

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – UCAM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

GUSTAVO DOS REIS FEIJÓ

**ANÁLISE DO DESACOPLAMENTO DAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE
CARBONO E PRODUTO INTERNO BRUTO NOS PAÍSES MAIS
POLUIDORES**

CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ

2018

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – UCAM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

GUSTAVO DOS REIS FEIJÓ

**DESACOPLAMENTO DAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO E
PRODUTO INTERNO BRUTO NOS PAÍSES MAIS POLUIDORES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Candido Mendes – Campos (RJ), para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: D. Sc. João José de Assis Rangel

CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca da **UCAM – CAMPOS** 004/2019

Feijó, Gustavo dos Reis.

Análise do desacoplamento das emissões de dióxido de carbono e produto interno bruto nos países mais poluidores. / Gustavo dos Reis Feijó . – 2018. 71 f.; il.

Orientador: João José de Assis Rangel.

Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade Candido Mendes – Campos. Campos dos Goytacazes, RJ, 2018.

Referências: f. 62-65.

1. Gás Carbônico. 2. Produto Interno Bruto (PIB). I. Universidade Candido Mendes – Campos. II. Título.

CDU – 551.588.7:330.55

Bibliotecária Responsável: Flávia Mastrogirolamo CRB 7ª-6723

GUSTAVO DOS REIS FEIJÓ

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – UCAM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Candido Mendes – Campos (RJ), para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Dissertação aprovada em 24 de novembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. João José de Assis Rangel, D. Sc.

Universidade Candido Mendes – Campos dos Goytacazes

Prof. Claudio Luiz Melo de Souza, D. Sc.

Universidade Candido Mendes – Campos dos Goytacazes

Profa. Cristine Nunes Ferreira, D. Sc.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense– Campos dos Goytacazes

CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ.

2018

Dedicatória

*A toda minha família, amigos e pessoas que me incentivaram durante essa
jornada.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me guiar nesse caminho. A todas as pessoas importantes em minha vida, pais, avós, tios e familiares que me apoiaram nesse caminho. Aos meus amigos sempre dispostos a ajudar. Ao Professor Orientador João José de Assis Rangel pelos ensinamentos, dedicação e todo o apoio durante todo o tempo. Agradeço também a todos os demais professores, funcionários, colegas da Universidade Candido Mendes.

RESUMO

Este trabalho analisou o comportamento do desacoplamento das emissões de dióxido de carbono (CO₂) em relação ao Produto Interno Bruto (PIB) das principais economias globais previstas para 2060. Os países selecionados com base nas previsões da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) foram China, Índia, EUA, Japão, Brasil e Rússia. Além deles, o a Média Mundial também foi analisado como forma de entender como a média de todos os países está se comportando. O Método OCDE para o desacoplamento, o Método de Tapio e o Método da Identidade de Kaya foram utilizados para avaliar o desacoplamento em um período de tempo compreendido de 1990 a 2015. Os resultados mostraram que o Brasil foi o país que apresentou situação mais crítica em relação ao desacoplamento entre as emissões de CO₂ e o PIB. Os demais países parecem já ter estabelecido uma condição de crescimento econômico sem a necessidade de ampliar também as emissões dos gases poluidores do Planeta. Por exemplo, a Rússia e EUA apresentaram períodos de desacoplamento com as emissões reduzindo e o PIB crescendo. Já a Índia e a China apresentaram comportamentos semelhantes com a economia crescendo mais do que as emissões de CO₂, embora as emissões de CO₂ continuem a aumentar. O Japão, por sua vez, apresentou uma trajetória menos uniforme, mas, ainda assim, com praticamente todo o período com desacoplamento. De certa forma, os resultados obtidos nesse estudo são positivos e ajudam a constatar os indícios já verificado por outros pesquisadores, que também mostram que o desacoplamento para muitos países e a nível planetário já é uma realidade. No entanto, a descarbonização do planeta é uma tarefa árdua e exigirá a soma de múltiplos esforços, pois apesar do desacoplamento constatado nesta investigação entre as emissões de CO₂ e o crescimento do PIB, para se combater o aquecimento global será necessária a redução drástica, e em pouco tempo, da quantidade das emissões dos gases do efeito estufa (GEE).

Palavras-chave: CO₂. Desacoplamento. Kaya. PIB. Tapio.

DECOUPLING OF CARBON DIOXIDE AND GROSS DOMESTIC PRODUCT EMISSIONS IN MOST POLLUTING COUNTRIES

This work analyzed the decoupling behavior of carbon dioxide (CO₂) emissions in relation to the Gross Domestic Product (GDP) of the main global economies forecast for 2060. The countries selected on the basis of the Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD) forecasts were China, India, USA, Japan, Brazil, and Russia. In addition, the World Average was also analyzed as a way of understanding how the average of all countries has behaved. The OECD Method for decoupling, the Tapio Method and the Kaya Identity Method were used to evaluate the decoupling in a time comprised from 1990 to 2015. Results showed that Brazil was the most critical country in relation to decoupling between CO₂ emissions and GDP. The other countries seem to have already established a condition of economic growth without the need to also increase emissions of the planet's polluting gases. For example, Russia and the United States experienced decoupling periods with emissions declining and GDP growing. India and China, on the other hand, showed similar behavior as the economy grew more than CO₂ emissions, although CO₂ emissions continued to increase. Japan, on the other hand, presented a less uniform trajectory, but with practically the whole period with decoupling. In a way, the results obtained in this study are positive and help verify the evidence already found by other researchers, who also show that the decoupling for many countries and at a planetary level is already a reality. However, the decarbonization of the planet is an arduous task and will require the sum of multiple efforts, because despite the decoupling of CO₂ emissions and GDP growth in this research, to combat global warming it will be necessary to drastically reduce the amount of greenhouse gas emissions (GHG) in a short time.

Keywords: CO₂. Decoupling. Kaya. GDP. Tapio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Número de artigos por ano de publicação.....	20
Figura 2. Número de publicações referentes ao tema em estudo por país.....	21
Figura 3. Número de Publicações por Área de Conhecimento	21
Figura 4. Estados de Acoplamento e Desacoplamento para o Método de Tapio	33
Figura 5. Participação dos países, (A) PIB – 2015, (B) PIB - 2060 e (C) Emissão de CO ₂ – 2015	36
Figura 6. Resultados da Média Mundial usando o Método OCDE(A) e Método de Tapio (B)	39
Figura 7. Resultados da China usando o Método OCDE(A) e Método de Tapio (B).	40
Figura 8. Resultados da Índia usando o Método OCDE(A) e Método de Tapio (B).	41
Figura 9. Resultados dos EUA usando o Método OCDE(A), Método de Tapio (B).	42
Figura 10. Resultados do Japão usando o Método OCDE(A), Método de Tapio (B).	43
Figura 11. Resultados do Brasil usando o Método OCDE(A), Método de Tapio (B).	44
Figura 12. Resultados da Rússia usando o Método OCDE(A), Método de Tapio (B).	45
Figura 13. Desenvolvimento dos Índices de Kaya para o Mundo.....	46
Figura 14 - Desenvolvimento dos Índices de Kaya para os BRICS, (A) China, (B) Índia, (C) EUA, (D) Japão, (E) Brasil e (F) Rússia	49
Figura 15. Perfil de Emissões	51
Figura 16. Perfil de Emissões de CO ₂ para o Mundo.....	52
Figura 17. Perfil de Emissões de CO ₂ para os países selecionados. (A) China, (B) Índia, (C) EUA, (D) Japão, (E) Brasil e (F) Rússia	54
Figura 18. Histórico de emissão de CO ₂ dos EUA por períodos presidenciais mais recentes. ..	55
Figura 19. Variação Percentual do TPES - PIB - CO ₂ (em MBtu, Dólar, Mt).....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intensidade de emissão de CO ₂ para os Países Selecionados.....	50
Tabela A 1. Fator OCDE e Elasticidade de Tapio para a China	66
Tabela A 2. Fator OCDE e Elasticidade de Tapio para a Índia.....	67
Tabela A 3. Fator OCDE e Elasticidade de Tapio para os EUA	68
Tabela A 4. Fator OCDE e Elasticidade de Tapio para o Japão.....	69
Tabela A 5. Fator OCDE e Elasticidade de Tapio para o Brasil	70
Tabela A 6. Fator OCDE e Elasticidade de Tapio para a Rússia	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Resultado da pesquisa bibliométrica por Termos Pesquisados	19
Quadro 2. Número de publicações por Periódico.....	22
Quadro 3. Resumo dos Estados de Desacoplamento para o Método de Tapio	32

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Emissões de carbono relativas ao uso energético	30
Equação 2. Método Proposto por Tapio (2005)	31
Equação 3. Adaptação do Método de Tapio para CO ₂	31
Equação 4. Índice de Desacoplamento OCDE	33
Equação 5. Fator de Desacoplamento OCDE.....	34
Equação 6. Taxa de Crescimento de CO ₂	34
Equação 7. Taxa de Crescimento do PIB	34

LISTA DE ABREVIATURAS

CO₂ Dióxido de Carbono

DF Driving force (força motriz)

EIA *Energy Information Administration* (Departamento de Energia dos EUA)

EP Environmental Pressure (pressão ambiental)

GEE Gases do Efeito Estufa

IEA *International Energy Agency*

OCDE Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

OECD *Organisation for Economic Co-operation and Development*

PIB Produto Interno Bruto

T tonelada

TFC *Total Final Consumption*

Toe Tonelada de óleo equivalente

TPES *Total Primary Energy Supply*

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização.....	15
1.2	Objetivos.....	16
1.2.1	Geral	16
1.2.2	Específico	17
1.3	Justificativas.....	17
1.4	Questões de Pesquisa	22
1.5	Estrutura do Trabalho	23
2	REVISÃO DA LITERATURA	24
2.1	Desacoplamento de Emissões de CO ₂ e Crescimento Econômico	26
2.2	Métodos de Validação do Desacoplamento.....	27
2.3	Conclusão da Revisão da Literatura.	28
3	METODOLOGIA.....	29
3.1	Descrição do Conjunto de Países Seleccionados.....	29
3.2	IPAT e Identidade de Kaya.....	29
3.3	Método de Tapio	31
3.4	Método de Desacoplamento da OCDE.....	33
3.5	Perfil de Emissão de CO ₂	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	Participação nas Emissões de CO ₂ e PIB.....	36
4.2	Análise do desacoplamento por diferentes métodos.....	38
4.3	Análise Detalhada da Identidade de Kaya para os Países Seleccionados.....	46
4.4	Perfil das Emissões de CO ₂	49
4.5	O Caso dos Estados Unidos	56
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58

5.1	Conclusões	58
5.2	Limitações do Trabalho	60
5.3	Sugestões para Trabalhos Futuros	60
5.4	Produções Originadas neste Trabalho.....	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Os recentes relatórios da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* - IEA) tem demonstrado que as emissões mundiais de dióxido de carbono (CO₂) nos últimos três anos (2015, 2016 e 2017) mantiveram-se praticamente estáticas enquanto o produto interno bruto (PIB) dos países aumentou neste mesmo período. Esta informação levanta a possibilidade de estar ocorrendo uma separação entre dois valores que caminham lado a lado: emissão de gases do efeito estufa (GEE) e PIB. O crescimento econômico registrado no último século até os dias atuais foi acompanhado do aumento das emissões dos gases poluentes do Planeta. Logo, o desacoplamento entre as emissões de GEE e PIB contraria o que sempre foi registrado e abre então uma promessa animadora para a urgente tarefa de descarbonização do planeta.

Um dos primeiros trabalhos a relacionar o consumo energético e crescimento econômico ocorreu no fim da década de 1970 (KRAFT; KRAFT, 1978). Desde então diversos outros estudos a respeito do tema foram realizados. Diversos artigos já mostraram que o crescimento do PIB está fortemente atrelado ao aumento do consumo energético (NIU et al., 2011; SAIDI; HAMMAMI, 2015). Além disso, demonstraram uma relação direta entre consumo energético e as emissões de CO₂. Outros trabalhos também analisam as relações existentes entre o crescimento do PIB, as emissões dos GGE e consumo energético (ANG, 2007; EWING, 2007; PAO; YU; YANG, 2011; ROBAINA ALVES; MOUTINHO, 2013; SOYTAS; SARI). Conclusivamente, pode-se afirmar que o comportamento econômico, consumo energético e, conseqüentemente, as emissões de CO₂ estão correlacionados (BOZOKLU; YILANCI, 2013).

O termo desacoplamento, utilizado no contexto deste estudo, foi usado primeiramente por Zhang (2000) e vem sendo empregado pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (*Organisation for Economic Co-operation and Development* - OECD) como um importante indicador da mitigação nas GE (OECD, 2002). O desacoplamento caracteriza a correlação direta entre a atividade econômica e a degradação ambiental. No entanto, apenas demonstrar a existência dessa correlação não é suficiente. É necessário também avaliar o comportamento desses dados no decorrer dos anos, ou seja, se está ou não ocorrendo o desacoplamento e, ainda, se é um fato isolado ou se está associado a uma mudança no padrão de consumo de energia de um determinado país.

Um estudo realizado por Vehmas et al. (2003) explorou melhor o desacoplamento ao atribuir, por exemplo, diferentes níveis e aspectos de desacoplamento. Com uma modificação deste estudo TAPIO (2005), chegou a oito possibilidades para avaliar diferentes níveis de desacoplamento para um determinado país. Logicamente, que um país desenvolvido tem maiores chances de obter o desacoplamento, pois tem possibilidade de empregar novas tecnologias de maior eficiência energética em larga escala. No entanto, o estágio de desenvolvimento não é a única força motriz para se atingir este quesito, outras ações são também desejadas, como expansão do uso de energias renováveis, por exemplo.

Wang et al. (2014) estudou estas relações, mas utilizaram uma ferramenta de análise desenvolvida por Tapio (TAPIO, 2005). Outros estudos também utilizaram o Método de Tapio como forma de classificar o desacoplamento e como esse se desenvolve (DAI; ZHANG; HUANG, 2016; TAPIO; FINEL, 2012). Estudos semelhantes para China também podem ser citados (FAN; WU, 2014; HU; GUI; ZHANG, 2017; LI; SUN; LI, 2015; LIU et al., 2011; NING et al., 2017; PENG et al., 2011; WANG; LI; ZHANG, 2017; YU et al., 2013). Outro estudo (LIMA et al., 2016) utilizou uma metodologia modificada da Identidade de Kaya para identificar os principais “*drivers*” das emissões de CO₂. Outros países também já foram estudados, como a Espanha (CLIMENT; PARDO, 2007) e África do Sul (LIN; BEIDARI; LEWIS, 2015), utilizando não apenas o Método de Tapio, mas utilizando também o método da OCDE (OECD, 2002) e uma variação do Método da Identidade de Kaya (KAYA, 1989). Outros estudos também analisaram as emissões de CO₂ e desenvolveram ferramentas que permitem a estimativa da intensidade energética de um dado país no ano de 2050 (BUDZIANOWSKI, 2012) ou prever emissões futuras de CO₂ (WU et al., 2015).

Diante disso, a proposta geral desta dissertação foi analisar as interações existentes entre esses indicadores de PIB, emissão de CO₂ e consumo energético, traçando paralelos entre os países, de forma a entender onde cada um se encontra do ponto de vista ambiental e econômico mostrando as principais mudanças de cada um para o período de 1990 a 2015.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

O objetivo deste trabalho foi analisar as relações entre as emissões de dióxido de carbono e o Produto Interno Bruto para as maiores economias globais, verificando o perfil do desacoplamento, tendo em vista uma escolha de países utilizando-se de dados atuais e previsões futuras para os maiores produtos internos brutos.

1.2.2 Específico

- i. Analisar o comportamento de cada país selecionado em relação ao desacoplamento no período de 1990 a 2015 e verificar se ocorre ou não este desacoplamento;
- ii. Caracterizar em qual tipo de desacoplamento cada país está inserido, caso o país esteja desacoplando;
- iii. Descrever o comportamento do perfil de emissões de cada país durante o período de tempo selecionado;
- iv. Identificar as principais forças motrizes que impulsionam cada alteração nos indicadores de PIB e emissão de CO₂ de cada país;

1.3 Justificativas

O grupo do G20 (as dezenove maiores economias do mundo mais a União Europeia) começou a incluir nas suas agendas econômicas alguns indicadores ambientais para eficiência energética e uso de energias renováveis. Além disso, os dados vem mostrando que a participação nas GEE das economias emergentes ultrapassou a parcela das emissões dos países desenvolvidos no G20 (YAO; FENG; HUBACEK, 2015). Assim, tanto os países emergentes quanto os que já possuem uma posição de liderança no cenário mundial são importantes para uma análise das emissões futuras de CO₂. A missão de mitigar os efeitos nocivos da emissão de GEE é árdua e a conjunção de esforços deve ser a principal via para se alcançar as metas estabelecidas. Como é possível verificar nos últimos dados da IEA, a *Conference of the Parties* (COP 23), realizada em Bonn/Alemanha em Novembro de 2017, ainda não é possível saber se as premissas do Acordo de Paris (COP 21) poderão ser alcançadas conforme estabelecidas (IEA, 2017b).

Neste contexto, entender as relações entre os principais indicadores (CO₂, PIB e consumo energético) é fundamental para que cada país possa planejar melhor o seu futuro, visando um crescimento mais sustentável e consciente dos problemas específicos de cada um, conforme suas realidades e perspectivas.

O reduzido número de registros científicos é outra justificativa sobre o assunto em questão, principalmente com o grupo de países selecionados. Nesse estudo, a metodologia da revisão de literatura apresentada foi baseada no trabalho de Costa (2010). A base de dados

utilizada neste trabalho foi a SCOPUS, que contém, não apenas artigos acadêmicos, mas outros tipos de publicações. A pesquisa não possui limite de ano de publicação nem limite quanto ao tipo de publicação. A procura se realizou apenas nos campos título, palavra-chave e resumo. A pesquisa abrangeu todas as áreas de conhecimento presentes no banco de dados. O operador “AND” certifica que as publicações encontradas contenham todas as palavras desejadas, enquanto o uso do operador “OR” possibilita um ou outro termo. O asterisco nas palavras-chave permite encontrar as variações dos termos, ampliando o número de resultados.

A primeira parcela ("*kaya*" OR "*Kaya Identity*" OR "*Kaya index*") coloca uma variedade de palavras relacionadas à Identidade de Kaya. Utilizando o operador “AND” juntou-se a primeira parcela à uma segunda parcela ("*carbon emission**" OR "*CO2 emission*" OR "*carbon dioxide emission*") na pesquisa. O Quadro 1 mostra um total de 125 artigos relacionando estes dois temas. Para refinar a pesquisa foi adicionada mais uma parcela ("*economic growth*" OR "*GDP*") reduzindo o número total de artigos para 56. Foi adicionada mais uma parcela, colocando o desacoplamento (*decoupling*) em perspectiva, ao inserir, além dos 3 anteriores "*decoup**" à pesquisa. Isto resultou em apenas 4 artigos, demonstrando a ausência de muitos artigos que levam todos estes temas em conjunto em consideração.

Mudando um pouco o foco das pesquisas e dessa forma abranger um pouco mais o número e variedade de artigos encontrados foi inserido como termos pesquisados apenas: ("*carbon emission**" OR "*CO2 emission*" OR "*carbon dioxide emission*") AND (*decoup**). Não se levou em consideração a Identidade de Kaya na pesquisa, alcançando um total de 348 artigos. Para apurar um pouco a busca, *adicionou-se mais uma parcela* ("*economic growth*" OR "*PIB*") reduzindo para um total de 189 artigos.

Por último, foi utilizada uma ferramenta de busca disponível pela própria base SCOPUS que permite a intersecção de duas parcelas, resultado em uma pesquisa conjugada, representada por: ((*"kaya"* OR "*Kaya Identity*" OR "*Kaya index*") AND ("*carbon emission**" OR "*CO2 emission*" OR "*carbon dioxide emission*") AND ("*economic growth*" OR "*GDP*")) OR ((*"carbon emission**" OR "*CO2 emission*" OR "*carbon dioxide emission*") AND (*decoup**) AND ("*economic growth*" OR "*GDP*")). Esta pesquisa resultou em um total de 189 artigos, todos com alguma aderência ao tema.

Quadro 1. Resultado da pesquisa bibliométrica por Termos Pesquisados

Termos Pesquisados	Nº de Resultados
<i>("kaya" OR " Kaya Identity " OR "Kaya index") AND ("carbon emission*" OR "CO2 emission" OR "carbon dioxide emission") AND ("economic growth" OR "GDP")</i>	58
<i>("kaya" OR " Kaya Identity " OR "Kaya index") AND ("carbon emission*" OR "CO2 emission" OR "carbon dioxide emission") AND (decoup*)</i>	8
<i>("kaya" OR " Kaya Identity " OR "Kaya index") AND ("carbon emission*" OR "CO2 emission" OR "carbon dioxide emission") AND (decoup*) AND ("economic growth" OR "GDP")</i>	4
<i>("carbon emission*" OR "CO2 emission" OR "carbon dioxide emission") AND (decoup*)</i>	348
<i>(("kaya" OR " Kaya Identity " OR "Kaya index") AND ("carbon emission*" OR "CO2 emission" OR "carbon dioxide emission") AND ("economic growth" OR "GDP")) OR (("carbon emission*" OR "CO2 emission" OR "carbon dioxide emission") AND (decoup*) AND ("economic growth" OR "GDP"))</i>	189

Fonte: SCOPUS (2018).

