UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE DE
RIBEIRÃO PRETO
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO DE ORGANIZAÇÕES

LUCIANO APARECIDO DOS SANTOS PIMENTEL

O impacto na variação da matriz energética e da área das florestas na eficiência relativa entre os países membros do G20 na emissão de gases de efeito estufa: uma análise envoltória de dados (DEA) nos anos 1990, 2000 e 2010

ORIENTADOR: PROF. DR. ALEXANDRE PEREIRA SALGADO JUNIOR

RIBEIRÃO PRETO

2014

Prof. Dr. Marco Antônio Zago
Reitor da Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Sigismundo Bialoskorski Neto
Diretor da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto

Profa. Dra. Sonia Valle Walter Borges de Oliveira
Chefe do Departamento de Administração

LUCIANO APARECIDO DOS SANTOS PIMENTEL

O impacto na variação da matriz energética e da área das florestas na eficiência relativa entre os países membros do G20 na emissão de gases de efeito estufa: uma análise envoltória de dados (DEA) nos anos 1990, 2000 e 2010

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração de Organizações da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Pesquisa Operacional

ORIENTADOR: PROF. DR. ALEXANDRE PEREIRA SALGADO JUNIOR

RIBEIRÃO PRETO

2014

Versão Corrigida. A original encontra-se disponível na FEA-RP/USP

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Pimentel, Luciano Aparecido dos Santos

O impacto na variação da matriz energética e da área das florestas na eficiência relativa entre os países membros do G20 na emissão de gases de efeito estufa: uma análise envoltória de dados (DEA) nos anos 1990, 2000 e 2010.

289 p. : il. ; 30 cm.

Tese de Doutorado, apresentada à Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto/USP - Área de concentração: Pesquisa Operacional

Orientador: Salgado Junior, Alexandre Pereira

1. Análise Envoltória de Dados 2. Desenvolvimento Sustentável. 3. Energia. 4. Meio Ambiente. 5. Eficiência e Desempenho

À Debora Bertolini (Dedé), pelo amor, compreensão, apoio e companheirismo. Não seria possível agradecer com palavras a magia que você trouxe para minha vida. Mais do que tudo que já tive, você, amor da minha vida, é a minha eterna “pequena”. ♥ vc!

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e Prof. Dr. Alexandre Pereira Salgado Junior, que me orientou nesta tese de doutorado, sempre com dedicação, respeito e conhecimento.

Aos professores, Prof. Dr. Márcio Mattos Borges de Oliveira, Prof. Dr. Tabajara Pimenta Jr e Prof. Dr. Marcos Fava Neves, que em vários momentos da minha passagem pela FEARP USP (graduação, mestrado e doutorado) contribuíram com orientações para minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

Ao Prof. Dr. Alberto Borges Matias, pela amizade, pelo conhecimento transmitido na graduação e pós-graduação e pela experiência profissional adquirida durante o período em que trabalhamos juntos.

Aos meus pais, Julia e Pimentel, pelo carinho, apoio, estrutura, ensinamentos e exemplo de vida que sempre me deram. Obrigado por servirem de referência e continuarem presentes. Espero que isso nunca mude!

Aos meus irmãos, Adriano e Julio, que fazem parte das minhas melhores lembranças de infância e, que agora, tornaram-se meus melhores amigos e confidentes.

À minha avó Helena, que esteve sempre presente em nossa vida, compartilhando histórias, alegrias e lutas.

Aos meus avós (*in memoriam*) José Ignácio dos Santos, José Pimentel e Regina Pimentel, com saudades.

Aos amigos pelo apoio e pelas valiosas contribuições e sugestões. Seria injusto citar apenas alguns nomes. Obrigado por estarem presente.

Aos professores, Prof. Dr. Márcio Mattos Borges de Oliveira, Prof. Dr. Marcelo Pereira de Souza e Prof. Alexandre Pereira Salgado Junior, pelas contribuições e sugestões proferidas na banca de qualificação.

Aos funcionários da Secretaria de Pós-Graduação e em especial à Érika de Lima Veronezi Costa, pela amizade e torcida. Agradeço a atenção e prestatividade dos amigos Matheus Carlos da Costa, Thiago Saran de Carvalho Sasso e Vânia Cristina Vasconcellos Prudêncio.

Aos professores, colegas de graduação, mestrado e doutorado e demais funcionários da FEARP USP, que participaram, direta e indiretamente, desse processo.

Por fim, não menos importante, à Deus, por estar presente em minha vida e assumir o comando em momentos difíceis.

“A vida é a soma de todas as suas escolhas”
(Albert Camus)

“Se extrapolarmos (Camus), a história equivale à soma das escolhas de toda a humanidade”
(Buchanan e O’connel)

PIMENTEL, L. A. S. **O impacto na variação da matriz energética e da área das florestas na eficiência relativa entre os países membros do G20 na emissão de gases de efeito estufa: uma análise envoltória de dados (DEA) nos anos 1990, 2000 e 2010.** Tese de Doutorado. FEARP USP, Ribeirão Preto, 2014

A globalização marca um período de crescimento dos países do G20. Como modelo de crescimento, estes países buscam aumentar sua produção e, com isso, emitem gases de efeito estufa que geram o aquecimento global, colocando em risco as reservas naturais, a biodiversidade, as populações e suas necessidades além de colocar em risco as gerações futuras. Devido à necessidade dos países em continuar crescendo, com sustentabilidade e sem provocar os efeitos negativos do consumo, esta tese avalia os efeitos das alterações nas matrizes energéticas dos países com maior consumo (G20), do aumento do consumo e da variação da área das florestas na emissão de gases de efeito estufa (GEE). Com o objetivo de explicar os fatores responsáveis pelo desempenho dos países na emissão de GEE, esta pesquisa explicativa utiliza o método quantitativo de análise de eficiência, com apoio da análise envoltória de dados (DEA). Foi utilizado o modelo BCC orientado à *output*, que considera rendimentos variáveis de escala entre os países (tecnologia e fontes energéticas) na emissão de gases. Os resultados indicam que o padrão de consumo influencia no desempenho, que as alterações na matriz energética (maior consumo de fontes menos poluentes) influenciam no desempenho em relação aos demais países e que as mudanças no uso da terra são fatores preponderantes no desempenho do país, em relação à ele mesmo e à outros, ao longo do tempo.

Palavras-Chave: Análise Envoltória de Dados, Desenvolvimento Sustentável, Energia, Meio Ambiente, Eficiência e Desempenho

PIMENTEL, L. A. S. The impact on the variation of the energy matrix and the area of forests in the relative efficiency among member countries of the G20 in the emission of greenhouse gases: A data envelopment analysis (DEA) in the years 1990, 2000 and 2010. Doctoral Thesis. FEARP USP, Ribeirão Preto, 2014

Globalisation represents a growth period of the G20 countries. As a growth model, these countries seek to increase their production and thereby emit greenhouse generating global warming, endangering the natural resources, biodiversity, populations and their needs as well as jeopardizing future generations. Due to the need to continue growing sustainably and without causing the negative effects of consuming countries, this thesis evaluates the effects of changes in the energy mix of countries with the highest consumption (G20), the increase in consumption and the change in area of forests the emission of greenhouse gases (GHG). In order to explain the factors responsible for the performance of countries in GHG emissions, this explanatory research uses quantitative analysis method efficiency, supported by data envelopment analysis (DEA). BCC output oriented model, which considers variable returns to scale between countries (technology and energy sources) in emission gases was used. The results indicate that the pattern of consumption influences performance, the changes in the energy matrix (higher consumption of less polluting sources) influence the performance in relation to other countries and those changes in land use are important factors in the performance of the country, in relation to itself and to others over time.

