

**08 a 11 de Outubro de 2018**  
**Instituto Federal Fluminense**  
**Búzios - RJ**

## **RANQUEAMENTO DOS PAÍSES EMISSORES DE CO<sub>2</sub> A PARTIR DA IDENTIDADE DE KAYA: MODELAGEM MULTICRITÉRIO DO G20**

**Leila de Matos Abreu**<sup>1</sup> – leilamatosabreu@gmail.com

**Henrique Rego Monteiro da Hora**<sup>1</sup> – dahora@gmail.com

**João José de Assis Rangel**<sup>1</sup> – joao.rangel@ucam-campos.br

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Fluminense - Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

**Resumo.** *A constante busca pelo desenvolvimento sustentável motivou a elaboração deste trabalho que tem como objetivo a construção de um ranking dos países mais sustentáveis em relação as emissões de CO<sub>2</sub>, de acordo com os critérios estabelecidos no indicador identidade de Kaya. Para o estudo foi selecionado o bloco econômico G20 devido sua representatividade no cenário mundial, com aplicação do método multicritério PROMETHEE II para a ordenação dos países, cujos dados foram obtidos da Agência Internacional de Energia. Como resultado, as cinco melhores posições no ranking, são representadas pelos países com excelentes projeções econômicas e eficiência energéticas conforme os critérios.*

**Palavras-chave:** *Emissões de CO<sub>2</sub>, Kaya, G20, PROMETHEE II*

## 1. INTRODUÇÃO

As questões acerca do desenvolvimento sustentável, o qual visa o equilíbrio entre as esferas econômicas, sociais e ambientais, tornaram-se relevantes para a humanidade a partir dos reflexos de suas ações antrópicas. Com a industrialização e o avanço da economia, um dos principais empecilhos para a sustentabilidade do planeta são os Gases de Efeito Estufa (GEE), em especial o dióxido de carbono. No entanto, recentes políticas ambientais e econômicas mais rigorosas vem sendo implementadas a fim de reduzir essas emissões. Atualmente, há estudos que demonstram uma tendência do desacoplamento das emissões de CO<sub>2</sub> e o PIB de diversos países, evidenciando uma relação de crescimento econômico nos países mais desenvolvidos sem um aumento das emissões de dióxido de carbono (Wang, Li & Liao, 2016).

O G20, ou Grupo dos 20, criado em 25 de setembro de 1999 diante das crises financeiras iniciadas em 1990, é um fórum internacional de cooperação econômica e financeira entre países desenvolvidos e emergentes a fim de desenvolver um diálogo mais amplo em relação à economia global. A integração desses países visa à promoção do crescimento sustentável aliado a estabilidade econômica, a partir de políticas e de regulações financeiras que reduzam o risco de crises no cenário internacional (G20, 2018).

O grupo é constituído pela União Europeia e as 19 maiores economias do mundo, são elas: África do Sul, Alemanha, Arábia Saudita, Argentina, Austrália, Canadá, China, Coreia, Estados Unidos, França, Índia, Indonésia, Itália, Japão, México, Reino Unido, Rússia e Turquia. Juntos, os países membros do G20 representam aproximadamente 90% do PIB mundial, 80% do comércio internacional, dois terços da população mundial e 84% da emissão de gases do efeito estufa, conferindo-lhes significativa influência sobre a gestão do sistema financeiro e da economia global (Itamaraty, 2018).

Neste contexto, o objetivo do artigo é elaborar um ranking dos países mais sustentáveis em relação as emissões de CO<sub>2</sub>, de acordo com os critérios abordados pelo indicador identidade de Kaya, sendo analisados critérios econômicos, populacionais, energéticos e as emissões de dióxido de carbono. Aplicando a modelagem multicritério PROMETHEE II (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) para realizar a ordenação dos países membros do bloco econômico G20, devido sua representatividade no cenário mundial.