A seguir será apresentado o resultado da pesquisa apresentado no Quadro 1, cujo número de artigos encontrado foi de 189 artigos. Esses 189 registros foram analisados de forma a mostrar em termos quantitativos as publicações por ano, por país, área de conhecimento, os autores que mais publicam sobre o tema e os periódicos com maior número de publicações.

Publicações por Ano

O número de publicações por ano, onde a publicação mais antiga encontrada foi do ano de 1986, é mostrado na Figura 1. Outro artigo só apareceu na pesquisa novamente no ano de 1996. A partir de 1999 houve relativa constância nos resultados com um pico local de 5 artigos no ano de 2007.

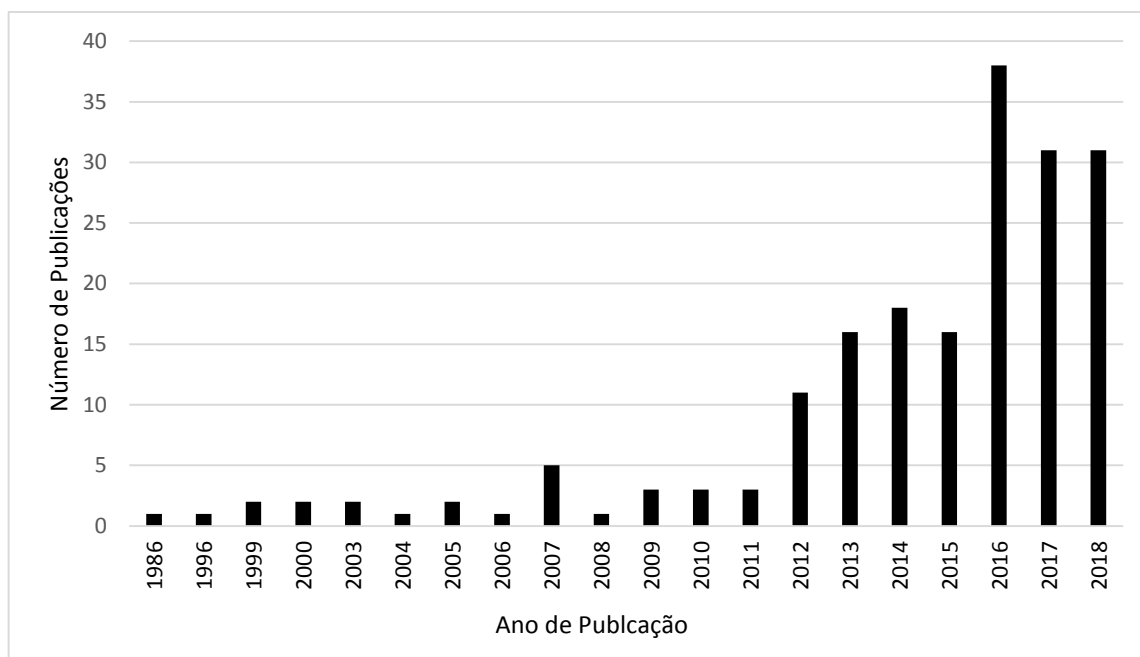


Figura 1. Número de artigos por ano de publicação

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do SCOPUS (2018).

No início da segunda década do século XXI é que o tema começou a ser discutido com mais expressividade, partindo de três resultados para 38 artigos em 2016.

Publicações por País

Em relação aos países que mais publicam e estudam o tema (Figura 2), a China é, com folga, o país com maior quantidade de artigos publicados, com 89 resultados e os Estados Unidos vêm em segundo lugar, com 18 artigos, um número quase 5 vezes menor. Um conjunto de países com 1 ou 2 publicações cada, somados, alcançam 35 artigos. Vale ressaltar que o Brasil apresenta apenas 1 artigo dentre os 189, o que demonstra o claro vazio de pesquisas relativas ao tema no país.

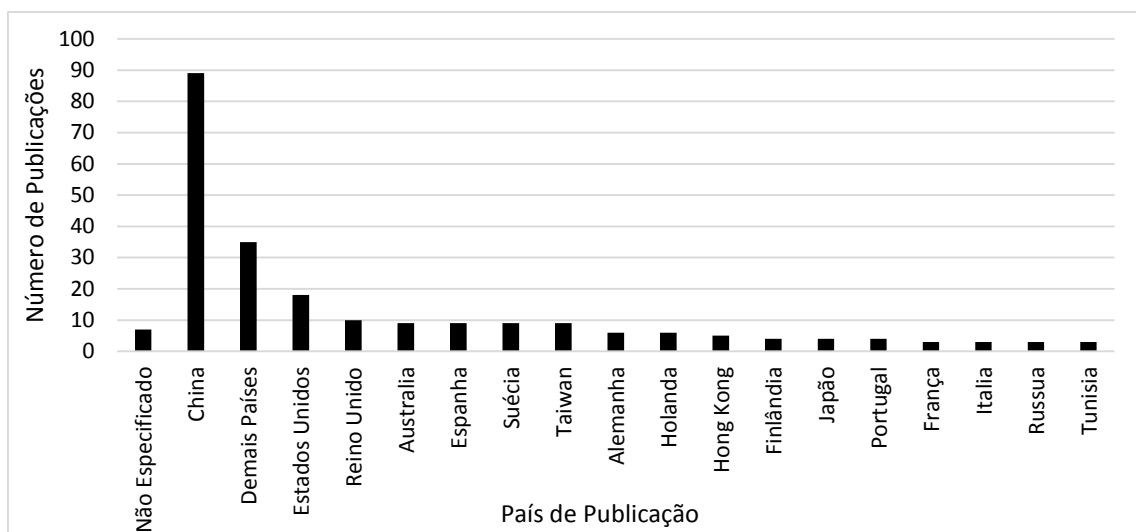


Figura 2. Número de publicações referentes ao tema em estudo por país

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do SCOPUS (2018).

Publicações por Área de Conhecimento

Estes 189 artigos foram agrupados em 18 áreas de conhecimento, pela própria base SCOPUS, mostrado pela Figura 3: Ciência Ambiental, Energia, Ciências Sociais, Engenharia, Ciência Sociais, Terra e Ciência Planetária, Gerenciamento de Negócios, Economia e Finança, Ciências Biológicas, Matemática, Ciência das Decisões, Engenharia Química, Química, Ciência Computacional, Ciência dos Materiais, Bioquímica, Genética e Biologia Molecular, Medicina, Farmacologia, Toxicologia e Farmacêutica e Artes e Humanidades.

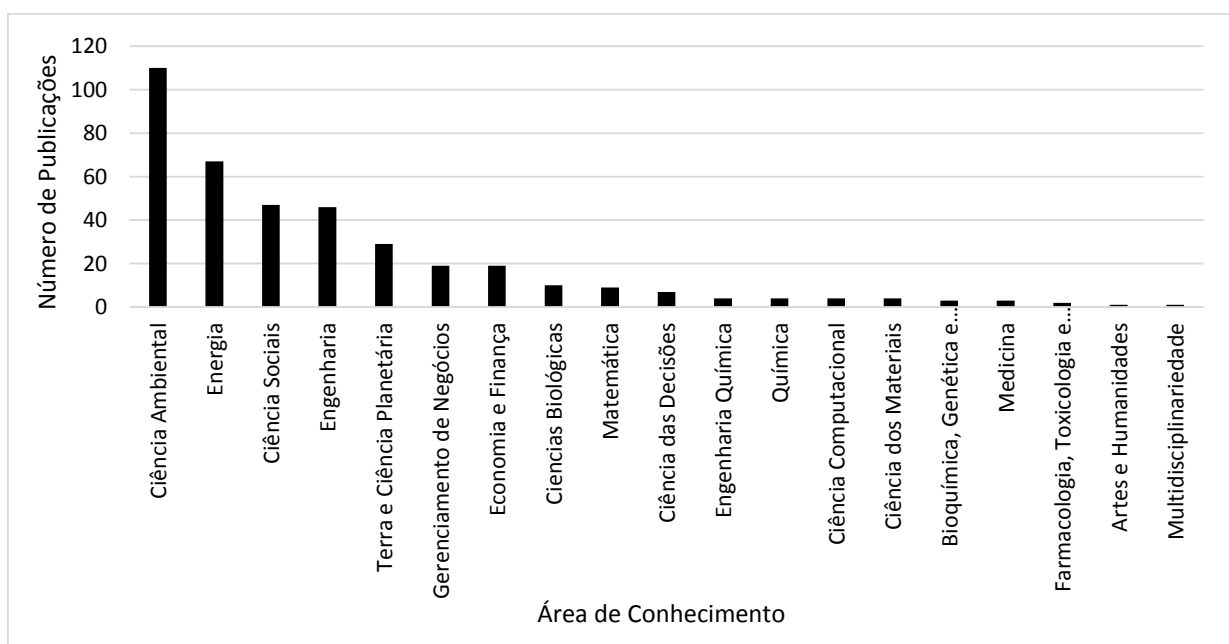


Figura 3. Número de Publicações por Área de Conhecimento

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do SCOPUS (2018).

Publicações por Periódico

A relação dos periódicos que mais publicaram em relação ao tema, conforme a base SCOPUS, pode ser vista no Quadro 2. O periódico *Journal Of Cleaner Production* soma 12 publicações no período, com *Energy Policy* com 11. A listagem contém todas os periódicos científicos com ao menos três artigos nesta seleção. Os periódicos com dois ou menos artigos publicados somam 99 publicações.

Quadro 2. Número de publicações por Periódico

Periódico	Publicações	Periódico	Publicações
<i>Journal Of Cleaner Production</i>	12	<i>Energy Economics</i>	4
<i>Energy Policy</i>	11	<i>Natural Hazards</i>	4
<i>Sustainability Switzerland</i>	10	<i>Polish Journal Of Environmental Studies</i>	4
<i>Energy</i>	7	<i>Aerosol And Air Quality Research</i>	3
<i>Advanced Materials Research</i>	6	<i>Applied Mechanics And Materials</i>	3
<i>Climate Policy</i>	5	<i>Energies</i>	3
<i>Ecological Indicators</i>	5	<i>Environmental Science And Pollution Research</i>	3
<i>Renewable And Sustainable Energy Reviews</i>	5	Demais periódicos	99
<i>Transport Policy</i>	5	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do SCOPUS (2018).

1.4 Questões de Pesquisa

- As semelhanças e diferenças entre cada Método utilizado e em quais situações podem ser utilizados?
- Qual a participação percentual de cada um dos países mais poluidores com relação no PIB mundial e emissões globais de CO₂?
- Quais países estão desacoplando e, caso estejam, em que estado de desacoplamento cada um deles ou o mundo se encontra?
- O estado mundial e de cada um dos países é suficiente para mitigar os efeitos do aquecimento global no futuro tendo em vista as emissões de CO₂ e o modelo de crescimento econômico apresentado?
- A trajetória dos indicadores relata uma conjuntura que é promissora ou não para os anos seguintes?

1.5 Estrutura do Trabalho

O primeiro capítulo apresenta a introdução do trabalho com contextualização, objetivos geral e específicos, justificativa e questões de pesquisa, método de pesquisa, delimitações e estrutura do trabalho.

O segundo capítulo trata-se da revisão de literatura com referencial teórico, a questão do desacoplamento de emissões, estado da arte e conclusão da revisão de literatura. O primeiro tema aborda questões básicas referentes às relações envolvidas entre CO₂, energia e PIB. O segundo refere-se artigos publicados que tratam do desacoplamento ou tendência de sua ocorrência. O terceiro mostra a aplicação de métodos para estudo do desacoplamento em diversos países. O último apresenta algumas conclusões a respeito do tema.

O terceiro capítulo refere-se à metodologia empregada na dissertação. Foram apresentadas a descrição do conjunto de países selecionados, as metodologias utilizadas e o que é o que aqui é chamado de Perfil de Emissão.

O quarto capítulo mostra os resultados para todas as análises, a participação de cada país em termos de emissão de CO₂ e PIB. Além do mais, os resultados das aplicações dos métodos e uma análise detalhada.

Por fim, o quinto capítulo mostra as considerações finais do trabalho e são apresentadas suas limitações, sugestões para trabalhos futuros e produções originadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção é apresentada a revisão de literatura, com o objetivo de apresentar os conceitos e fundamentos presentes neste trabalho. Foram descritos alguns conceitos básicos sobre as relações existentes entre as emissões de CO₂, consumo energético e crescimento econômico. Além disso, são mostrados outros artigos que tratam o tema além da conceituação, mas sim no enfoque do comportamento dessas relações existentes e seu acoplamento ou desacoplamento. Por fim, são mostrados alguns artigos recentes que utilizam a mesma metodologia utilizada nesta dissertação.

Para isso, o levantamento bibliográfico realizado na base SCOPUS que retornou 189 artigos foi analisada. Desses artigos 58 foram selecionados para uma análise prévia, sendo esse número reduzido para 16. Outros artigos foram obtidos a partir de mais pesquisas realizadas durante o período da dissertação.

Neste contexto, Saidi e Hammami (2015) concluíram em seu artigo, por meio de uma análise de 58 países, que o efeito do crescimento econômico no consumo de energia é positivo e significativo em um panorama global. Além disso, mostraram a relação direta entre consumo energético e emissões de CO₂. Portanto, para os autores, crescimento econômico, emissões de CO₂ e consumo energético são complementares.

Zhang e Da (2015) realizaram estudos buscando encontrar os meios eficazes para reduzir a intensidade de emissões de carbono (relação entre CO₂ e PIB) no Brasil e na China, respectivamente. Eles concluíram que o crescimento foi a maior causa do aumento das emissões no período de 1996 a 2010. Além disso, para os autores a intensidade energética e o consumo energético absoluto exercem papel fundamental na redução da intensidade carbônica e emissão de CO₂.

Abramovay (2014) deu destaque ao fato de estar ocorrendo duplicação da oferta de energia gerada por fontes renováveis, numa faixa temporal entre 2008 e 2012, em alguns países mais desenvolvidos. No caso do Brasil, Didoné et al (2014) mostraram que 44% da matriz energética brasileira é composta por energias renováveis.

Para Bozoklu e Yilanci (2013) o consumo de energia é um dos fatores básicos vinculado ao desenvolvimento econômico. Políticas energéticas de alguns países vêm sendo alteradas devido ao Protocolo de Kyoto que visa reduzir as emissões e frear as mudanças climáticas. No entanto, os países em desenvolvimento visam um maior desenvolvimento econômico e isto acarreta um maior consumo energético por parte destes. Assim, um maior e mais extenso estudo

dessas novas políticas energéticas e seus efeitos na economia e conseqüentemente nas emissões deve ser realizado. Niu et al. (2011) demonstraram essa mesma questão, a existência de uma relação entre consumo energético e emissões de CO₂ para 8 países asiáticos estudados. Porém, os autores vão além e dizem que apesar do uso de CO₂ per capita ser menor em países em desenvolvimento, o consumo por unidade de energia é muito maior do que nos países desenvolvidos, principalmente devido a questões tecnológicas, diferenças de investimentos em geração de energia de fontes alternativas e menor eficiência energética. Kais e Sami (2016) também apontaram a ligação entre crescimento econômico e emissões de CO₂.

Lucon e Goldemberg (2009) afirmaram que a intensidade energética representa o consumo de energia por PIB no país. Vale salientar que tanto a intensidade energética quanto a intensidade de dióxido de carbono têm conexão com a tecnologia utilizada no período considerado. Alvim e Santin (2008a) mostraram que o consumo de energia e o consumo energético *per capita* tende a ser menor com os avanços tecnológicos. Já a intensidade de dióxido de carbono tem conexão estreita com a matriz energética do país estudado.

Segundo Sahir e Qureshi (2007) a energia como parte essencial de uma economia, bem como o desenvolvimento socioeconômico sendo também reconhecida como uma das mais importantes mercadorias estratégicas. Fiorito (2013) chegou às mesmas conclusões, mas diz que a razão consumo energético e PIB não é tão útil para demonstrar o estado de desenvolvimento econômico de um país.

Um estudo para determinar as relações de equilíbrio entre consumo energético, emissões de carbono e o PIB para o Brasil foi feito por Pao e Tsai (2011). Este estudo mostrou que existe sim essas relações, mas não são tão fortes quanto em outros países. Eles comentaram que esta diferença é basicamente devido ao setor energético brasileiro contribuir pouco para as emissões dado a uma matriz energética mais limpa e sustentável.

As políticas energéticas de alguns países vêm sendo alteradas devido ao Protocolo de Kyoto e ao Acordo de Paris que visam reduzir as emissões e frear as mudanças climáticas. Abramovay (2014) deu destaque ao fato de estar ocorrendo duplicação da oferta de energia gerada por fontes renováveis, numa faixa temporal entre 2008 e 2012. No caso do Brasil, estudos mostraram que quase metade da matriz energética brasileira é composta por energias renováveis (DE SOUZA et al., 2015; DIDONÉ; WAGNER; PEREIRA, 2014).

2.1 Desacoplamento de Emissões de CO₂ e Crescimento Econômico

Wang, Li e Liao (2016) mostraram resultados, obtidos pelo Método da Identidade de Kaya, que sugerem a ocorrência do desacoplamento das emissões de CO₂ e o PIB de diversos grupos de países, demonstrando que o crescimento econômico sem um aumento nas emissões de dióxido de carbono não é apenas uma hipótese, mas uma realidade. Um estudo semelhante foi feito por Freitas e Kaneko (2011) que mostrou um desacoplamento da atividade econômica e da emissão de CO₂ do consumo energético no ano de 2009. O Brasil nesse ano atingiu um padrão de baixa emissão que aproxima o país de um pequeno grupo de países que também registraram tal fato. O estudo concluiu que a diminuição da intensidade carbônica e a diversificação da matriz energética foram os fatores principais para redução. Os resultados também sugerem que intensidade energética, a atividade econômica e o crescimento populacional estão entre os indicadores que mais afetam as emissões.

Wang et al. (2014) utilizaram a metodologia da Identidade de Kaya em conjunto com o modelo de desacoplamento de Tapio (Tapio, 2005) para estudar as relações entre as emissões de gás carbônico e crescimento econômico. Rustemoglu & Andrés (2016) utilizaram uma extensão do método de Kaya para analisar as emissões de CO₂ relacionadas com o consumo energético. Seus resultados demonstram que, para os países por eles estudados, essa emissão de gases, relativa à energia consumida, é um problema de grande relevância.

Kasperowicz (2015) investigou a relação entre crescimento econômico e emissão de CO₂, neste caso para 18 países membros da União Europeia. Seu estudo mostrou uma situação de desacoplamento destes dois indicadores, dado ao desenvolvimento de novas tecnologias de baixo carbono que permitem manter a produção emitindo menos CO₂.

Zhang e Wang (2013) utilizaram o Método de Tapio para investigar o desacoplamento entre CO₂ e PIB em uma província da China. Durante o período estudado, a província experimentou dois estados de desacoplamento. Contudo, analisar diversos setores econômicos em separado mostrou-se um problema. No entanto, o artigo demonstrou que, de forma geral, o PIB cresceu de forma mais acelerada do que as emissões de CO₂ na província de Jiangsu.

Dai, Zhang e Huang (2016) falaram a respeito de uma diferença de intensidade energética dos BRICS e países desenvolvidos. Nas últimas duas décadas a ameaça do aquecimento global e mudanças climáticas tornou-se uma preocupação a nível mundial. Para os autores, entender as emissões de CO₂ é essencial para descobrir formas de diminuir estas emissões. Além disso, o rápido crescimento das emissões de CO₂ relacionadas a geração de energia nos países do

BRICS é alarmante. O artigo estudou, então, o desacoplamento do PIB e emissões de CO₂ para estes cinco países. Por fim, sugeriu que a utilização de novas tecnologias e novas políticas deveriam ser fortalecidas nesse grupo de países.

De acordo com Conte Grand (2016), assim como grande parte da comunidade científica, para evitar danos ainda mais sérios ao ambiente devido a mudanças climáticas, o aumento da temperatura global não pode ultrapassar os 2 graus Celsius até o fim do século, sugerindo que para se obter esse resultado deve ocorrer uma redução entre 45%-70% das emissões de CO₂ até o ano de 2050 comparando-se dados de 2010. Além disso, diz que reduzir a intensidade de emissão de CO₂, dado pela razão CO₂/PIB, não deve ser o único objetivo, já que tal redução pode ocorrer enquanto as emissões de CO₂ aumentam. Além disso, dependendo do método utilizado, conclusões diferentes podem ser acontecer enquanto em alguns casos uma congruência de opiniões é obtida. Além disso, mostrou que reduzir a intensidade de emissão de CO₂, dada pela razão PIB/ CO₂, não deve também ser o único objetivo dado que tal redução pode ocorrer enquanto as emissões de CO₂ aumentam.

2.2 Métodos de Validação do Desacoplamento

Wang et al. (2014) fizeram uso da metodologia da Identidade de Kaya em conjunto com o modelo de desacoplamento de Tapio (TAPIO, 2005) para estudar as relações entre as emissões de gás carbônico e crescimento econômico. Rustemoglu e Andrés (2016) usaram uma extensão do método de Kaya para analisar as emissões de CO₂ relacionadas com o consumo energético. Seus resultados demonstraram que, para os países por eles estudados, essa emissão de gases relativa a energia consumida é um problema de grande relevância. Lima et al. (2016) relacionaram a quantidade de energia consumida ao desenvolvimento socioeconômico utilizando uma metodologia que inclui uma análise que utiliza a Identidade de Kaya como ponto de partida. Além disso, disseram que com a ameaça das mudanças climáticas, as condições de consumo energético insustentáveis não podem continuar. Algumas estatísticas mencionadas mostraram que 87% da energia primária vem de fontes fósseis não renováveis. De forma geral, os autores concluíram que a intensidade energética e fatores de afluência possuem os maiores impactos nas mudanças de emissões de CO₂ relacionadas ao consumo energético nos países por eles analisados.