Keywords: Data Envelopment Analysis, Sustainable Development, Energy, Environment, Efficiency and Performance

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Estoques de carbono globais (vegetação e solo até profundidade de 1 m)	49
Tabela 2 - Área de floresta dos países do G20 (+ Irã) em Km ²	51
Tabela 3 - Variação da área de floresta no G20 (+ Irã)	53
Tabela 4 - Custo Médio de investimento e operações por tipo de fonte energética	62
Tabela 5 - Principais reservas mundiais de carvão mineral	80
Tabela 6 - Usinas nucleares (reatores em operação) e reatores em construção	87
Tabela 7 - Energia Eólica - capacidade de produção instalada (MW)	98
Tabela 8 - Publicações sobre DEA por área do conhecimento	141
Tabela 9 - Principais autores sobre DEA, pelos índices G e H	143
Tabela 10 - Estoques de carbono globais (resumido)	157
Tabela 11 - Área de floresta dos países do G20 (em km ²)	159
Tabela 12 - Crescimento econômico médio nos decênios 1991-2000 e 2001-2010	162
Tabela 13 - Resultado da análise de eficiência temporal pelo modelo BCC (DEA)	163
Tabela 14 - Resultado da análise de eficiência com dados em painel pelo modelo BCC	168
Tabela 15 - Análise Temporal (desempenho das DMUs sem considerar mudanças no uso da terra)	170
Tabela 16 - Análise com dados em Painel (desempenho das DMUs sem considerar o C_{mut})	171
Tabela 17 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (África do Sul)	172
Tabela 18 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (África do Sul)	173
Tabela 19 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (África do Sul)	173
Tabela 20 - Consumo energético (África do Sul)	174
Tabela 21 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (África do Sul)	174
Tabela 22 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (África do Sul)	175
Tabela 23 - Eficiência Temporal e com dados em painel (África do Sul)	175
Tabela 24 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Arábia Saudita)	176
Tabela 25 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Arábia Saudita)	177
Tabela 26 - Consumo energético (Arábia Saudita)	177
Tabela 27 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (Arábia Saudita)	178
Tabela 28 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Arábia Saudita)	178
Tabela 29 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Arábia Saudita)	179
Tabela 30 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Arábia Saudita)	179
Tabela 31 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Argentina)	180
Tabela 32 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Argentina)	181
Tabela 33 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Argentina)	181
Tabela 34 - Consumo energético (Argentina)	182
Tabela 35 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (Argentina)	182
Tabela 36 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Argentina)	183
Tabela 37 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Argentina)	183
Tabela 38 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Turquia)	184
Tabela 39 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Turquia)	184
Tabela 40 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Turquia)	185
Tabela 41 - Consumo energético (Turquia)	185
Tabela 42 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (Turquia)	186
Tabela 43 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Turquia)	186
Tabela 44 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Turquia)	187
Tabela 45 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Austrália)	188
Tabela 46 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Austrália)	189
Tabela 47 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Austrália)	189
Tabela 48 - Consumo energético (Austrália)	190
Tabela 49 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (Austrália)	190
Tabela 50 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Austrália)	191
Tabela 51 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Austrália)	192
Tabela 52 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Irã)	192
Tabela 53 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Irã)	193

Tabela 54 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Irã).....	193
Tabela 55 - Consumo energético (Irã).....	194
Tabela 56 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (Irã).....	194
Tabela 57 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Irã).....	195
Tabela 58 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Irã)	196
Tabela 59 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Alemanha).....	197
Tabela 60 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Alemanha).....	197
Tabela 61 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Alemanha).....	198
Tabela 62 - Consumo energético (Alemanha).....	198
Tabela 63 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (Alemanha).....	199
Tabela 64 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Alemanha)	199
Tabela 65 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Alemanha)	200
Tabela 66 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Itália)	201
Tabela 67 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Itália)	202
Tabela 68 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Itália).....	202
Tabela 69 - Consumo energético (Itália).....	203
Tabela 70 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (Itália)	203
Tabela 71 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Itália).....	204
Tabela 72 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Itália).....	204
Tabela 73 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Reino Unido).....	205
Tabela 74 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Reino Unido).....	205
Tabela 75 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Reino Unido).....	206
Tabela 76 - Consumo energético (Reino Unido).....	207
Tabela 77 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (Reino Unido).....	207
Tabela 78 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Reino Unido).....	208
Tabela 79 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Reino Unido)	208
Tabela 80 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Rússia).....	209
Tabela 81 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Rússia).....	209
Tabela 82 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Rússia)	210
Tabela 83 - Consumo energético (Rússia)	211
Tabela 84 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (Rússia).....	211
Tabela 85 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Rússia).....	212
Tabela 86 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Rússia)	212
Tabela 87 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (França)	213
Tabela 88 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (França)	214
Tabela 89 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (França)	214
Tabela 90 - Consumo energético (França)	215
Tabela 91 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (França)	215
Tabela 92 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (França)	216
Tabela 93 - Eficiência Temporal e com dados em painel (França).....	216
Tabela 94 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Canadá)	217
Tabela 95 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Canadá)	217
Tabela 96 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Canadá)	218
Tabela 97 - Consumo energético (Canadá)	218
Tabela 98 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (Canadá).....	219
Tabela 99 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Canadá)	219
Tabela 100 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Canadá).....	220
Tabela 101 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Estados Unidos)	221
Tabela 102 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Estados Unidos)	221
Tabela 103 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Estados Unidos)	222
Tabela 104 - Consumo energético (Estados Unidos)	222
Tabela 105 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (Estados Unidos)	223
Tabela 106 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Estados Unidos)	223
Tabela 107 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Estados Unidos).....	224
Tabela 108 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Japão)	225

Tabela 109 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Japão)	225
Tabela 110 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Japão)	226
Tabela 111 - Consumo energético (Japão)	226
Tabela 112 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (Japão)	227
Tabela 113 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Japão)	227
Tabela 114 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Japão)	228
Tabela 115 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (México)	228
Tabela 116 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (México)	229
Tabela 117 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (México)	229
Tabela 118 - Consumo energético (México)	230
Tabela 119 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (México)	230
Tabela 120 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (México)	231
Tabela 121 - Eficiência Temporal e com dados em painel (México)	231
Tabela 122 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Brasil)	232
Tabela 123 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Brasil)	233
Tabela 124 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Brasil)	234
Tabela 125 - Consumo energético (Brasil)	234
Tabela 126 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (Brasil)	235
Tabela 127 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Brasil)	235
Tabela 128 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Brasil)	236
Tabela 129 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Coreia do Sul)	236
Tabela 130 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Coreia do Sul)	237
Tabela 131 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Coreia do Sul)	238
Tabela 132 - Consumo energético (Coreia do Sul)	238
Tabela 133 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (Coreia do Sul)	239
Tabela 134 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Coreia do Sul)	239
Tabela 135 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Coreia do Sul)	240
Tabela 136 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Indonésia)	241
Tabela 137 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Indonésia)	241
Tabela 138 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Indonésia)	242
Tabela 139 - Consumo energético (Indonésia)	242
Tabela 140 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (Indonésia)	243
Tabela 141 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Indonésia)	243
Tabela 142 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Indonésia)	244
Tabela 143 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (China)	245
Tabela 144 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (China)	246
Tabela 145 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (China)	246
Tabela 146 - Consumo energético (China)	247
Tabela 147 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE (China)	247
Tabela 148 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (China)	248
Tabela 149 - Eficiência Temporal e com dados em painel (China)	249
Tabela 150 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Índia)	249
Tabela 151 - Participação de cada fonte em sua matriz energética Índia	250
Tabela 152 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 Índia	251
Tabela 153 - Consumo energético Índia	251
Tabela 154 - Absorção de CO ₂ e Emissão de GEE Índia	252
Tabela 155 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 Índia	252
Tabela 156 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Índia)	253
Tabela 157 - Variação nos scores entre 1990 e 2010 (nos modelos com e sem C _{mut})	259
Tabela 158 - <i>Inputs</i> e <i>Outputs</i> - Dados de 1990 do G20	283
Tabela 159 - <i>Inputs</i> e <i>Outputs</i> - Dados de 2000 do G20	284
Tabela 160 - <i>Inputs</i> e <i>Outputs</i> - Dados de 2010 do G20	285

