

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA  
E TECNOLOGIA FLUMINENSE**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À  
ENGENHARIA E GESTÃO**

**Leila de Matos Abreu**

**O USO DO MÉTODO PROMETHEE NO SETOR DE ENERGIA:  
ESTUDOS DE CASOS NOS PAÍSES DO G20 E NA REGIÃO NORTE  
FLUMINENSE**

**Campos dos Goytacazes/RJ**

**2020**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA  
E TECNOLOGIA FLUMINENSE**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À  
ENGENHARIA E GESTÃO**

**LEILA DE MATOS ABREU**

**O USO DO MÉTODO PROMETHEE NO SETOR DE ENERGIA: ESTUDOS DE CASOS  
NOS PAÍSES DO G20 E NA REGIÃO NORTE FLUMINENSE**

**Milton Erthal Junior**

**(Orientador)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, no Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão (MPSAEG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão.

**Campos dos Goytacazes/RJ**

**Outubro de 2020**

Biblioteca Anton Dakitsch  
CIP - Catalogação na Publicação

A162u

Abreu, Leila de Matos

O Uso do Método Promethee no Setor de Energia: Estudos de Casos nos Países do G20 e na Região Norte Fluminense / Leila de Matos Abreu - 2020.

50 f.: il. color.

Orientadora: Milton Erthal Junior

Dissertação (mestrado) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campus Campos Centro, Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão, Campos dos Goytacazes, RJ, 2020.

Referências: f. 47 a 48.

1. Emissões de CO2. 2. Energia Renovável. 3. Multicritério. 4. Identidade de Kaya. 5. Sustentabilidade. I. Erthal Junior, Milton, orient. II. Título.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
FLUMINENSE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À  
ENGENHARIA E GESTÃO

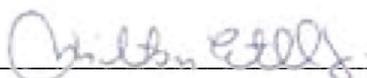
Leila de Matos Abreu

O USO DO MÉTODO PROMETHEE NO SETOR DE ENERGIA: ESTUDOS DE CASOS  
NOS PAÍSES DO G20 E NA REGIÃO NORTE FLUMINENSE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, no Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão (MPSAEG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão.

Aprovado (a) em 08 de outubro de 2020.

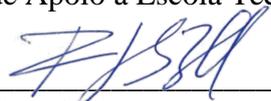
Banca Examinadora:



Milton Erthal Junior, Doutor em Produção Vegetal (UENF)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense  
(Orientador)



Claudio Luiz Melo de Souza, Doutor em Produção Vegetal (UENF)  
Fundação de Apoio à Escola Técnica - FAETEC



Renato Gomes Sobral Barcellos, Doutor em Geociências (UFF)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense



Luiz Fernando Rosa Mendes, Doutor em Ciências Naturais (UENF)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me dado saúde e força para superar todos os obstáculos enfrentados até aqui.

Agradeço a minha família, em especial a minha mãe Dulcilene e minha irmã Maria Letícia, por todo apoio, dedicação, compreensão e palavras de incentivo durante toda essa trajetória para a conclusão de mais uma etapa importante na minha vida.

Ao meu orientador Milton Erthal, por todas suas contribuições, paciência, conselhos e incentivo que foram fundamentais para o alcance dos objetivos deste trabalho e para o meu crescimento profissional e pessoal.

Por fim, agradeço a todos colegas e professores do mestrado pela troca de experiências e ensinamentos.

Muito obrigada a todos!

## RESUMO

Em razão das mudanças climáticas originadas principalmente do uso de combustíveis fósseis e com impactos em diversos aspectos da vida, alterar os padrões atuais de consumo e de como a energia é utilizada consiste num desafio para todos. Este trabalho tem como objetivo propor a aplicação de um método multicritério para soluções no setor energético, na primeira parte foram elencados os países do grupo das vinte maiores economias mundiais (G20) quanto a sua sustentabilidade e na segunda parte foi identificada a fonte renovável mais adequada para a Região Norte Fluminense. Por meio de dados públicos e dados obtidos através de avaliação com especialistas, o método de análise decisória *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE), foi aplicado utilizando como métricas os critérios do indicador Identidade de Kaya e critérios de potencialidades para implantação das fontes renováveis. Os resultados apontam que entre as maiores economias, a França encontra-se na liderança da sustentabilidade, e para a Região Norte Fluminense a energia fotovoltaica foi classificada como a melhor fonte sustentável para a região. O método empregado nesse trabalho de auxílio da tomada de decisões, poderá servir como suporte para futuros trabalhos relacionados no setor energético.

**Palavras-chave:** Emissões de CO<sub>2</sub>, Energia Renovável, Identidade de Kaya, Multicritério, Promethee, Sustentabilidade.

## ABSTRACT

Due to the climate changes originating mainly from the use of fossil fuels and with impacts on several aspects of life, changing the current consumption patterns and how energy is used is a challenge for everyone. This work aims to propose the application of a multicriteria method for solutions in the energy sector, in the first part the countries of the group of the twenty largest world economies (G20) were listed regarding their sustainability and in the second part the most suitable renewable source was identified for the Norte Fluminense Region. Through public data and data obtained through evaluation with specialists, the Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE) decision analysis method was applied using as metrics the criteria of the Kaya Identity indicator and potentiality criteria for the implantation of renewable sources. The results show that among the largest economies, France is the leader in sustainability, and for the Norte Fluminense Region photovoltaic energy was classified as the best sustainable source for the region. The method used in this work to assist in decision making, can serve as support for future works related to the energy sector.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> emissions, Renewable energy, Kaya Identity, Multicriteria, Promethee, Sustainability.

## LISTAS

### Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> – Etapas da pesquisa - G20	23
<b>Figura 2</b> – Resultado dos fluxos líquidos	26
<b>Figura 3</b> – Gráfico de dispersão entre Rank PIB e Rank PROMETHEE	27
<b>Figura 4</b> – Desenvolvimento dos Índices de Kaya para a França	29
<b>Figura 5</b> – Desenvolvimento dos Índices de Kaya para a China	29
<b>Figura 6</b> – Intensidade das Emissões de CO <sub>2</sub> (a) e Matriz Energética (b)	30
<b>Figura 7</b> – Mapa ranking dos países do G20	31
<b>Figura 8</b> – Matriz Elétrica Mundial (2016) e Matriz Elétrica Brasileira (2017)	36
<b>Figura 9</b> – Etapas da pesquisa – Energia Norte Fluminense (NF)	38
<b>Figura 10</b> – Matriz Elétrica Rio de Janeiro e Norte Fluminense	41
<b>Figura 11</b> – Ranking das fontes de energia	42
<b>Figura 12</b> – Potencialidade e Estabilidade na Geração das fontes de energia	43
<b>Figura 13</b> – Viabilidade Econômica e Viabilidade Técnica das fontes de energia	43
<b>Figura 14</b> – Impactos Ambientais e Impactos Sociais das fontes de energia	44

## **Lista de Quadros**

<b>Quadro 1</b> – Critérios de Avaliação – Identidade de Kaya	24
<b>Quadro 2</b> – Critérios de Avaliação – Energia	39

## **Lista de Tabelas**

<b>Tabela 1</b> – Matriz de pagamento – Países G20	25
<b>Tabela 2</b> – Ranking das alternativas e o fluxo líquido do Promethee II – Países G20	26
<b>Tabela 3</b> – Índice de Renovabilidade	40
<b>Tabela 4</b> – Matriz de pagamento – Energia NF	41

## **Lista de Siglas**

**AHP** – Analytical Hierarchy Process

**AMD** – Apoio Multicritério a Decisão

**ANEEL** – Agência Nacional de Energia Elétrica

**BEN** – Balanço Energético Nacional

**BIG** – Banco de Informações de Geração

**CO<sub>2</sub>** – Dióxido de Carbono

**CH<sub>4</sub>** – Metano

**ELECTRE** – Elimination Et Choix Traduisant la Réalité

**EPE** – Empresa de Pesquisa Energética

**G20** – Grupo das vinte maiores economias mundiais

**GEE** – Gases do Efeito Estufa

**IEA** – International Energy Agency

**IPCC** – Intergovernmental Panel on Climate Change

**IRENA** – International Renewable Energy Agency

**LMDI** – Logarithmic Mean Divisia Index

**MCDA** – Multicriteria Decision Analysis

**N<sub>2</sub>O** – Óxido Nitroso

**O<sub>3</sub>** – Ozônio

**PIB** – Produto Interno Bruto

**PROMETHEE** – Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation

**RJ** – Rio de Janeiro

**ODS** – Objetivo do Desenvolvimento Sustentável

**ONU** – Organização das Nações Unidas

**NF** – Norte Fluminense

**WEF** – World Economic Forum

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	Contextualização.....	14
1.2	Objetivo Geral .....	15
1.3	Objetivos Específicos .....	15
1.4	Justificativa .....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	17
2.1	Apoio Multicritério a Decisão – AMD .....	17
2.2	Método Multicritério PROMETHEE .....	17
3	ARTIGO 1 – RANQUEAMENTO DOS PAÍSES EMISSORES DE CO <sub>2</sub> A PARTIR DA IDENTIDADE DE KAYA: MODELAGEM MULTICRITÉRIO DO G20 .....	20
3.1	Introdução .....	22
3.2	Metodologia .....	23
3.3	Resultados e Discussão .....	25
3.3.1	<i>Ranking</i> de Sustentabilidade .....	25
3.3.2	Análise da Identidade de Kaya .....	28
3.4	Conclusão .....	31
3.5	Referências Bibliográficas .....	32
4	ARTIGO 2 – ANÁLISE MULTICRITÉRIO DE POTENCIALIDADES PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL NA REGIÃO NORTE FLUMINENSE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO .....	34
4.1	Introdução .....	36
4.2	Metodologia .....	37
4.3	Resultados e Discussão .....	40
4.3.1	Índice de Renovabilidade .....	40
4.3.2	Método Multicritério .....	41

4.3.3	Análise das Fontes de Energia Renováveis .....	42
4.4	Conclusão .....	44
4.5	Referências Bibliográficas .....	45
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	46
6	REFERÊNCIAS.....	47
	APÊNDICE (A) - QUESTIONÁRIO.....	49

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

O maior desafio enfrentado pelas economias mundiais consiste no estabelecimento de uma relação equilibrada entre a preservação da biodiversidade e o crescimento econômico humano, visto que o abastecimento e a manutenção da crescente população mundial e a sua incessante busca por riquezas implica em uma exploração excessiva dos recursos naturais renováveis e não renováveis. Nesse sentido, a sustentabilidade não se limita apenas as suas três perspectivas, econômica, social e ambiental, ela também auxilia como horizonte para a sociedade em um tempo de intensas desigualdades econômicas e sociais e elevado impacto ambiental (SOTTO et al., 2019).

O conceito do desenvolvimento sustentável foi apresentado pela ONU - Organização das Nações Unidas, na conhecida Comissão de Brundtland em 1987 com o relatório intitulado “Nosso Futuro Comum”, o qual definiu o princípio sustentável como “o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades” (WCED, 1987).