Lin, Beidari e Lewis (2015) utilizaram 3 métodos para estudar o desacoplamento na África do Sul. Foram eles: Método da Identidade de Kaya, Método de Tapio e Método OCDE. O objetivo principal foi mostrar as similaridades e diferenças entre os métodos, bem como suas

diferentes aplicações, com o Método de Kaya sendo mais utilizado para entender a força motriz principal das emissões de CO₂. Neste estudo, os métodos OCDE e Tapio apresentaram diferentes estados de desacoplamento, mas de certa forma bem correlacionados. Isso pôde ser explicado pelo fato do Método OCDE usar um ano base para comparação enquanto Tapio utiliza um modelo de comparação com o ano anterior. Para o autor o método OCDE foi mais simplório ao oferecer apenas dois estados de desacoplamento.

Hu, Gui e Zhang (2017) utilizaram tanto o Método OECE quanto o Método de Tapio para estudar a relação entre o setor produtivo chinês e as emissões de CO₂. O estudo mostrou que a relação entre a produção geral dos mais diversos setores da economia e as emissões de CO₂ inerentes apresentaram uma relação de queda, ou seja, maior aumento na produção do que nas emissões de CO₂. O estudo mostrou também, que em diversos setores da economia foi possível atingir um aumento na produção diminuindo as emissões de CO₂ e os autores atribuem isso às novas tecnologias empregadas.

2.3 Conclusão da Revisão da Literatura.

Todos os países visam um maior crescimento econômico e isto, logicamente, acarreta um maior consumo energético por parte destes. Assim, um maior e mais extenso estudo dessas novas políticas energéticas e seus efeitos na economia e, conseqüentemente nas emissões, vem sendo realizado utilizando-se as mais diversas técnicas. Os diferentes autores aqui expostos buscaram analisar os elementos que originam as causas do aumento ou redução das emissões de gases poluentes. Todos eles aqui expostos, de certa forma, analisaram as emissões de CO₂, comparativamente ao crescimento populacional e econômico, encontrando aí as razões para a compreensão das questões relacionadas ao assunto. Com isso, é possível pensar em formas de mitigar os efeitos nocivos do excesso de CO₂ na atmosfera ao desenvolver leis e projetos que foquem nas principais causas dessas emissões nos mais diversos países.

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição do Conjunto de Países Selecionados

O presente trabalho foi elaborado a partir de dados obtidos na base de dados da IEA (IEA, 2017c). O período analisado inicia em 1990 e termina em 2015. As emissões de CO₂ originada da queima de combustível fóssil está em milhões de toneladas e o PIB em bilhões de dólares 2010. Além disso, dados da *Energy Information Agency* (EIA, 2017) foram utilizados para mostrar a situação mais detalhada para os EUA.

Observando o PIB mundial no ano de 2015 nota-se como os cinco maiores países em termos econômicos EUA, China, Índia, Japão e Alemanha. Porém, esta não é uma situação que tende a se manter nas próximas décadas, de acordo com uma projeção feita pela OCDE (OECD, 2017). Para o ano de 2060 esta estimativa mostra que as cinco maiores economias poderão ser China, Índia, EUA, Japão e Brasil. Além do mais, de acordo com os dados, a Rússia viria em sexto lugar, com um PIB próximo ao do Brasil. Devido a possíveis erros nas projeções, o fato da Rússia ter semelhanças econômicas e populacionais com os demais países, e ainda, fazer parte dos BRICS (acrônimo que se refere ao grupo de países formado por: Brasil, Rússia, Índia, China, e África do Sul), juntamente com China, Índia e Brasil, este país também foi inserido nesta análise. Além desses, o Mundo como um todo foi inserido como forma de estudar, também, a situação do planeta.

Diversos estudos citados neste trabalho mostraram a relação entre o crescimento econômico e as emissões de CO₂. Portanto, é importante avaliar como estes países estão participando do crescimento econômico global e desenvolvendo as suas matrizes energéticas. Em resumo é necessário estudar o grau de acoplamento/desacoplamento de cada país.

Logo, os sete países ou grupo estudados neste trabalho são: China, Índia, EUA, Japão, Brasil, Rússia e Mundo. Os seis países, hoje, respondem por praticamente 60% das emissões globais de CO₂. Os demais são responsáveis por cerca de 40% do total da GGE.

3.2 IPAT e Identidade de Kaya

A Identidade de Kaya é uma metodologia que traz consigo o conceito de que a variação das emissões de CO₂ tem relação com o produto de quatro indicadores: a variação populacional, PIB per capita, intensidade energética (energia por unidade de PIB) e intensidade de dióxido de carbono (emissão de CO₂ por unidade de energia consumida) (BUDZIANOWSKI, 2013; KAYA, 1989).

A Identidade de Kaya é uma forma geral da equação $I = PAT$ que correlaciona os impactos ambientais (I) com três outros fatores: população (P), afluência (A) e tecnologia (T) (EHRLICH et al., 1971). Kaya desenvolveu esta decomposição matemática com objetivo de quantificar as emissões de dióxido de carbono, em comparação com o consumo energético e a intensidade carbônica (HENRIQUES; BOROWIECKI, 2014). Na Identidade de Kaya, impacto está relacionado às emissões de CO₂ e tecnologia é dividida em intensidade energética e intensidade de dióxido de carbono.

Dando ênfase, então, ao modelo de composição de Kaya focado nas emissões de carbono relativas ao uso energético, tem-se, como mostra a Equação 1:

$$CO_2 = ((CO_2)/TPES)(TPES/TFC)(TFC/PIB)(PIB/P)(P)$$

Equação 1. Emissões de carbono relativas ao uso energético

Fonte: Adaptado de Lin; Beidari & Lewis, (2015)

Onde, CO₂ são as emissões de dióxido de carbono;

CO₂/TPES é a emissão de CO₂ por unidade do *Total primary energy supply* (TPES) que depende de fatores relacionados a emissão e a mistura de combustível; [MtCO₂/toe]

TPES/TFC é o consumo energético dividido pelo *Total final energy consumption* (TFC) que depende da eficiência de conversão e mistura de combustível;

TFC/PIB é o *Total final energy consumption* por produto interno bruto (PIB) que depende da intensidade energética do consumidor final; [toe/USD]

PIB/P que é o PIB per capita; e por último P para população. [USD per capita]

Este modelo mostra que, para um dado momento, as emissões de CO₂ podem ser obtidas através da multiplicação de cinco componentes da Identidade de Kaya. As mudanças de comportamento de seus componentes permitem uma forma de avaliar a emissão de CO₂ baseada em pontos chave, como a economia, demografia e intensidade energética que levam a essa emissão. Esta é uma metodologia que pode mostrar padrões bem distintos entre países desenvolvidos e não desenvolvidos (ALBRECHT; FRANÇOIS; SCHOORS, 2002). O ano de referência é 1990, cujo valor base é igual a 100.

3.3 Método de Tapio

O Método de Tapio foi inicialmente desenvolvido em 2005, como uma extensão da classificação de Vehmas (VEHMAS et al., 2003), de forma a analisar o desacoplamento do crescimento do volume de transporte e crescimento econômico (TAPIO, 2005). O resultado foram 8 estados de desacoplamento. Em um outro estudo mais recente, Tapio adequou esta estrutura de forma a considerar as variáveis: emissão de CO₂ e crescimento econômico (TAPIO; FINEL, 2012).

Neste contexto, a taxa de crescimento do PIB e das emissões podem estar acopladas, desacopladas ou negativamente desacopladas. A Equação 2 representa então o método proposto por Tapio (2005).

$$d = \%EP/\%DF$$

Equação 2. Método Proposto por Tapio (2005)

Fonte: Adaptado de Lin; Beidari & Lewis (2015)

Onde "d" é a elasticidade do desacoplamento, a sigla EP significa a *environmental pressure* (pressão ambiental referente às emissões CO₂) e DF *driving force* (força motriz referente ao PIB).

Posteriormente o método foi adaptado onde a Equação 2 foi reescrita como mostra a Equação 3:

$$d = \%CO2/\%PIB$$

Equação 3. Adaptação do Método de Tapio para CO₂

Fonte: Adaptado de Lin; Beidari & Lewis (2015)

Onde: %CO₂ e %PIB representam a variação percentual das emissões de CO₂ e do PIB, respectivamente.

Os valores das taxas podem ser calculadas fazendo: %CO₂ = (CO₂_t - CO₂_{t-1})/CO₂_{t-1} e %PIB = (PIB_t - PIB_{t-1})/PIB_{t-1}, onde t representa um ano qualquer. O período de tempo estudado pode ser agrupado em pequenos intervalos de tempo onde quanto mais indefinido o padrão maior este intervalo (TAPIO, 2005). No caso do nosso trabalho este intervalo é de 5 em 5 anos.

Um valor de elasticidade igual a 1 significa que as emissões e o PIB crescem a uma taxa equivalente. A metodologia de Tapio de forma a não interpretar erroneamente variações pequenas ou pontuais como sinais de desacoplamento, adota uma variação de 20% para mais ou para menos como acoplamento. Portanto, valores entre 0,8 e 1.2 são considerados como acoplados. Ainda, %CO₂ e %PIB podem ser tanto positivos ou negativos, levando a um acoplamento expansivo e acoplamento recessivo, respectivamente.

Segundo o método o desacoplamento pode ser dividido em seis situações e combinações entre os indicadores. Na primeira tem-se o desacoplamento fraco quando $0 < d < 0,8$ com as emissões e o PIB positivos. Na segunda um o desacoplamento negativo fraco com $d > 1,2$ onde tanto %CO₂ e %PIB são maiores do que zero. A terceira é o desacoplamento negativo forte com elasticidade menor do que 0, %PIB < 0 e %CO₂ > 0. Na quarta o desacoplamento forte quando tanto a %CO₂ e %PIB são negativos e $d < 0$ e na quinta desacoplamento recessivo quando $d \leq 1,2$ e %CO₂ e %PIB decrescem, com a economia reduzindo menos do que as emissões. Por último, desacoplamento negativo recessivo que ocorre quando ambas variáveis estão decrescendo sendo $0 < d < 0,8$. Todas estas categorias foram alocadas em quadrantes e alguns desses quadrantes foram divididos. Um resumo de todos estes estados está presente no Quadro 3.

Quadro 3. Resumo dos Estados de Desacoplamento para o Método de Tapio

Quadrante	L*	Condições	Estado de Desacoplamento
I	a	$0 < d \leq 0,8$ %CO ₂ > 0 ; %PIB > 0	Desacoplamento fraco
	b	$0,8 < d \leq 1,2$ %CO ₂ > 0 ; %PIB > 0	Acoplamento Expansivo
	c	$d > 1,2$ %CO ₂ > 0 ; %PIB > 0	Desacoplamento Negativo Fraco
II	-	$d \leq 0$ %CO ₂ > 0 ; %PIB > 0	Desacoplamento Negativo Forte
III	a	$0 < d \leq 0,8$ %CO ₂ ≤ 0 ; %PIB ≤ 0	Desacoplamento Negativo Recessivo
	b	$0,8 < d \leq 1,2$ %CO ₂ ≤ 0 ; %PIB ≤ 0	Acoplamento Recessivo
	c	$d \leq 1,2$ %CO ₂ ≤ 0 ; %PIB ≤ 0	Desacoplamento Recessivo
IV	-	$d \leq 0$ %CO ₂ ≤ 0 ; %PIB > 0	Desacoplamento Forte

Fonte: Adaptado de Tapio (2005)

* legenda da Figura 4

Uma visualização gráfica das divisões presentes neste método pode ser visto na Figura 4. As linhas cinzas representam o limite onde a elasticidade é 0,8 e 1,2.

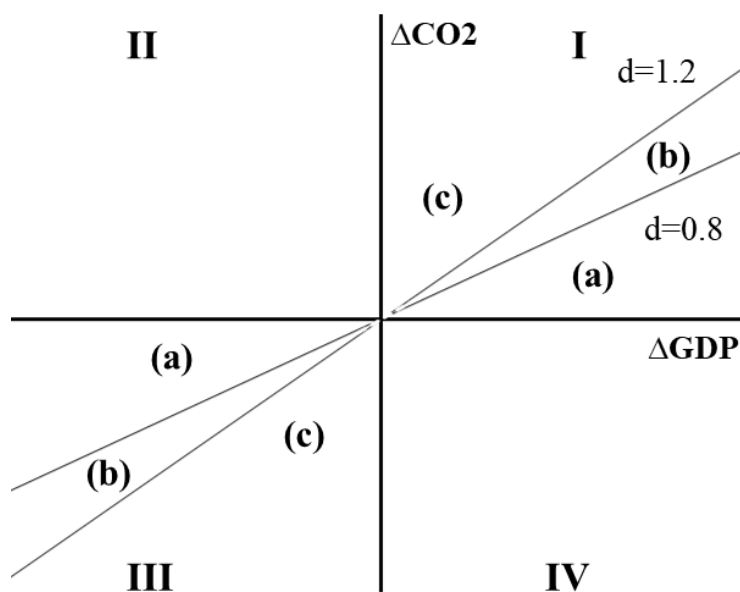


Figura 4. Estados de Acoplamento e Desacoplamento para o Método de Tapio

Fonte: Adaptado de Tapio (2005)

É importante ressaltar que o ideal é um país estar localizado no quadrante IV, onde o PIB cresce e as emissões decrescem o que resulta em um desacoplamento forte. Já o quadrante I-a, apesar de não ser o ideal, também apresenta desacoplamento de forma positiva, já que o valor da elasticidade está entre 0 e 0,8, mostrando que apesar de ambos CO₂ e PIB estarem aumentando, o crescimento econômico é maior. Qualquer dos estados que possuem no nome a palavra “negativo” (I-c;II;III-a) é indicativo de que o desacoplamento está ocorrendo, mas as emissões crescem mais do que a economia. Os quadrantes onde acontecem um acoplamento (I-b;III-b) tem o valor de elasticidade entre 0,8 e 1,2. Isto significa que nesses quadrantes tanto o CO₂ quanto o PIB podem ser maiores que o outro, porém, pela definição, o desacoplamento só é caracterizado quando essa diferença percentual é maior do que 20% para mais ou para menos.

3.4 Método de Desacoplamento da OCDE

A OCDE define desacoplamento como o processo de quebra entre a relação entre uma pressão ambiental (EP) e um benefício econômico ou força motriz (*driving force -DF*) (OECD, 2002). O indicador de desacoplamento é definido pelas Equação 4 e Equação 5:

$$\text{Índice de desacoplamento} = \left(\frac{EP}{DF}\right)_t / \left(\frac{EP}{DF}\right)_{t_0}$$

Equação 4. Índice de Desacoplamento OCDE

Fonte: Adaptado de Lin; Beidari & Lewis, (2015)

Fator de desacoplamento = 1 – Decoupling Index

Equação 5. Fator de Desacoplamento OCDE

Fonte: Adaptado de Lin; Beidari & Lewis, (2015)

Onde “t” é o fim do período analisado e T₀ o início do período. Neste estudo EP está relacionado as emissões de CO₂ e DF relacionado ao PIB.

Caso o índice desacoplamento seja menor do que 1 significa que durante o período o desacoplamento ocorreu. No entanto, apenas esse valor não mostra se o desacoplamento é absoluto ou negativo. Caso esse index seja maior ou igual a 1 (consequentemente o fator de desacoplamento seria negativo ou 0) não há desacoplamento. Se o valor do fator desacoplamento estiver entre 0 e 1 é indicativo que ocorreu algum grau de desacoplamento (OECD, 2002).

Quando as emissões de CO₂ e o crescimento econômico são positivos, mas a taxa de crescimento das emissões é menor do que a do PIB tem-se o desacoplamento relativo. O desacoplamento absoluto ocorre quando a taxa de crescimento das emissões é zero ou negativa e a taxa de crescimento do PIB é positiva. As taxas de crescimento das emissões de CO₂ e crescimento do PIB podem ser vistas pelas Equação 6 e Equação 7, respectivamente, onde t representa um ano qualquer.

$$\%CO_2 = \frac{CO_{2t} - CO_{2t-1}}{CO_{2t-1}}$$

Equação 6. Taxa de Crescimento de CO₂

Fonte: Adaptado de Lin; Beidari & Lewis, (2015)

$$\%PIB = \frac{PIB_t - PIB_{t-1}}{PIB_{t-1}}$$

Equação 7. Taxa de Crescimento do PIB

Fonte: Adaptado de Lin; Beidari & Lewis, (2015)

3.5 Perfil de Emissão de CO₂

O Perfil de Emissões de CO₂ é uma modelagem que pode ser realizada a partir de um conjunto de dados de forma a se encontrar uma trajetória que identifica se um determinado país

está desempenhando com maior ou menor eficácia as medidas para se alcançar uma matriz energética mais ou menos poluente. A respectiva modelagem relaciona as emissões de CO₂ e o crescimento econômico e populacional, para um período de tempo específico, por meio da relação de dois indicadores. Este perfil é um recorte temporal da trajetória de 2 indicadores. A partir da análise do período investigado pode-se projetar então uma perspectiva futura de como as principais nações poderão estar influenciando na descarbonização do Planeta.

O primeiro indicador é obtido pela razão entre as emissões de CO₂ e o número de habitantes (CO₂/POP) chamado de emissão de CO₂ per capita. O segundo indicador é obtido pela razão entre as emissões e o PIB (CO₂/PIB) é chamada de intensidade de emissão de CO₂. A curva construída ao longo do tempo pela interseção destes dois indicadores é chamada de Perfil de Emissões de CO₂. A emissão de CO₂ per capita é dada em toneladas de CO₂ (tCO₂) e a intensidade de emissão de CO₂ é dada em milhões de toneladas (Mt) por USD relativos ao ano de 2010 (Mt/\$), seguindo o padrão da origem do dado.

Desta forma, o Perfil de Emissões demonstra o quanto um determinado país está em trajetória temporal mais ou menos poluente em relação ao desenvolvimento alcançado e ao aumento populacional. Ou seja, pode-se dizer o seguinte: quando a trajetória dos valores descritos no gráfico caminha em direção ao vértice dos eixos (ponto 0,0) indica que um determinado país está tendo aumento populacional e crescimento econômico maiores que o aumento das emissões de CO₂ no período. Isto é o que todos os países deveriam fazer para obterem uma matriz energética mais limpa. Assim, este é então um mecanismo que pode ser utilizado para a verificação da descarbonização da matriz energética de um determinado país.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A relação CO₂ - PIB é uma comparação direta que pode ser realizada para se avaliar a participação percentual das emissões de CO₂ comparativamente ao tamanho da economia de um determinado país. O ideal é que um país tenha participação percentual na economia maior que a participação percentual nas emissões de CO₂.

4.1 Participação nas Emissões de CO₂ e PIB

As participações de cada país selecionado com relação ao PIB mundial em 2015 pode ser visto na Figura 5A e a Figura 5B mostra a projeção da OCDE destes mesmo países no ano de 2060 quanto a participação no PIB (OECD, 2017). Além disso, a Figura 5C mostra as emissões totais de CO₂ em 2015. É possível notar que estes seis países selecionados, para o ano de 2015, possuem uma parcela de 50,48% do PIB mundial. Somente os EUA é responsável por 21,99% acompanhado pela China com 12,15% (Figura 5A). Já nas emissões de CO₂ o Mundo, em 2015, emitia um total de 32294,21 Mt. Desse total os EUA são responsáveis por 15,47% e a China com 28,13%. É importante ressaltar que, além da elevada parcela do PIB, os seis países em conjunto possuem 59,48% das emissões mundiais de CO₂.

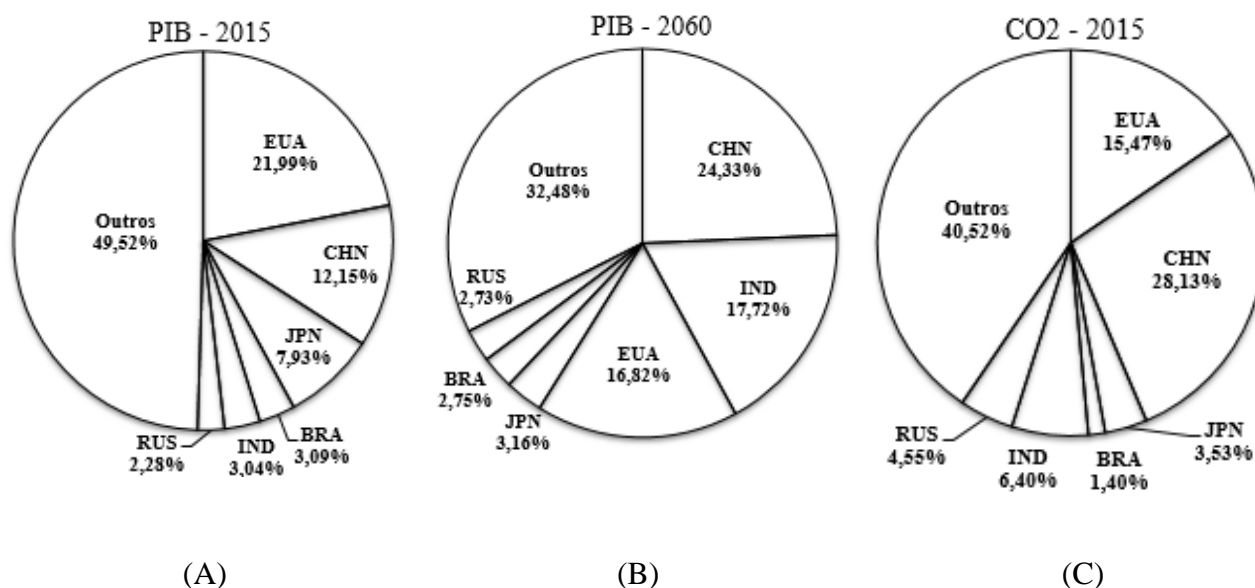


Figura 5. Participação dos países, (A) PIB – 2015, (B) PIB - 2060 e (C) Emissão de CO₂ – 2015

Fonte: Adaptado de (IEA, 2017).