Lista de Figuras

Figura 1 - Fatos relevantes da participação da ONU nas negociações ambientais	33
Figura 2 - Mapa dos conflitos mundiais relacionados à mudança climática	36
Figura 3 - Expectativas de alteração no desvio padrão na temperatura mundial (2050)	37
Figura 4 - Metas de redução (incluindo mudanças no uso da terra)	44
Figura 5 - Estoque de carbono armazenado nos biomas (gigatoneladas de carbono)	50
Figura 6 – Possíveis cenários sobre aquecimento e resfriamento global	57
Figura 7 - Emissão de carbono na energia elétrica	64
Figura 8 - Reservas mundiais de petróleo	70
Figura 9 - Fluxos de Gás Natural	74
Figura 10 - Reservas mundiais de gás natural	76
Figura 11 - Tipos de carvão, reservas e usos	79
Figura 12 - Reservas mundiais de carvão mineral	81
Figura 13 - Mapa dos países com uso de energia nuclear (número de reatores em operação)	88
Figura 14 - Consumo de energia nuclear no mundo	89
Figura 15 - Principais potenciais hidrelétricos tecnicamente aproveitáveis no mundo	93
Figura 16 - Radiação solar direta global (kWh/m ² /dia)	95
Figura 17 - Fronteira Eficiente com economia ou deseconomia de escala	106
Figura 18 - Organograma das técnicas de avaliação de eficiência	107
Figura 19 - Análise de eficiência utilizando a análise de regressão	108
Figura 20 - Análise de eficiência utilizando a fronteira estocástica	110
Figura 21 - Função Cobb-Douglas	111
Figura 22 - Comparação entre DEA e Análise de Regressão	114
Figura 23 - Elementos de uma unidade tomadora de decisão (DMU)	119
Figura 24 - Isoquanta convexa para medição de eficiência	120
Figura 25 - Função de produção (variações da produtividade e da eficiência)	121
Figura 26 - Cálculo da produtividade de uma DMU (pela tangente)	122
Figura 27 - Regiões gráficas da influência da escala de produção	123
Figura 28 - Regiões de soluções possíveis da Análise Envoltória de Dados	124
Figura 29 - Isoquanta da DMU _k com dois insumos e um produto	125
Figura 30 - Comparação entre os modelos BBC e CCR	126
Figura 31 - Classificação entre ganhos e escala e orientação	127
Figura 32 - Variáveis necessárias para o cálculo da eficiência por uma orientação qualquer	127
Figura 33 - Fronteira eficiente em um modelo DEA do tipo de retorno de escala constante (CCR) ..	130
Figura 34 - Fronteira eficiente em um modelo DEA do tipo de retorno de escala constante (BCC) ..	132
Figura 35 - Exemplos de folga como correção da fronteira linear por partes	135
Figura 36 - Comparação do modelo FDH com o modelo BCC	136
Figura 37 - Fluxograma para desenvolvimento de uma aplicação DEA	139
Figura 38 - <i>Inputs</i> e <i>Output</i> do modelo	153
Figura 39 - Representação gráfica da escolha e orientação do modelo DEA	154
Figura 40 - Mapa com os países do G8, G5 e demais países que compõem o G20	155
Figura 41 - Análise temporal (relação entre <i>score</i> e <i>output</i>) em 1990	165
Figura 42 - Análise temporal (relação entre <i>score</i> e <i>output</i>) em 2000	166
Figura 43 - Análise temporal (relação entre <i>score</i> e <i>output</i>) em 2010	167
Figura 44 - Modelo com Coeficiente de mudança do uso da terra	169
Figura 45 - Modelo sem o Coeficiente de mudança do uso da terra	169
Figura 46 - Mapa dos scores dos países (com mudanças no uso da terra)	260
Figura 47 - Mapa dos scores dos países (sem coeficiente de mudanças no uso da terra)	261
Figura 48 - Regiões no mundo com florestas tropicais	286
Figura 49 - Regiões no mundo com florestas temperadas	287
Figura 50 - Regiões no mundo com floresta boreal	287
Figura 51 - Regiões no mundo com Cerrado (Savana)	288
Figura 52 - Regiões no mundo com campos temperados	288
Figura 53 - Regiões no mundo com desertos e semidesertos	289

Figura 54 - Regiões no mundo com Tundra.....	289
--	-----

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Emissão de GEE (G8, G5 e demais países do G20)	29
Gráfico 2 - Emissões de dióxido de carbono do G20.....	32
Gráfico 3 - Variação de temperatura (1880-2011)	34
Gráfico 4 - Evolução da concentração de dióxido de carbono	42
Gráfico 5 - Custo de geração de energia a partir das principais fontes energéticas	61
Gráfico 6 - Emissões de Carbono por fonte energética.....	63
Gráfico 7 - Evolução do preço do petróleo (1939-2013)	69
Gráfico 8 - Preço do gás natural em relação aos demais combustíveis fósseis	75
Gráfico 9 - Evolução dos preços dos combustíveis fósseis	82
Gráfico 10 - Preço do carvão em relação ao gás natural e petróleo	83
Gráfico 11 - Publicações sobre DEA por área do conhecimento	142
Gráfico 12 - Autores com a maioria das referências	143
Gráfico 13 - Evolução das publicações sobre DEA	144

Lista de Quadros

Quadro 1- Principais temas discutidos nas COPs	31
Quadro 2 - Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio (Protocolo de Montreal).....	39
Quadro 3 - Características dos Gases de Efeito Estufa	40
Quadro 4 - Equivalência de Carbono dos Gases de Efeito Estufa	41
Quadro 5 - Cadeia produtiva do gás natural.....	72
Quadro 6 - Tipos de carvão e poder calorífico.....	77
Quadro 7 - Classificação do carvão segundo teor de carbono conteúdo energético	78
Quadro 8 - Processo de transformação da biomassa em energia.....	100
Quadro 9 - Comparação entre as técnicas paramétricas e não paramétricas na análise da eficiência.	108
Quadro 10 - Comparação entre os modelos da Técnica de Números índices	112
Quadro 11 - Quadro comparativo entre o DEA e Análise de Regressão	115
Quadro 12 - Publicações que deram origem aos modelos DEA	123
Quadro 13 - Resumo dos modelos DEA	137
Quadro 14 - Metodologia para análise de eficiência produtiva.....	138
Quadro 15 - Variáveis utilizadas em estudos ambientais com aplicação da técnica DEA.....	148
Quadro 16 - Variáveis de <i>input</i> e <i>output</i> utilizadas no trabalho	151
Quadro 17 - Países do G20.....	156
Quadro 18 - Biomas característicos dos países do G20	158
Quadro 19 - Quadro resumo do desempenho das matrizes energéticas	254
Quadro 20 - Quadro resumo do consumo, absorção, emissões e desempenho	256
Quadro 21 - Quadro resumo da eficiência dos países	258

Siglas e Abreviações

ABEN	Associação Brasileira de Energia Nuclear
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANPAD	Associação Nacional dos Programas de Pós-Graduação em Administração
BCC	Banker, Charnes e Cooper (em referência ao modelo BCC)
BP	<i>Beyond Petroleum</i> (BP Global - nova denominação da <i>British Petroleum</i>)
CCR	Charnes, Cooper e Rhodes (em referência ao modelo CCR)
CDB	Convenção de Diversidade Biológica
CIA	<i>Central Intelligence Agency</i>
C _{mut}	Coefficiente de Mudança no Uso da Terra
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CO _{2eq}	CO ₂ equivalente
COLS	<i>Corrected Ordinary Last Squares</i>
COP	Conferência das Partes
DEA	Análise Envoltória de Dados (originado do inglês <i>Data Envelopment Analysis</i>)
DMU	<i>Decision Making Unit</i>
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EU	<i>European Union</i>
EUA	Estados Unidos da América
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FDH	<i>Free Disposal Hull</i>
FGV	Fundação Getúlio Vargas
G20	Grupo dos 20
G5	Grupo dos cinco
G77	Grupo dos setenta e sete
G8	Grupo dos oito
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LULUCF	<i>Land Use, Land Use Change and Forestry</i>
MDL	Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MRE	Ministério das Relações Exteriores
MW	Megawatt
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
OLS	<i>Ordinary Last Squares</i>
OMC	Organização Mundial do Comércio
OMI	Organização Meteorológica Internacional
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONG	Organização Não Governamental
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PAC	Plano de Aceleração do Crescimento
PIB	Produto Interno Bruto
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RAC	Revista de Administração Contemporânea da ANPAD

RAE	Revista de Administração de Empresas da FGV
RAUSP	Revista de Administração da Universidade de São Paulo
RCE	Rendimentos Constantes de Escala
RED	<i>Reducing Emissions from Deforestation</i>
REDD	<i>Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation</i>
REDD+	<i>REDD plus</i>
RNC	Rendimentos Não Crescentes de Escala
RND	Rendimentos Não Decrescentes de Escala
RVE	Rendimentos Variáveis de Escala
SFA	<i>Stochastic Frontier Analysis</i>
TNP	Tratado de Não Proliferação Nuclear
UE	União Europeia
UN	<i>United Nations</i>
UNCHE	<i>United Nations Conference on the Human Environment</i>
UNCTAD	<i>United Nations Conference on Trade And Development</i>
UNEP	<i>United Nations Environment Program</i>
UNFCCC	Convenções Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
WRI	<i>World Resources Institute</i>

Elementos e Fórmulas Químicas

C	Carbono
CFC	Clorofluorcarboneto
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
HFC	Hidrofluorcarbono
MO _x	Óxido misto
N ₂ O	Óxido Nitroso
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
PFC	Perfluorcarbono
S ₆	Hexafluoreto
SO ₂	Óxido de Enxofre
U ₃ O ₈	Octócido de Triurânio (conhecido como yellow cake)
UF ₆	Hexafluoreto de Urânio