É importante ressaltar que dois terços das emissões globais dos Gases do Efeito Estufa (GEE), resultam da produção e utilização de energia, colocando o setor no centro da ação climática (GIELEN et al., 2019). Em 2015, no tratado do Acordo de Paris, os países se comprometeram a manter o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2 °C acima dos níveis pré-industriais, com esforços para limitar o aquecimento a 1,5 °C (IPCC, 2018).

Em decorrência das graves mudanças climáticas e visando amenizar a intensidade e frequência de seus efeitos que abrangem eventos extremos nos recursos, nos ecossistemas e na biodiversidade, a ONU adotou em 2015, os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2015). Entre eles, destaca-se o ODS7 – Energia limpa e acessível, que tem como uma das metas da Agenda de 2030, aumentar a parcela da energia renovável na matriz energética global, que está alinhado com o enfrentamento eficaz da problemática ambiental abordada nesta pesquisa.

As energias limpas são obtidas através de fontes renováveis, pois reduzem as emissões de gases poluentes, melhoram a economia, e não acarretam grandes impactos ao ambiente. Segundo relatório da IRENA - *International Renewable Energy Agency* ou Agência Internacional para Energias Renováveis, a utilização das energias renováveis, a redução da

demanda e o aumento da eficiência energética, juntos podem ser responsáveis por mais de 80% das reduções de emissões de CO<sub>2</sub> atuais necessárias nos principais setores das indústrias e dos transportes (IRENA, 2020).

A transição energética dos combustíveis fósseis para os de baixo carbono, constitui o objetivo central de todas as políticas destinadas na descarbonização e pode ser amplamente alcançado por implantação acelerada de tecnologias de energia renovável e medidas de eficiência energética (NEOFYTOU; NIKAS; DOUKAS, 2020).

Nesse contexto, este trabalho apresenta por meio de dois artigos e uma breve revisão do método de decisão, uma análise de sustentabilidade e estudo de caso com aplicabilidade de métodos multicritérios no setor energético. Pretende, assim, agregar conhecimento para novos estudos e uso do método no setor de energia.

## 1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar um diagnóstico da matriz energética dos países do G20 e da região Norte Fluminense do Estado do Rio de Janeiro (RJ). O indicador de identidade de Kaya e o método PROMETHEE de auxílio multicritério a decisão foram empregados para ranquear os países do G20 quanto a sustentabilidade energética. Ademais, um estudo de caso foi conduzido na região Norte Fluminense do Estado do Rio de Janeiro, para embasar a expansão de projetos de geração de energia elétrica renovável nesta região.

## 1.3 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, destacam-se como objetivos específicos do trabalho:

- i. Apresentar um *ranking* de sustentabilidade dos países mais sustentáveis em relação as emissões de CO<sub>2</sub>;
- ii. Realizar análise de comparação entre os países que ocupam o primeiro e último lugar conforme *ranking*;
- iii. Analisar o indicador identidade de Kaya, conforme critérios econômicos, populacionais, energéticos e as emissões de dióxido de carbono das maiores economias do mundo;
- iv. Analisar o índice de renovabilidade energética da matriz elétrica da região em estudo;
- v. Propor uma classificação ordenada das alternativas para a geração de energia elétrica;
- vi. Identificar, segundo a visão de especialistas de área de energia, qual a melhor fonte de geração de energia renovável para a região Norte Fluminense do Estado do Rio de Janeiro,

sendo analisada as potencialidades de geração, viabilidades técnicas e econômicas, impactos ambientais e sociais para aproveitamento da geração de energia elétrica.

#### **1.4 Justificativa**

O presente trabalho justifica-se pela a importância da temática do desenvolvimento sustentável, especificamente no setor de energia, com aplicabilidade de um método de análise decisória. Na primeira pesquisa a implementação do indicador de sustentabilidade Identidade de Kaya para determinação de uma ordenação de países mais sustentáveis e na segunda à análise de critérios para a escolha de melhor fonte de energia renovável para a região. Ambos estudos podem contribuir como metodologia para aplicabilidade em futuros trabalhos e/ou para futuros planejamentos energéticos da região.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Apoio Multicritério a Decisão – AMD

Os métodos MCDA – *Multicriteria Decision Analysis* ou Apoio Multicritério à Decisão (AMD), fornecem suporte à tomada de decisão, são métodos estruturados e são utilizados para resolver problemáticas em que o decisor necessita analisar um conjunto de alternativas em relação a diferentes critérios, com capacidade de avaliar de forma subjetiva ou objetiva (ALMEIDA, 2013; GOMES, 2019).

Na literatura há diversos métodos de análise decisória, como base duas escolas são destacadas como referências para esses métodos, são essas a escola americana e a escola francesa (escola europeia) (GOMES; COSTA, 2013).

O principal método da escola americana é o método AHP (*Analytical Hierarchy Process*) ou Método da Análise Hierárquica (SAATY, 1991), que propõe o tratamento de problemas de escolhas complexos de forma simples (COSTA; MOLL, 1999).

Na escola francesa os principais métodos são os métodos ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*) desenvolvido por Bernard Roy em 1968, a família deste método é aplicada na resolução de problemas que envolvem decisão: escolha, classificação e ordenação (ROY, 1996). Outro método desta escola é o PROMETHEE (BRANS; VINCKE, 1985) com aplicações semelhantes ao ELECTRE.

### 2.2 Método Multicritério PROMETHEE

O método multicritério da família PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) desenvolvido por Brans e Vincke (1985) é um método de auxílio à tomada de decisão que tem como objetivo construir uma relação de sobreclassificação de valores para ordenação. Ou seja, esta relação de superação, adiciona informações entre as alternativas e os critérios, o método usa esse relacionamento para apoiar a decisão (MELO; MEDEIROS; ALMEIDA, 2013).

O método PROMETHEE possui sete variáveis (I, II, III, IV, V, VI e Gaia) que representam diferentes características metodológicas e objetivos (BRANS, MARESCHAL, 2005; ALMEIDA; COSTA, 2002).

- PROMETHEE I - A interseção entre os fluxos anteriores estabelece uma relação de sobreclassificação parcial entre as alternativas;

- PROMETHEE II - Classifica as alternativas, estabelecendo uma ordem decrescente, estabelece uma ordem completa entre as alternativas;
- PROMETHEE III - Ampliação da noção de indiferença, tratamento probabilístico dos fluxos (preferência intervalar);
- PROMETHEE IV - Pré-ordem completa ou parcial, destinada à problemática de escolha e ordenação em situações onde o conjunto de soluções viáveis é contínuo;
- PROMETHEE V - Nesta implementação, após estabelecer uma ordem completa entre as alternativas, são introduzidas restrições, identificadas no problema para as alternativas selecionadas, incorporando uma filosofia de otimização inteira;
- PROMETHEE VI - Pré-ordem completa ou parcial; problemática de escolha e ordenamento. Destinado às situações em que o decisor não consegue estabelecer um valor fixo de peso para cada critério;
- PROMETHEE Gaia - análise geométrica para assistência interativa.

O cálculo do método PROMETHEE II 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 (1). A função de preferência fornece a intensidade de preferência de uma alternativa  $a$  sobre outra  $b$  em relação a um dado critério.

$$P(x_i, x_k) = P_j(u_j(x_i) - u_j(x_k)) = P_j(\delta_{ik}) \quad \text{Equação (1)}$$

A diferença para cada par de alternativas é representada pela Equação (2).

$$\delta_{ik} = u_j(x_i) - u_j(x_k) \quad \text{Equação (2)}$$

Em seguida calcula-se o índice de preferência ( $S_{ik}$ ) da alternativa  $x_i$  comparada as demais alternativas  $x_k$ , este índice é representado pela Equação (3). Onde  $w_j$  é o peso de cada critério, sendo a importância que o decisor atribui ao critério.

$$S_{ik} = \frac{\sum_j w_j \cdot P(\delta_{ik})}{\sum_j w_j} \quad \text{Equação (3)}$$

O terceiro passo representa os fluxos de superação. O primeiro na Equação (4), 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 (5), 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.

$$\Phi_i^+ = \sum_k S_{ik} \quad \text{Equação (4)}$$

$$\Phi_i^- = \sum_k S_{ki} \quad \text{Equação (5)}$$

O quarto e o último passo permitem obter a ordenação geral das alternativas, utilizando o fluxo de superação ou fluxo líquido dado na Equação (6), que representa o resultado entre a força e a fraqueza da alternativa.

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \quad \text{Equação (6)}$$

A ordenação das alternativas é feita com base na ordem decrescente de seus respectivos fluxos líquidos, que quanto maior for o fluxo, melhor é o desempenho da alternativa, e quando os fluxos líquidos são iguais, as alternativas são indiferentes entre elas.

### **3 ARTIGO 1 – RANQUEAMENTO DOS PAÍSES EMISSORES DE CO<sub>2</sub> A PARTIR DA IDENTIDADE DE KAYA: MODELAGEM MULTICRITÉRIO DO G20**

#### **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 de decisão PROMETHEE II para a ordenação dos países, a partir de dados 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.

## 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 block G20 was selected due to its representativeness in the world scenario, with application of the multi-criteria decision method PROMETHEE II for the country order, based on data 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.

### 3.1 Introdução

As questões acerca do desenvolvimento sustentável, que 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 é a intensificação dos Gases de Efeito Estufa (GEE), sendo os principais gases o CO<sub>2</sub>, este o mais relevante, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, vapor d'água entre outros em menores quantidades (GOLDEMBERG; LUCON, 2007a). No entanto, recentes políticas ambientais e econômicas mais rigorosas vêm sendo implementadas a fim de reduzir essas emissões. Atualmente, estudos demonstram uma tendência do desacoplamento das emissões de CO<sub>2</sub> e o Produto Interno Bruto (PIB) de diversos países, este fenômeno ocorre quando a pressão ou impacto ambiental é menor que sua força econômica, 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, Brasil, Canadá, China, Coreia do Sul, 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 GEE, conferindo-lhes significativa influência sobre a gestão do sistema financeiro e da economia global (Itamaraty, 2018).

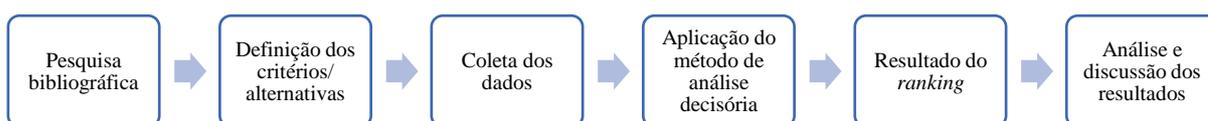
Os Métodos de Apoio Multicritério à Decisão (AMD), consistem em formulações metodológicas ou teorias, com estruturas axiomáticas bem definidas, que podem ser utilizadas para a formação de um modelo de decisão visando a solução de um problema (ALMEIDA, 2013). A modelagem da identidade de Kaya proporciona forte utilidade ao permitir o cálculo das emissões a partir das previsões existentes acerca de taxa de crescimento populacional, econômico, de consumo energético por unidade de PIB e de emissões de CO<sub>2</sub> por unidade de

energia (BUDZIANOWSKI, 2013). Esta ferramenta vem sendo utilizada para projetar emissões futuras de GEE em diversas projeções climáticas.