A projeção do PIB para 2060, Figura 5B, mostra que se a soma de todas as economias será responsável por 67,52%, ou seja, estes 6 países terão cerca de dois terços do PIB mundial. Este fato torna ainda mais interessante o estudo da situação atual para que dessa forma seja possível avaliar a perspectiva futura desses países quanto as emissões de CO₂.

A razão entre a participação percentual em relação ao mundo das emissões de CO₂ e PIB, de cada país, é um bom dado para indicar se um determinado país está com participação maior ou menor frente as emissões de CO₂. O comportamento desejado é que o país possua maior participação econômica em detrimento de uma maior fatia das emissões de CO₂ a nível mundial, portanto, o ideal é uma razão menor do que 1. A Tabela 1 mostra a razão entre as porcentagens dos dois indicadores.

Tabela 1- Razão CO₂/PIB no ano de 2015

	CHINA	ÍNDIA	EUA	JAPÃO	BRASIL	RÚSSIA
PIB	12,15%	3,04%	21,99%	7,93%	3,09%	2,28%
CO₂	28,13%	6,40%	15,47%	3,53%	1,40%	4,55%
RAZÃO	2,31:1	2,10:1	0,70:1	0,45:1	0,45:1	1,99:1

Fonte: Elaborado pelo autor. (IEA, 2017)

Dentre os países em análise apenas três deles apresentaram esta razão CO₂/PIB menor do que 1, sendo estes Brasil, EUA e Japão (0,45:1, 0,70:1 e 0,45:1). Os demais possuem razão maior do que 1, indicando que a parcela relativa às emissões é maior que o tamanho percentual da economia. Dentre os seis, Japão e Brasil possuem razão semelhante mostrando que detém as matrizes energéticas que menos emitem CO₂ em relação a parcela da economia. De forma contrária a China (2,31:1) é o país que mais emite CO₂ frente a sua porcentagem de participação no PIB.

Logo, caso essas razões se mantenham a mesma pelas próximas décadas, no ano de 2060 a China seria responsável por 56,20% das emissões totais (24,33 x 2,31). A Índia seria responsável por 37,21% das emissões (17,72 x 2,10).

Contudo, tanto Figura 5 quanto a Tabela 1 mostram apenas um relato estático. A maneira que as mudanças ocorreram ao longo dos anos pode, então, ser estudada pelas metodologias de Tapio e da OCDE que indicam se está havendo ou não desacoplamento dos dois indicadores.

4.2 Análise do desacoplamento por diferentes métodos

As Figura 6 a Figura 12 apresentam os resultados obtidos ao se aplicar os dois métodos em cada um dos países. Cada Figura está dividida em duas partes: (A) pode-se analisar o Método OCDE e em (B) ver o Método de Tapio, com seus respectivos indicadores. Os valores detalhados do fator de desacoplamento e do coeficiente de elasticidade estão no Apêndice A. É de suma importância ressaltar que os gráficos não estão todos em uma mesma escala uma vez que os valores de cada país são bem distintos.

A Figura 6 mostra o comportamento do Mundo. Para o Método OCDE a Figura 6A demonstra um comportamento de desacoplamento em todos os anos analisados. De forma parecida, o Método de Tapio (Figura 6B) demonstrou um quadro onde ocorreu desacoplamento fraco (região I-a) em três períodos de tempo (1990-1995; 1995-2000; 2010-2015). Os outros dois períodos encontram-se numa região que é considerada de acoplamento (I-b). Em nenhum momento o planeta demonstra desacoplamento forte, que seria aumento da atividade econômica com diminuição das emissões de CO₂.

Observando, de forma detalhada cada país, a Figura 7 demonstra os resultados para a China. O Método de Tapio (Figura 7B) demonstrou desacoplamento na maioria dos períodos (1;2;4;5), com o país em numa situação, apesar de não ideal, em um estado de desacoplamento fraco (I-a), com a economia crescendo mais do que as emissões. Esta questão também pode ser levantada na Identidade de Kaya (Figura 714A) ao se observar a razão CO₂/PIB em constante queda (-56,17% no período 1990-2015) e, conseqüentemente, o distanciamento entre os índices de PIB (aumento de 882,57% no período 1990-2015) e emissão de CO₂ (aumento de 330,71% no período 1990-2015). O período de 2000 a 2005 apresentou um período onde o fator de desacoplamento começou a diminuir, embora ainda considerado que o país esteja desacoplado. O ponto 3 no método de Tapio mostra que para esse mesmo período a China esteve em desacoplamento negativo fraco (I-c), com as emissões crescendo mais do que a economia.

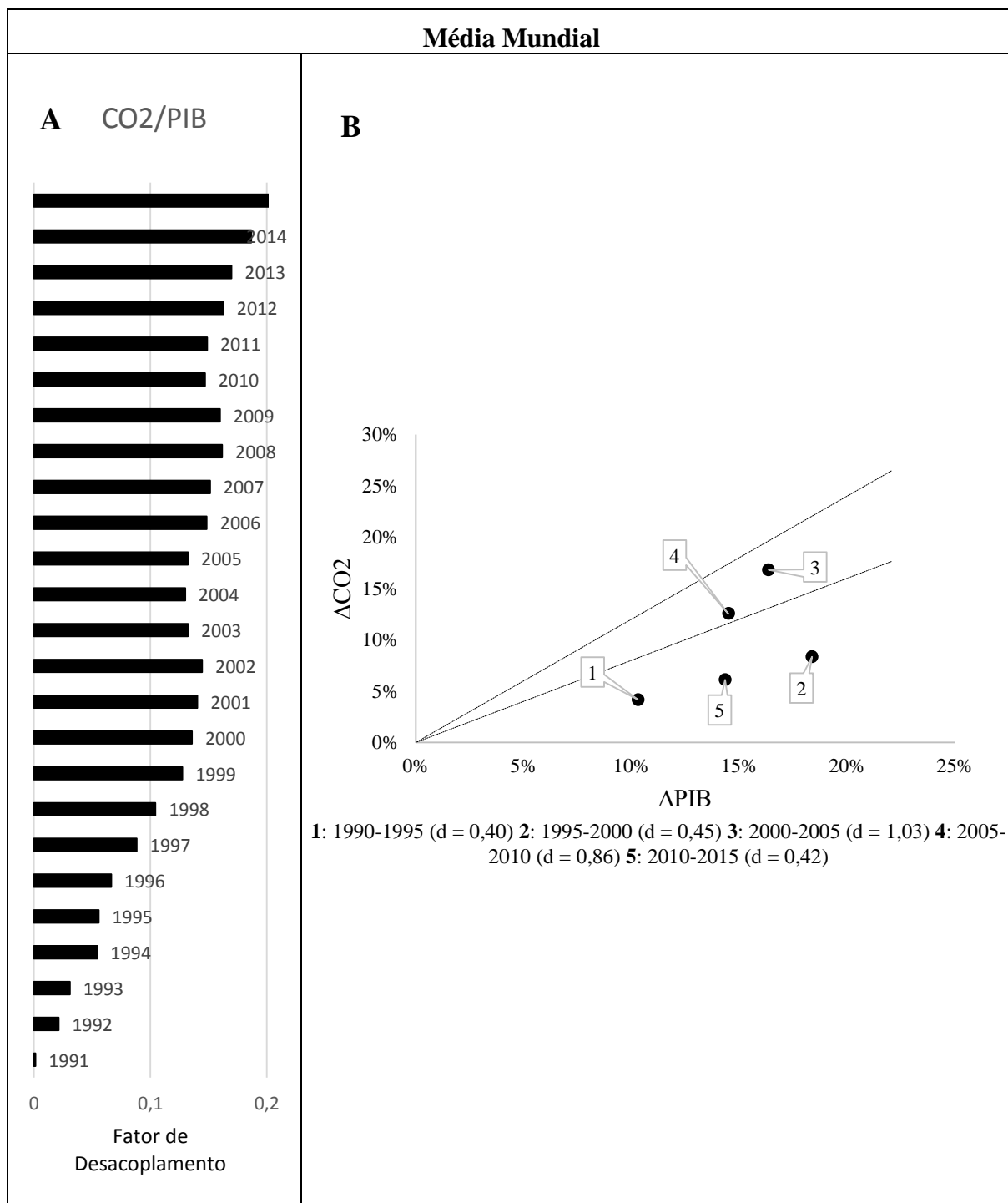


Figura 6. Resultados da Média Mundial usando o Método OCDE(A) e Método de Tapio (B)

Fonte: Elaborada pelo autor (IEA, 2017).

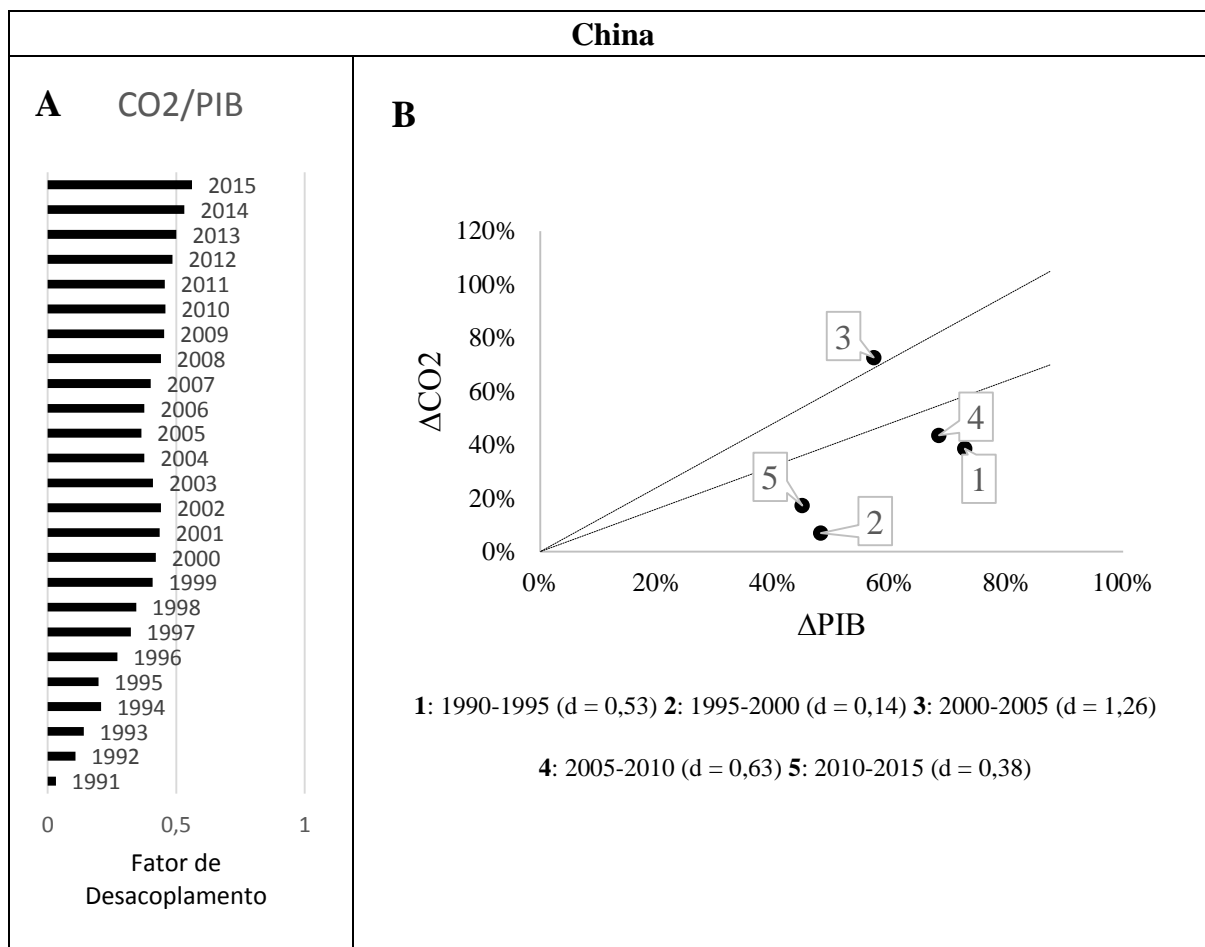


Figura 7. Resultados da China usando o Método OCDE(A) e Método de Tapio (B).

Fonte: Elaborada pelo autor (IEA, 2017).

A Figura 8 mostra que a Índia está acoplada de acordo com o Método OCDE (Figura 8A) nos primeiros anos do período analisado. O Método de Tapio (Figura 8B) corroborou com esta análise, já que o ponto 1 (1990-1995) tem elasticidade de aproximadamente 1,19 o que pelo método significa que o país está acoplado. De acordo com o Método OCDE, do ano de 1998 em diante a Índia esteve constantemente desacoplada, o que demonstra um padrão de comportamento, mesmo que com algumas variações no valor do fator de desacoplamento. Já os pontos 2, 3 e 5, pela metodologia de Tapio, confirmaram este estado de desacoplamento, já que estão no quadrante I-a com desacoplamento fraco. No período de 2005 a 2010 o Método OCDE mostrou uma tendência do fator de desacoplamento se aproximar de 0, embora não tenha chegado a esse valor. Isto mostra um agravamento nos indicadores, já que para isso a relação CO₂/PIB foi aumentando. Já o Método de Tapio também mostrou essa mesma conclusão pois o ponto 4 está situado no quadrante I-b com elasticidade igual a 1, o que significa um acoplamento expansivo.

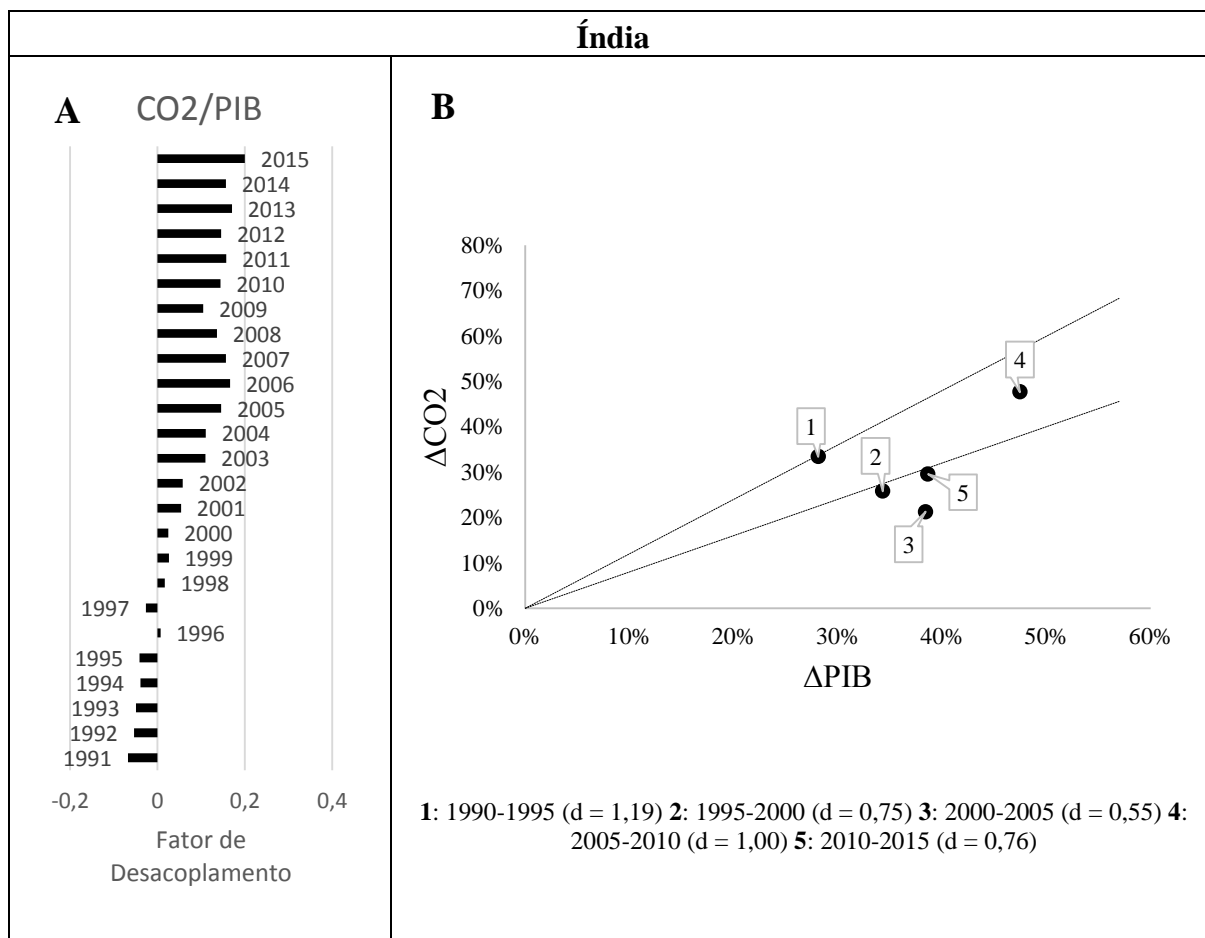


Figura 8. Resultados da Índia usando o Método OCDE(A) e Método de Tapio (B).

Fonte: Elaborada pelo autor (IEA, 2017).

Os EUA dentre os países selecionados foi o que apresentou melhor comportamento quanto ao desacoplamento das emissões de CO_2 em relação ao crescimento econômico. O Método OCDE (Figura 9A) mostrou um crescimento praticamente constante do fator de desacoplamento, significando um constante distanciamento das emissões do PIB. O Método de Tapio, Figura 9B, mostrou uma situação semelhante e colaborou com análise feita pelo outro métodos. Os períodos 1, 2 e 3, presentes no quadrante I-a, demonstraram um desacoplamento fraco, enquanto os últimos 10 anos analisados (2005-2015) representados pelos pontos 4 e 5 apresentaram o comportamento ideal com uma situação de desacoplamento forte, com a taxa de crescimento do PIB positiva e as emissões de CO_2 reduzindo. Esses resultados podem ser devido a novas tecnologias que vem sendo empregadas nos mais diversos setores da economia americana já que tanto a intensidade energética quanto a intensidade de dióxido de carbono têm conexão direta com a tecnologia utilizada pelo país no período considerado.

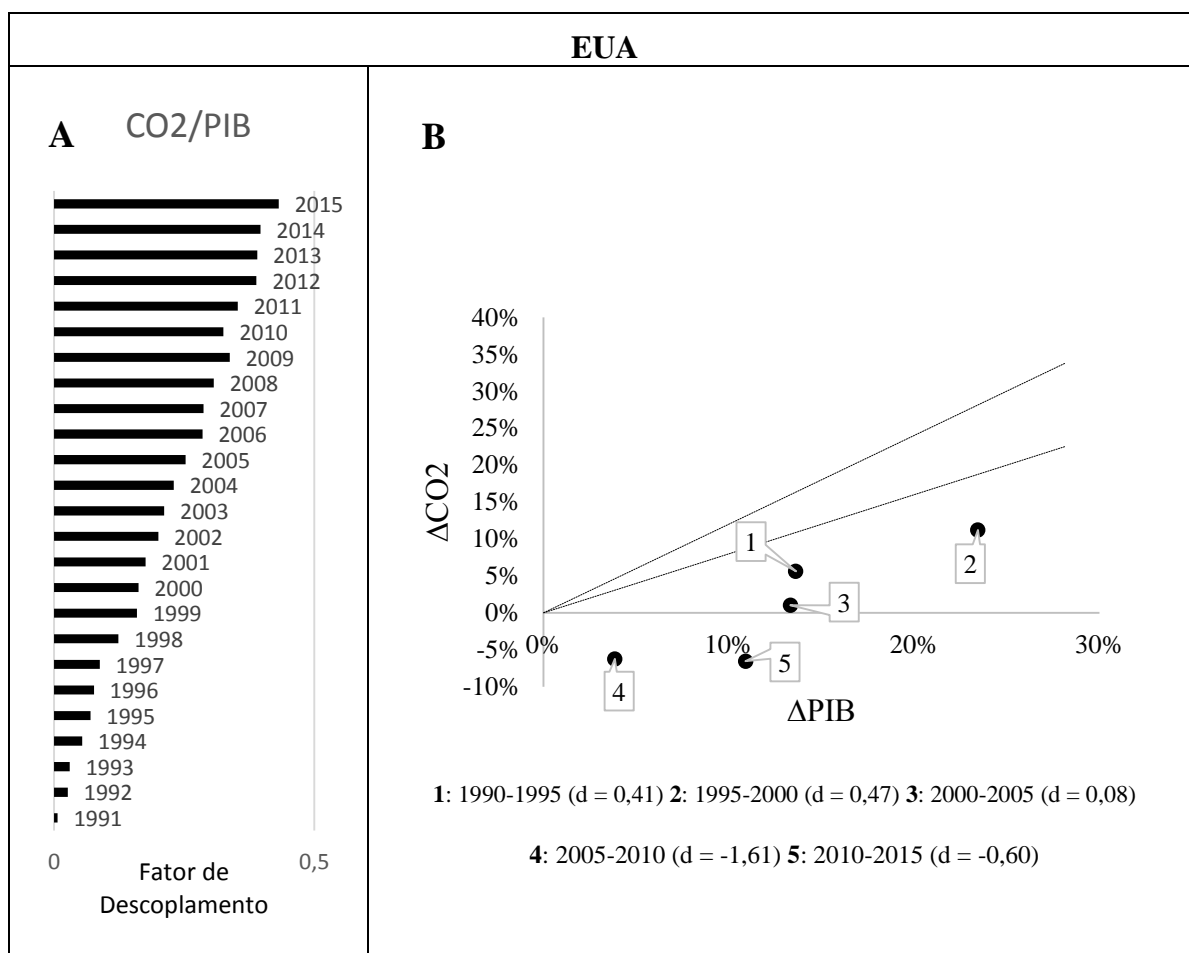


Figura 9. Resultados dos EUA usando o Método OCDE(A), Método de Tapio (B).