Unidades de Medida

ha	Hectare
km ²	Quilômetro quadrado
kt	Quilo tonelada
mt	Milhões de toneladas
mwh	Megawatt-hora
ppm	Partes por milhão
ton	Tonelada

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Justificativa	9
1.3	Problema de Pesquisa e Objetivos.....	10
1.4	Limitações	11
1.5	Estrutura do Trabalho.....	12
2	Mudanças Climáticas e Negociações Ambientais.....	14
2.1	A Organização das Nações Unidas e o Meio Ambiente.....	16
2.2	Estruturas ambientais das Nações Unidas e as negociações ambientais	21
2.2.1	Organização Meteorológica Mundial.....	21
2.2.2	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento	21
2.2.3	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente	22
2.2.4	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.....	23
2.2.5	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima	27
2.2.6	Conferência das Partes	28
2.3	Aquecimento global e Conflitos Mundiais.....	34
2.4	Gases de Efeito Estufa e Camada de Ozônio	37
2.5	Desmatamento e absorção de carbono nas florestas.....	43
2.5.1	Redução de Emissões do Desmatamento (RED, REDD e REDD +).....	45
2.5.2	Tipos de biomas e absorção de carbono.....	48
2.5.3	Florestamento, Reflorestamento e Desmatamento no G20	51
3	Fontes e Matriz Energética.....	56
3.1	Combustíveis Fósseis	65
3.1.1	Petróleo	65
3.1.2	Gás Natural.....	71
3.1.3	Carvão	77
3.1.4	Pré-Sal, <i>Shale Gas</i> e <i>Tight Oil</i>	84
3.2	Energia Nuclear.....	85
3.3	Fontes Renováveis.....	91
3.3.1	Hidrelétricas	92
3.3.2	Energia Solar Térmica e Fotovoltaica	94
3.3.3	Energia Eólica	97
3.3.4	Biomassa	99
3.3.5	Outras fontes Renováveis.....	101
4	Eficiência e Análise de Desempenho	103
4.1	Conceitos Básicos	104

4.2	Técnicas para mensuração da eficiência	106
4.2.1	Análise de Regressão	108
4.2.2	Métodos de Fronteira	109
4.2.3	Números Índices.....	111
4.2.4	Análise Envoltória de Dados	112
4.3	Análise Envoltória de Dados	116
4.3.1	Origens	117
4.3.2	Conceitos Básicos	118
4.3.3	Modelos de Análise Envoltória de Dados	123
4.3.4	Comparativo entre os modelos DEA.....	136
4.4	Etapas da análise de eficiência	137
4.5	Estudos sobre Análise Envoltória dos Dados (DEA)	140
5	Procedimentos Metodológicos	149
5.1	Classificação da Pesquisa.....	149
5.2	Método de Pesquisa.....	150
5.2.1	Definição das variáveis	150
5.2.2	Escolha e Orientação do Modelo DEA	153
5.2.3	Definição das Unidades Tomadoras de Decisão (DMUs).....	154
5.2.4	Tratamento dos Dados.....	156
6	Apresentação e Análise dos Resultados	161
6.1	Análise de desempenho pela Análise Envoltória de Dados (DEA)	161
6.1.1	Análise Temporal	163
6.1.2	Análise em Pannel.....	167
6.2	Comparação do desempenho das DMUs em função do C_{mut}	169
6.3	Países na fronteira de eficiência em todos os períodos (eficiência relativa)	171
6.3.1	África do Sul	172
6.3.2	Arábia Saudita.....	176
6.3.3	Argentina.....	180
6.3.4	Turquia	184
6.4	Países que se tornaram eficientes (eficiência relativa)	187
6.4.1	Austrália	188
6.4.2	República do Irã	192
6.5	Países sempre ineficientes (com melhora na eficiência relativa)	196
6.5.1	Alemanha	196
6.5.2	Itália.....	200
6.5.3	Reino Unido	205
6.5.4	Rússia	209
6.6	Países sempre ineficientes (com tendência de melhora na eficiência relativa)	213
6.6.1	França.....	213

6.6.2	Canadá.....	217
6.6.3	Estados Unidos.....	220
6.6.4	Japão.....	224
6.6.5	México.....	228
6.7	Países que se tornaram ineficientes (eficiência relativa).....	232
6.7.1	Brasil	232
6.7.2	Coreia do Sul.....	236
6.7.3	Indonésia	240
6.8	Países sempre ineficientes (com tendência de queda na eficiência relativa).....	245
6.8.1	China	245
6.8.2	Índia.....	249
6.9	Síntese da Análise de Eficiência	253
6.9.1	Quadro Matriz Energética	254
6.9.2	Quadro Consumo, Absorção, Emissões e Análise Envoltória	256
6.9.3	Variações nos <i>scores</i> de eficiência entre 1990 e 2010	258
7	Discussão.....	262
8	Conclusão.....	266
	Referencial Bibliográfico	267
	Apêndice	283
	Base de dados utilizada	283
	Dados utilizados para a análise de viabilidade no ano de 1990	283
	Dados utilizados para a análise de viabilidade no ano de 2000	284
	Dados utilizados para a análise de viabilidade no ano de 2010	285
	Anexos.....	286
	Biomass.....	286
	Floresta Tropical	286
	Floresta Temperada	287
	Floresta Boreal (Taiga).....	287
	Savanas (Cerrado)	288
	Campos Temperados	288
	Desertos e Semidesertos.....	289
	Tundra	289

1 Introdução

O período caracterizado pela globalização econômica (este último à partir de 1990) presenciou fatos históricos importantes e, em especial, momentos de crises mundiais. A queda do muro de Berlim na Alemanha em 1989 e o consequente desmantelamento do socialismo no mundo marcou o início deste processo (SILVA, 2010). Com o fim do socialismo e o questionamento do capitalismo durante a globalização e, mais fortemente, após a crise global de 2008, o mundo passou a buscar soluções alternativas para estimular o crescimento e desenvolvimento econômico e evitar crises (STIGLITZ; STERN; SEN, 1990, STIGLITZ, 1994). Em uma análise simplificada, o estímulo ao crescimento econômico sugere aumento de produção e consumo, com objetivo a gerar emprego e renda. Assim, em um contexto de predominância de interesses econômicos, com um consumo maior, a busca pela geração de bem-estar da população e o combate às crises e seus efeitos negativos, o meio ambiente passou a ser novamente ameaçado, como em outras fases da história mundial (NASCIMENTO, 2012).

Com o aumento da produção, maiores níveis de gases de efeito estufa foram lançados na atmosfera, gerando o efeito estufa e provocando aquecimento global. Além desta questão, o aumento do consumo causa outros problemas importantes como a perda da biodiversidade e migrações (STERN, 2006; DAWSON ET AL., 2011). A preocupação com os problemas ambientais, em especial da emissão de gases de efeito estufa (tema discutido nesta tese), têm gerado discussões com o objetivo de compreender os meios de mitigar os efeitos do aquecimento global e propor soluções mais sustentáveis para os países. Baseado nesta breve introdução, a subseção seguinte detalha esta ideia inicial e apresenta o problema de pesquisa, os objetivos e a estrutura do trabalho.

1.1 Contexto

Crescimento e desenvolvimento econômico sempre estiveram em pauta tanto em discussões acadêmicas quanto em decisões e propostas dos Estados. A cada ano surgem novas teorias, visões e explicações sobre causas do crescimento, assim como teorias para entender e explicar o desenvolvimento dos países. A discussão merece destaque, pois este conhecimento promove o debate de alternativas e direciona a tomada de decisão política e econômica. A adoção de

modelos econômicos de crescimento e desenvolvimento adequados pode promover maior qualidade de vida e oportunidades para a população. Em épocas de crise, estes modelos tendem a ser questionados e reavaliados, sendo que em dois momentos da história recente houve um questionamento sobre este tema, sendo o primeiro relacionado ao fim do bloco soviético e o outro relacionado à crise de 2008 (STIGLITZ; STERN; SEN, 1990; KRUGMAN, 2008).