## 2. METODOLOGIA

Nesse trabalho foram seguidas algumas etapas para construir um *ranking* dos países mais sustentáveis à luz dos critérios estabelecidos. A partir da definição do objetivo, para aplicação do método de análise decisória, foram selecionados como alternativas os países que compõem o grupo econômico G20 e os critérios foram determinados conforme o indicador identidade de Kaya. Os dados levantados foram obtidos na base pública da *International Energy Agency* - IEA, referente ao ano de 2015.

A identidade de Kaya (1989), é uma decomposição matemática utilizada para estabelecer uma relação entre as emissões de dióxido de carbono produzidas pelas atividades da humanidade e quatro fatores importantes: demográfico, econômico, intensidade energética e intensidade carbônica, conforme Equação (1) (Henriques & Borowiecki, 2014). A identidade de Kaya é uma versão renovada da identidade de IPAT, em que as forças de população (P), afluência (A) e tecnologia (T) causam um impacto ambiental (I), estabelecida por Ehrlich e Holdren (1971).

$$C = P \times \frac{PIB}{P} \times \frac{E}{PIB} \times \frac{C}{E} \quad (1)$$

Onde:

C: Emissões de dióxido de carbono (MtCO<sub>2</sub>);

P: População (milhões de pessoas);

PIB: Produto Interno Bruto (1 bilhão de dólares americanos em 2005);

E: Energia (Mtep – tonelada equivalente de petróleo).

Disso, infere-se que:

PIB/P: PIB per capita (bilhões de dólares americanos em 2005 por habitante);

E/PIB: Intensidade energética, ou seja, a produção de energia por unidade de PIB (tep/mil dólares americanos em 2005);

C/E: Intensidade carbônica da energia, ou seja, as emissões de CO<sub>2</sub> por unidade de energia produzida (tCO<sub>2</sub>/tep).

Os Métodos de Apoio Multicritério à Decisão (AMD), consistem em formulações metodológicas ou teorias, com estruturas axiomáticas bem definidas, que podem ser utilizadas para a formação de um modelo de decisão visando a solução de um problema. Esses métodos podem ser classificados como compensatórios e não compensatórios (Almeida, 2013).

Nesta pesquisa é utilizado o método da família PROMETHEE, desenvolvido por Brans e Vincke (1985), especificamente o PROMOTHEE II, que estabelece uma ordem completa entre as alternativas destinadas à problemáticas de ordenação. O *software* utilizado para a aplicação é o *Visual PROMETHEE Academic Edition*.

Conforme estabelecido, o modelo é composto por vinte alternativas e os quatro critérios conforme na Tabela 1, no qual são apresentados os critérios de avaliação com suas respectivas descrições e pesos. Não há distinção de pesos entre os critérios.

Tabela 1 - Critérios de avaliação

Critérios		Descrição	Peso
C1	Emissões de CO <sub>2</sub>	Este critério irá avaliar a quantidade de emissões de dióxido de carbono emitidos por combustíveis fósseis. Será considerado mais sustentável o país que emitir menos. É um critério de minimização, ou seja, quanto menor melhor.	1,0
C2	PIB per capita	Este critério irá avaliar o crescimento econômico em relação a população. Será considerado mais sustentável o país que obter uma melhor relação. É um critério de maximização, ou seja, quanto maior melhor.	1,0
C3	Intensidade energética	Este critério é representado pela razão entre o consumo total de energia de um país e o PIB da economia. Evidencia o grau de eficiência da utilização energética em relação à riqueza do país. Será considerado mais sustentável o país que obter melhor eficiência econômica. É um critério de minimização, ou seja, quanto menor melhor.	1,0
C4	Intensidade carbônica	Este critério é representado pela razão entre as emissões e o consumo total de energia, avalia a eficiência energética. Será considerado mais sustentável o país que obter um menor valor. É um critério de minimização, ou seja, quanto menor melhor.	1,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 2 são apresentados os dados da matriz de pagamento das alternativas, que são os países membros do G20, em relação a um conjunto de critérios, sendo as razões de cada critério com os fatores determinantes da identidade de Kaya.