Fonte: Elaborado pelo autor (IEA, 2017).

O Japão apresentou o comportamento mais instável dentre os países selecionados com constantes variações e mudanças de trajetória. O Método OCDE (Figura 10A) refletiu essas variações quando o fator de desacoplamento sofreu períodos de aumento e diminuição porém, excetuando-se 1994 esteve sempre desacoplado. O Método de Tapio, Figura 10B, mostrou essa inconstância nos dados. O ponto 1 (elasticidade 0,8021) está, pela definição, em acoplamento expansivo, mas próximo de se tornar um desacoplamento fraco. Os períodos 2, 3 e 5 estão presentes no quadrante I-a apresentando o desacoplamento fraco, com a economia crescendo mais do que as emissões.

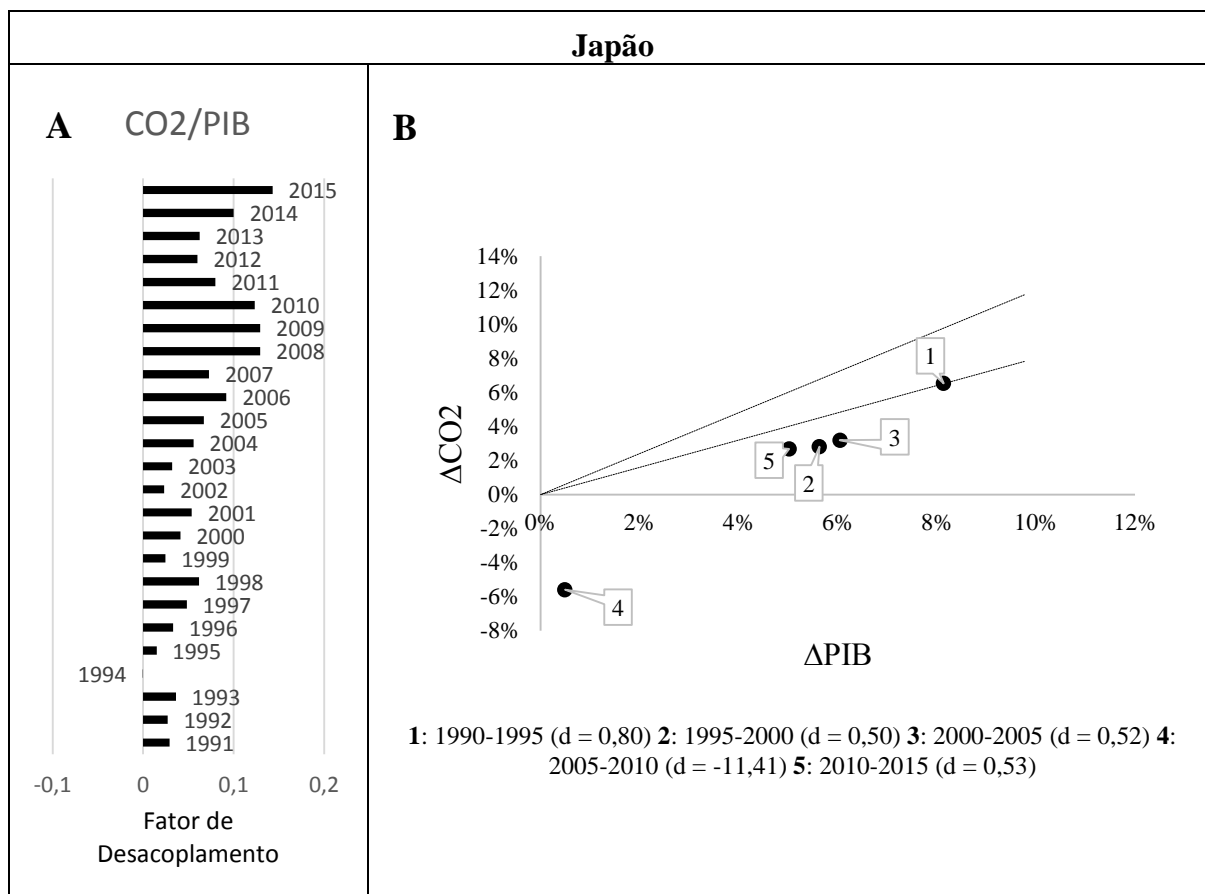


Figura 10. Resultados do Japão usando o Método OCDE(A), Método de Tapio (B).

Fonte: Elaborada pelo autor (IEA, 2017).

A Figura 11 ilustra muito bem o Brasil como um país em que as emissões de CO₂ e o PIB estão acoplados. O Método OCDE (Figura 11A) indicou que o país, no período analisado, nunca esteve com o fator de desacoplamento maior do que 0. Em certos períodos, como de 1995 a 2001 o país demonstrou uma deterioração considerável no quadro pois este valor se tornou ainda mais negativo. A partir daí o país entrou em uma trajetória de melhoria, com a curva CO₂ se aproximando da curva de PIB, o que também se nota pelo comportamento do fator de desacoplamento caminhando em direção a um valor mais positivo. Porém, esse padrão foi invertido de 2009 em diante onde a razão CO₂/PIB. Essa situação talvez seja devido a fatores internos, como uma crise hídrica no país o que forçou o Brasil a utilizar em larga escala usinas termelétricas para geração de energia.

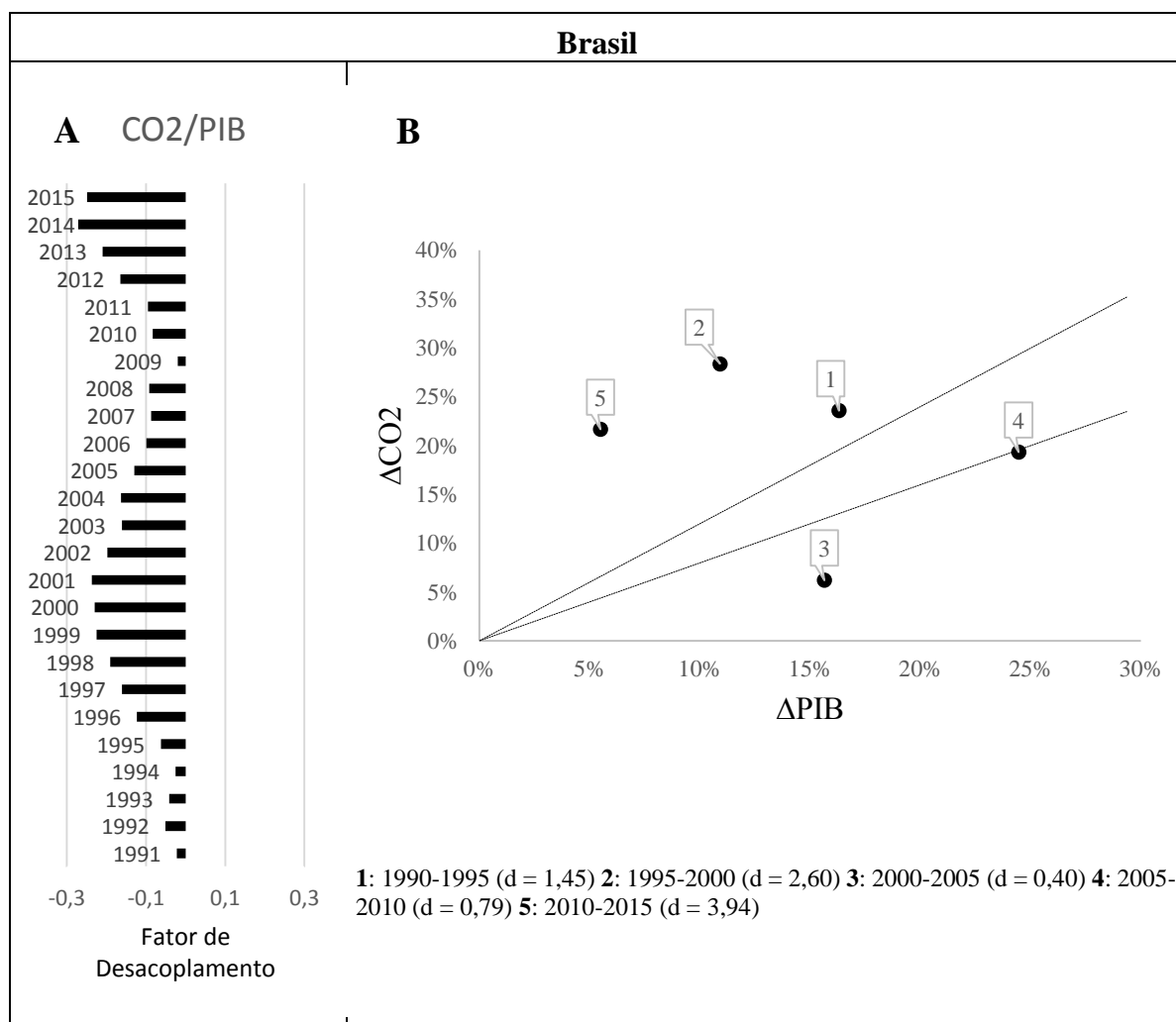


Figura 11. Resultados do Brasil usando o Método OCDE(A), Método de Tapio (B).

Fonte: Elaborado pelo autor (IEA, 2017).

O Método de Tapio (Figura 11B) mostrou que o país apresenta três períodos localizados no quadrante I-(c) (1;2;5) o que representa um desacoplamento negativo fraco onde ocorre o desacoplamento, mas com as emissões de CO_2 aumentando mais do que o aumento do PIB. Nos outros dois períodos (3;4) esse método mostrou que houve desacoplamento positivo no Brasil, com ambos situando no quadrante I-a. Contudo, o período entre 2005 a 2010 (4) apresentou elasticidade igual a 0,79, localizando-se bem perto do limite considerado por Tapio no valor de 0,8. Além disso, a elasticidade para Brasil em nenhum momento se localizou no quadrante IV, o que mostra que o país não apresenta o desacoplamento forte.

Na Figura 12 observa-se que a Rússia passou por várias mudanças, apresentando diversos estados de desacoplamento ao longo dos anos. O Método OCDE (Figura 12A) mostrou que o país apresentou um estado de acoplamento de 1990 a 2000. Esse panorama inicial também pode ser observado pelo Método de Tapio (Figura 12B). O ponto 1, localizado no

quadrante III-a mostra um desacoplamento negativo recessivo, ou seja, tanto a economia quanto emissões diminuem, mas a queda da economia é maior. Já o ponto 2 mostra a situação que a Identidade de Kaya também mostra, quando no período de 1995 a 2000 as emissões caíram 4,77% e o PIB 8,26%, situando-se no quadrante IV (desacoplamento forte). O ponto 5, 2010 a 2015, também apresenta desacoplamento forte. Os pontos 3 e 4 demonstram também um desacoplamento positivo, porém um desacoplamento fraco, com tanto as emissões quanto o PIB aumentando. Diferentemente do Brasil, a Rússia de forma geral apresenta uma trajetória satisfatória quanto ao desacoplamento, com exceção do período 1. Os restantes estão sempre localizados ou no quadrante I-a (3;4) ou no IV (2;5). Um outro fato importante é o que as emissões de CO₂ em 2015 foram menores que as de 1990, com queda de 32,10%, sendo entre os seis países selecionados o único a estar nessa situação.

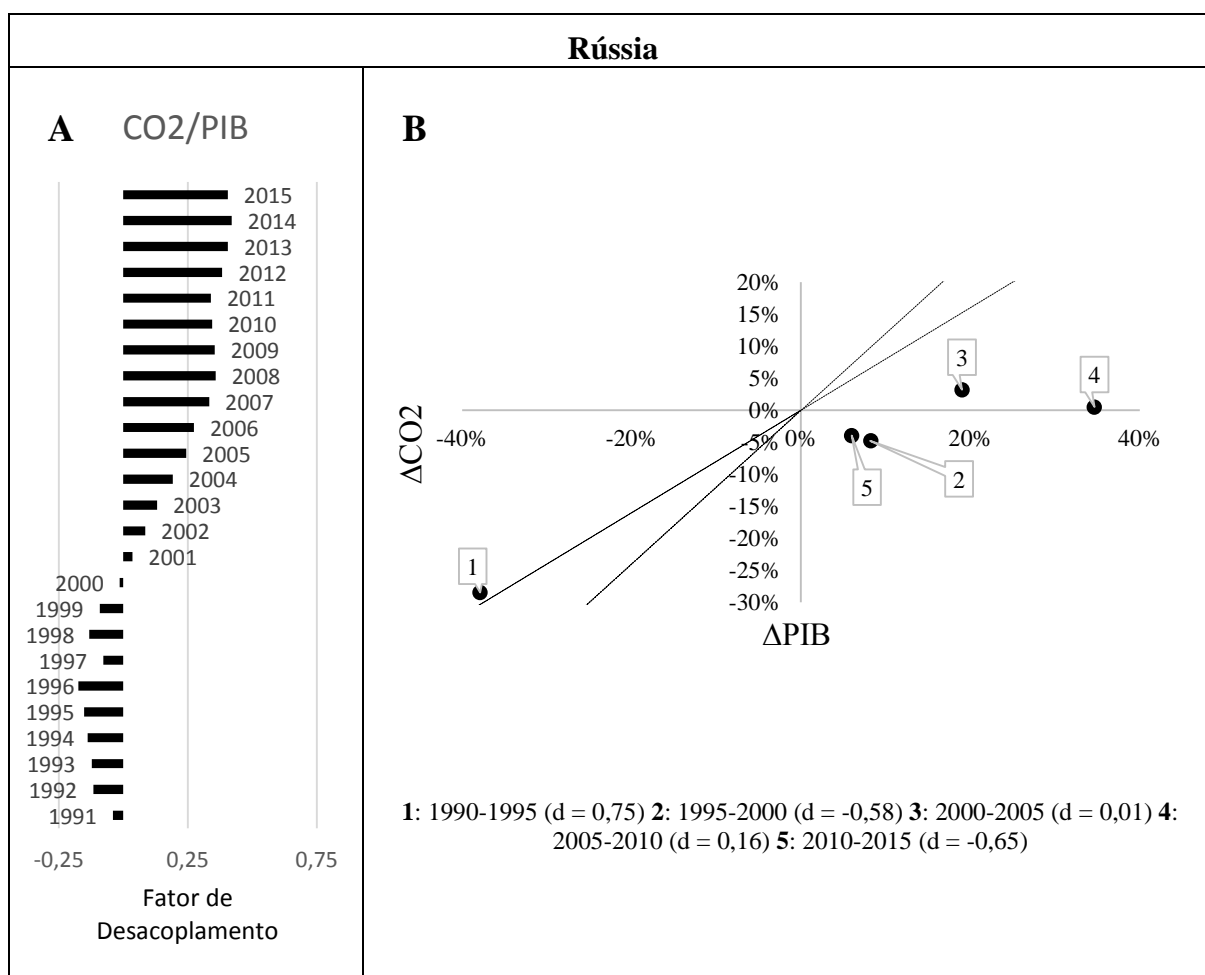


Figura 12. Resultados da Rússia usando o Método OCDE(A), Método de Tapio (B).

Fonte: Elaborado pelo autor (IEA, 2017).

Os resultados apresentados mostraram que no geral apenas o Brasil não alcançou o desacoplamento das emissões em relação ao crescimento econômico. China, EUA e Japão já

apresentaram desde o início do período analisado um estado desacoplamento, variando para cada um o grau de desacoplamento. Os métodos utilizados mostraram que Rússia e Índia por certo período de tempo não apresentaram nenhum grau de desacoplamento. No caso do Mundo como um todo, o desacoplamento está presente em quase todos os períodos. O Método da Identidade de Kaya mostrou que os países que se encontram em algum grau de desacoplamento apresentam a curva de PIB acima da curva de emissão de CO₂. Isso é de certa forma esperado já que para ocorrer desacoplamento positivo o crescimento da economia deve ser maior do que as emissões, ou ainda, a economia crescer e as emissões diminuírem.

4.3 Análise Detalhada da Identidade de Kaya para os Países Selecionados

Na Média Mundial, a Figura 13 deixa evidente a interdependência das emissões de CO₂ com o consumo energético (Energia Primária), demonstrado pela quase total sobreposição das curvas. De modo geral para uma mesma quantidade energética, está produzindo a mesma quantidade de CO₂. A queda dos valores de intensidade energética também é boa, por indicar um crescimento do PIB maior do que o crescimento do consumo energético em termos percentuais. O crescimento do PIB per capita, mesmo com o aumento da população, mostra uma melhora no quadro geral da economia das famílias.

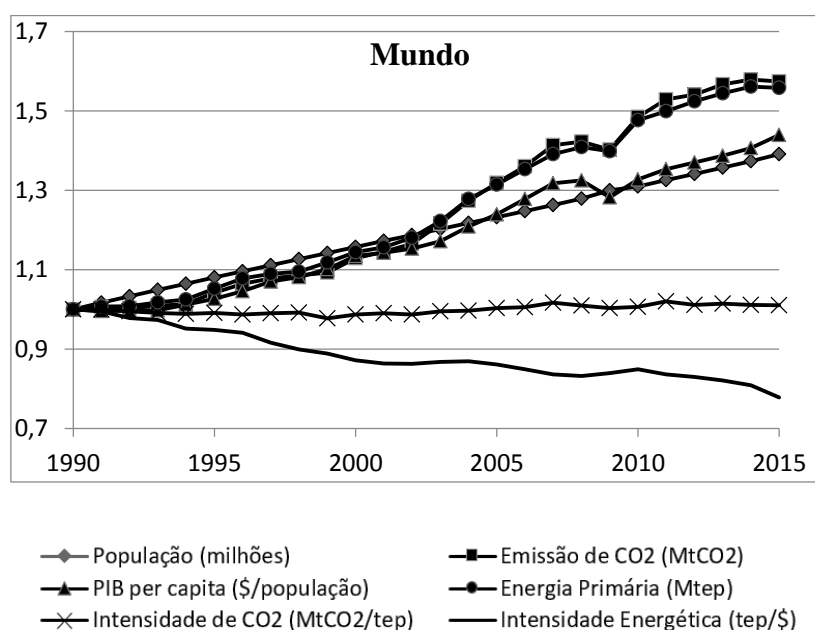


Figura 13. Desenvolvimento dos Índices de Kaya para o Mundo

Fonte: Elaborado pelo autor com dados da IEA (IEA, 2017).

Observa-se que cada um dos seis países mostrados de forma individual pela Figura 14 não apresenta um comportamento padrão. Por outro lado, um aspecto específico, que ocorre na maioria deles, é a relação entre as emissões de CO₂ e o consumo de energia.

De modo geral, excluindo a Rússia, onde as emissões de CO₂ caíram significativamente, os países apresentaram como maior queda a intensidade energética. Brasil, Rússia, Índia e China, apesar de apresentarem valores absolutos diferentes, têm um padrão gráfico semelhante no qual ocorre o crescimento das emissões de CO₂, energia primária, PIB per capita, além da intensidade energética. Para o Brasil e Índia o indicador que mais cresce é o de emissões de CO₂, enquanto Rússia e China apresentam o PIB per capita como indicador que mais cresceu.

A China, Figura 14A, mostrou um grande aumento em suas emissões de CO₂, 330% (1990: 1 e 2015: 4,30), mas o que mais se destaca é o aumento de aproximadamente 900% do PIB enquanto a população não cresceu tanto assim (cerca de 20%), o que leva ao expressivo crescimento do PIB per capita em cerca de 713%. Vale ressaltar o aumento de 250% no consumo energético do país, demonstrado pela curva de energia primária.