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 CO<sub>2</sub>, aplicando a modelagem multicritério PROMETHEE II para realizar a ordenação dos países membros do bloco econômico G20, devido sua representatividade no cenário mundial.

### 3.2 Metodologia

Nesse trabalho foram seguidas algumas etapas para construir um *ranking* dos países mais sustentáveis à luz dos critérios estabelecidos. A pesquisa foi organizada e estruturada conforme as etapas sequenciais apresentadas na Figura 1.



**Figura 1** – Etapas da pesquisa - G20

As pesquisas foram realizadas em bases públicas internacionais com levantamento de dados em relação aos indicadores deste estudo, revisões bibliográficas em artigos publicados nas bases científicas Scopus® e Science Direct® com temáticas relacionadas a métodos multicritérios e indicadores de sustentabilidade, conforme as palavras-chave: “*multicriteria*”, “*promethee*” e “*kaya identity*”.

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 2017 (IEA, 2020).

A identidade de Kaya é uma extensão da identidade IPAT, em que as forças de população (P), afluência (A) e tecnologia (T) causam impacto ambiental (I), essa afluência está ligada ao consumo ou renda/produto per capita, conceito inicialmente desenvolvido por Ehrlich & Holdren (1971). A identidade de Kaya (KAYA, 1989), é uma decomposição matemática utilizada para estabelecer uma relação entre as emissões de CO<sub>2</sub> produzidas pelas atividades da

humanidade e quatro fatores importantes: demográfico, econômico, intensidade energética e intensidade carbônica, conforme Equação (7) (TAVAKOLI, 2018).

$$C = P \times \frac{PIB}{P} \times \frac{E}{PIB} \times \frac{C}{E} \quad \text{Equação (7)}$$

Onde  $C$  é a taxa de emissão de dióxido de carbono ( $MtCO_2$ );  $P$  é a população em milhões de pessoas;  $PIB/P$  é a relação per capita do Produto Interno Bruto (1 bilhão de dólares americanos em 2010 por habitante); a relação  $E/PIB$  é a intensidade energética, ou seja, a produção de energia primária (Mtep) por unidade de  $PIB$  (tep/mil dólares americanos em 2010), sendo a unidade *tep* – tonelada equivalente de petróleo; e a relação  $C/E$  é a intensidade carbônica, ou seja, as emissões de carbono por unidade de energia produzida ( $tCO_2/tep$ ).

Na literatura há outras atualizações mais recentes deste indicador como o LMDI - *Logarithmic Mean Divisia Index* - Índice de Divisia de Média Logarítmica para a análise de decomposição e a extensão do indicador da Identidade de Kaya a fim de contabilizar não apenas pela contribuição dos combustíveis fósseis, mas também para a análise das fontes de energias renováveis (LIMA et al., 2016). Este estudo aplica a abordagem tradicional do método.

Nesta pesquisa é utilizado o método MCDA – *Multi-Criteria Decision Analysis* da família PROMETHEE (BRANS & 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 definido, o modelo é composto por vinte alternativas e quatro critérios conforme no Quadro 1, no qual são apresentados os critérios de avaliação com suas respectivas descrições e pesos. Não há distinção de pesos entre os critérios.

**Quadro 1** – Critérios de Avaliação – Identidade de Kaya

ID	Critérios	Descrição	Peso
C1	Emissões de CO <sub>2</sub>	Avalia a emissão de dióxido de carbono emitido por combustíveis fósseis e demais fontes. 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 à 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	Representa a razão entre a geração 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
----	-----------------------	--	-----

Na Tabela 1 são apresentados os dados da matriz de pagamento das alternativas, que são os países membros do G20, em relação a um conjunto de quatro critérios, sendo os quocientes dos fatores determinantes da identidade de Kaya. Para o estudo, foram considerados quatro dos sete critérios do indicador, não sendo analisado isoladamente população, PIB e energia primária, pois estes critérios compõem as razões analisadas do indicador, como PIB per capita, intensidade energética e intensidade carbônica. Apenas as emissões de carbono foram utilizadas individualmente, pois é o elemento principal da problemática.

**Tabela 1** – Matriz de pagamento – Países G20

<b>Critérios/ Alternativas</b>	<b>Emissões 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	421,68	7,53	0,31	3,19
Alemanha	718,79	46,99	0,08	2,31
Arábia Saudita	532,18	20,77	0,31	2,52
Argentina	183,38	10,40	0,19	2,15
Austrália	384,58	63,98	0,08	3,03
Brasil	427,63	10,89	0,13	1,47
Canadá	547,80	51,27	0,15	1,90
China	9.257,93	7,33	0,30	3,02
Coreia do Sul	600,03	26,16	0,21	2,13
Estados Unidos	4.761,30	53,22	0,12	2,21
França	306,12	42,87	0,09	1,24
Índia	2.161,57	1,96	0,34	2,45
Indonésia	496,41	4,13	0,22	2,03
Itália	321,48	35,03	0,07	2,10
Japão	1.132,44	48,47	0,07	2,62
México	445,99	10,42	0,14	2,48
Reino Unido	358,73	42,68	0,06	2,04
Rússia	1.536,88	11,63	0,44	2,10
Turquia	378,63	15,02	0,12	2,58
União Europeia	1.504,15	30,19	0,10	2,06

Fonte: Dados IEA (IEA, 2020)

### 3.3 Resultados e Discussão

#### 3.3.1 *Ranking* de Sustentabilidade

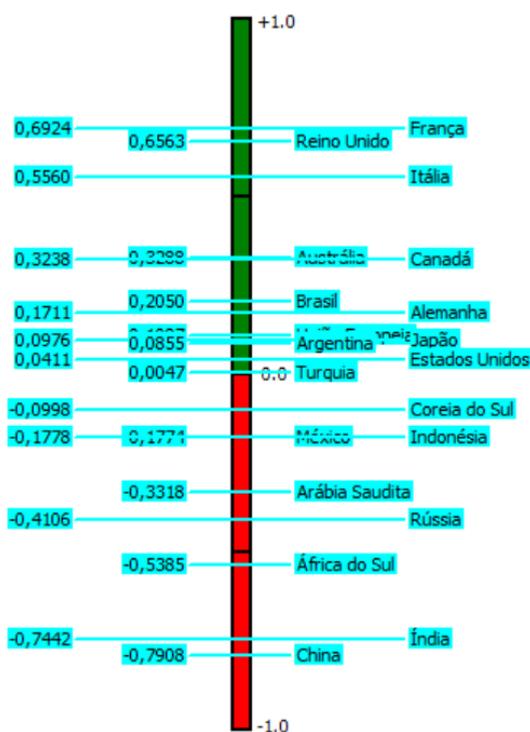
Como resultado, após aplicação da abordagem PROMETHEE II, é obtida uma ordenação dos países mais sustentáveis em ordem decrescente dos fluxos de importâncias líquidos ( $\phi$ ), ou seja, do mais sustentável até o menos sustentável em relação aos critérios definidos, conforme Tabela 2 e representação gráfica do software na Figura 2. Destacando-se na primeira posição do *ranking*, a França. Ela é considerada a nação mais sustentável de acordo com a modelagem

aplicada, com fluxo líquido de 0,6924. A vigésima e última posição do *ranking* é ocupada pela China, sendo considerado o país menos sustentável com um fluxo líquido de -0,7908.

**Tabela 2** – Ranking das alternativas e o fluxo líquido do Promethee II – Países G20

Ranking	Alternativas	$\phi$
1	França	0,6924
2	Reino Unido	0,6563
3	Itália	0,5560
4	Austrália	0,3288
5	Canadá	0,3238
6	Brasil	0,2050
7	Alemanha	0,1711
8	União Europeia	0,1087
9	Japão	0,0976
10	Argentina	0,0855
11	Estados Unidos	0,0411
12	Turquia	0,0047
13	Coreia do Sul	-0,0998
14	México	-0,1774
15	Indonésia	-0,1778
16	Arábia Saudita	-0,3318
17	Rússia	-0,4106
18	África do Sul	-0,5385
19	Índia	-0,7442
20	China	-0,7908

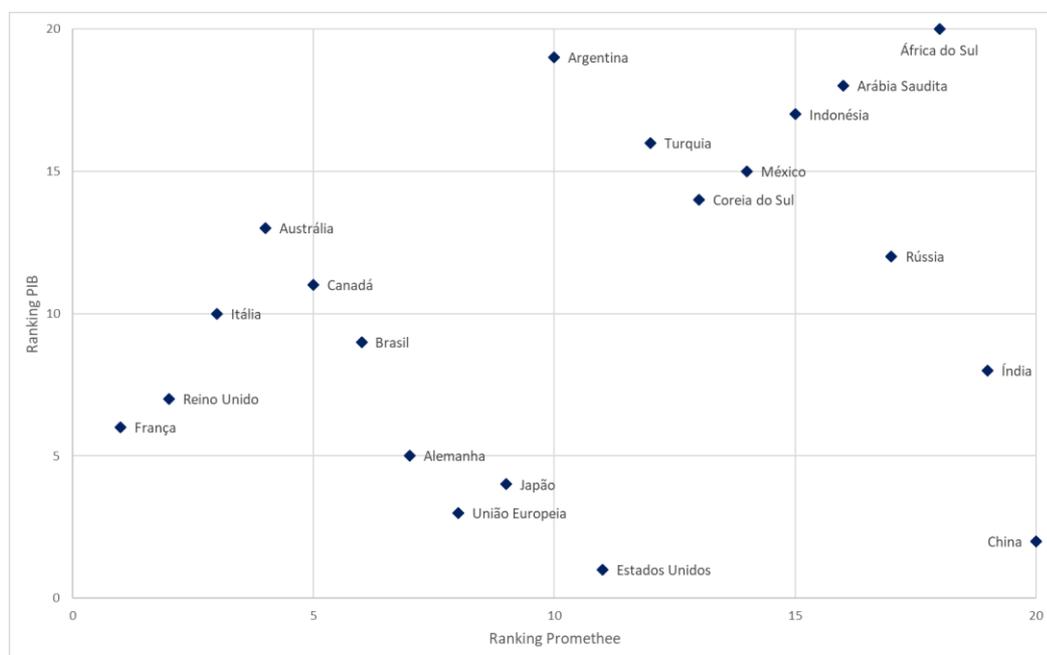
Fonte: Dados aplicados no *Visual Promethee*



**Figura 2** – Resultado dos fluxos líquidos  
Fonte: Dados aplicados no *Visual Promethee*

Na Figura 3, é representado um gráfico de dispersão com o *ranking* dos 20 países analisados, no eixo das ordenadas encontra-se o *ranking* das maiores economias do mundo 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, Reino Unido, com melhor intensidade energética e Itália, ambos países 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 de CO<sub>2</sub> e intensidade carbônica. No gráfico, a China ocupa a segunda posição no *ranking* dos maiores PIB 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, a Índia sendo ressaltada como a pior relação econômica por habitante. Analisando a economia, os Estados Unidos é o maior PIB do mundo e o segundo maior emissor de CO<sub>2</sub>, ficando atrás apenas da China, porém no *ranking* de sustentabilidade, ocupa a décima primeira posição, devido a sua grande relação PIB per capita.