Com o fim da Guerra Fria e a extinção da União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) em 1991, o modelo socialista passou a ser questionado como modelo econômico de desenvolvimento. Apesar da grande maioria dos países socialistas terem abandonado este modelo, alguns países continuam adotando o socialismo como modelo. Estes países, como Cuba e Coreia do Norte, apresentam indicadores econômicos ruins e baixa qualidade de vida da população, o que leva a um questionamento constante deste tipo de solução econômica. Segundo Bresser-Pereira (2010), por outro lado, a crise global de 2008 também levantou questionamento do modelo adotado pela maioria dos países, denominados capitalistas, que agora adotam uma postura de livre mercado em um contexto de globalização. Stiglitz (2000) já havia relacionado instabilidade com a abertura dos mercados e crescimento econômico, considerando que a liberalização dos mercados leva à instabilidade e que pode gerar um efeito adverso no crescimento.

Neste contexto de crise, cada país busca achar uma solução que o permita sair da crise, bem como reestabelecer índices de crescimento positivos. O crescimento econômico é o foco das atenções dos governos pelo consenso que se tem de que quanto maior for o crescimento de um país (geração de riqueza), mais a população tenderá a se beneficiar, direta (emprego e consumo) ou indiretamente (infraestrutura, segurança, saúde e educação), o que pode ser traduzido como desenvolvimento econômico (melhoria do bem-estar da população). Os resultados sociais, contudo, podem não apresentar melhora caso o aumento da riqueza do país (crescimento econômico) não for direcionado para melhoria de estrutura de educação, saúde, infraestrutura, e outras áreas de ação governamental. Esta relação entre crescimento e desenvolvimento envolve uma série de outros fatores mais complexos, que não são abordados neste trabalho, como distribuição de renda e corrupção. Assim, voltando à simplicidade do conceito, Mankiw (2005) aponta que por meio do crescimento econômico as gerações podem melhorar seu padrão de vida, pois, ao desfrutar de renda mais alta, podem consumir maiores quantidades de bens e serviços. Friedman (2009) reforça este conceito ao defender que o

crescimento econômico, amplamente distribuído, proporciona benefícios aos países e sua população, fortalecendo instituições e promovendo estabilidade política.

Cada país tem características próprias de tamanho da população, recursos naturais, tipo de regime político que o torna singular na escolha do modelo de crescimento adotado. O crescimento econômico é medido pelo Produto Interno Bruto (PIB) que, por sua vez, em seu cálculo, depende do consumo das famílias, investimento das empresas, gastos do governo e das exportações líquidas. Assim, há aumento do PIB quando algum destes fatores contribui positivamente para seu crescimento (BARRO; REDLICK, 2011). Apesar deste raciocínio elementar, há algumas considerações importantes sobre as características dos países e o crescimento econômico, relacionadas ao seu uso como medida de desempenho e características dos países na escolha do modelo econômico.

A primeira consideração importante é que o PIB tem sido questionado como medida de desempenho econômico e progresso social, incluindo os problemas com a sua medição. Em 2008, Nicolas Sarkozy, presidente francês na época, fomentou a criação de uma comissão formada por Joseph Stiglitz, Amartya Sen e Jean Paul Fitoussi, posteriormente chamada de “Comissão sobre a Medição de Desempenho Econômico e Progresso Social” (CMEPSP), com o objetivo de identificar os limites do PIB como um indicador de desempenho econômico e progresso social ao considerar que informação adicional pode ser necessária para a produção de indicadores mais relevantes do progresso social e para avaliar a viabilidade de ferramentas de medição de alternativas, além de discutir maneiras de apresentar a informação estatística de uma forma adequada (STIGLITZ; SEN; FITOUSSI, 2009).

Outra consideração importante é que muitos países tendem a fomentar seu mercado interno para estimular o crescimento, já que as variáveis controladas pelo governo para este fim são mais fáceis de ajustar. Além disto, países que dependem das exportações líquidas são mais suscetíveis a uma série de fatores, como competitividade no mercado internacional, câmbio, medidas protecionistas e práticas ilegais de comércio (como *dumping* e subsídios). Com relação ao câmbio, Bresser-Pereira (2012) destaca que,

[...] uma taxa de câmbio competitiva é fundamental para o desenvolvimento econômico porque coloca todo o mercado externo à disposição das empresas nacionais realmente competentes do ponto de vista administrativo e tecnológico. Dado o progresso técnico em curso (a variável básica do crescimento do lado da oferta), o desenvolvimento econômico é função da taxa de investimento. Ora, uma taxa de câmbio competitiva estimula os

investimentos orientados para a exportação e aumenta correspondentemente a poupança interna (BRESSER-PEREIRA, 2012, p. 11)

A taxa cambial, que muitas vezes é utilizada como forma de estimular o crescimento, fica limitada como instrumento de estímulo econômico no caso em que os países adotam moeda única, como é a União Europeia. A adoção da moeda única, como parte de um processo de integração, estimula a competitividade entre os países, uma vez que estes países reduzem suas barreiras comerciais no bloco. Este modelo (adoção de moeda única), contudo, passa a ser questionado nos períodos de crise, como tem ocorrido com a Grécia no período pós crise de 2008 (KRUGMAN, 2001; MILIOS; SOTIROPOULOS, 2010).

Neste sentido, os países populosos tendem a ter certa vantagem na geração do crescimento, pois sua dependência do mercado externo pode ser reduzida. Em outras palavras, o país pode estimular o crescimento econômico com base no mercado interno, promovendo o aumento do consumo das famílias. Há de se considerar aqui que países com distribuição de renda desigual tendem a perder esta oportunidade, pois com a má distribuição de renda, parte da população não consegue consumir. O estímulo do consumo é uma medida fortemente adotada pelos governos por dois importantes motivos: (1) em grande parte os estímulo do consumo pode ser feito por medidas políticas e econômicas (e quem controla isto é o próprio governo) e (2) estimula o efeito multiplicador.

O estímulo do consumo dado pelo governo (aumentando a produção) pode ser feito por meio de planos econômicos, como o Plano de Aceleração do Crescimento (PAC) ou o plano “Minha Casa, Minha Vida”, que estimularam determinados setores da economia, reduzindo impostos, facilitando o crédito e dando prazos maiores para o pagamento (estimulando o consumo, tanto à vista quanto à prazo). Outra maneira de estimular o crescimento é por meio de medidas econômicas, como redução da taxa básica de juros, fazendo o custo de financiamentos se reduzir, também estimulando e facilitando o crédito e compras a prazo, pois, independentemente do prazo do pagamento (compra à vista ou à prazo), esta medida promove o aumento do consumo. Neste contexto, o efeito multiplicador ajuda a promover o crescimento econômico (SARTI; HIRATUKA, 2011).

O efeito multiplicador é um conceito econômico em que o crescimento econômico é estimulado pelo aumento do consumo e da produção. Isto ocorre da seguinte forma: o

aumento do consumo faz com que as empresas aumentem a produção para atender esta demanda. Segundo Silveira e Julio (2013), o efeito multiplicador,

[...] engloba toda a economia nacional. A transferência de capitais ociosos para investimento em infraestrutura impulsiona as indústrias de máquinas e equipamentos no mercado interno. A ampliação e a dinamização do mercado interno têm por consequências a geração de novos empregos, aumento da renda, consumo e poupança, ou seja, retomada do desenvolvimento econômico (SILVEIRA; JULIO, 2013, p. 36).

Devido ao aumento da produção e para suprir esta demanda sem atrasos, as empresas necessitam contratar mais trabalhadores na produção de bens e serviços e consequentemente estas pessoas passam a ter mais renda (salários), o que estimula novamente o consumo. Desta forma, pode-se resumir que o aumento do consumo gera um aumento de produção, que gera um aumento do emprego, que por sua vez gera um aumento da renda. Este aumento da renda gera um novo aumento de consumo, formando um ciclo (efeito multiplicador) que afeta várias áreas da economia estimulando o crescimento econômico¹. Assim, com o aumento do crescimento e da geração de riqueza, haverá uma maior chance do país promover desenvolvimento econômico, traduzido em melhoria das condições da população.

Veiga (2005) reforça esta ideia ao considerar que o crescimento e desenvolvimento está associado ao processo de industrialização. Segundo o autor, o crescimento econômico, por meio da industrialização, tende a melhorar a condição de vida da população, gerando maior quantidade de bens e serviços disponíveis para satisfação de necessidades. Além da maior quantidade de produtos para consumo, obtida por meio da industrialização, o país acaba promovendo geração de empregos e consequente aumento do número de consumidores.