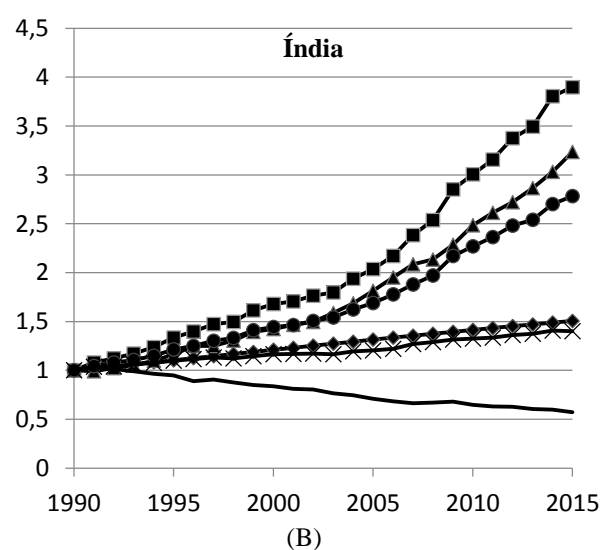
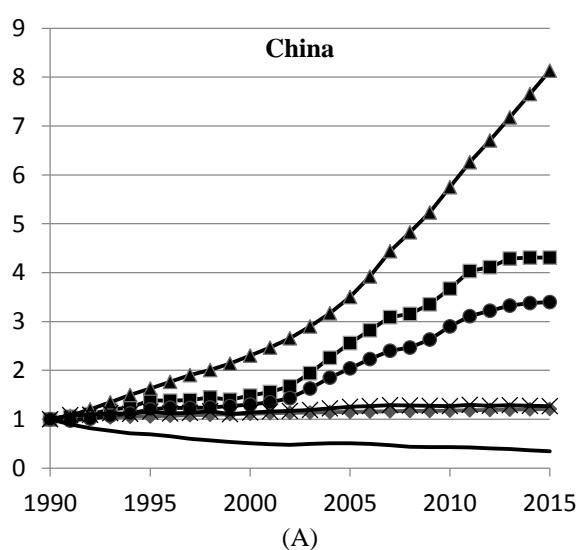
Já a Índia, Figura 14B, teve um grande crescimento nas emissões de CO₂, as quais aumentaram 289% (1990: 1 e 2015: 3,89). Este crescimento foi acompanhado pelo aumento do PIB per capita e consumo energético, enquanto a intensidade energética diminuiu em cerca de 43% (1990: 1 e 2015: 0,57) mostrando um aumento do PIB caindo o consumo energético relativo. Ou seja, apresenta uma clara influência de novas tecnologias aplicadas à produção de energia por meio de fontes renováveis e limpas.

Os EUA, Figura 14C, demonstraram uma forte queda na intensidade energética caindo 38% (1990: 1 e 2015: 0,62) e queda de cerca de 9% da intensidade de CO₂ (1990: 1 e 2015: 0,91). Esse padrão de decréscimo pode ser explicado pelo papel de liderança em desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias, que levam a um perfil mais limpo e sustentável da matriz de geração energética. Apesar disso, ainda é um país que emite grande quantidade de CO₂ na atmosfera, apresentando comportamento de crescimento nos últimos anos das emissões, consumo de energia e PIB per capita.

Já para o Japão a Figura 14D demonstra uma queda na intensidade energética do período de 1990 a 2015 de 24% (1990: 1 e 2015: 0,76), com uma queda mais acentuada a partir de 2010. Nota-se também que a crise de 2008 teve grande impacto demonstrado pela queda do PIB per capita, consumo de energia e emissões de CO₂ nesse ano. Outra situação que fica em evidência é o aumento da intensidade de CO₂ a partir de 2011, principalmente devido ao desastre de Fukushima e consequente substituição da energia nuclear por outras que emitem mais CO₂ para a atmosfera para um mesmo valor de TPES.

O método da Identidade de Kaya para o Brasil é mostrado pela Figura 14E. Observe a semelhança de comportamento com os outros países do grupo. Esta figura demonstra que o forte acoplamento entre o consumo de energia e as emissões de CO₂ no Brasil também está presente, ambos mantendo um padrão de crescimento na maior parte da linha do tempo considerada. A crise de 2008 teve efeito notável nas emissões de CO₂ e consumo energético, visto pela queda de ambos índices no ano de 2009. Outra questão importante é o comportamento de distanciamento entre os índices de energia primária e PIB per capita, percebendo-se o desacoplamento desses dois indicadores. O aumento das emissões no decorrer dos últimos anos pode ser explicado pela crise hídrica pela qual o país passou, levando a necessidade da utilização de termelétricas, mais poluidoras, na geração de energia.

Em relação à Rússia, a Figura 14F apresenta grande queda do consumo de energia primária, emissão de CO₂ e PIB per capita. Apenas no início dos anos 2000 tem-se uma recuperação, demonstrada pelo aumento do PIB per capita e queda da intensidade energética, o que mostra aumento do PIB. Nos últimos anos há uma tendência de queda nas emissões de CO₂ e intensidade energética. No entanto, a Rússia não apresentou um padrão de comportamento, provavelmente devido às questões políticas pelas quais o país passou, após o fim da URSS. Dentre todos países, foi o único que apresentou queda das emissões de CO₂, consumo de energia primária e intensidade de CO₂.



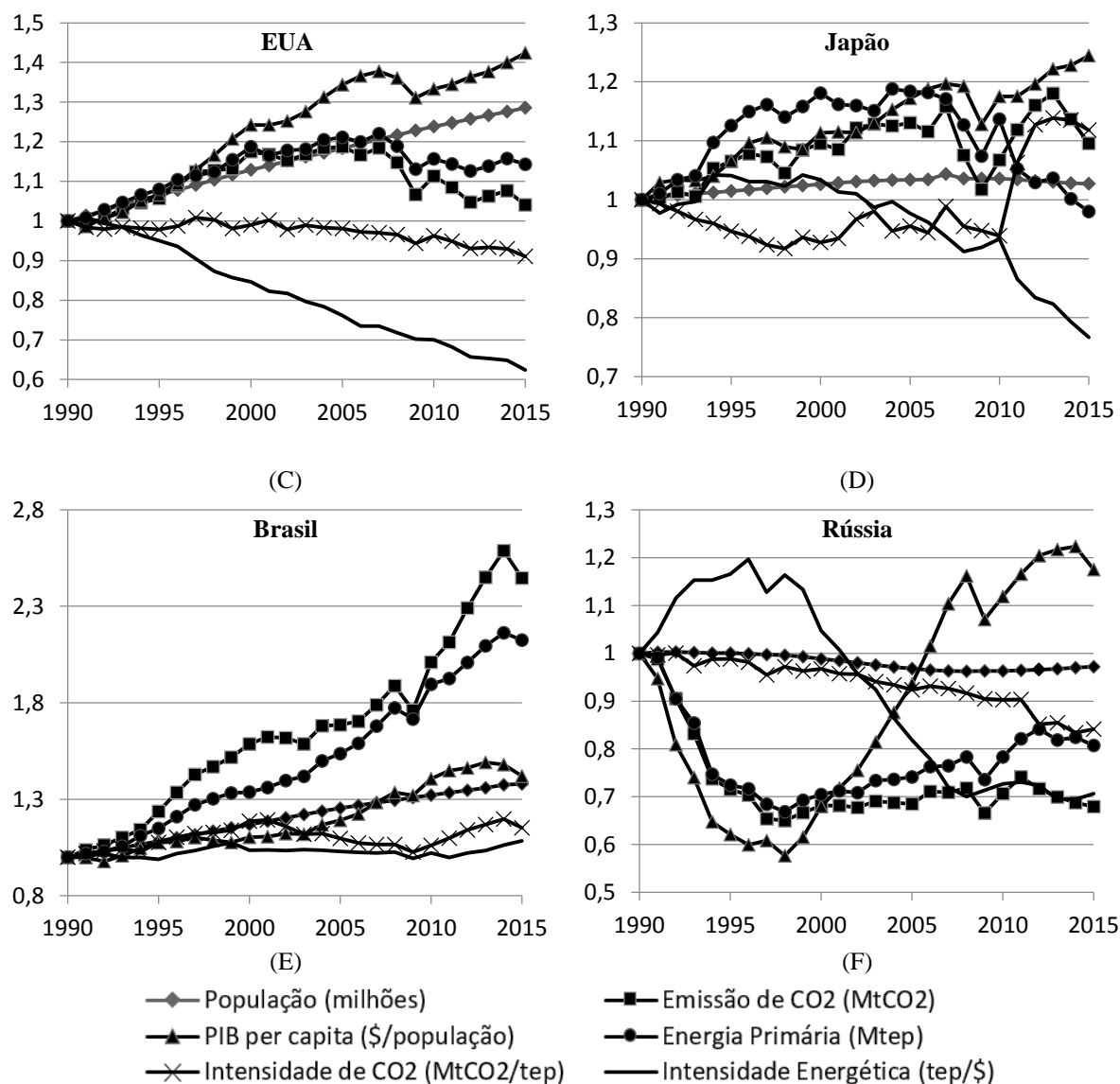


Figura 14 - Desenvolvimento dos Índices de Kaya para os BRICS, (A) China, (B) Índia, (C) EUA, (D) Japão, (E) Brasil e (F) Rússia

Fonte: Elaborado pelo autor com dados da IEA (IEA, 2017).

4.4 Perfil das Emissões de CO₂

A trajetória dos dados deste perfil é demonstrada pelos valores das emissões per capita, da intensidade de emissão de CO₂ e das emissões de CO₂. Quando o perfil apresenta uma tendência de caminhar em direção ao vértice dos eixos, isto significa que o país em análise está com um crescimento econômico e populacional maior do que o aumento das emissões de CO₂.

A Tabela 1 apresenta numericamente os valores, demonstrando a variação percentual entre o ano inicial (1990) e final (2015) e o valor das emissões totais de CO₂.

Tabela 1 - Intensidade de emissão de CO₂ para os Países Selecionados.

	INTENSIDADE DE EMIÇÃO DE CO ₂ (CO ₂ /PIB) [MtCO ₂ / \$]			EMIÇÃO PER CAPITA (CO ₂ /POP) [MtCO ₂]			EMIÇÃO DE CO ₂ [MtCO ₂]		
	1990	2015	Δ (%)	1990	2015	Δ (%)	1990	2015	Δ (%)
BRASIL	0,155	0,193	24,51	1,225	2,174	77,47	184,25	450,79	144,66
RÚSSIA	1,530	0,852	-44,31	14,588	10,194	-30,12	2163,23	1468,99	-32,09
ÍNDIA	1,124	0,900	-19,93	0,609	1,576	158,78	530,41	2066,01	289,51
CHINA	2,259	0,990	-56,17	1,849	6,590	256,40	2109,24	9084,62	330,70
EUA	0,530	0,301	-43,21	19,196	15,534	-19,60	4802,45	4997,50	4,06
JAPÃO	0,222	0,191	-13,96	8,430	8,990	6,64	1041,96	1141,58	9,56
MUNDO	0,543	0,427	-21,36	3,885	4,395	13,12	20502,53	32276	57,43

Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, acessado em 12/02/2017.

A Figura 15 ilustra a situação dos países, com o ano de 1990 em bola preta e 2015 em bola branca.

● 1990 ○ 2015

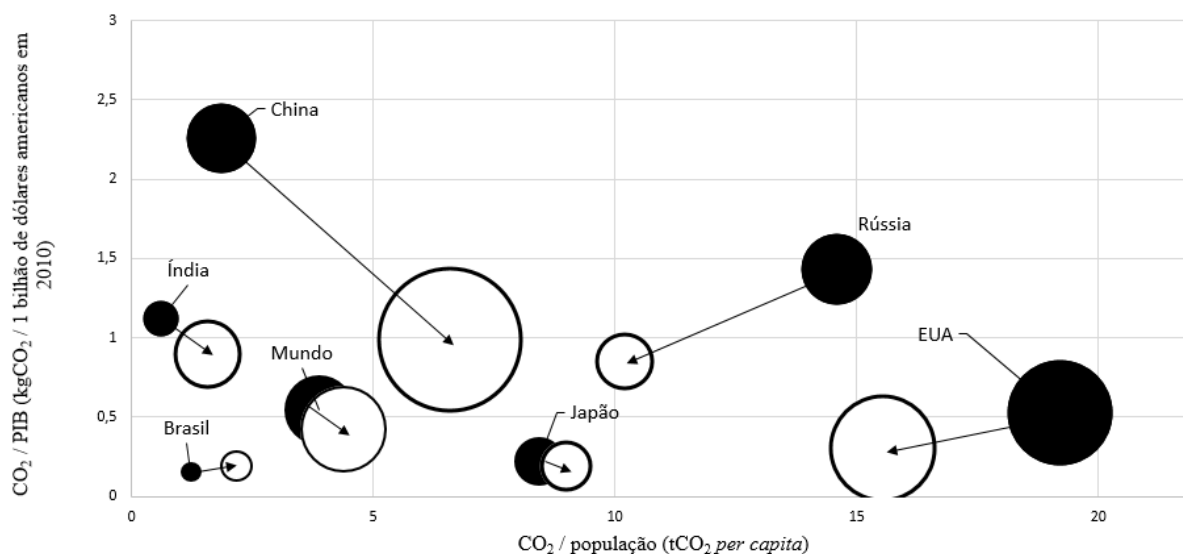


Figura 15. Perfil de Emissões

Fonte: Elaborado pelo autor (IEA, 2017c).

* Valor das emissões do Mundo dividido por 10 para melhor visualização gráfica do tamanho dos círculos.

O Brasil apresentou comportamento contrário ao desejado, aumentando a intensidade de CO₂ e emissões per capita em 24,51% e 77,47%, respectivamente. Além disso, as emissões de CO₂ cresceram 144,66%, porém, o país ainda está bem colocado devido aos valores numéricos da intensidade de emissão e emissões per capita, bem como a emissão de CO₂ em si no valor de 450,79 Mt.

Apenas a Rússia caminhou na direção ideal, com variação negativa de todos os indicadores, inclusive das emissões totais de CO₂. A China apresentou queda expressiva na intensidade de emissão (-56,17%), mas apresentou aumento de 256,40% nas emissões per capita e 330,70% nas emissões totais de CO₂.

A Índia melhorou no indicador de intensidade de emissão de CO₂ (-19,93%), mas sua população emitiu cada vez mais CO₂, aumentando 158,78%. Em termos de emissões totais a variação foi mais expressiva, com a Índia emitindo 289,51% mais CO₂.

A China apresentou queda significativa na intensidade de emissão de CO₂ (-56,17%), mas um crescimento expressivo tanto na emissão per capita (256,40%) quanto nas emissões totais (330,70%).

A trajetória dos EUA, em relação ao vértice, demonstrou que apesar de ainda alto, a emissão per capita vem diminuindo, assim como a intensidade de emissão de CO₂ vem caindo.

No entanto, em termos absolutos as emissões de CO₂ apresentaram um aumento de 4,06%. O Japão, por sua vez, demonstrou uma melhora no indicador CO₂/PIB (-13,96%), porém um aumento na emissão de CO₂ per capita (6,64%) e 9,56% de aumento das emissões de CO₂.

No caso do Mundo, a queda da intensidade foi de -21,36%, com aumento nos outros dois indicadores, 13,12% nas emissões per capita e 57,43% nas emissões totais

As Figura 176 e 17 apresentam o comportamento da trajetória do perfil das emissões de CO₂ de forma detalhada, em relação aos países selecionados e o Mundo entre 1990 e 2015.

De modo geral, a Figura 16 revela que o comportamento do Mundo não é o ideal. Ocorreu um decréscimo na intensidade de emissão de CO₂, mas, ao contrário do desejado, houve um aumento das emissões per capita. O Mundo de 1990 até 1994 tinha o comportamento ideal, diminuindo as emissões de CO₂ por pessoa e diminuindo as emissões de CO₂ por bilhão de dólar do PIB. Em 1995 e 1996, apesar de manter a queda na relação CO₂/PIB as emissões per capita voltaram a subir. Já de 1997 até 1999 a queda de ambos voltou a se estabelecer. Este comportamento se altera em 2000, com as emissões de CO₂ per capita aumentando até o ano 2007, enquanto CO₂/PIB mantém-se praticamente constante. Em 2008 e 2009 nota-se novamente a queda das emissões de CO₂ per capita, mas, após isso, em 2010 e 2011 volta a subir. A partir disto, o que ocorre é novamente uma queda de ambos indicadores até 2015 o que caracteriza uma trajetória, mesmo que momentânea, ideal.

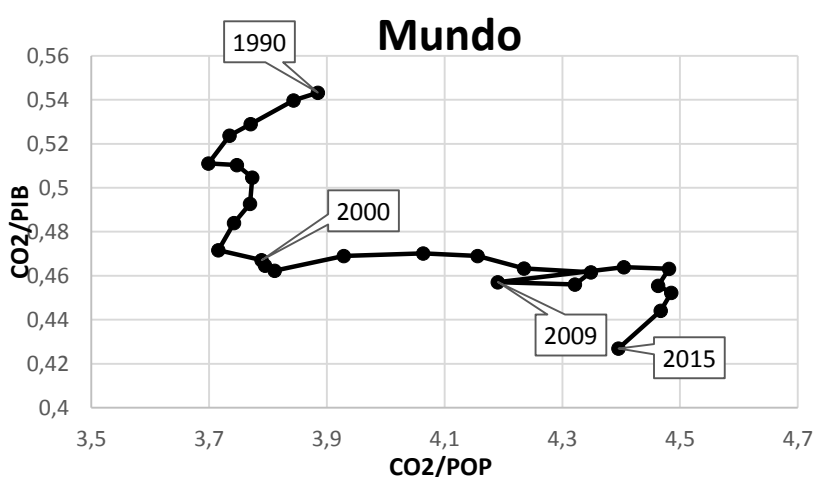


Figura 16. Perfil de Emissões de CO₂ para o Mundo

Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, acessado em 12/02/2017.

O comportamento da curva para Índia e China, Figura 17A e Figura 17B respectivamente, são semelhantes, embora com valores absolutos diferentes. Em ambos casos a tendência geral foi de forte aumento das emissões per capita, principalmente da China, e

diminuição do indicador de intensidade de emissão de CO₂ (CO₂/PIB). A China, entre os anos de 1990 a 2015 foi um dos países de maior crescimento das emissões, partindo de 2109,24 Mt, chegando a 9084,62 Mt em 2015. A Índia, também teve um grande aumento no mesmo período de 530,41 Mt para 2066,01 Mt.

Para os EUA a Figura 17C mostra uma tendência de crescimento das emissões de CO₂ per capita até meados da década de 2000 enquanto o PIB cresce mais que as emissões de CO₂ o que acarreta na queda do índice CO₂/PIB durante todo o período. A partir da outra metade da década de 2000 o país começou uma melhora ainda maior diminuindo consistentemente o seu índice de CO₂ per capita.

No caso do Japão, a Figura 17D apresenta uma tendência de aumento das emissões CO₂ per capita até o ano de 2003, enquanto as emissões de CO₂ em relação ao PIB mantiveram-se basicamente constantes. A partir desse ano até 2009 percebe-se uma queda de ambos indicadores mostrando uma evolução do país tomando uma trajetória mais sustentável, não só emitindo menos CO₂ por pessoa, mas aumentando o PIB mais do que as emissões de CO₂. Após 2009, provavelmente devido à crise mundial deste ano, o indicador de CO₂ per capita voltou a aumentar, como visto em 2010. No ano seguinte nota-se não só um aumento no indicador de emissão per capita, mas a piora na relação CO₂/PIB e isto pode ser explicado devido a substituição da matriz de energia nuclear por outras alternativas após o desastre de Fukushima. Essa tendência de piora se manteve até 2013 e apenas em 2014 é que ambos indicadores voltaram a cair.

O perfil das emissões de CO₂ do Brasil, Figura 17E, apresentou comportamento contrário ao desejado, apresentando uma trajetória de aumento de ambos indicadores. De 1990 até 2001, o país apresentou piora tanto nas emissões de CO₂ per capita quanto as emissões de CO₂ por bilhão de dólares do PIB. Após 2001 até 2008 o país passou a ter um comportamento melhor, mantendo as emissões de per capita e diminuindo as emissões de CO₂ frente ao PIB. De 2009 em diante, este comportamento voltou a ser semelhante ao da década de 1990, com um crescimento das emissões de CO₂ per capita e o indicador de quantidade de CO₂ emitido para uma dada parcela do PIB, ambos voltando a patamares semelhantes aos de 2000. Neste período, as emissões de CO₂ saltaram de 184,25 Mt, no ano de 1990 para 450,79 Mt no ano de 2015, variando 144,66%. As emissões de CO₂ per capita foram de 1,225 tCO₂ para 2,174 tCO₂, enquanto a intensidade de emissão de CO₂ subiu de 0,155 MtCO₂/\$ para 0,193 MtCO₂/\$.

A Rússia (Figura 17F), pós fim da URSS entre os anos de 1990 até 1998 teve uma queda expressiva nas emissões per capita, devido a problemas oriundos desta transição. Neste mesmo período ocorreu um aumento de cerca de 13% no indicador de emissões de CO₂ por PIB. De 1998 até 2008, esta tendência se inverteu, com o crescimento das emissões de CO₂ per capita em aproximadamente 14% e uma queda acentuada do indicador CO₂/PIB em cerca de 44%. De 2009 em diante ambos indicadores não possuíram uma tendência constante, ora aumentando, ora diminuindo. Neste espaço de tempo, as emissões de dióxido de carbono diminuíram de 2163,23 Mt no ano de 1990 para 1468,99 no ano de 2015.