**Figura 3** – Gráfico de dispersão entre Rank PIB e Rank PROMETHEE

Em relação ao critério emissão de CO<sub>2</sub>, que tem 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, Argentina, Turquia, México, Indonésia e África do Sul. Apesar dos mesmos emitirem menos gases na atmosfera, eles apresentam forças e fraquezas nos demais critérios econômicos e energéticos. A Argentina obteve a maior relevância sustentável em relação as emissões, sendo a menor do grupo de países, e a Austrália se sobressai na correlação PIB per capita. De forma antagônica, os demais países que apresentaram desempenhos negativos em relação as emissões de CO<sub>2</sub>, foram: Canadá, Alemanha, União Europeia, Japão, Coreia do Sul e Rússia. Os mesmos também apresentaram comportamentos positivos e negativos em relação aos demais critérios, mesmo sendo os maiores emissores, a Rússia com maior evidência pela pior intensidade energética. Foram considerados como os países que compõem a União Europeia o somatório de todos os 28 Estados membros, excluindo neste estudo os que tem dupla participação no G20, ou seja, nações de destaque individual no grupo G20 e também integrantes da União Europeia, como a Alemanha, França, Itália e Reino Unido. Com o *Brexit*, o Reino Unido deixou de fazer parte da União Europeia em 31 de janeiro de 2020, sendo assim composta por 27 membros, porém os dados utilizados nesta pesquisa são de 2017 (EUROPA.EU, 2020).

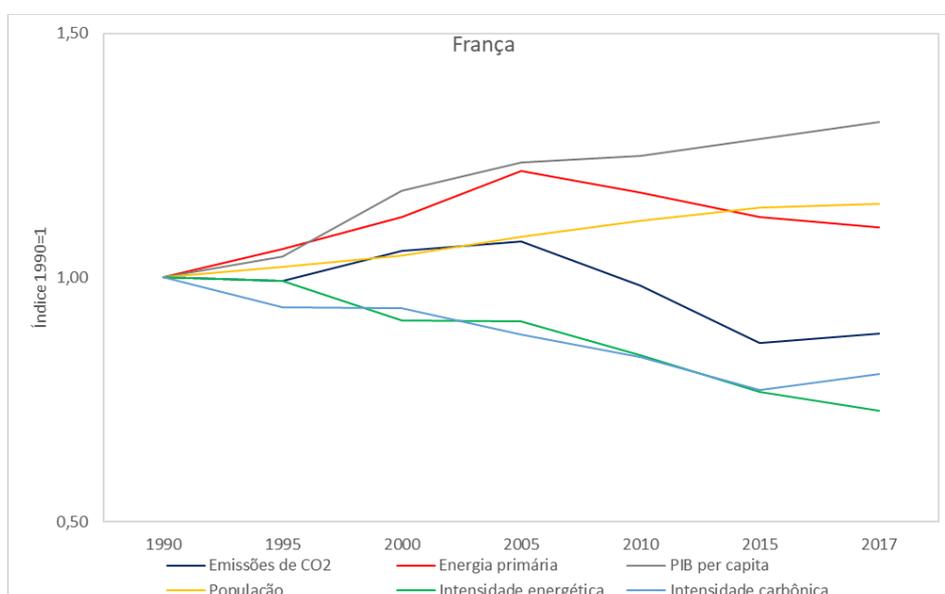
Além disso, o país com o menor PIB entre as 20 economias é a África do Sul, que também apresentou uma baixa posição no *ranking*, estando em décimo oitavo lugar em relação a sustentabilidade. A Argentina, é o país que menos emitiu CO<sub>2</sub> entre as vinte economias, mas ocupa a décima posição no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

### 3.3.2 Análise da Identidade de Kaya

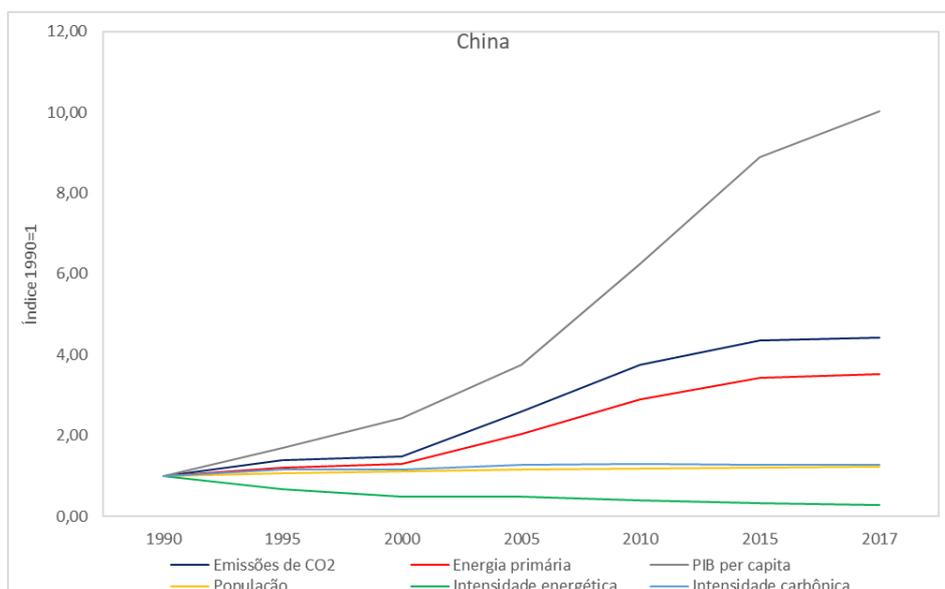
A identidade de Kaya permite analisar o desenvolvimento desses indicadores, sendo fundamental para a implantação de ações que contribuam com a redução ou limitação das emissões de GEE de forma mais intensa e ao menor custo, a fim de reverter os efeitos do crescimento da população e economia.

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 2017, com os dados disponíveis na base de dados da IEA. Abaixo, nas Figura 4 e 5, é apresentado o comportamento dos países que ocuparam a primeira e última posição do *ranking* com a modelagem identidade de Kaya.

A França em 2017 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 1,16% das emissões, consequentemente é observado na Figura 4 a redução das emissões e das intensidades energéticas e carbônicas ao decorrer dos anos, mantendo seu crescimento econômico. Em contrapartida, a China com seu relevante desenvolvimento econômico e industrialização, foi responsável em 2017 por 34,97% das emissões de CO<sub>2</sub>, representando a liderança negativa das emissões em relação a todos os países do mundo. O que vem desencadeando um aumento de todos os fatores analisados, como demonstrado na Figura 5 principalmente no PIB per capita e intensidades carbônicas. Em ambos os casos, a população apresenta com um crescimento constante.

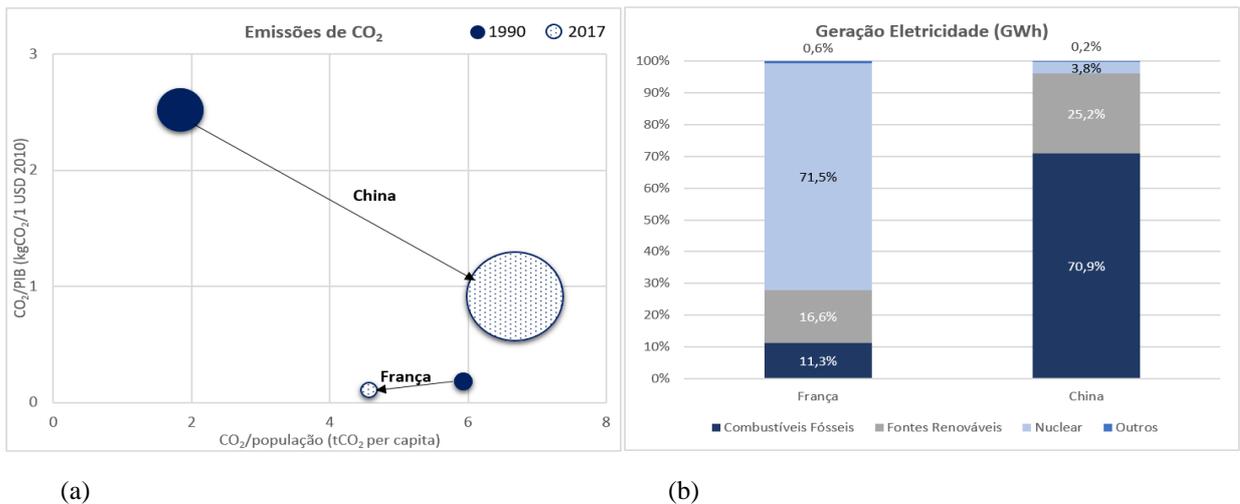


**Figura 4** – Desenvolvimento dos Índices de Kaya para a França



**Figura 5** – Desenvolvimento dos Índices de Kaya para a China

A seguir são demonstradas duas análises, na Figura 6(a) é apresentado uma relação da quantidade CO<sub>2</sub> emitidas por PIB com a taxa de CO<sub>2</sub> per capita entre os anos de 1990 e 2017, demonstrando uma retração das emissões na França e uma forte expansão das emissões na China neste período conforme sua grande expansão na indústria e economia. A Figura 6(b) apresenta um comparativo das duas matrizes energéticas desses países, em relação a geração de energia elétrica, em GWh, a partir de distintas fontes. A energia nuclear na França corresponde 71,52% da sua matriz, uma fonte que não é renovável, porém com baixa emissão de carbono, sendo uma energia alternativa, a qual tem um papel importante no enfrentamento das mudanças climáticas. E com crescente investimentos em tecnologias e energia limpa, 16,63% representam as energias renováveis e 11,29% em combustíveis fósseis e outras fontes (0,57%). Já a China com sua grande responsabilidade pelo impacto das emissões de gases, utiliza 70,86% da sua matriz de origem fóssil e 25,18% de origem renovável, com tendência crescente desta para mitigar os efeitos ao ambiente, apenas 3,76% compõem a energia nuclear e outras fontes (0,20%).