Tabela 2 - Matriz de pagamento

<b>Crítérios/ Alternativas</b>	<b>Emissões de CO<sub>2</sub> (mín)</b>	<b>PIB per capita (máx)</b>	<b>Intensidade energética (mín)</b>	<b>Intensidade carbônica (mín)</b>
África do Sul	427,57	7,59	0,34	3,01
Alemanha	729,77	45,25	0,08	2,37
Arábia Saudita	531,46	21,31	0,33	2,40
Argentina	191,42	10,50	0,19	2,23
Austrália	380,93	61,72	0,08	3,04
Brasil	450,79	11,21	0,13	1,51
Canadá	549,23	50,11	0,15	2,03
China	9.040,74	6,50	0,33	3,04
Coreia do Sul	585,99	25,02	0,22	2,15
Estados Unidos	4.997,50	51,59	0,13	2,28
França	290,49	41,76	0,09	1,18
Índia	2.066,01	1,75	0,37	2,43
Indonésia	441,91	3,83	0,23	1,96
Itália	330,75	33,91	0,07	2,17
Japão	1.141,58	47,14	0,07	2,66
México	442,31	9,98	0,16	2,36
Reino Unido	389,75	41,20	0,07	2,16
Rússia	1.428,99	11,96	0,41	2,07
Turquia	317,22	14,04	0,12	2,46
União Europeia	1.504,35	28,57	0,10	2,11

Fonte: Elaborado pelo autor.

O cálculo do método é composto por 4 etapas (BRANS, VINCKE & MARESCHAL, 1986):

Primeiramente consiste em calcular a diferença de desempenho ( $\delta_{ik}$ ) da alternativa  $x_i$  com a alternativa  $x_k$  relativa a critério  $j$  e a função de preferência relativa ( $P$ ) de cada critério  $j$ . A preferência relativa é dada pela Equação (2).

$$P(x_i, x_k) = P_j(u_j(x_i) - u_j(x_k)) = P_j(\delta_{ik}) \quad (2)$$

A diferença para cada par de alternativas é representada pela Equação (3).

$$\delta_{ik} = u_j(x_i) - u_j(x_k) \quad (3)$$

Em seguida consiste em calcular o índice de preferência ( $S_{ik}$ ) da alternativa  $x_i$  comparada as demais alternativas  $x_k$ , este índice é representado pela Equação (4). Onde  $w_j$  é o peso de cada critério, sendo a importância que o decisor atribui ao critério.

$$S_{ik} = \frac{\sum_j w_j \cdot P(\delta_{ik})}{\sum_j w_j} \quad (4)$$

O terceiro passo representam os fluxos de superação. O primeiro na Equação (5), é o fluxo de superação positivo, ou fluxo de saída, que representa a intensidade de preferência de uma alternativa sobre todas as alternativas. O segundo na Equação (6), é o fluxo de superação negativo, ou fluxo de entrada, que representa a intensidade de preferência de todas as alternativas sobre uma das alternativas. Quanto maior o  $\phi^+$ , melhor a alternativa e quanto menor o  $\phi^-$ , melhor a alternativa (Vincke, 1992).

$$\Phi_i^+ = \sum_k S_{ik} \quad (5)$$

$$\Phi_i^- = \sum_k S_{ki} \quad (6)$$

O quarto e o último passo consiste em obter a ordenação geral das alternativas, utilizando o fluxo de superação líquido, que representa o balanço entre o poder e a fraqueza da alternativa. Ressaltando que quanto maior o fluxo líquido, melhor é o desempenho da alternativa, a equação do fluxo líquido é dada pela Equação (7).