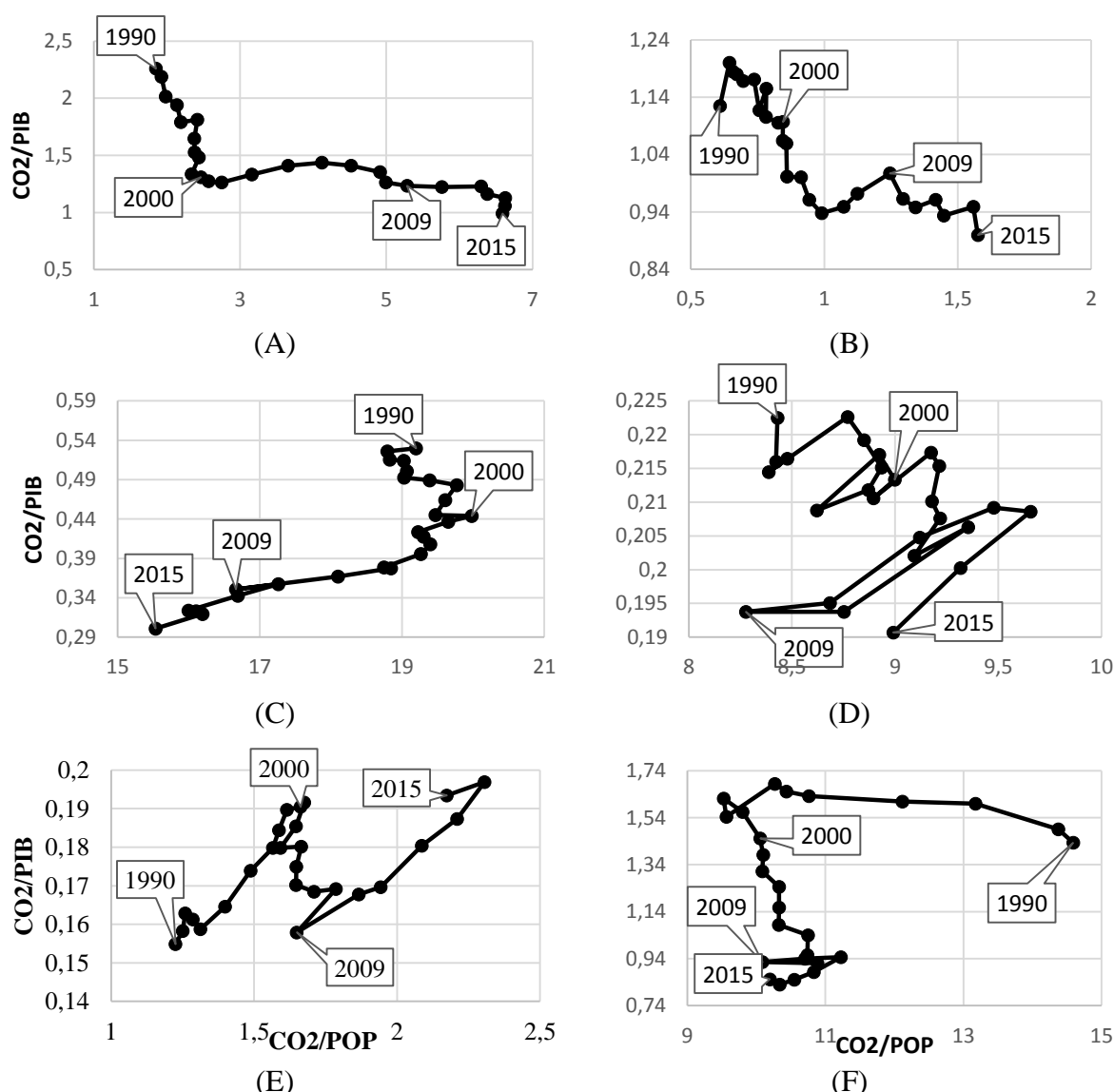


Figura 17. Perfil de Emissões de CO₂ para os países selecionados. (A) China, (B) Índia, (C) EUA, (D) Japão, (E) Brasil e (F) Rússia

Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA (2017).

A Figura 18 mostra o histórico das emissões totais de CO₂ dos EUA como um exemplo de um país que vem diminuindo suas emissões recentemente. De 2008 em diante, a quantidade

de dióxido de carbono lançada na atmosfera vem diminuindo. Logicamente, esta redução dos valores mostrou o resultado de políticas ambientais de controle de emissões de gases do efeito estufa bem-sucedidas, que tiveram início, provavelmente, em períodos anteriores.

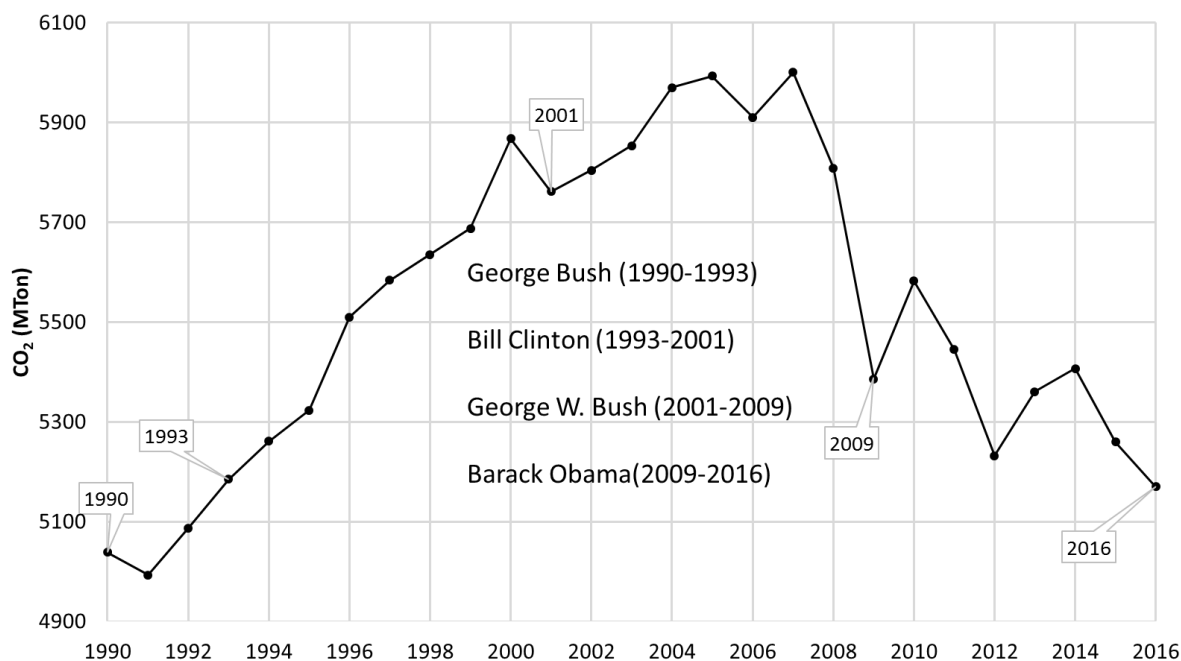


Figura 18. Histórico de emissão de CO₂ dos EUA por períodos presidenciais mais recentes.

Fonte: Elaborado pelo autor (EIA, 2017).

Pode-se perceber que, embora o comportamento geral seja de crescimento das emissões de CO₂, de 1990 a 2000, neste mesmo período, a intensidade de emissão de CO₂ apresentou apenas uma trajetória de queda. Já no período de 2001 a 2007, as emissões de CO₂ cresceram, enquanto houve não só uma queda na intensidade de emissão, mas também das emissões per capita. Isto demonstra um crescimento econômico maior do que as emissões, bem como, provavelmente, um consumo mais consciente da população com equipamentos mais modernos, de menor gasto de energia. Como Alvim e Santin (2008) destacam, novas tecnologias tendem a ser sempre menos poluidoras.

4.5 O Caso dos Estados Unidos

Uma outra maneira ainda para realização da análise das emissões de CO₂ na atmosfera pode ser obtida por meio da comparação, através de um gráfico de barras e não de linhas, entre os valores das variações da energia total primária suprida (em Inglês TPES, *Total Primary Energy Supply*), a variação, no mesmo período, do PIB e também a variação, no mesmo período, das emissões de CO₂. O gráfico resultante formado pelo conjunto destes três valores para os períodos analisados pode ser visto na Figura 19.

Esta Figura pode ser melhor compreendida pela análise do comportamento dos valores separados em dois subgrupos. No primeiro, com os três períodos compreendidos entre os anos de 1990 a 2005, ocorreu um elevado aumento do PIB, um aumento também das emissões de CO₂ (com menor intensidade) e praticamente nenhuma variação do consumo energético (TPES). O segundo subgrupo, de valores compreendidos entre os anos de 2005 e 2016, apresentou menores crescimentos tanto para o PIB como para a TPES (comparativamente ao primeiro subgrupo). No entanto, estes dois valores contrastam com a queda da variação de CO₂ no mesmo período. Note que ocorreu uma redução de -7% nas emissões gasosas.

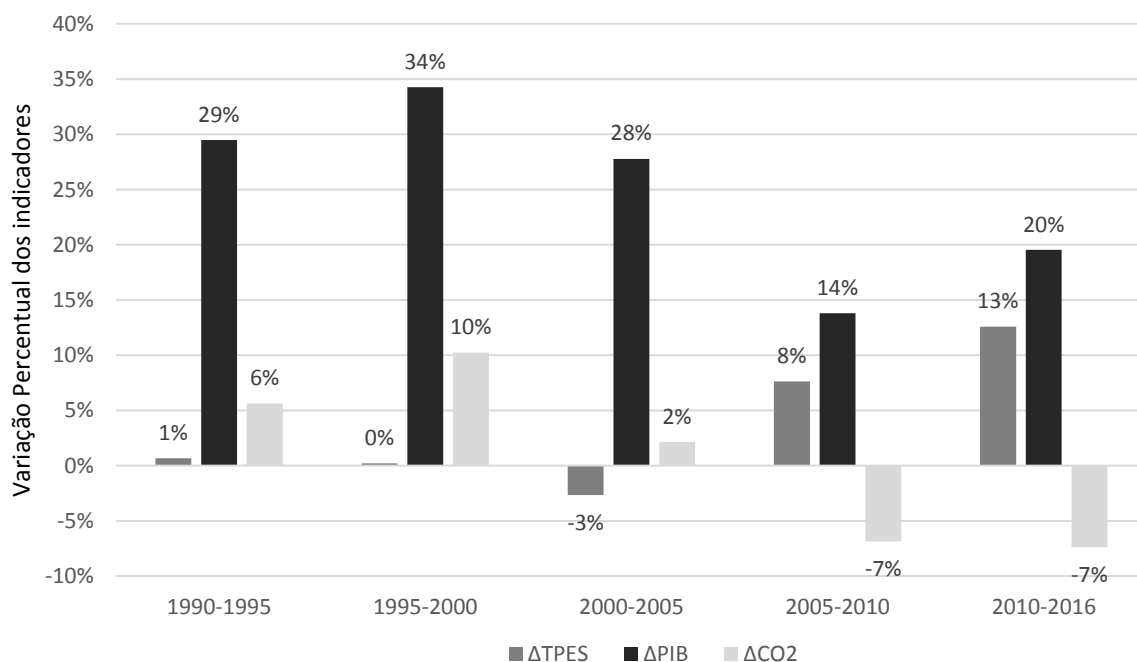


Figura 19. Variação Percentual do TPES - PIB - CO₂ (em MBtu, Dólar, Mt)

Fonte: Elaborado pelos autores. Dados EIA(2017).

Observando cada período da Figura 19, pode ser visto ainda que, nos anos de 1990 a 1995, o crescimento do PIB foi de 29%, apenas 1% de variação de consumo energético e um

incremento de 6% nas emissões de CO₂. Um quadro semelhante pode ser verificado para o período de 1995 a 2000, porém, com aumento de 10% nas emissões de CO₂. Algo ainda mais interessante ocorre de 2000 a 2005; o PIB cresce 28% enquanto o consumo energético cai 3% e as emissões sobem apenas 2%.

Olhando em detalhe a parte direita do gráfico da Figura 19, nota-se que as maiores variações no TPES e CO₂ ocorrem nos dois últimos períodos. De 2005 a 2010, houve crescimento de 8% na energia primária, enquanto o PIB cresceu 14% e as emissões caíram 7%. O período de 2010 a 2016 foi o de maior crescimento no consumo energético, 13%, enquanto o PIB cresceu 20% e novamente as emissões caíram 7%. Os resultados anteriores, tanto pelo Método de Kaya quanto o Perfil de Emissões, já mostravam a diminuição das emissões nestes últimos dois períodos, demonstrando que o PIB e o consumo energético cresceram mais que as emissões.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O presente trabalho apresentou uma análise do desacoplamento entre a emissão de CO₂ e o PIB, no período de 1990 a 2015, para o grupo de seis países: China, Índia, EUA, Japão, Brasil e Rússia. De uma forma em geral, os resultados confirmaram os primeiros indícios do suposto desacoplamento que parece ter iniciado nos últimos três anos, como citam os recentes relatórios da IEA (IEA, 2017a). Os seis países selecionados neste estudo respondem atualmente por, praticamente, 50% do PIB do Planeta e 60% das emissões globais de CO₂. No entanto, a projeção da OCDE para o PIB total destes mesmos seis países, em 2060, é de quase 70%. Ou seja, se o desacoplamento não se tornar uma realidade as consequências para o Planeta poderão ser desastrosas.

As três metodologias aplicadas puderam avaliar diferentes aspectos na análise desenvolvida no estudo. O Método OCDE é mais simples pois, saber o fator de desacoplamento não possibilita saber o estado de desacoplamento, apenas se este ocorre ou não. Já o Método de Tapio possibilita obter mais detalhes tais como a respeito desses estados de desacoplamento, embora seja mais complexo que o da OCDE. O Método de Kaya, por sua vez, auxilia na análise das alterações ao longo do tempo de diversos indicadores. Além disso, mostra de forma clara o comportamento das curvas de emissão de CO₂ e PIB.

Os resultados mostraram que apenas o Brasil permaneceu acoplado durante todo o período de acordo com o Método OCDE e também mostrou a trajetória de diminuição do fator de desacoplamento indicando um agravamento da situação. O Método de Tapio mostrou que o desacoplamento negativo é o estado mais presente, onde as emissões de CO₂ crescem mais do que a economia (1990-2000;2010-2015). A Identidade de Kaya ilustrou esse cenário ao mostrar o distanciamento entre as curvas de emissão de CO₂ e PIB em diversos períodos de tempo. Um dos possíveis motivos para esse aumento das emissões a partir de 2009 pode ser a crise hidrológica pela qual o Brasil passou de 2008 em diante, com o baixo índice pluviométrico e a necessidade da entrada de diversas usinas termelétricas para suprir a demanda energética do país (“Observatório do Clima”, 2017).

A Rússia, excetuando-se o período de 1990 a 1995, apresentou um excelente comportamento. Kaya mostrou o distanciamento do PIB em relação as emissões de dióxido de carbono. Dois períodos de tempo apresentaram uma condição de crescimento econômico com

redução nas emissões, e entre 2000-2005 houve grande crescimento econômico com pouco aumento das emissões. Além disso, de 2005 a 2010 apresentou um desacoplamento fraco.

Índia e China apresentaram comportamento semelhante, com a tendência de aumento do fator de desacoplamento, demonstrando crescimento econômico maior do que aumento nas emissões. Tapio demonstrou essa situação com a maioria dos pontos na área de fraco desacoplamento, embora a Índia tenha apresentado um período de acoplamento ($0,8 < d < 1,2$) e a China de 2000 a 2005 apresente um desacoplamento negativo fraco ($\Delta CO_2 > \Delta PIB$; $\Delta CO_2 > 0$; $\Delta PIB > 0$)

Os EUA foi quem apresentou o melhor comportamento quanto ao desacoplamento das emissões de CO₂ em relação ao crescimento econômico. O país foi o único no qual todos os períodos se localizaram nos quadrantes desejados, de acordo com o Método de Tapio. Além disso, nos últimos 10 anos analisados ele esteve numa situação de forte desacoplamento. Tanto o método OCDE quanto Kaya mostraram essa trajetória que pode indicar um futuro em que mesmo com o PIB crescente as emissões de CO₂ possam vir a diminuir.

Os resultados para o Japão mostraram que o país esteve praticamente todo o período em desacoplamento pelo método OCDE. Tapio mostrou que 4 dos 5 pontos apresentaram um estado de desacoplamento positivo, alternando períodos de desacoplamento fraco e desacoplamento forte. O ponto restante, apesar de pertencer ao quadrante I-b, está próximo da linha limite do desacoplamento fraco.

Já o Mundo como um todo, está numa trajetória razoável. O desacoplamento está ocorrendo, mas não dá forma ideal. Isso se deve ao fato de que, apesar da economia crescer mais que as emissões, estas ainda estão se elevando.

Então, todos os dados mostraram que, com a exceção do Brasil, a trajetória tanto do restante dos países quanto do planeta é boa. Uns melhores que os outros, mas alcançando algum grau de desacoplamento.

É fato que os dados aqui apresentados mostraram o que aconteceu em relação ao desacoplamento no período investigado, mas não podem garantir nada de como eles estarão nas próximas décadas. Ou seja, tudo indica que os seis países estudados neste artigo devem ser os principais atores nesta corrida pela busca de uma matriz energética cada vez mais limpa e a consequente redução das GEE. O último relatório *World Energy Outlook* da IEA confirma que as necessidades energéticas globais já estão crescendo mais lentamente do que no passado, mas ainda devem aumentar 30% entre hoje e 2040. O mesmo relatório cita ainda que esse

crescimento equivale a adicionar outra China e Índia à demanda global de hoje (IEA, 2017a). Portanto, o esforço para a descarbonização do planeta é urgente e demandará ações concretas de todos os países.

5.2 Limitações do Trabalho

Nesta pesquisa, os dados da IEA com relação as emissões de CO₂ levam em consideração apenas a emissão de origem fóssil, ou seja, da utilização de petróleo, gás natural e carvão. Isto pode afetar os valores absolutos de cada país de formas diferente, a depender de suas matrizes energéticas. Além do mais, esses valores de emissão são gerais, não explicitando qual setor da economia tem a maior participação, se seria o de transporte, geração de energia ou outros qualquer.

Outra questão é que os dados oriundos desta fonte de pesquisa possuem um atraso de 2. Ou seja, as análises realizadas têm como base sempre a situação que cada país apresentava 2 anos antes.

Por fim, apesar da estimativa da OCDE para 2060 possuir certo nível de confiabilidade, o próprio nome diz, é uma previsão. Os países selecionados, em 2060, podem apresentar uma situação completamente diferente da prevista. Novas tecnologias podem vir a ser desenvolvidas ou acontecimentos inesperados podem ocorrer. Dessa forma os principais atores na questão de emissão de CO₂ e economia podem vir a ser outros.

5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Uma possível recomendação para um trabalho futuro é a possibilidade de uma análise mais setorial de cada país, com as emissões, consumo energético e participação na economia divididas em nichos. Obter os dados de cada setor da economia e estudá-los de forma mais aprofundada pode levar a entendimentos de onde cada país deva focar para mitigar os efeitos nocivos da emissão descontrolada dos gases do efeito estufa, entre eles o CO₂.

Outro ponto que pode vir a ser explorado em trabalhos futuros seria um maior número de países analisados. Neste trabalho foram apenas 6, mais o Mundo, que podem ser, no futuro, os mais poluidores.

5.4 Produções Originadas neste Trabalho

	ARTIGO	SITUAÇÃO
1	RANGEL, J. J. A.; FEIJO, G. R. Análise do Perfil das Emissões de Dióxido de Carbono dos EUA nas Últimas Décadas. PETRÓLEO, ROYALTIES E REGIÃO , v. 56, p. 25-31, 2017.	Publicado
2	FEIJO, G. R.; RANGEL, J. J. A. Análise do comportamento das emissões de dióxido de carbono (CO ₂) do Brasil e de outros países por meio da Identidade de Kaya e do Perfil de Emissões. DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE (UFPR) , v. 46, p. 1-22, 2018.	Publicado

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOVAY, R. Inovações para que se democratize o acesso à energia, sem ampliar as emissões. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 1–18, 2014 .
- ALBRECHT, J.; FRANÇOIS, D.; SCHOORS, K. A Shapley decomposition of carbon emissions without residuals. **Energy Policy**, [s.l.] v. 30, n. 9, p. 727–736, 2002.
- ALVIM, A. M.; SANTIN, M. F. C. de L. Os impactos do crescimento econômico sobre o aquecimento terrestre: a contribuição dos países em desenvolvimento. **Estudos do CEPE**, Santa Cruz do Sul, n. 26, p. 05–29, 2008a.
- SANTIN, Maria Fernanda Cavaliéri Lima et al. Os impactos da demanda por crédito de carbono sobre o mercado de certificações de reduções de emissões no Brasil, no âmbito do Protocolo de Quioto. **Ensaio FEE**. [s.l.] v. 29, n. 2, 2007.
- ANG, J. B. CO₂ emissions, energy consumption, and output in France. **Energy Policy**, [s.l.], v. 35, n. 10, p. 4772–4778, 2007.
- BOZOKLU, S.; YILANCI, V. Energy consumption and economic growth for selected OECD countries: Further evidence from the Granger causality test in the frequency domain. **Energy Policy**, [s.l.], v. 63, p. 877–881, 2013.
- BUDZIANOWSKI, W. M. Target for national carbon intensity of energy by 2050: A case study of Poland’s energy system. **Energy**, v. 46, n. 1, p. 575–581, 2012.
- BUDZIANOWSKI, W. M. Modelling of CO₂ 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. 1–17, 2013.
- CLIMENT, F.; PARDO, A. Decoupling factors on the energy-output linkage: the Spanish case. **Energy Policy**, v. 35, n. 1, p. 522–528, 2007.
- CONTE GRAND, M. Carbon emission targets and decoupling indicators. **Ecological Indicators**, v. 67, p. 649–656, 2016.
- COSTA, H. G. Modelo para webibliomining : proposta e caso de aplicação. **Rev. FAE**, v. 13, n. 1, p. 115–126, 2010.
- DAI, S.; ZHANG, M.; HUANG, W. Decomposing the decoupling of CO₂ emission from economic growth in BRICS countries. **Natural Hazards**, v. 84, n. 2, p. 1055–1073, 2016.
- DE FREITAS, L. C.; KANEKO, S. Decomposing the decoupling of CO₂ emissions and economic growth in Brazil. **Ecological Economics**, v. 70, n. 8, p. 1459–1469, 2011.
- DE SOUZA, A. M. et al. Estrutura produtiva do Brasil, Rússia, Índia e China (BRIC) e seus impactos nas emissões de dióxido de carbono (CO₂). **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 34, 2015.
- DIDONÉ, E. L.; WAGNER, A.; PEREIRA, F. O. R. Strategies towards Net Zero Energy

Office Buildings in Brazil with emphasis on BIPV. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 3, p. 27–42, 2014.