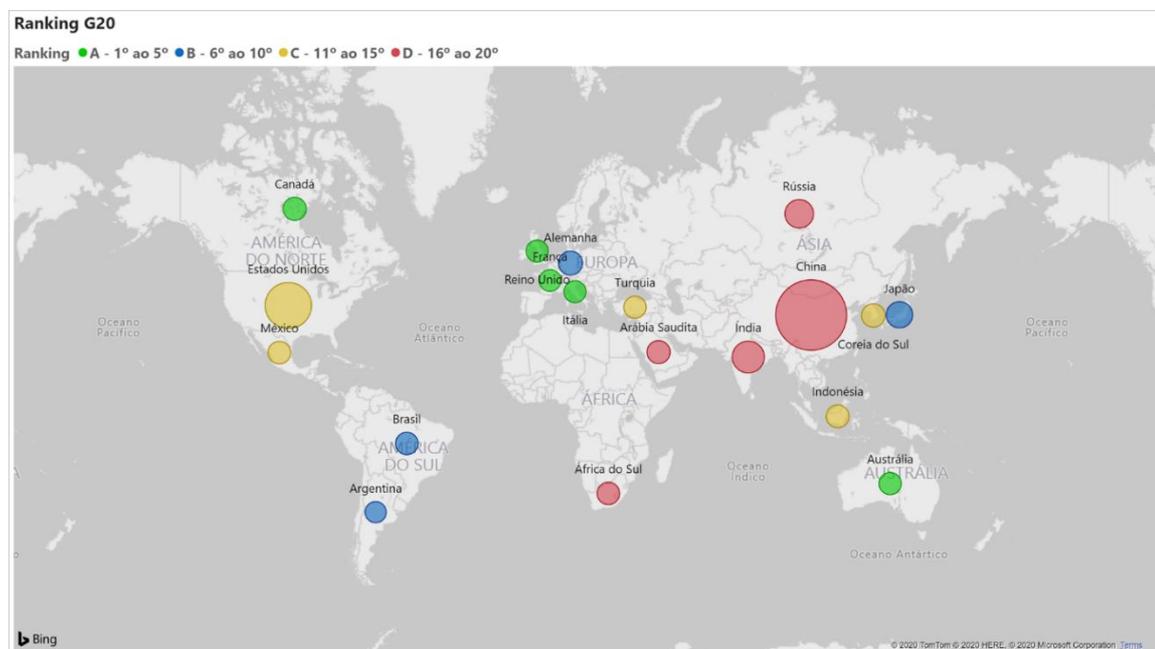


**Figura 6** – Intensidade das Emissões de CO<sub>2</sub> (a) e Matriz Energética (b)

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.

Conforme estudo realizado, o *ranking* de sustentabilidade é representado no mapa com a formação de grupos (Figura 7), em destaque as cinco primeiras posições na cor verde, e as cinco

últimas posições na cor vermelha, em todos os países o tamanho da bolha é representado pela emissão total de CO<sub>2</sub> em relação ao período analisado.



**Figura 7** – Mapa ranking dos países do G20

Fonte: Dados aplicados em *PowerBI*

### 3.4 Conclusão

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 estratégias que garantem a ela a primazia da sustentabilidade entre as maiores economias do mundo. Com uma matriz energética predominante em energia nuclear, crescimento potencial dos renováveis 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 GEE, da diversificação de seu modelo energético e do aumento do desenvolvimento de energias renováveis (Gouvernement.fr, 2018).

Em contrapartida, a China tendo 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 no mundo, também é o maior importador deste insumo. Em compensação a China detém a maior capacidade instalada de energias renováveis, aproximadamente 30% da capacidade das fontes de energia solar, eólica e hidroelétrica do mundo encontram-se na China segundo o relatório *Key World Energy Statistics*, (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.

### 3.5 Referências Bibliográficas

ALMEIDA, A. T. **Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério**. São Paulo: Atlas, 2013.

BRANS, J. P.; VINCKE, PH. A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). **Management Science**, v. 31, n. 6, p. 647–656, 1985.

BUDZIANOWSKI, W. M. Modelling of CO<sub>2</sub> content in the atmosphere until 2300: influence of energy intensity of gross domestic product and carbon intensity of energy. **International Journal of Global Warming**, v. 5, n. 1, p. 1, 2013.

EHRLICH, P. R.; HOLDREN, J. P. Impact of Population Growth. **Science, New Series**, v. 171, p. 1212–1217, 29 mar. 1971.

EUROPA.EU. **Países | União Europeia**. Text. Disponível em: <[https://europa.eu/european-union/about-eu/countries\\_pt](https://europa.eu/european-union/about-eu/countries_pt)>. Acesso em: 1 ago. 2020.

**G20**. Disponível em: <<https://g20.org/en/>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 7–20, abr. 2007b.

**Gouvernement.fr**. Disponível em: <<https://www.gouvernement.fr/en/energy-transition>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

**IEA**. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics>>. Acesso em: 14 maio. 2020.

**IEA - International Energy Agency.** Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/>>. Acesso em: 19 jan. 2019.

**Itamaraty.** Disponível em: <<http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/diplomacia-economica-comercial-e-financeira/15586-brasil-g20>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

**KAYA, Y. Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios. Paper presented at the IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, Paris, France, 1989.**

**Key World Energy Statistics 2018.** . [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/kwes/>>.

**LIMA, F. et al. A cross-country assessment of energy-related CO<sub>2</sub> emissions: An extended Kaya Index Decomposition Approach. *Energy*, v. 115, p. 1361–1374, nov. 2016.**

**TAVAKOLI, A. A journey among top ten emitter country, decomposition of “Kaya Identity”. *Sustainable Cities and Society*, v. 38, p. 254–264, abr. 2018.**

**WANG, Q.; LI, R.; LIAO, H. Toward Decoupling: Growing GDP without Growing Carbon Emissions. *Environmental Science & Technology*, v. 50, n. 21, p. 11435–11436, nov. 2016.**

#### **4 ARTIGO 2 – ANÁLISE MULTICRITÉRIO DE POTENCIALIDADES PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL NA REGIÃO NORTE FLUMINENSE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**

##### **RESUMO**

A matriz energética mundial é composta, predominantemente, por recursos energéticos de origem fóssil. Esse não é o caso da matriz energética brasileira, onde prevalecem as fontes renováveis. O objetivo desta pesquisa é avaliar o índice de renovabilidade da energia elétrica produzida na região Norte do Estado do Rio de Janeiro e identificar, através do método PROMETHEE de análise decisória, a melhor fonte de energia renovável para a diversificação da matriz energética regional. As alternativas estudadas foram: hidrelétricas, biomassa, eólica e fotovoltaica, que foram analisadas segundo critérios potencialidade, estabilidade, viabilidade e impactos. O método PROMETHEE, de auxílio multicritério à decisão, foi empregado para definir um *ranking* das alternativas. O índice de renovabilidade da região é de aproximadamente 5%, pois o gás natural é o recurso energético mais empregado na região. A energia fotovoltaica foi eleita a mais promissora, seguida pela eólica, biomassa e a hidrelétrica como a menos promissora. A região Norte Fluminense é rica em recursos energéticos renováveis e não renováveis, mas gera a maior parte da energia a partir de fontes não renováveis. Este trabalho contribui como suporte para um futuro planejamento energético da região.

**Palavras-chave:** Energia Renovável, Multicritério, PROMETHEE, Norte Fluminense.

## ABSTRACT

The global energy matrix is composed predominantly of energy resources of fossil origin. This is not the case for the Brazilian energy matrix, where renewable sources prevail. The objective of this research is to evaluate the renewable energy index produced in the northern region of the state of Rio de Janeiro and to identify, through the PROMETHEE method of decision analysis, the best renewable energy source for the diversification of the regional energy matrix. The alternatives studied were: hydroelectric, biomass, wind and photovoltaic, which were analyzed according to the criteria of potentiality, stability, viability and impacts. The PROMETHEE method, of multicriteria decision aid, was used to define a ranking of the alternatives. The renewability index of Norte Fluminense is approximately 5%, since natural gas is the most used energy resource in the region. Photovoltaic energy was chosen as the most promising, followed by wind, biomass and hydroelectric as the least promising. The North Fluminense region is rich in renewable and non-renewable energy resources, but generates most of the energy from non-renewable sources. This work contributes as a support for future energy planning in the region.

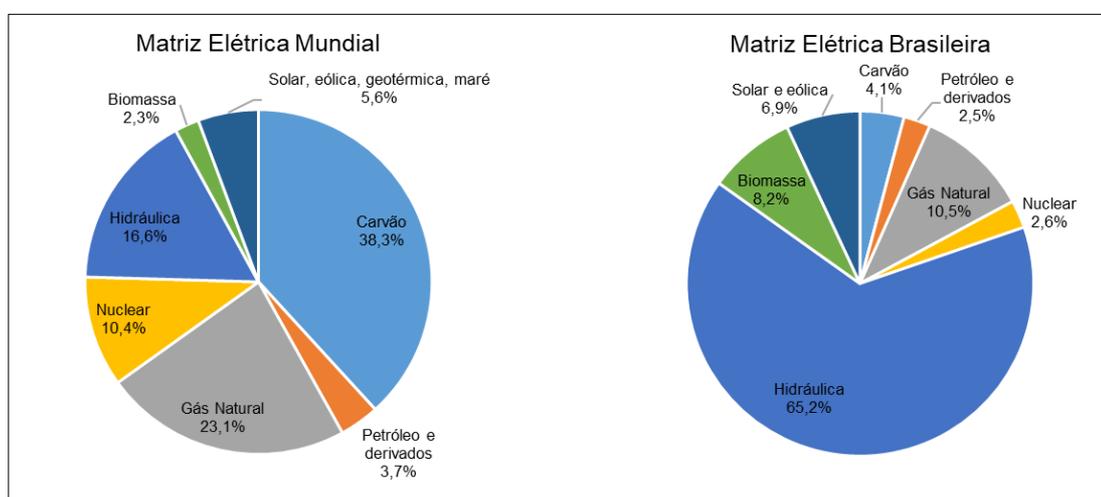
**Keywords:** Renewable energy; Multicriteria; PROMETHEE; Norte Fluminense.

#### 4.1 Introdução

Os padrões atuais de produção e consumo de energia são sustentados principalmente em fontes fósseis. É inegável a importância desta fonte de energia para o desenvolvimento da sociedade moderna, no entanto, os combustíveis fósseis emitem poluentes, intensificam o efeito estufa e não são renováveis, o que coloca em risco a sustentabilidade energética no longo prazo. O problema mais relevante quanto ao uso deste recurso energético é a sua contribuição para o aumento da concentração atmosférica dos Gases do Efeito Estufa (GEEs) como: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ), o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), entre outros, que são responsáveis pelas mudanças climáticas globais (MARQUES, 2006). Por estas razões, é necessário mudar esse padrão investindo em energias renováveis (GOLDEMBERG; LUCON, 2007a).

Apesar da diversificação e as discussões sobre a sustentabilidade do setor de energia, a matriz energética mundial ainda é muito dependente dos combustíveis fósseis, sendo 81,1% composta por carvão, petróleo e gás natural. O restante da matriz energética mundial é composta de fontes renováveis, como a seguir: biocombustíveis e resíduos (9,8%), energia hidráulica (2,5%) e outras fontes renováveis (1,7%) (IEA, 2018).

O setor energético brasileiro apresenta uma diferenciação no padrão de distribuição de fontes de energia em relação a matriz elétrica mundial. De acordo com o BEN – Balanço Energético Nacional (EPE, 2018), o setor elétrico brasileiro possui uma matriz predominantemente renovável (Figura 8). A capacidade instalada é concentrada em usinas hidrelétricas, correspondendo a cerca de 65,2% da energia gerada, seguida de 17,1% de geração por combustíveis fósseis, em sua maior parte de gás natural, 8,2% de biomassa, em especial as geradas nas usinas que utilizam bagaço da cana-de-açúcar, 2,6% de energia nuclear, e por fim 6,8% de energia eólica e 0,1% de energia solar fotovoltaica.