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \quad (7)$$

Uma alternativa  $a$  sobreclassifica uma alternativa  $b$  se o fluxo líquido de  $a$  for maior que o fluxo líquido de  $b$ , isto é,  $\phi(a) > \phi(b)$ ,  $a$  é indiferente a  $b$  se seus fluxos líquidos forem iguais, isto é,  $\phi(a) = \phi(b)$ . A ordenação das alternativas é feita com base na ordem decrescente de seus respectivos fluxos líquidos, quanto maior o fluxo melhor a alternativa.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado, após aplicação da abordagem PROMETHEE II, é obtida uma ordenação dos países mais sustentáveis em ordem decrescente dos fluxos de importâncias líquidos ( $\phi$ ), ou seja, do mais sustentável até o menos sustentável em relação aos critérios definidos, conforme Tabela 3. Destacando-se na primeira posição do *ranking*, a França é considerada o país mais sustentável, de acordo com a modelagem aplicada, com fluxo líquido de 0,7025. A vigésima e última posição do *ranking* é ocupada pela China, sendo considerado o país menos sustentável com um fluxo líquido de -0,8347.

Tabela 3 - Ranking das alternativas e o fluxo líquido do Promethee II

Ranking	Alternativas	$\phi$
1	França	0,7025
2	Itália	0,5292
3	Reino Unido	0,5170
4	Canadá	0,3167

5	Austrália	0,3130
6	Brasil	0,1963
7	Alemanha	0,1470
8	Japão	0,1053
9	Turquia	0,0835
10	União Europeia	0,0752
11	Argentina	0,0738
12	Estados Unidos	0,0167
13	Coreia do Sul	-0,0668
14	Indonésia	-0,0938
15	México	-0,1855
16	Arábia Saudita	-0,2797
17	Rússia	-0,3178
18	África do Sul	-0,5099
19	Índia	-0,7879
20	China	-0,8347

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 1, é representado um gráfico de dispersão com o *ranking* dos 20 países analisados, no eixo das ordenadas encontra-se o *ranking* dos maiores PIBs e no eixo das abscissas encontra-se o *ranking* de sustentabilidade obtido no modelo PROMETHEE. Entre as vinte alternativas, a França obteve o melhor resultado, apresentando melhor desempenho em todos os critérios, destacando-se nas menores emissões de CO<sub>2</sub> e intensidade carbônica. No gráfico é possível observar que a França é a sexta maior economia do mundo e a primeira colocada em relação a sustentabilidade. Em seguida nas posições dos fluxos, Itália e Reino Unido também obtiveram em todos os critérios desempenhos positivos.

Com resultado inverso, a China apresentou o pior desempenho em todos os critérios, destacando-se nas maiores emissões e intensidade carbônica. No gráfico, a China ocupa a segunda posição no *ranking* dos maiores PIBs e a vigésima e última posição no *ranking* dos países mais sustentáveis. A Índia e a Arábia Saudita também obtiveram desempenhos negativos em todos os critérios. Analisando a economia, os Estados Unidos é o maior PIB do mundo e o segundo maior emissor de dióxido de carbono, ficando atrás apenas da China. Mas no *ranking* de sustentabilidade, ocupa a décima segunda posição, devido a sua grande relação PIB per capita.

Em relação ao critério emissão de CO<sub>2</sub>, o qual têm maior relevância neste trabalho, excluindo os países já mencionados, os países que apresentaram desempenhos positivos em relação a esse critério na ordem dos fluxos líquidos, foram: Austrália, Brasil, Turquia, Argentina, Indonésia, México e África do Sul. Apesar dos mesmos emitirem menos gases na atmosfera, eles apresentam forças e fraquezas nos outros critérios. De forma antagônica, os países que apresentaram desempenhos negativos em relação as emissões de CO<sub>2</sub>, foram: Canadá, Alemanha, Japão, os países que compõem a União Européia excluindo os que tem dupla participação no G20, Coreia do Sul e Rússia. Os mesmos também apresentaram comportamentos positivos e negativos em relação aos demais critérios, mesmo sendo os maiores emissores.