Apesar de ser um conceito simples e de parecer uma solução ideal, este processo tem um custo muito alto para o meio ambiente em dois aspectos. O primeiro aspecto é relativo ao consumo exagerado de recursos naturais (minérios, água, matéria-prima, dentre outros recursos) necessários à produção. Assim, quanto maior for o consumo, mais rapidamente se esgotam estes recursos naturais, em grande parte, não renováveis. O segundo aspecto, também

¹ Uma importante observação deve ser feita quanto ao estímulo do consumo das famílias para promover o crescimento. O aumento do consumo e o efeito multiplicador só faz efeito na geração do crescimento se os produtos consumidos forem nacionais. Se houver aumento do consumo de produtos estrangeiros, o efeito multiplicador ocorre no país exportador e não no país importador. Isso explica, em grande parte, as medidas protecionistas tarifárias e não tarifárias adotadas pelos países, que tem gerado conflito no âmbito da Organização Mundial do Comércio (OMC), assim como explica a guerra cambial dos países em tentar desvalorizar sua moeda.

ligado à produção, refere-se ao consumo energético utilizado na produção e a emissão de gases poluentes no meio ambiente, como os gases de efeito estufa (GEE). Com o aumento da poluição e da emissão destes poluentes, há uma provável chance de aumento de problemas ambientais como aumento da temperatura global, aumento do nível dos oceanos, desertificação de determinadas áreas no mundo, dentre outras consequências.

Uma das maneiras para tentar corrigir as externalidades causadas pelo aumento da produção e das emissões de GEE é por meio de cobrança de impostos ou taxas dos países que mais poluem. Este conceito foi formalizado inicialmente por Pigou em 1924, que propunha um meio do Estado influenciar o comportamento de agentes econômicos no mercado, com o objetivo de corrigir externalidades negativas. Posteriormente, este conceito foi adaptado para a área ambiental, e conhecido como taxa pigouviana, visando à internalização das externalidades por meio da fixação de impostos sobre o uso do recurso ambiental. De acordo com Baiardi e Menegati (2011, p. 222), a taxa pigouviana argumentou que a “externalidade negativa devido à poluição pode ser internalizada em um mercado competitivo através da introdução de um imposto igual ao dano marginal social provocado pela degradação ambiental”. Desta forma, a taxa pigouviana busca, por meio de instrumentos econômicos, promover a proteção de recursos naturais. Além da fixação de impostos, outras formas consideradas para a internalização das externalidades negativas são a indenização das pessoas e o fechamento de empreendimentos.

A implantação de grandes projetos industriais e a criação de novos centros urbanos em determinada área, criando empregos diretos e indiretos, causam impactos no meio ambiente, elevando a demanda de alimentos e matérias-primas determinando a expansão da oferta agrícola para suprir as necessidades internas e a demanda internacional de produtos (SOUZA, 2005). Isso faz do setor industrial um dos que mais provoca danos ao meio ambiente. Com base neste cenário, o movimento de proteção ambiental ganhou força, uma vez que os países passaram a questionar os modelos vigentes de crescimento e desenvolvimento que não consideravam a incorporação da preocupação com problemas ambientais (CORREA, 1998).

Um dos desdobramentos desta preocupação ambiental foi a realização de conferências globais e a realização de estudos sobre o tema, que culminou no desenvolvimento do conceito de “Desenvolvimento Sustentável” criado por Gro Brundtland em 1987 na ocasião do encontro da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UN, 1987). Para

Brundtland, o desenvolvimento deve ocorrer de modo “que atenda às necessidades das gerações presentes sem comprometer a habilidade das gerações futuras de suprirem suas próprias necessidades”. Neste sentido, o atual padrão de consumo de recursos naturais (e um possível aumento deste padrão) poderia comprometer as necessidades futuras da sociedade.

Outro desdobramento importante foi relacionado às consequências do aquecimento global. Ainda que não haja consenso entre os pesquisadores sobre as possíveis consequências, o aumento da temperatura global é fato inegável. Para alguns pesquisadores, sob um prisma mais catastrófico, as consequências do aumento da temperatura e destruição do meio ambiente podem fazer com que as áreas litorâneas deixem de ser habitadas (aumento do nível dos oceanos), que áreas cultiváveis virem deserto (aumento da temperatura e desertificação), constituindo um ambiente propício para migração e consequente xenofobia, acirramento de disputas por terras, fome e miséria. De qualquer forma, mesmo na mais otimista das hipóteses, as consequências do aquecimento global tendem a ser comprometedoras para o mundo inteiro. Baseado neste contexto, o mundo hoje enfrenta um grande problema: Como estimular o crescimento com o menor prejuízo para o meio ambiente?

Este é um problema real que preocupa cada vez mais o mundo inteiro. A questão ambiental é muito abrangente, que vai desde a manutenção da biodiversidade, dos recursos de água doce, do consumo sustentável ao aquecimento global. Assim, dada a abrangência da temática ambiental, este trabalho busca avaliar apenas a questão do aquecimento global, considerado uma das importantes ameaças ambientais. Neste sentido, para que o meio ambiente seja preservado, ainda que haja opiniões divergentes, há um consenso de que a redução nas emissões de gases de efeito estufa reduziria alguns dos efeitos negativos para o meio ambiente (em especial o aquecimento global), o que ajudaria a mitigar em parte o problema (VEIGA, 2013).

Para a concretização desta proposta em favor do meio ambiente, de maneira imediata, os países deveriam reduzir sua emissão de GEE, o que incorreria, na maioria dos países, em uma redução de sua produção industrial, uma vez que o desenvolvimento tecnológico para redução de emissões e aumento de produtividade e uso de novas matérias primas menos poluentes levaria algum tempo para ser viabilizado. Neste sentido, a redução na produção provocaria uma redução nos empregos, que por sua vez geraria uma redução na renda e consequentemente redução no consumo (fazendo uma espécie de efeito multiplicador no

sentido negativo). Apesar de aceita, esta opção foi inicialmente questionada pelos países, pois acarretaria redução no crescimento econômico causando outros problemas para o país.

Formalmente foi feita em 1997 pelo Protocolo de Quioto, sendo que apenas os países desenvolvidos deveriam ter meta de redução de emissão de GEE (UN, 1998). Isto ocorreu pela justificativa de que os países em desenvolvimento não deveriam ter meta, uma vez que no contexto da globalização e liberação dos mercados, poderiam aumentar a produção para crescer e tentar se tornar mais competitivo. A opção de penalizar os países mais desenvolvidos tem como base que estes foram os principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa e pelo alto padrão de consumo. De acordo com Zadek (2011), os países desenvolvidos beneficiaram-se de um período de desenvolvimento industrial sem restrições de ordem ambiental. Ainda que estes países não tivessem conhecimento dos efeitos das emissões de carbono por suas indústrias, estes países (industrialmente mais desenvolvidos) tiveram grande participação nas emissões nos últimos séculos, que se refere ao período pós Revolução Industrial até o fim do século XX. Os países em desenvolvimento, por sua vez, resistem em adotar políticas preservacionistas que acarretam restrições aos fluxos demográficos e às atividades econômicas e reivindicam compensações financeiras e transferência de tecnologia em troca de adoção de políticas de conservação e preservação do meio ambiente, previstas nos princípios 9 e 13 da declaração final da Conferência do Meio Ambiente realizada no Rio de Janeiro em 1992 (UN, 1992). Dessa forma, o subdesenvolvimento representa sérias ameaças ao meio ambiente, já que a população tende a ser levada à superexploração de recursos naturais.

Essa ideia de redução da emissão de gases não foi aceita de imediato por todos os países desenvolvidos, sendo que um deles, os Estados Unidos da América² (EUA), não ratificou o protocolo durante seu tempo de vigência (baseado nos problemas econômicos que poderiam ser causados ao país pela ratificação deste acordo). Outro ponto que foi questionado pelos EUA foi que em 1997, no momento da proposta do Protocolo de Quioto, países como China, Índia e Brasil não eram tão desenvolvidos como são hoje, e por serem classificados como países em desenvolvimento não tinham meta obrigatória. Com o passar do tempo alguns destes países cresceram economicamente e aumentaram sua produção, ganhando destaque

² Ainda que o país não tenha formalmente ratificado o Protocolo de Quioto, várias cidades e governos locais estadunidenses têm adotado medidas para mitigação do aquecimento global (LINDSETH, 2004; REAMS; CLINTON; LAM, 2012).

entre os países que mais poluem, sendo hoje a China o maior poluidor do mundo (WORLD BANK, 2013; BP, 2013).