**Figura 8** – Matriz Elétrica Mundial (2016) e Matriz Elétrica Brasileira (2017)  
Fonte: (IEA, 2018) e (BEN, 2018)

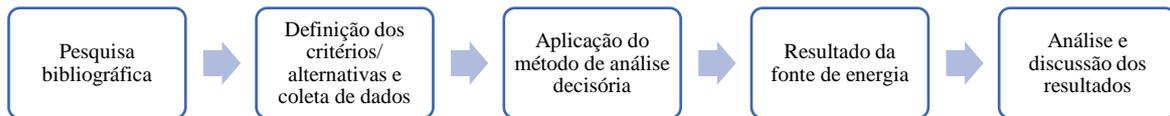
O Brasil possui 7.439 empreendimentos em operação, totalizando 164.830.554 kW de potência instalada, há previsão para os próximos anos uma adição de 20.739.477 kW na capacidade de geração do país, proveniente de 600 empreendimentos atualmente em construção ou projetos ainda não iniciados (ANEEL, 2019).

O Estado do Rio de Janeiro tem participação significativa na matriz energética do Brasil (MENDES; STHEL, 2018), considerado o maior produtor de petróleo e gás natural do país, concentrado na Bacia de Campos, localizada na Mesorregião Norte Fluminense. Esta é uma das seis mesorregiões pertencentes ao estado do Rio de Janeiro, caracterizado pela união entre nove municípios, sendo esses: Campos dos Goytacazes, Carapebus, Cardoso Moreira, Conceição de Macabu, Macaé, Quissamã, São Fidélis, São Francisco de Itabapoana e São João da Barra. Destaca-se por possuir uma área de 9.741km<sup>2</sup> e apresentar o maior PIB per capita entre as demais mesorregiões do estado (IBGE, 2018). A economia da Região Norte Fluminense é sustentada principalmente por atividades petrolíferas em Macaé, pela economia agroindustrial de Campos dos Goytacazes, que possui usinas de açúcar e forte atividade agropecuária e pela potencial atividade portuária em São João da Barra. Nos demais municípios predominam a agricultura e criação de gado. O rio Paraíba do Sul, considerado o mais importante do estado, corta parte da região, favorecendo as atividades do setor primário.

O objetivo desta pesquisa é analisar o índice de renovabilidade energética e ordenar através de um método de análise decisória, as potencialidades, viabilidades e impactos para aproveitamento da geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis a fim de identificar a melhor fonte de geração de energia para um planejamento energético da Região Norte Fluminense do Estado do Rio de Janeiro. Dentre as energias disponíveis e favoráveis conforme as características geográficas da região, foram consideradas as energias renováveis hidrelétricas, biomassa, eólica e fotovoltaica. Os critérios analisados de acordo com a análise dos especialistas para avaliação de cada fonte foram as potencialidades, estabilidade na geração, viabilidade econômica, viabilidade técnica, impactos ambientais e impactos sociais.

## **4.2 Metodologia**

Neste trabalho, foram realizadas pesquisas em relatórios de órgãos públicos nacionais e internacionais com estudos e levantamento de dados voltados para o setor energético e revisões bibliográficas em artigos publicados nas bases científicas Scopus®, Science Direct® e Scielo® com temáticas relacionadas a métodos multicritérios, energias renováveis e sustentabilidade. A pesquisa foi organizada e estruturada conforme as etapas sequenciais apresentadas na Figura 9.



**Figura 9** – Etapas da pesquisa – Energia Norte Fluminense (NF)

A estratégia desta pesquisa é constituída das seguintes etapas: pesquisa exploratória dos artigos, livros, relatórios e documentos técnicos; elaboração, aplicação de questionário a especialistas, e tratamento dos dados obtidos; cálculo do índice de renovabilidade da matriz, e por fim aplicação do método de análise decisória obtendo como resultado um *ranking* das fontes de energia analisadas na região. A metodologia está fundamentada nos conceitos de análise emergética, no qual o objeto de estudo foi a região Norte Fluminense, localizada no interior do Estado do Rio de Janeiro com suas principais fontes geradoras de energia elétrica.

O índice de renovabilidade é um índice que mede a razão entre a quantidade de energia renovável em relação ao total de energia utilizadas (ODUM, 1996).

$$Ren(\%) = \frac{\sum EnergiaRenovável}{\sum EnergiaTotal} \times 100 \quad \text{Equação (8)}$$

Os métodos multicritérios são processos decisórios que têm como objetivo expor alternativas e resultados que apoiem à decisão, identificando qual será a mais viável de acordo com a análise de critérios (ALMEIDA, 2013).

O método de decisão da família PROMETHEE (BRANS; VINCKE, 1985), é um método conhecido e amplamente aplicado, analisa comparações de cenários, integra critérios quantitativamente e qualitativamente para diferentes alternativas, comparando as alternativas em pares a fim de tornar a avaliação mais realista.

Estes métodos são bastante utilizados em problemáticas de planejamento de energia renováveis e sustentabilidade (SULTANA; KUMAR, 2012). Nesta pesquisa será utilizado o método PROMETHEE II, que estabelece uma ordem completa entre as alternativas destinadas à problemáticas de ordenação.

Desta forma para avaliar a potencialidade e viabilidade da implantação de energias renováveis na região Norte Fluminense, foi elaborado um questionário com seis perguntas em relação aos quatro tipos de fontes de energia, conforme Apêndice A. Um total de 28 questionários foram aplicados aos especialistas da área do meio acadêmico e empresarial que atuam na região. Além disso, foram estabelecidos pesos a cada um dos critérios a fim de se

realizar o método de análise decisória.

Considerando as particularidades da região Norte Fluminense, as fontes energéticas que mais se adequam a implantação na região são as provenientes de hidrelétricas, biomassa, eólica e fotovoltaica. Quanto aos atributos a serem pesquisados, foram considerados, potencialidade, estabilidade na geração, viabilidade econômica, viabilidade técnica, impactos ambientais e impactos sociais.

Para avaliação de cada atributo com sua respectiva alternativa, foram pontuados os quesitos: muito alto (5), alto (4), médio (3), baixo (2), muito baixo (1) e não quero opinar (0). Com aplicação de estatística descritiva para a obtenção dos resultados.

Após o tratamento dos dados é utilizado o método multicritério PROMOTHEE II, que resulta na ordenação das alternativas conforme critérios, evidenciando o primeiro lugar como a melhor fonte de energia para a região e o último lugar para a fonte de energia menos adequada. O *software* utilizado para a aplicação é o *Visual PROMETHEE Academic Edition*.

O modelo é composto por quatro alternativas e seis critérios, no Quadro 2 são apresentados os critérios de avaliação com suas respectivas descrições e pesos. Os pesos dos critérios foram estabelecidos conforme a média aritmética de todos os questionários aplicados, no qual foi avaliado por cada especialista o grau de importância de cada critério determinando uma nota entre 0 e 10.

**Quadro 2** – Critérios de Avaliação – Energia

<b>Critérios</b>	<b>Descrição</b>	<b>Peso</b>
Potencialidade	Este critério irá avaliar a potencialidade de implantação da fonte de energia, a capacidade de realização e viabilidade para a região. É um critério de maximização, ou seja, quanto maior melhor.	7,92
Estabilidade na Geração	Este critério irá avaliar a estabilidade da geração de cada fonte de energia, o quanto esta fonte é capaz de fornecer estabilidade no fornecimento de energia para um sistema. É um critério de maximização, ou seja, quanto maior melhor.	7,96
Viabilidade Econômica	Este critério irá avaliar a viabilidade econômica de cada fonte, considerando os custos de implantação, manutenção e geração de energia. É um critério de minimização, ou seja, quanto menor melhor.	8,46
Viabilidade Técnica	Este critério irá avaliar a viabilidade técnica de cada fonte, considerando a viabilidade da infraestrutura e operacional de cada fonte de energia. É um critério de maximização, ou seja, quanto maior melhor.	8,67
Impactos Ambientais	Este critério irá avaliar os impactos ambientais de cada fonte de energia, ou seja, as alterações das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente com a implantação e geração dessas fontes. É um critério de minimização, ou seja, quanto menor melhor.	8,50
Impactos Sociais	Este critério irá avaliar os impactos sociais de cada fonte de energia, ou seja, o quanto cada fonte tanto na implantação e geração pode transformar positivamente e mensurável em torno do local ou no máximo alcance. É um critério de maximização, ou seja, quanto maior melhor.	8,71

Ao analisar os questionários, alguns especialistas não souberam avaliar as diferenças dos atributos entre as alternativas, neste caso onde foram observados valores repetidos ou iguais,

estas respostas foram eliminadas a fim de constituir uma melhor obtenção de dados.

### 4.3 Resultados e Discussão

Nesta seção são apresentados o índice de renovabilidade da matriz elétrica do Norte Fluminense, o *ranking* das alternativas com a aplicação do método de análise decisória identificando qual a melhor fonte para a região e a análise dos resultados obtidos da pesquisa com os especialistas de acordo com os atributos/critérios em relação as respectivas fontes de energia.

#### 4.3.1 Índice de Renovabilidade

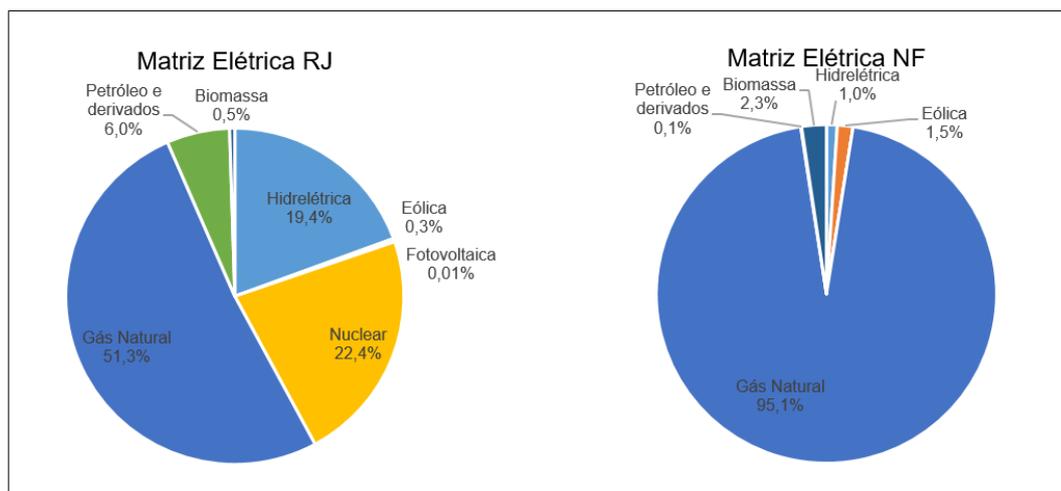
A matriz elétrica do Rio de Janeiro e da região Norte Fluminense, presente na Tabela 3, possui uma baixa renovabilidade energética, aproximadamente 5%, devido a predominância da utilização de recursos de origem não renovável para a geração de eletricidade do estado.

**Tabela 3** – Índice de Renovabilidade

<b>Local</b>	<b>Renovabilidade (%)</b>
Brasil	83%
Rio de Janeiro	20%
Norte Fluminense	5%

Fonte: (BIG, 2019)

Destaca-se na Figura 10, na região Norte Fluminense que 95,1% da geração é proveniente do gás natural, o estado é o maior produtor deste combustível no país, há quatro termoelétricas em operação na região com potência outorgada de 1.778.395 kW, uma em construção no município de São João da Barra com capacidade de geração de 1.298.963 kW e projeto de construção para mais duas termoelétricas, uma no mesmo município e outra em Macaé, totalizando uma potência prevista de mais 2.238.099 kW de geração (ANEEL, 2019). Neste caso, torna necessário minimizar a dependência do gás natural na região, reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, diversificar a matriz e impulsionar a utilização das fontes renováveis para a melhoria da sustentabilidade.