Além disso, o país com o menor PIB entre as 20 economias é a África do Sul, que também apresentou uma baixa posição no *ranking*, estando em décimo oitavo lugar em relação a sustentabilidade, conforme é observado na Figura 1. A Argentina, é o país que menos emitiu CO<sub>2</sub> entre as vinte economias, mas ocupa a décima primeira posição no *ranking* dos fluxos, pois tem baixo desempenho na relação PIB per capita e intensidade energética.

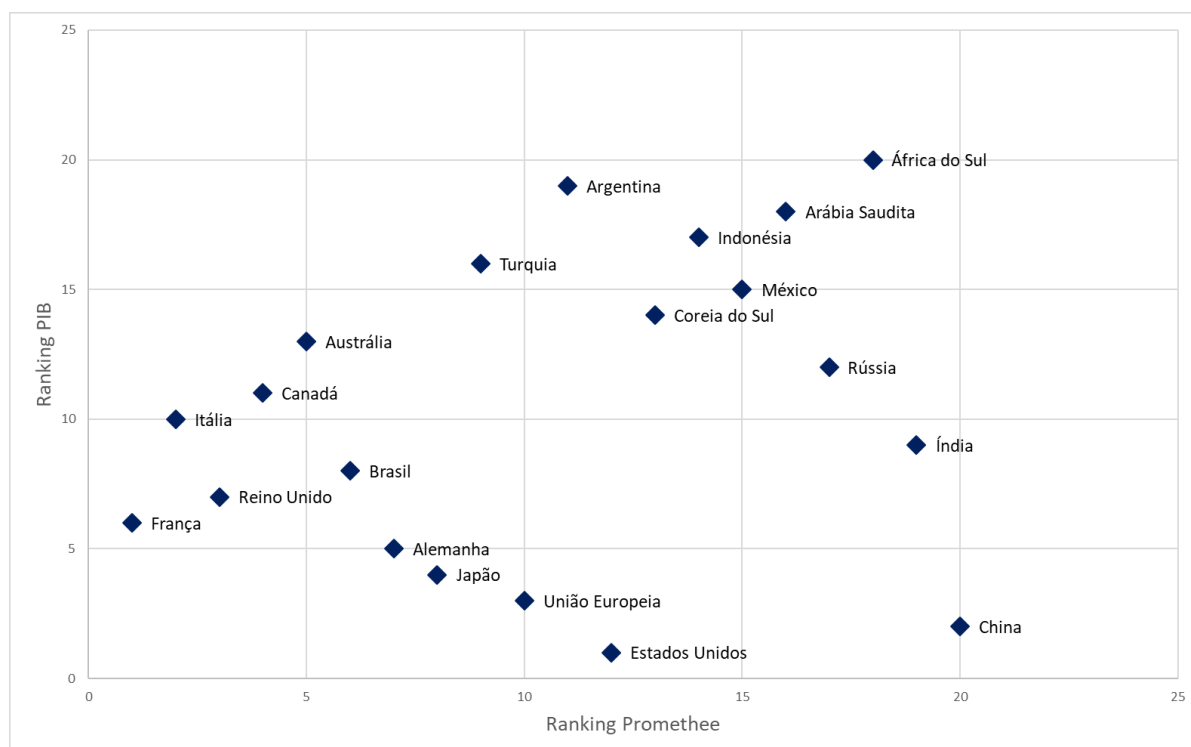


Figura 1 – Gráfico de dispersão entre *Rank PIB* e *Rank Promethee*  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme GVces (2015), a identidade de Kaya permite analisar o movimento desses indicadores, sendo fundamental para a proposição de políticas que contribuam com a redução ou limitação das emissões de GEE de forma mais intensa e ao menor custo, a fim de reverter os efeitos do crescimento da população e renda.