Esta situação complexa gera um problema, pois, especialmente em época de crise, nenhum país quer reduzir sua produção e seu crescimento. Considerando isto, uma possível solução para que os países continuem produzindo (e aquecendo sua economia) e que o meio ambiente não seja destruído, é a utilização de fontes de energia menos poluentes e renováveis, além do desenvolvimento de tecnologias que permitam aumento de produtividade e redução de emissões. Assim, a produção não teria uma queda acentuada e o meio ambiente receberia menos GEE. Outra maneira de reduzir os efeitos do aquecimento global seria a redução da concentração de gases de efeito estufa pelo aumento da área de floresta e de projetos ou mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL), que retirariam o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera e ajudariam a atenuar esta questão. Da mesma forma que o aumento da área de florestas (por meio de florestamento, reflorestamento ou projetos de MDL) poderia ser favorável à questão ambiental, a redução da área de floresta (desmatamento) diminuiria a capacidade de absorção das florestas, além de liberar o carbono estocado nas árvores e raízes para a atmosfera (caso fossem realizadas queimadas).

1.2 Justificativa

A preocupação ambiental é um tema que, desde a década de 1970, vem se tornando cada vez mais relevante. Desde a primeira grande conferência mundial sobre o meio ambiente, em 1972, várias reuniões, estudos e pesquisas têm sido feitas no sentido de compreender e achar soluções que possam mitigar os efeitos do aquecimento global e demais consequências para o meio ambiente.

Do ponto de vista dos atores envolvidos neste contexto, a questão do desenvolvimento sustentável tem sido colocada em pauta tanto para empresas quanto para os governos. O aumento da conscientização dos consumidores (em especial nos países mais desenvolvidos) requer das empresas uma preocupação ambiental maior, fazendo com que as organizações ofereçam produtos ambientalmente corretos (sustentáveis), em alguns casos credenciados com o selo verde, e busquem opções de produção menos agressivas ao meio ambiente (AMACHER; KOSKELA; OLLIKAINEN, 2004; BLEDA; VALENTE, 2009). Para os

governos, a preocupação ambiental tem reforçado a ideia de buscar soluções que possam garantir um crescimento econômico que permita a manutenção das necessidades da população, sem comprometer as gerações futuras.

Neste início de século, o aquecimento global tem sido considerado uma das importantes ameaças, tanto para o meio ambiente, pelos potenciais efeitos na biodiversidade, quanto para a economia dos países, no que se refere à disponibilidade de recursos básicos como água e produção de alimentos e, conseqüentemente, na migração de populações afetadas pelos efeitos deste aquecimento. Causado principalmente pela emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, o aquecimento global e as questões relativas a este problema tornaram-se alvo de pesquisas científicas no mundo todo. Neste sentido, o estudo das causas do aquecimento global, como as alterações nas matrizes energéticas dos países e mudanças no uso da terra, pode contribuir para as discussões sobre o tema (HÖHNE *et al.*, 2007; SEIFFERT, 2013). Desta forma, o tema central desta tese torna-se atual, relevante e a discussão acadêmica pode ajudar a consolidar os conhecimentos já apresentados e, eventualmente, contribuir com considerações ou propostas para um cenário mais sustentável.

1.3 Problema de Pesquisa e Objetivos

Baseado nesta breve contextualização, este trabalho busca responder o seguinte problema de pesquisa: De que maneira as alterações na matriz energética e as variações na área de floresta (florestamento, reflorestamento ou desmatamento) podem garantir o mesmo padrão de produção para os países, com menor emissão de gases de efeito estufa?

Ao responder este problema de pesquisa, este trabalho busca compreender melhor quais são as alterações na matriz energética que permitem garantir a manutenção do padrão de consumo (nos termos de desenvolvimento sustentável proposto por Gro Brundtland) e também avaliar o impacto das mudanças no uso da terra (florestamento, reflorestamento e desmatamento) no desempenho relativo de emissões de gases de efeito estufa dos países.

Para que seja respondido este problema de pesquisa, há uma necessidade de conhecer os principais países emissores de gases de efeito estufa, avaliar sua matriz energética e possíveis restrições de uso de energia alternativa, a viabilidade de implantação de fontes renováveis, as

mudanças no uso de terras (florestamento, reflorestamento e desmatamento) e, por fim, avaliar os efeitos destas mudanças para o meio ambiente.

Assim, para a obtenção da resposta do problema de pesquisa, são definidos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho. Segundo Richardson (2007) os objetivos, geral e específicos, devem ser extraídos diretamente do problema de pesquisa. Para o autor (2007, pp. 62-63), os objetivos gerais descrevem “o que se pretende alcançar com a realização da pesquisa” enquanto os objetivos específicos definem as “etapas que devem ser cumpridas para alcançar o objetivo geral”.

Desta forma, o objetivo geral deste trabalho é verificar se a alteração da matriz energética e a variação na área de floresta dos países do G20 permitem manter o mesmo padrão de produção com redução de emissões de GEE.

Os objetivos específicos deste trabalho são: (1) fazer um levantamento teórico sobre negociações ambientais e fontes energéticas; (2) fazer um levantamento teórico sobre os modelos de análise de eficiência; (3) avaliar a eficiência relativa de cada país em períodos distintos para avaliar a evolução de cada país e (4) identificar quais configurações de matrizes energéticas minimizam as emissões de GEE para a atmosfera e verificar o impacto da alteração na área de floresta na análise de eficiência.

1.4 Limitações

Este é um trabalho teórico que faz uso de uma base de dados envolvendo informações sobre diversos países. Alguns destes países não disponibilizam estes dados oficialmente, fazendo com que parte das informações utilizadas sejam originadas por empresas privadas (e não órgãos governamentais). Também não há descrição sobre o tipo de industrialização de cada país, composição da matriz industrial por setores, idade média das plantas industriais e ranking de competitividade.

Considerando que o modelo utilizado nesta tese é uma representação da realidade e que a técnica não paramétrica utilizada possui limitações, as considerações deste trabalho são condicionadas a estas restrições.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho tem como proposta avaliar o desempenho dos países na emissão de gases de efeito estufa, com base nas alterações na matriz energética dos países e na mudança do uso da terra. Assim, este trabalho está estruturado em sete seções, apresentadas a seguir.

Na Seção 1 é apresentada a contextualização do problema de pesquisa, a definição do problema de pesquisa, os objetivos, a justificativa e a estrutura do trabalho. Na Seção 2 é apresentada a revisão teórica sobre Mudanças Climáticas e Negociações Ambientais, subdividida na Subseção 2.1, que explora a evolução histórica da preocupação com o meio ambiente e a participação das Nações Unidas neste processo; na Subseção 2.2, que discorre sobre as estruturas criadas pelas Nações Unidas para promover negociações ambientais; na Subseção 2.3 que discute a questão do aquecimento global antropogênico e suas consequências mundiais; na Subseção 2.4 que discute os gases de efeito estufa e seus efeitos na camada de ozônio; e na Subseção 2.5 que aborda as alterações nas áreas de florestas e seus possíveis efeitos para o meio ambiente.

Considerando que o aquecimento global é causado pela emissão de gases de efeito estufa e que a alteração nas matrizes energéticas dos países pode contribuir para uma redução nestas emissões, a Seção 3 apresenta a revisão teórica sobre as principais fontes e matrizes energéticas, seu potencial de emissão de gases de efeito estufa e os principais fatores que determinam seu uso pelos países. Esta seção está dividida na Subseção 3.1, que discute as principais características dos combustíveis fósseis; na Subseção 3.2, que aborda a fonte de energia nuclear e na Subseção 3.3, que apresenta as fontes renováveis de energia.

Para responder o problema de pesquisa este trabalho avalia a eficiência energética (manutenção do padrão de produção, com redução de emissão de gases de efeito estufa) dos países do G20. Assim, a Seção 4 deste trabalho apresenta a revisão teórica de eficiência e análise de desempenho, expondo na Subseção 4.1 os conceitos básicos sobre o tema e na Subseção 4.2 as técnicas para mensuração da eficiência. Na Subseção 4.3 é apresentada a técnica escolhida, a Análise por Envoltória de Dados, discutindo os conceitos básicos, e detalhando os modelos para a aplicação da técnica. Por fim, na Subseção 4.4 são discutidas as

etapas para análise de eficiência e na Subseção 4.5 são apresentados os estudos sobre a técnica DEA no meio acadêmico.