**Figura 10** – Matriz Elétrica Rio de Janeiro e Norte Fluminense  
Fonte: (BIG, 2019)

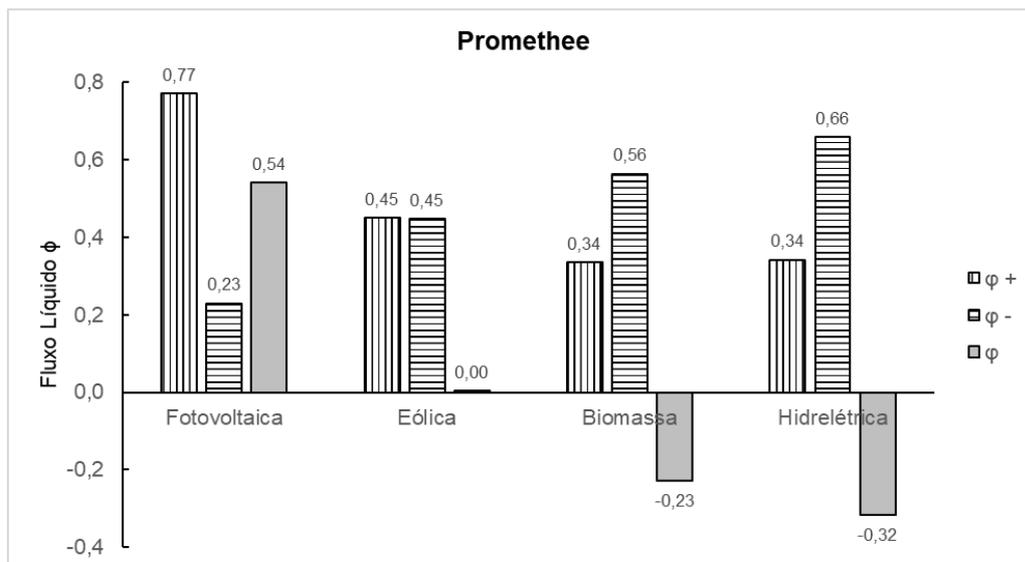
#### 4.3.2 Método Multicritério

São apresentados os dados da matriz de pagamento das alternativas (Tabela 4), que são as quatro respectivas fontes de energias renováveis em relação a um conjunto de seis critérios, o resultado de cada relação é a média aritmética dos questionários aplicados na pesquisa. Para os gráficos foram considerados os respectivos resultados considerando o desvio padrão das amostras.

**Tabela 4** – Matriz de pagamento – Energia NF

Critérios/ Alternativas	Potencia- lidade	Estabilidade na geração	Viabilidade econômica	Viabilidade técnica	Impactos ambientais	Impactos sociais
Hidrelétrica	2,89	3,11	3,00	3,07	3,56	3,39
Biomassa	3,46	3,23	3,58	3,71	2,46	2,50
Eólica	3,96	3,32	3,56	3,72	2,08	2,36
Fotovoltaica	4,35	3,54	3,19	3,96	1,42	2,04

Com a aplicação da modelagem PROMETHEE II, é obtida uma ordenação das fontes de energias renováveis em ordem decrescente dos fluxos de importâncias líquidos ( $\phi$ ), conforme a Figura 11. Destacando-se na primeira posição do *ranking*, a energia fotovoltaica, sendo considerada a melhor fonte de geração para a região de acordo com a modelagem aplicada, com fluxo líquido de 0,5409, seguidas das energias eólicas e biomassa. Na quarta e última posição do *ranking* é a energia hidrelétrica, sendo considerada a menos favorável para a região, com um fluxo líquido de -0,3162.

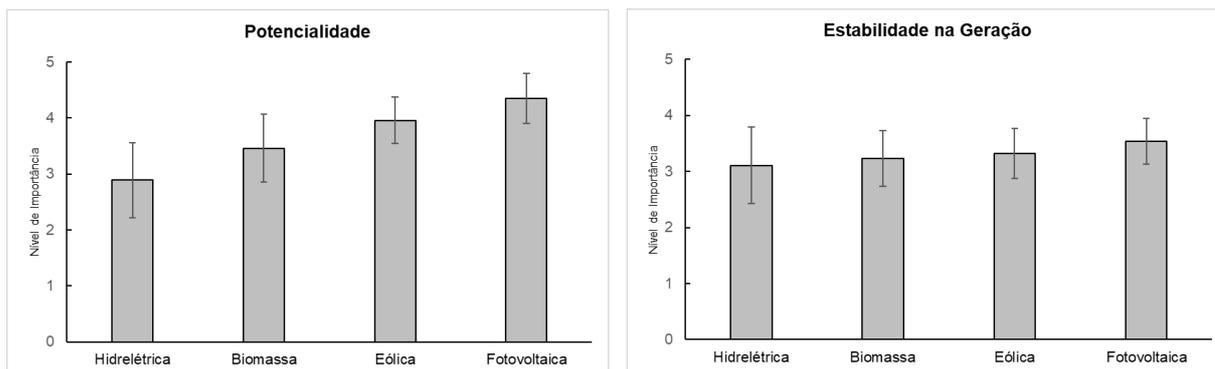


**Figura 11** – Ranking das fontes de energia

A energia fotovoltaica tem como vantagens ser uma fonte de energia limpa e inesgotável, não emite gases poluentes e não geram resíduos, baixo custo de manutenção, acessibilidade a diversos locais, longa vida útil, e complementariedade com outros sistemas gerando economia. Em contrapartida, como desvantagem está no alto custo do investimento, a intermitência na geração da energia e a alteração estética em relação as construções residenciais. Esta possui grande incentivo no Brasil, sendo justificado pelo potencial do país, que possui altos índices de radiação solar.

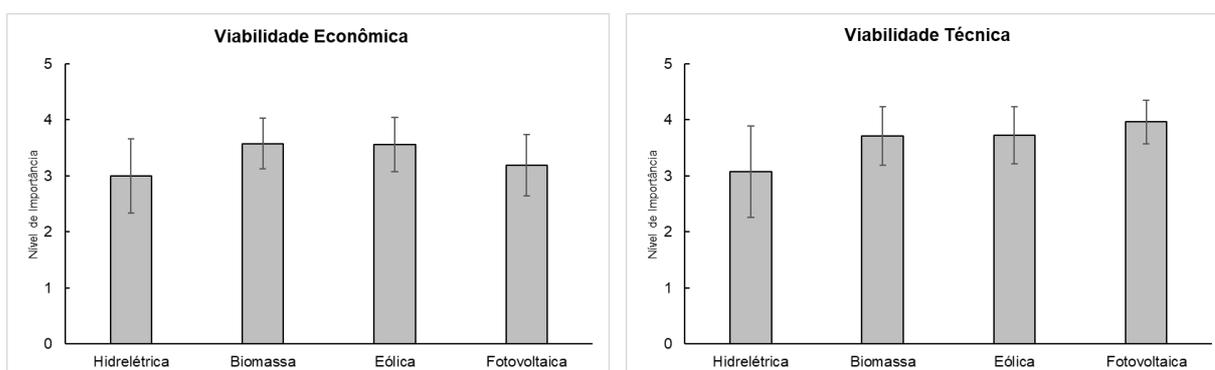
#### 4.3.3 Análise das Fontes de Energia Renováveis

A Figura 12 apresenta o resultado da avaliação dos especialistas em relação ao critério de potencialidade e ao critério de estabilidade na geração, ambos têm como objetivo analisar a viabilidade da implantação da respectiva fonte de energia considerando suas restrições e sua capacidade de fornecimento para alimentação dos sistemas e eficiência energética para a região. A energia com maior potencialidade e estabilidade na geração é a fotovoltaica, respectivamente com 29,6% e 26,8% de relevância em relação ao nível de importância das outras fontes, pois na região Norte Fluminense há uma grande extensão territorial e com altos índices de incidência solar, em contrapartida a fonte de energia menos favorável para a região nos dois critérios é a hidrelétrica, com 19,7% e 23,5% de relevância, pois o relevo da região é formado por planície predominantemente, com poucas quedas d'água em seus rios.



**Figura 12** – Potencialidade e Estabilidade na Geração das fontes de energia

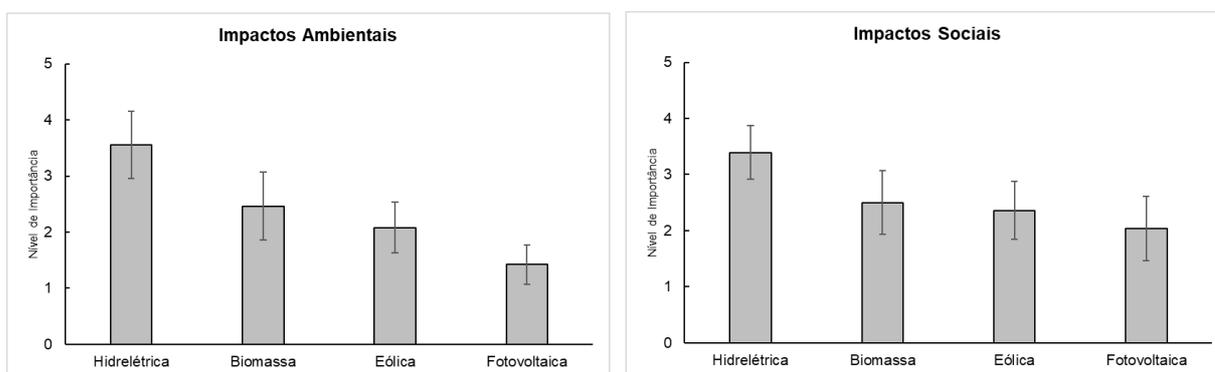
A Figura 13 representa o resultado em relação ao critério de viabilidade econômica e o critério de viabilidade técnica, neste caso o primeiro atributo corresponde o quanto é economicamente viável a utilização dessas fontes, sendo considerado os custos da implantação do projeto, a manutenção da operação e o gasto com a geração. A fonte com melhor viabilidade econômica é a biomassa com 26,8% de importância, pois na região Norte Fluminense há relevante produção na indústria da cana-de-açúcar, apesar das mesmas serem utilizadas na cogeração, ainda é pouco explorada na geração de energia. Seguidas da energia eólica, devido que na região há altos potenciais de ventos para a geração de energia. O segundo atributo caracteriza a infraestrutura para a implantação e a operacionalidade da geração desta energia, sendo a fotovoltaica a fonte com melhor viabilidade técnica, com 27,4% de relevância, além da abundante disponibilidade de incidência solar, é crescente o mercado neste setor. Em ambos, a fonte de energia menos favorável é a hidrelétrica, respectivamente 22,5% e 21,2%, devido aos altos custos de implantação e altos esforços na operação.