Analisando os resultados da modelagem com este indicador de intensidade, é possível verificar o comportamento ascendente ou descendente das curvas. Este comportamento indica a situação relativa do país em um determinado momento em relação ao ano-base de 1990 (índice = 1). O período analisado compreendeu de 1990 a 2015, com os dados disponíveis na base de dados da IEA. Abaixo, na Figura 2, é apresentado o comportamento dos países que ocuparam a primeira e última posição do *ranking* com a identidade de Kaya.

A França em 2015 foi um dos países que menos emitiram CO<sub>2</sub>, em relação aos vinte países analisados, perdendo apenas para a Argentina, o equivalente a 1,11% das emissões, conseqüentemente é observado no gráfico a redução das emissões e das intensidades energéticas e carbônicas ao decorrer dos anos, mantendo seu crescimento econômico. Em contrapartida, a China com seu desenvolvimento econômico, foi responsável em 2015 por 34,40% das emissões de CO<sub>2</sub>, representando a liderança das emissões em relação a todos os países do mundo. O que vem desencadeando um aumento de todos os fatores analisados, principalmente no PIB per capita, nas emissões e intensidades carbônicas. Em ambos os casos, a população apresenta com um crescimento constante.

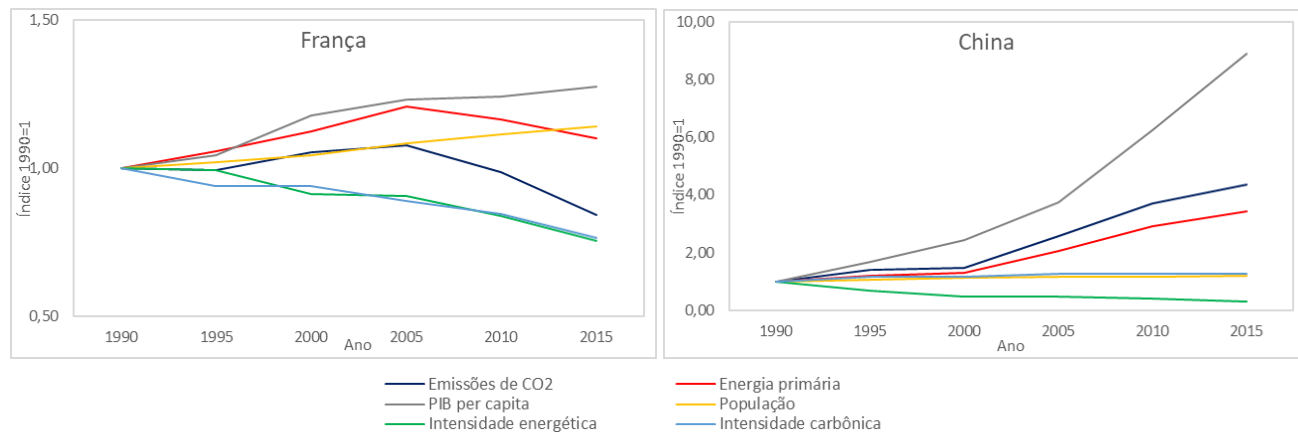


Figura 2 - Identidade de Kaya França e China.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

O crescimento econômico de um país implica no aumento do consumo de energia e de todas as pressões sobre o ambiente. É necessário aumentar a eficiência do setor energético e a substituição dos combustíveis de origem fóssil para os combustíveis de origem de fontes renováveis.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo o ranqueamento dos países membros do G20 mais sustentáveis em relação às emissões de CO<sub>2</sub> de acordo com os critérios econômicos, populacionais, energéticos e as emissões de dióxido de carbono do indicador identidade de Kaya. O objetivo foi alcançado através da aplicação do método PROMETHEE II, cujo primeiro lugar pertence à França e o último a China.