EHRlich, P. R. et al. Impact of Population Growth. **Science**, v. 171, n. 3977, p. 1212–1217, 1971.

Energy Information Administration. **EIA**. Disponível em: <<https://www.eia.gov/totalenergy/>>. Acesso em: 5 maio. 2017.

FAN, R. G.; WU, Y. Study on Carbon Emissions and Economic Growth Based on Elasticity Decoupling Theory in China over 2000-2011. **Applied Mechanics and Materials**, v. 522, p. 1853–1857, 2014.

FIORITO, G. Can we use the energy intensity indicator to study “decoupling” in modern economies? **Journal of Cleaner Production**, v. 47, p. 465–473, 2013.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. [s.l.]: Plageder, 2009.

HENRIQUES, S. T.; BOROWIECKI, K. J. The drivers of long-run CO₂ emissions: A global perspective since 1800. **Discussion Papers on Business and Economics**, University of Denmark, n. 13, 2014.

HU, J.; GUI, S.; ZHANG, W. Decoupling Analysis of China’s Product Sector Output and Its Embodied Carbon Emissions—An Empirical Study Based on Non-Competitive I-O and Tapio Decoupling Model. **Sustainability**, v. 9, n. 5, p. 815, 2017.

International Energy Agency. IEA. **COP23**. Disponível em: <<http://www.iea.org/cop23/>>. Acesso em: 23 nov. 2017b.

International Energy Agency. IEA. **International Energy Agency Statistics**. Disponível em: <<http://www.iea.org/statistics/>>. Acesso em: 5 maio 2017c.

KAIS, S.; SAMI, H. An econometric study of the impact of economic growth and energy use on carbon emissions: Panel data evidence from fifty eight countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1101–1110, 2016.

KASPEROWICZ, R. Economic growth and CO₂ emissions: The ECM analysis. **Journal of International Studies**, v. 8, n. 3, p. 91–98, 2015.

KAYA, Y. Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios. **IPCC Energy and Industry Subgroup**, [s.l.]:[s.n.], 1989.

KRAFT, J.; KRAFT, A. On the Relationship Between Energy and GNP. **The Journal of Energy and Development**, v. 3, n. 2, p. 401–403, 1978.

LI, W.; SUN, S.; LI, H. Decomposing the decoupling relationship between energy-related CO₂ emissions and economic growth in China. **Natural Hazards**, v. 79, n. 2, p. 977–997, 2015.

LIMA, F. et al. A cross-country assessment of energy-related CO₂ emissions: An extended Kaya Index Decomposition Approach. **Energy**, v. 115, p. 1361–1374, 2016.

LIN, S. J.; BEIDARI, M.; LEWIS, C. Energy consumption trends and decoupling effects between carbon dioxide and gross domestic product in South Africa. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 15, n. 7, p. 2676–2687, 2015.

LIU, Z. et al. Relationships between economic growth and CO₂ emissions for Low-Carbon Pilot provinces in China. **J Resour Sci**, v. 33, n. 4, p. 620–625, 2011.

LUCON, O.; GOLDEMBERG, J. Crise financeira, energia e sustentabilidade no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 23, n. 65, p. 121–130, 2009.

NING, Y. et al. Analysis of regional decoupling relationship between energy-related CO₂ emission and economic growth in China. **Natural Hazards**, v. 87, n. 2, p. 867–883, 2017.

NIU, S. et al. Economic growth, energy conservation and emissions reduction: A comparative analysis based on panel data for 8 Asian-Pacific countries. **Energy Policy**, v. 39, n. 4, p. 2121–2131, 2011.

Observatório do Clima. Disponível em: <<http://www.observatoriodoclima.eco.br/>>. Acesso em: 23 nov. 2017.

Organisation for Economic Co-operation and Development. OECD. **OECD, GDP long-term forecast (indicator)**. Disponível em: <https://data.oecd.org/gdp/gdp-long-term-forecast.htm>. Acesso em: 15 de jun. 2018.

PAO, H.-T.; TSAI, C.-M. Modeling and forecasting the CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth in Brazil. **Energy**, v. 36, n. 5, p. 2450–2458, 2011.

PAO, H.-T.; YU, H.-C.; YANG, Y.-H. Modeling the CO₂ emissions, energy use, and economic growth in Russia. **Energy**, v. 36, n. 8, p. 5094–5100, 2011.

PENG, J. et al. Decoupling Analysis of Economic Growth and Energy Carbon Emissions in China [J]. **Resources Science**, v. 4, p. 626–633, 2011.

ROBAINA ALVES, M.; MOUTINHO, V. Decomposition analysis and Innovative Accounting Approach for energy-related CO₂ (carbon dioxide) emissions intensity over 1996-2009 in Portugal. **Energy**, v. 57, p. 775–787, 2013.

RUSTEMOGLU, H.; ANDRÉS, A. R. Determinants of CO₂ emissions in Brazil and Russia between 1992 and 2011: a decomposition analysis. **Environmental Science and Policy**, v. 58, p. 95–106, 2016.

SAHIR, M. H.; QURESHI, A. H. Specific concerns of Pakistan in the context of energy security issues and geopolitics of the region. **Energy Policy**, v. 35, n. 4, p. 2031–2037, 2007.

SAIDI, K.; HAMMAMI, S. The impact of CO₂ emissions and economic growth on energy consumption in 58 countries. **Energy Reports**, v. 1, p. 62–70, 2015.

SANTOS, I. E. **Manual de métodos e técnicas de pesquisa científica**. [s.l.]:Impetus, 2009.

SOYTAS, U.; SARI, R.; EWING, B. T. Energy consumption, income, and carbon emissions

in the United States. **Ecological Economics**, v. 62, n. 3–4, p. 482–489, 2007.

TAPIO, P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001. **Transport Policy**, v. 12, n. 2, p. 137–151, 2005.

FINEL, N.; TAPIO, P. Decoupling transport CO₂ from GDP. **Finland Future Research Centre FFRC ebook**, v. 1, p. 12-42, 2012.

VEHMAS, J. et al. Europe in the global battle of sustainability: Rebound strikes back? : Advanced Sustainability Analysis. **Turku School of Economics and Business Administration, Series Discussion and Working Papers**, v. 7, p. 2003, 2003.

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

WANG, W. et al. Empirical research on decoupling relationship between energy-related carbon emission and economic growth in guangdong province based on extended kaya identity. **The Scientific World Journal**, v. 2014, n. 1, 2014.

WANG, W.; LI, M.; ZHANG, M. Study on the changes of the decoupling indicator between energy-related CO₂ emission and GDP in China. **Energy**, v. 128, p. 11–18, 2017.

WU, L. et al. Modelling and forecasting CO₂ emissions in the BRICS (Brazil, Russia, India, China, and South Africa) countries using a novel multi-variable grey model. **Energy**, v. 79, n. C, p. 489–495, 2015.

YAO, C.; FENG, K.; HUBACEK, K. Driving forces of CO₂ emissions in the G20 countries: An index decomposition analysis from 1971 to 2010. **Ecological Informatics**, v. 26, n. P1, 2015.

YU, Y. et al. Eco-efficiency trends in China, 1978-2010: Decoupling environmental pressure from economic growth. **Ecological indicators**, v. 24, p. 177–184, 2013.

ZHANG, M.; WANG, W. Decouple indicators on the CO₂ emission-economic growth linkage: The Jiangsu Province case. **Ecological Indicators**, v. 32, p. 239–244, 2013.

ZHANG, Y. J.; DA, Y. BIN. The decomposition of energy-related carbon emission and its decoupling with economic growth in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 1255–1266, 2015.

ZHANG, Z. Decoupling China's carbon emissions increase from economic growth: An economic analysis and policy implications. **World Development**, v. 28, n. 4, p. 739–752, 2000.

ANEXOS E APÊNDICES

Tabela A 1. Fator OCDE e Elasticidade de Tapio para a China

Período de Tempo	Ano	ΔCO_2	ΔPIB	OCDE(Fator)	Intervalo de tempo	$\Delta\text{CO}_2(\%)$	$\Delta\text{PIB}(\%)$	Elasticidade de Tapio
-	1990	-	-	-	1990-1995	38,61	72,84	0,5300
1990-1991	1991	5,41%	8,89%	0,031975				
1991-1992	1992	4,45%	13,35%	0,108005				
1992-1993	1993	8,91%	13,09%	0,140982				
1993-1994	1994	3,67%	12,38%	0,207553				
1994-1995	1995	11,50%	10,18%	0,198065				
1995-1996	1996	-0,56%	9,45%	0,271418	1995-2000	6,96	48,13	0,1446
1996-1997	1997	1,10%	8,90%	0,323604				
1997-1998	1998	3,46%	6,78%	0,344647				
1998-1999	1999	-3,18%	7,32%	0,408755				
1999-2000	2000	6,20%	8,44%	0,420935				
2000-2001	2001	5,03%	7,84%	0,436052				
2001-2002	2002	7,71%	8,68%	0,441084	2000-2005	72,65	57,23	1,2695
2002-2003	2003	15,77%	9,65%	0,409882				
2003-2004	2004	16,34%	10,04%	0,376073				
2004-2005	2005	13,32%	11,19%	0,364122				
2005-2006	2006	10,28%	12,43%	0,376282				
2006-2007	2007	9,37%	13,86%	0,400869				
2007-2008	2008	2,13%	9,32%	0,440266	2005-2010	43,52	68,40	0,9362
2008-2009	2009	6,33%	8,90%	0,453495				
2009-2010	2010	9,57%	10,49%	0,458068				
2010-2011	2011	9,84%	9,37%	0,455707				
2011-2012	2012	1,81%	7,64%	0,485183				
2012-2013	2013	4,34%	7,60%	0,500799				
2013-2014	2014	0,47%	7,15%	0,531929	2010-2015	17,24	44,95	0,3835
2014-2015	2015	0,00%	6,78%	0,561655				

Fonte: Elaborado pelo autor (IEA, 2017).

Tabela A 2. Fator OCDE e Elasticidade de Tapio para a Índia

Período de Tempo	Ano	ΔCO_2	ΔPIB	OCDE(Fator)	Intervalo de tempo	$\Delta\text{CO}_2(\%)$	$\Delta\text{PIB}(\%)$	Elasticidade de Tapio
-	1990	-	-	-	1990-1995	33,42%	28,12%	1.188571
1990-1991	1991	7,87%	1,06%	-0,0674				
1991-1992	1992	4,11%	5,48%	-0,05356				
1992-1993	1993	4,33%	4,75%	-0,04936				
1993-1994	1994	5,59%	6,66%	-0,03883				
1994-1995	1995	7,84%	7,58%	-0,04139				
1995-1996	1996	4,65%	9,71%	0,006705	1995-2000	25,83%	34,30%	0,752818
1996-1997	1997	5,46%	2,00%	-0,02697				
1997-1998	1998	1,66%	6,18%	0,016757				
1998-1999	1999	7,84%	8,85%	0,025821				
1999-2000	2000	4,00%	3,84%	0,024363				
2000-2001	2001	1,66%	4,82%	0,053814	2000-2005	21,24%	38,42%	0,552828
2001-2002	2002	3,35%	3,80%	0,057936				
2002-2003	2003	1,96%	7,86%	0,109503				
2003-2004	2004	7,80%	7,92%	0,110507				
2004-2005	2005	4,99%	9,28%	0,145463				
2005-2006	2006	6,59%	9,26%	0,16638	2005-2010	47,67%	47,46%	1.004438
2006-2007	2007	9,91%	8,61%	0,156372				
2007-2008	2008	6,38%	3,89%	0,136161				
2008-2009	2009	12,46%	8,48%	0,104498				
2009-2010	2010	5,37%	10,26%	0,144242				
2010-2011	2011	4,99%	6,64%	0,157457	2010-2015	29,59	38,64	0,7658
2011-2012	2012	6,99%	5,48%	0,145469				
2012-2013	2013	3,45%	6,54%	0,170223				
2013-2014	2014	8,97%	7,18%	0,156339				
2014-2015	2015	2,34%	7,93%	0,200091				

Fonte: Elaborado pelo autor (IEA, 2017).

Tabela A 3. Fator OCDE e Elasticidade de Tapio para os EUA

Período de Tempo	Ano	ΔCO_2	ΔPIB	OCDE(Fator)	Intervalo de tempo	$\Delta\text{CO}_2(\%)$	$\Delta\text{PIB}(\%)$	Elasticidade de Tapio
-	1990	-	-	-	1990-1995	5,64%	13,62%	0,413886
1990-1991	1991	7,87%	1,06%	-0,0674				
1991-1992	1992	4,11%	5,48%	-0,05356				
1992-1993	1993	4,33%	4,75%	-0,04936				
1993-1994	1994	5,59%	6,66%	-0,03883				
1994-1995	1995	7,84%	7,58%	-0,04139				
1995-1996	1996	4,65%	9,71%	0,006705	1995-2000	11,22%	23,44%	0,478891
1996-1997	1997	5,46%	2,00%	-0,02697				
1997-1998	1998	1,66%	6,18%	0,016757				
1998-1999	1999	7,84%	8,85%	0,025821				
1999-2000	2000	4,00%	3,84%	0,024363				
2000-2001	2001	1,66%	4,82%	0,053814				
2001-2002	2002	3,35%	3,80%	0,057936	2000-2005	1,06%	13,33%	0,07926
2002-2003	2003	1,96%	7,86%	0,109503				
2003-2004	2004	7,80%	7,92%	0,110507				
2004-2005	2005	4,99%	9,28%	0,145463				
2005-2006	2006	6,59%	9,26%	0,16638				
2006-2007	2007	9,91%	8,61%	0,156372				
2007-2008	2008	6,38%	3,89%	0,136161	2005-2010	-6,23%	3,86%	-1,61349
2008-2009	2009	12,46%	8,48%	0,104498				
2009-2010	2010	5,37%	10,26%	0,144242				
2010-2011	2011	4,99%	6,64%	0,157457				
2011-2012	2012	6,99%	5,48%	0,145469				
2012-2013	2013	3,45%	6,54%	0,170223				
2013-2014	2014	8,97%	7,18%	0,156339	2010-2015	-6,54	10,91	-0,59903
2014-2015	2015	2,34%	7,93%	0,200091				

Fonte: Elaborado pelo autor (IEA, 2017).

Tabela A 4. Fator OCDE e Elasticidade de Tapio para o Japão

Período de Tempo	Ano	ΔCO_2	ΔPIB	OCDE(Fator)	Intervalo de tempo	$\Delta\text{CO}_2(\%)$	$\Delta\text{PIB}(\%)$	Elasticidade de Tapio
-	1990	-	-	-	1990-1995	6,53%	8,14%	0,80212
1990-1991	1991	7,87%	1,06%	-0,0674				
1991-1992	1992	4,11%	5,48%	-0,05356				
1992-1993	1993	4,33%	4,75%	-0,04936				
1993-1994	1994	5,59%	6,66%	-0,03883				
1994-1995	1995	7,84%	7,58%	-0,04139				
1995-1996	1996	4,65%	9,71%	0,006705	1995-2000	2,82%	5,63%	0,500506
1996-1997	1997	5,46%	2,00%	-0,02697				
1997-1998	1998	1,66%	6,18%	0,016757				
1998-1999	1999	7,84%	8,85%	0,025821				
1999-2000	2000	4,00%	3,84%	0,024363				
2000-2001	2001	1,66%	4,82%	0,053814				
2001-2002	2002	3,35%	3,80%	0,057936	2000-2005	3,19%	6,05%	0,528002
2002-2003	2003	1,96%	7,86%	0,109503				
2003-2004	2004	7,80%	7,92%	0,110507				
2004-2005	2005	4,99%	9,28%	0,145463				
2005-2006	2006	6,59%	9,26%	0,16638				
2006-2007	2007	9,91%	8,61%	0,156372				
2007-2008	2008	6,38%	3,89%	0,136161	2005-2010	-5,59%	0,49%	-11,4131
2008-2009	2009	12,46%	8,48%	0,104498				
2009-2010	2010	5,37%	10,26%	0,144242				
2010-2011	2011	4,99%	6,64%	0,157457				
2011-2012	2012	6,99%	5,48%	0,145469				
2012-2013	2013	3,45%	6,54%	0,170223				
2013-2014	2014	8,97%	7,18%	0,156339	2010-2015	2,68%	5,02%	0,5334
2014-2015	2015	2,34%	7,93%	0,200091				

Fonte: Elaborado pelo autor (IEA, 2017).

Tabela A 5. Fator OCDE e Elasticidade de Tapio para o Brasil

Período de Tempo	Ano	ΔCO_2	ΔPIB	OCDE(Fator)	Intervalo de tempo	$\Delta\text{CO}_2(\%)$	$\Delta\text{PIB}(\%)$	Elasticidade de Tapio
-	1990	-	-	-	1990-1995	23,59%	16,31	1.446238
1990-1991	1991	7,87%	1,06%	-0,0674				
1991-1992	1992	4,11%	5,48%	-0,05356				
1992-1993	1993	4,33%	4,75%	-0,04936				
1993-1994	1994	5,59%	6,66%	-0,03883				
1994-1995	1995	7,84%	7,58%	-0,04139				
1995-1996	1996	4,65%	9,71%	0,006705	1995-2000	28,36%	10,91%	2,599024
1996-1997	1997	5,46%	2,00%	-0,02697				
1997-1998	1998	1,66%	6,18%	0,016757				
1998-1999	1999	7,84%	8,85%	0,025821				
1999-2000	2000	4,00%	3,84%	0,024363				
2000-2001	2001	1,66%	4,82%	0,053814				
2001-2002	2002	3,35%	3,80%	0,057936	2000-2005	6,22%	15,65%	0,397644
2002-2003	2003	1,96%	7,86%	0,109503				
2003-2004	2004	7,80%	7,92%	0,110507				
2004-2005	2005	4,99%	9,28%	0,145463				
2005-2006	2006	6,59%	9,26%	0,16638				
2006-2007	2007	9,91%	8,61%	0,156372				
2007-2008	2008	6,38%	3,89%	0,136161	2005-2010	19,33%	24,46%	0,79049
2008-2009	2009	12,46%	8,48%	0,104498				
2009-2010	2010	5,37%	10,26%	0,144242				
2010-2011	2011	4,99%	6,64%	0,157457				
2011-2012	2012	6,99%	5,48%	0,145469				
2012-2013	2013	3,45%	6,54%	0,170223				
2013-2014	2014	8,97%	7,18%	0,156339	2010-2015	21,66%	5,50	3,938269
2014-2015	2015	2,34%	7,93%	0,200091				

Fonte: Elaborado pelo autor (IEA, 2017).

Tabela A 6. Fator OCDE e Elasticidade de Tapio para a Rússia

Período de Tempo	Ano	ΔCO_2	ΔPIB	OCDE(Fator)	Intervalo de tempo	$\Delta\text{CO}_2(\%)$	$\Delta\text{PIB}(\%)$	Elasticidade de Tapio
-	1990	-	-	-	1990-1995	-28,44%	-37,88%	0,750784
1990-1991	1991	7,87%	1,06%	-0,0674				
1991-1992	1992	4,11%	5,48%	-0,05356				
1992-1993	1993	4,33%	4,75%	-0,04936				
1993-1994	1994	5,59%	6,66%	-0,03883				
1994-1995	1995	7,84%	7,58%	-0,04139				
1995-1996	1996	4,65%	9,71%	0,006705	1995-2000	-4,77%	8,26%	-0,57712
1996-1997	1997	5,46%	2,00%	-0,02697				
1997-1998	1998	1,66%	6,18%	0,016757				
1998-1999	1999	7,84%	8,85%	0,025821				
1999-2000	2000	4,00%	3,84%	0,024363				
2000-2001	2001	1,66%	4,82%	0,053814				
2001-2002	2002	3,35%	3,80%	0,057936	2000-2005	0,50%	34,65%	0,014563
2002-2003	2003	1,96%	7,86%	0,109503				
2003-2004	2004	7,80%	7,92%	0,110507				
2004-2005	2005	4,99%	9,28%	0,145463				
2005-2006	2006	6,59%	9,26%	0,16638				
2006-2007	2007	9,91%	8,61%	0,156372				
2007-2008	2008	6,38%	3,89%	0,136161	2005-2010	3,19%	19,01%	0,167781
2008-2009	2009	12,46%	8,48%	0,104498				
2009-2010	2010	5,37%	10,26%	0,144242				
2010-2011	2011	4,99%	6,64%	0,157457				
2011-2012	2012	6,99%	5,48%	0,145469				
2012-2013	2013	3,45%	6,54%	0,170223				
2013-2014	2014	8,97%	7,18%	0,156339	2010-2015	-3,92	5,98%	-0,655
2014-2015	2015	2,34%	7,93%	0,200091				

Fonte: Elaborado pelo autor (IEA, 2017).