**Figura 13** – Viabilidade Econômica e Viabilidade Técnica das fontes de energia

Por fim, na Figura 14, são apresentados os resultados dos critérios dos impactos ambientais e os impactos sociais de acordo com a avaliação, a fonte de energia com menor impacto ambiental é a fotovoltaica com 14,9% de grau de importância e de forma oposta a com

maior impacto é a hidrelétrica, com 37,3% de relevância, devido a grandiosidade desses projetos e as modificações do ambiente com a sua implantação. Em relação aos impactos sociais, a fonte de energia com melhor impacto é a hidrelétrica representando 33%, e a fonte com menor impacto é a fotovoltaica representando 19,8% de nível de importância. A energia fotovoltaica apesar de ser mais favorável por causar um menor impacto no ambiente em relação as demais, há pouco impacto social devido à baixa necessidade de utilização de recursos após instalação, em contrapartida a energia hidrelétrica apesar de ter negativo impacto no ambiente, impacta positivamente na sociedade e mercado gerando oportunidades.



**Figura 14** – Impactos Ambientais e Impactos Sociais das fontes de energia

#### 4.4 Conclusão

Esta pesquisa se propôs a analisar as potencialidades, viabilidades e impactos na geração de energia elétrica através de fontes renováveis a fim de identificar por meio do método de decisão a fonte mais adequada conforme as características da região Norte Fluminense e avaliações dos especialistas, obtendo-se como melhor alternativa a energia fotovoltaica.

A importância da utilização das fontes de energia renováveis, além da substituição das fontes fósseis e redução das emissões de carbono e outros poluentes, consiste na preservação dos recursos naturais, melhoria da eficiência energética, desenvolvimento de novas tecnologias e garantia da sustentabilidade. Por fim, este trabalho além de evidenciar a fonte fotovoltaica como uma excelente complementariedade de energia, contribui como suporte e pode funcionar como um modelo de aplicação em outras análises para um futuro planejamento energético da região, alinhado com políticas de desenvolvimento ambiental e econômico.

#### 4.5 Referências Bibliográficas

ALMEIDA, A. T. **Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério**. São Paulo: Atlas, 2013.

ANEEL. **BIG - Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 31 maio. 2019.

**Balanco Energético Nacional 2018**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em: 16 maio. 2019.

BRANS, J. P.; VINCKE, PH. A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). **Management Science**, v. 31, n. 6, p. 647–656, 1985.

**Brasil | Cidades e Estados | IBGE**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>>. Acesso em: 23 set. 2019.

**Empresa de Pesquisa Energética**. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt>>. Acesso em: 16 maio. 2019.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, v. 0, n. 72, p. 6, 1 fev. 2007a.

**IEA - International Energy Agency**. Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/>>. Acesso em: 19 jan. 2019.

MARQUES, M. C. **Conservação de Energia - Eficiência energética de equipamentos e instalações**. 3<sup>a</sup> ed. [s.l.] Eletrobrás/PROCEL EDUCAÇÃO/Universidade Federal do Itajubá/FUPAI, 2006.

ODUM, H.T. *Environmental accounting, energy and decision making*. New York: J. Wiley, 1996.

MENDES, L. F. R.; STHEL, M. S. Analysis of the hydrological cycle and its impacts on the sustainability of the electric matrix in the state of Rio de Janeiro/Brazil. **Energy Strategy Reviews**, v. 22, p. 119–126, nov. 2018.

SULTANA, A.; KUMAR, A. Ranking of biomass pellets by integration of economic, environmental and technical factors. **Biomass and Bioenergy**, Biorefinery. v. 39, p. 344–355, 1 abr. 2012.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi possível demonstrar um método de análise decisória, o PROMETHEE II, com aplicabilidade no setor de energia. No primeiro artigo com a aplicação do método foi apresentada uma ordenação dos países mais sustentáveis do grupo G20, utilizando como métrica os critérios do indicador de sustentabilidade Identidade de Kaya, analisando as emissões de dióxido de carbono, os fatores econômicos, populacionais e as intensidades energéticas e carbônicas. Como resultado do *ranking* a França obteve os melhores desempenhos ficando na primeira posição e a China devido aos seus impactos no ambiente ficou na última posição.

Comparando o resultado desta pesquisa com o *ranking* do Indicador de Transição Energética, o qual avalia o potencial e as condições que um país apresenta para promover a transição energética para uma economia de baixo carbono. Este indicador é elaborado pelo *World Economic Forum* ou Fórum Econômico Mundial, pode-se perceber que proporcionalmente os resultados foram semelhantes com o do estudo do G20. No último relatório de 2020, a França avaliada como economia avançada, encontra-se na 8ª posição do *ranking*, com 74% de eficiência no sistema energético e 64% na escala de preparo para a transição energética. Já a China, avaliada como países da Ásia emergente e em desenvolvimento, encontra-se na 78ª posição do *ranking*, com 50% de eficiência no sistema energético e 52% na escala de preparo para a transição energética (WEF, 2020).

No segundo artigo com a aplicação do mesmo método, além da ordenação, foi apresentada a melhor opção de fonte renovável para a região, sendo escolhida a energia fotovoltaica como a melhor alternativa. Os critérios foram avaliados conforme questionários aplicados aos especialistas da área de energia que atuam na região de estudo, avaliando as potencialidades, viabilidades econômicas e técnicas, e os impactos ambientais e sociais na geração de energia elétrica de acordo com as características da Região Norte Fluminense.

Sendo assim, a aplicação desse método multicritério no setor de energia pode contribuir para a orientação de novas pesquisas e estudos para planejamento de soluções no setor. Com foco na eficiência energética e no uso de fontes sustentáveis que promovem a descarbonização das economias e alcançam reduções eficazes de emissões de gases de efeito estufa e o desenvolvimento sustentável.

## 6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. T. **Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério**. São Paulo: Atlas, 2013.

ALMEIDA, A. T. DE; COSTA, A. P. C. S. Modelo de decisão multicritério para priorização de sistemas de informação com base no método PROMETHEE. **Gestão & Produção**, v. 9, n. 2, p. 201–214, ago. 2002.

BRANS, J. P.; VINCKE, PH. A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). **Management Science**, v. 31, n. 6, p. 647–656, 1985.

BRANS, J. P.; VINCKE, PH.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: The Promethee method. **European Journal of Operational Research**, v. 24, n. 2, p. 228–238, fev. 1986.

BRANS, J. P. *et al.* Promethee Methods. In: **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys**. New York: Springer-Verlag, 2005. v. 78p. 163–186.

COSTA, H. G.; MOLL, R. N. Emprego do método de análise hierárquica (AHP) na seleção de variedades para o plantio de cana-de-açúcar. **Gestão & Produção**, v. 6, n. 3, p. 243–256, dez. 1999.

GIELEN, D. et al. The role of renewable energy in the global energy transformation. **Energy Strategy Reviews**, v. 24, p. 38–50, abr. 2019.

GOMES, L. F. A. M., & GOMES, C. F. S. **Princípios e Tomada de decisão: enfoque multicritério** (6. ed.). São Paulo: Atlas, 2019.

GOMES, C. F. S.; COSTA, H. G. Aplicação de métodos multicritério ao problema de escolha de modelos de pagamento eletrônico por cartão de crédito. **Production**, v. 25, n. 1, p. 54–68, 17 set. 2013.

IPCC. **Global Warming of 1.5 °C - The Intergovernmental Panel on Climate Change**, 2018. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/sr15/>>. Acesso em: 12 set. 2020

IRENA. **Reaching zero with renewables: Eliminating CO2 emissions from industry and transport in line with the 1.5oC climate goal**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications)>. Acesso em: 10 set. 2020.

MELO, R. M. DE; MEDEIROS, D. D. DE; ALMEIDA, A. T. DE. A multicriteria model for ranking of improvement approaches in construction companies based on the PROMETHÉE II method. *Production*, v. 25, n. 1, p. 69–78, 17 set. 2013.

NEOFYTOU, H.; NIKAS, A.; DOUKAS, H. Sustainable energy transition readiness: A multicriteria assessment index. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 131, p. 109988, out. 2020.

ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | As Nações Unidas no Brasil**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 20 set. 2020.

ROY, B. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. Kluwer, 1996.

SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. Tradução Wainer da Silveira e Silva. São Paulo: Makron, 1991.

SOTTO, D. et al. Sustentabilidade urbana: dimensões conceituais e instrumentos legais de implementação. *Estudos Avançados*, v. 33, n. 97, p. 61–80, dez. 2019.

WCED. **UN World Commission on Environment and Development, ed., Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future | Environment & Society Portal**. Disponível em: <<http://www.environmentandsociety.org/mml/un-world-commission-environment-and-development-ed-report-world-commission-environment-and>>. Acesso em: 10 set. 2020.

WEF. **WEF\_Fostering\_Effective\_Energy\_Transition\_2020\_Edition\_World Economic Forum**. Disponível em: <[http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Fostering\\_Effective\\_Energy\\_Transition\\_2020\\_Edition.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Fostering_Effective_Energy_Transition_2020_Edition.pdf)>. Acesso em: 21 set. 2020.

## APÊNDICE (A) - QUESTIONÁRIO

### Potencialidades de implantação de fontes de energia renováveis para a região Norte Fluminense do Estado do Rio de Janeiro:

- **Perfil do Avaliador:**

- ( ) Academia
- ( ) Poder Público
- ( ) Iniciativa Privada
- ( ) Empreendedor

- **Nível de Importância:**

Avaliar o nível de importância os seis critérios abaixo para a implantação de fontes de energias renováveis na região Norte Fluminense. Notas de avaliação de 0 a 10.

1. Potencialidades ( )
2. Estabilidade na Geração ( )
3. Viabilidade Econômica ( )
4. Viabilidade Técnica ( )
5. Impactos Ambientais ( )
6. Impactos Sociais ( )

- **Crítérios de Avaliação:**

Avaliar as quatro fontes de energias renováveis em relação aos respectivos critérios conforme as notas de avaliação de 0 a 5 para a região Norte Fluminense.

Notas de Avaliação:		
(0) Não quero opinar	(1) Muito baixo	(2) Baixo
(3) Médio	(4) Alto	(5) Muito alto

#### 1) Energia Hidrelétrica

##### a) Potencialidades

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

##### b) Estabilidade na Geração

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

##### c) Viabilidade Econômica

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

##### d) Viabilidade Técnica

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

##### e) Impactos Ambientais

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

##### f) Impactos Sociais

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

**2) Energia Biomassa**

## a) Potencialidades

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## b) Estabilidade na Geração

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## c) Viabilidade Econômica

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## d) Viabilidade Técnica

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## e) Impactos Ambientais

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## f) Impactos Sociais

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

**3) Energia Eólica**

## a) Potencialidades

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## b) Estabilidade na Geração

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## c) Viabilidade Econômica

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## d) Viabilidade Técnica

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## e) Impactos Ambientais

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## f) Impactos Sociais

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

**4) Energia Fotovoltaica**

## a) Potencialidades

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## b) Estabilidade na Geração

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## c) Viabilidade Econômica

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## d) Viabilidade Técnica

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## e) Impactos Ambientais

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## f) Impactos Sociais

0 ( )	1 ( )	2 ( )	3 ( )	4 ( )	5 ( )
-------	-------	-------	-------	-------	-------