e 28,3% e 16,3% da produção dos 40 países analisados. Uma análise da composição de suas matrizes ao longo desse período é relevante para avaliação do impacto dos 40 países na transição energética. Na Tabela 4 observa-se que estes dois países sempre estiveram no agrupamento com preponderância de combustível fóssil apesar de suas matrizes serem distintas, enquanto a matriz dos EUA sempre apresentou um percentual relevante de nuclear, na matriz da China esta fonte não tem relevância. Percebesse uma lenta redução ao longo do tempo do percentual de combustíveis fósseis nas matrizes dos dois países, mais significativa no caso da China. Entretanto, esta redução não foi suficiente para uma

migração para outro agrupamento, mesmo para aqueles em que não há predominância de uma fonte.

Tabela 4: Matrizes de energia elétrica de China e EUA.

Nota: N=Nuclear, CF=Combustíveis Fósseis e R=Renováveis

País	1992			2001			2010			2019		
	N	CF	R	N	CF	R	N	CF	R	N	CF	R
China	0,00	0,82	0,18	0,01	0,79	0,19	0,02	0,79	0,20	0,05	0,68	0,28
EUA	0,20	0,69	0,11	0,21	0,71	0,08	0,20	0,70	0,11	0,19	0,62	0,19

Fonte: Os autores

Apesar existirem diversos países que não estão caminhando para a transição energética, esta migração muito lenta destes dois países tem impacto global nos objetivos perseguidos para redução da emissão de gases de efeito estufa.

Na Tabela 5 podemos perceber a magnitude dos consumos e produções de energia elétrica dos dois países, os dois conjuntamente, totalizam cerca de 45% do consumo e produção de energia dos 40 países analisados. Isto mostra a relevância de suas movimentações em direção a uma matriz de energia elétrica com maior participação de renováveis.

Tabela 5: Consumo (C) e Produção (P) de Energia Elétrica (BkWh) de China e EUA.

País	1992		2001		2010		2019	
	C	P	C	P	C	P	C	P
China	666	716	1315	1426	3714	3987	6875	7235
EUA	2897	3088	3557	3745	3889	4132	3990	4168

Fonte: Os autores

5. Conclusões

Neste estudo avaliamos a evolução das matrizes de energia elétrica nacionais, através da análise de clusters, cujos perfis de clusters permitiram identificar alguns “clubes” de países, de acordo com a preponderância de uma das fontes de energia elétrica: nuclear, combustíveis fósseis e renováveis. O objetivo do estudo era verificar o possível aumento da participação de fontes renováveis, o que identificaria a contribuição dos países no esforço de transição energética. A análise de cluster não identificou um movimento uniforme dos 40 países analisados (40 maiores consumidores de energia elétrica em 2019).

Dos 40 países analisados, identificou-se apenas no último ano (2019) a formação de um cluster cujo o comportamento indicava uma transição para fontes renováveis. Este cluster, que neste trabalho foi denominado “clube da transição” é composto por apenas

três países, Alemanha, Espanha e Reino Unido. Apesar de não pertencerem ao mesmo agrupamento destes três países, poderiam fazer parte deste clube de transição a Finlândia, Suécia e Itália, pois percebe-se que também estão fazendo um movimento para tornar suas matrizes mais renováveis, porém num processo mais lento.

É importante destacar o cluster formado por quatro países, o “clube dos renováveis”, cujas matrizes de energia elétrica se mantiveram predominantemente renováveis ao longo do tempo, por isso formaram um cluster independente do “clube de transição”. Este grupo é composto pelo Brasil, Noruega, Venezuela e Canadá.

Por outro lado, 24 países (60%) formam o “clube dos combustíveis fósseis”, pois suas matrizes se mantiveram predominantemente fósseis ao longo do período estudado (1992-2019), apesar de formarem clusters distintos.

Destaca-se que as duas maiores economias mundiais e maiores produtores e consumidores de energia elétrica, China e EUA, apresentam uma migração muito lenta no sentido de tornar suas matrizes de energia elétrica mais renováveis, o que tem um impacto grande na transição energética global. Os dois países encontram-se no “clube dos combustíveis fósseis”.

Em resumo, este trabalho identificou que dos 40 países analisados, apenas 7 (aproximadamente 18%) estão contribuindo para a transição energética global através da evolução para matrizes de energia elétrica mais renováveis.

Finalmente, cabe destacar que neste trabalho não foram considerados outros esforços que podem estar sendo feitos nos países analisados no sentido de mitigar as emissões de gases de efeito estufa em suas matrizes de energia elétrica, como por exemplo, aumento da eficiência energética, substituição de carvão por gás natural, menos emissor, adoção de tecnologias de captura de CO₂, entre outros. Também não foi investigado, por não ser objetivo deste trabalho, outros fatores que podem ter impactado as matrizes dos países analisados ao longo do tempo, como conflitos, crises econômicas.

Referências

ARTHUR, D.; VASSILVITSKII, S. k-means++: The advantages of careful seeding. **Proceedings** of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, 2007.

EIA. **International Energy Outlook**. Disponível em: <https://www.eia.gov/international/data/world>
Acesso em 14/04/2022, 2022.

HENNING, C., MEILA, M., MURTAGH, F., ROCCI, R. **Handbook of Cluster Analysis**, CRC Press, 2017.

IPCC. **Mudança do Clima 2021** - A Base Científica - Sumário para Formuladores de Políticas. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf. Acesso em 14/03/2022. 2021.

IPCC. **Fifth Assessment Report**, Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/energy-systems/>. Acesso em 14/03/2022. 2014.

KAUFMAN, L., ROUSSEEUW, P.J. **Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis**, John Wiley & Sons, 1990.

MAECHLER M., ROUSSEEUW P., STRUYF A., HUBERT M., HORNIK K. **Cluster Analysis Basics and Extensions. R package version 2.1.3**, Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=cluster> . 2022.

MEILA, M. Comparing clusterings - An information-based distance. **Journal of Multivariate Analysis**, 98(5):873–895, 2007.

ROUSSEEUW, P.J. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, 20, 53–65, 1987.

EVALUATING THE ENERGY TRANSITION USING CLUSTER ANALYSIS OF THE ELECTRIC POWER MATRICES OF 40 COUNTRIES

Abstract

This article evaluated the evolution of the composition of electricity matrices in a set of countries, between 1992 and 2019, based on existing data from the U.S. Energy Information Administration – EIA. The objective was to verify the potential increase in the participation of renewable sources in the matrices, seeking to identify the contribution of countries in the energy transition effort. The number of countries in the EIA database varies year by year, for this article were selected 40 largest consumers of electricity in 2019. The countries that are part of the G-20 group are included in this data set. Cluster analysis was used to obtain groups of countries and identify their changes over time, based on the composition of their matrices (nuclear, fossil fuels and renewables). The study allowed us to identify that, over the period analyzed, there were changes in the matrices of some countries in the direction of the energy transition, but the electric matrices of the two largest economies did not undergo significant changes, which reduces the impact on the global electric matrix. There is a group of countries that we call the "renewables club", which maintained in the studied period a matrix with preponderance of renewable sources, and a group we call the "transition club" whose components are moving in this direction.

Key-words: *Electric Power Matrices, Energy Transition, Cluster Analysis.*