A partir deste resultado, pode-se verificar que a França adota práticas que garantem a ela a primazia da sustentabilidade entre as maiores economias do mundo. Com uma matriz energética predominante em energia nuclear e com políticas que promovem a redução dos impactos ambientais nas mudanças climáticas. Essas práticas fazem parte do projeto francês “Energy Transition for the Green Growth” (Transição Energética para o Crescimento Verde) que visa tornar o país um líder mundial no desenvolvimento sustentável, através da redução das emissões de gases do efeito estufa, da diversificação de seu modelo energético e do aumento do desenvolvimento de energias renováveis (Gouvernement.fr, 2018).

Em contrapartida, a China sendo a maior população do mundo e com um crescimento econômico notável, enfrenta o grande desafio de manter seu desenvolvimento econômico aliado a sustentabilidade. Uma das características que mais contribuem para as emissões de CO<sub>2</sub> é a representatividade do consumo de carvão na sua matriz energética, pois além de ser o maior produtor de carvão, também é o maior importador desta fonte segundo o relatório *Key world energy statistics*, disponível na base IEA (2018).

Por fim, este trabalho é capaz de fornecer um instrumento de ordenação para resultados como esse e análises que visam à contribuição para a sustentabilidade, como determinação de melhores fontes energéticas, diante de fatores econômicos, ambientais e sociais.



## REFERÊNCIAS

- Almeida, A. T. (2013), “*Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério*”, São Paulo: Atlas.
- BRANS, J. P.; VINCKE, P. H. (1985), “*A preference ranking organization method, the PROMETHEE method for multiple criteria decision-making*”, *Management. Science*, v. 31, p. 647-656.
- BRANS, J. P.; VINCKE, P.; MARESCHAL, B. (1986), “*How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method*”, *European Journal of Operational Research*, v. 24, p. 228-238.
- Ehrlich, P., & Holdren, J. (1971), “*Impact of population growth*”, *Science*, 171(3977), pp. 1212-1217.
- GVces (2015), “*Aplicação de Indicadores de Intensidade em Instrumentos Econômicos*”, Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas. São Paulo, p. 143.
- Gouvernement.fr (2018). Disponível em: <<https://www.gouvernement.fr/en/energy-transition>> Acesso em: 15 de agosto. 2018.
- G20 (2018). Disponível em: <<https://www.g20.org/>>. Acesso em: 15 de agosto.2018.
- Henriques, S. T., & Borowiecki, K. J. (2014), “*The Drivers of Long-run CO2 Emissions: A Global Perspective since 1800*”, *Trinity Economics Papers*, pp. 1-45.
- IEA. International Energy Agency (2018). Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/>>. Acesso em: 16 de julho. 2018.
- Itamaraty (2018). Disponível em: <<http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/diplomacia-economica-comercial-e-financeira/15586-brasil-g20>>. Acesso em: 15 de agosto.2018.
- Kaya, Y. (1989), “*Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: interpretation of proposed scenarios*”, Intergovernmental Panel on Climate Change/Response Strategies Working Group May.
- VINCKE, P. (1992), “*Multicriteria decision-aid.*”, Londres: John Wiley & Sons.
- WANG, Q.; LI, R.; LIAO, H. (2016), “*Toward Decoupling: Growing GDP without Growing Carbon Emissions*”, *Environmental Science and Technology*, v. 50, n. 21, p. 11435–11436.

## **COUNTRY'S CO<sub>2</sub> EMISSIONS RANKING USING KAYA IDENTITY: G20 MULTICRITERIA MODELING**

**Abstract.** *The constant search for sustainable development motivated the elaboration of this work, which purpose to build a ranking of the most sustainable countries in relation to CO<sub>2</sub> emissions, according to the criteria established in the Kaya identity indicator. For the study, the economic bloc G20 was selected due to its representativeness in the world scenario, with application of the multicriteria method PROMETHEE II for the country order, whose data were obtained from the International Energy Agency. As a result, the five best positions in the ranking are represented by countries with excellent economic projections and energy efficiency according to the criteria.*

**Keywords:** *CO<sub>2</sub> emissions, Kaya, G20, PROMETHEE II*