Na Seção 5 são apresentados os procedimentos metodológicos deste trabalho, divididos na classificação da pesquisa, apresentada na Subseção 5.1 e no método de pesquisa, apresentado na Subseção 5.2. Nesta última subseção são apresentadas as variáveis utilizadas no modelo de análise envoltória de dados, as unidades tomadoras de decisão e, também são discutidas as razões da escolha do modelo de análise de eficiência para este trabalho. As Seções 6 e 7 são reservadas para a Apresentação e Análise dos Resultados e Considerações Finais, respectivamente, em que são apresentados os testes preliminares dos dados e são analisadas as eficiências relativas de cada um dos países do G20. Os resultados desta análise são apresentados no final da Seção 6 em um quadro resumo sobre análise de eficiência das matrizes energéticas na emissão de gases de efeito estufa do G20. Na Seção 7 são feitas as considerações finais e são apresentadas sugestões de estudos futuros. Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho, os apêndices e anexos.

2 Mudanças Climáticas e Negociações Ambientais

As principais questões em relação ao debate sobre a governança ambiental são relacionadas à desigualdades, arquitetura organizacional e tendências de mudança. No quesito tendências de mudança, a questão das mudanças climáticas assume o ponto de maior importância. Segundo Veiga (2013, p. 77), esse panorama não poderá ser alterado apenas pelo incremento tecnológico na área energética, sendo que em uma visão otimista, em 2050 as emissões de carbono serão iguais às emissões atuais (apontando para um aquecimento global de ao menos 4° centígrados). Veiga ainda aponta que, desde a primeira grande conferência em 1972, passaram-se mais de 40 anos de governança ambiental prejudicada pela incoerência e contradição entre o discurso e as práticas adotadas e acordo firmados.

Além do aumento das emissões de gases de efeito estufa, e consequente aumento de temperatura, outro fator de grande importância para o meio ambiente é a avaliação do saldo ecológico, avaliado pela comparação entre a pressão que os humanos exercem sobre os ecossistemas e sua capacidade de regeneração (ou biocapacidade). De acordo com Veiga (2013, pp. 85-87), a humanidade passou a consumir em um ano (com base nos dados de 2008) aquilo que a biosfera precisa de um ano e meio para regenerar. De acordo com o autor, os principais fatores para este déficit são relacionados principalmente à (1) falta de absorção e sequestro de carbono e (2) consumo agrícola (levemente deficitário). Viola, Franchini e Ribeiro (2013), ampliam esta discussão apontando que as perdas humanas e econômicas associadas aos eventos climáticos extremos são maiores para os países em desenvolvimento, fato que revela mais uma vez o caráter desigual da questão climática.

A ciência do clima ameaça setores ricos e poderosos da economia global em que há interesses econômicos investidos no combate à teses de que a mudança climática é um risco derivado da forma pela qual a sociedade atual está organizada. Desta forma, empresas ligadas à economia de alto carbono (uso intensivo de combustíveis fósseis e consequente emissão de gases de efeito estufa) investem pesado no adiamento de decisões de mudança e no combate e evidências que mostram necessidade de ação rápida e radical.

Estas alterações provocariam mudanças nos padrões de produção e consumo das sociedades, no modo de vida das pessoas, tecnologias, materiais, fontes de energia e matéria prima. Neste

sentido, o debate sobre o aquecimento antropogênico (causado pela ação humana) se politizou e adquiriu um viés ideológico (ABRANCHES, 2010, pp. 40-41).

Essa separação entre ciência e política começa pela própria motivação que estimula as duas. A política se move pelo interesse. A ciência encontra sua razão de ser na curiosidade, na busca pelo conhecimento. Conhecimento é poder e pode ser transformado em poder político. [...] O prazo e as metas de redução das emissões de CO₂ capazes de nos manter na zona de segurança climática são dados pela ciência, mas as ações para realizar essas metas no tempo certo dependem da política. O necessário, em termos científicos, não tem sido politicamente viável nas últimas duas décadas de avanço vertiginoso do conhecimento científico sobre a ameaça do aquecimento global. O viável politicamente não tem sido suficiente do ponto de visto científico (ABRANCHES, 2010, pp. 71-72).

Esse conflito de interesses ameaça o futuro dos países e da humanidade. Segundo Simon *et al.* (1986), o que dirige o curso da sociedade e suas organizações econômicas e governamentais é, em grande parte, o trabalho de tomar decisões e resolver problemas. É um trabalho de escolher as questões que requerem atenção, estabelecimento de metas, encontrar ou projetar cursos adequados de ação, e avaliar e escolher entre ações alternativas, fixação de agendas, estabelecimento de metas e o planejamento de ações.

O mundo está atravessando um processo de transformações significativas, caracterizado pela aceleração e aprofundamento das várias dimensões da globalização, um intenso crescimento populacional e um aumento sensível do consumo de energia, bens e serviços a nível global. Assim, uma desestabilização do sistema climático poderia causar uma retração sensível da democracia como mecanismo de resolução pacífica das disputas em comunidades humanas (VIOLA; FRANCHINI; RIBEIRO, 2013, p. 61).

A integração entre os países, estimulada com globalização e o fim da guerra fria, promoveu uma mudança nos conceitos de Estado-nação. Os países passaram a se integrar e buscar soluções conjuntas para problemas mundiais. Neste contexto, a globalização envolveu diversos domínios de atividade e interação, incluindo político, econômico, militar, legal e ambiental, com implicações para o comércio, investimentos, produção, desenvolvimento tecnológico e aspectos culturais (SCHAEFFER, 2003; NEVES, 2007, p.23). Muitas destas soluções conjuntas são feitas por meio de estruturas representativas dos países, no qual são signatários, sendo a Organização das Nações Unidas (ONU) a mais abrangente para discussões e acordos internacionais.

Fundada em 1945 após a Segunda Guerra Mundial para substituir a Liga das Nações³, a ONU contém várias organizações subsidiárias, além de agências especializadas e programas e fundos para realizar suas missões e atingir seu objetivo. De acordo com Veiga (2013), uma das principais missões da ONU, prevista em seu artigo 55, é de favorecer condições de “progresso e desenvolvimento econômico e social” e “a solução de problemas internacionais”, com o objetivo de criar condições de estabilidade e bem-estar, necessárias às relações pacíficas e amistosas entre as nações.

Com relação ao Meio Ambiente, a ONU promoveu Conferências Ambientais, estudos e formalização de programas de apoio à proteção ambiental, que são objeto de discussão nas subseções seguintes.

2.1 A Organização das Nações Unidas e o Meio Ambiente

O marco do início do questionamento e discussões para manutenção do meio ambiente é controverso. De acordo com a ONU (UN, 2012), o movimento ambiental começou como uma resposta à industrialização, entre os séculos XVIII e XIX. A questão ambiental, relacionada aos recursos destinados ao consumo, já havia sido discutida por Jean-Baptiste Fourier, Thomas Malthus, John Tyndall, Svante Arrhenius e Charles David Keeling.

Malthus, com enfoque econômico, questionou em 1798 os possíveis prejuízos às condições de vida da sociedade, relacionando o aumento populacional com a produção de alimentos. Ainda que não houvesse destruição ambiental como tema principal abordado no livro, já havia a preocupação do que seria considerado o conceito de desenvolvimento sustentável, em que as gerações futuras não deveriam ser prejudicadas pelo consumo presente (MALTHUS, 1798; GREMAUD ET AL., 2003).

Em 1824, o matemático Jean-Baptiste Joseph Fourier, trabalhando em sua teoria de calor resolveu calcular a relação entre ganho e perda de energia pela Terra, partindo da ideia que a Terra recebe energia da luz solar, acumulando calor, e devolve parte desta energia ao meio

³ A Liga das Nações, também conhecida como Sociedade das Nações, foi uma organização internacional, idealizada em Versalhes em abril de 1919, onde as potências vencedoras da Primeira Guerra Mundial se reuniram para negociar um acordo de paz. Em Junho de 1919 foi assinado o Tratado de Versalhes que estabelecia a Sociedade das Nações. O Conselho da Sociedade das Nações se reuniu pela primeira vez em janeiro de 1920, sendo em abril de 1946 sua última reunião. Sua criação foi baseada na proposta de paz feita pelo presidente estadunidense Woodrow Wilson (Quatorze Pontos de Wilson).

ambiente. Em 1859 o físico John Tyndall revelou a existência teórica de um “efeito estufa” natural, comprovada matematicamente pelo físico Svante Arrhenius em 1895, tendo sido Arrhenius o primeiro cientista a demonstrar que havia uma relação entre a quantidade de CO₂ e a temperatura global (ABRANCHES, 2010, pp. 52-54).

Dada a importância da relação entre CO₂ com o meio ambiente, o pesquisador Charles David Keeling se especializou no estudo dos movimentos do carbono na Terra, iniciando em 1958 a medição sistemática de dióxido de carbono na atmosfera. Seus estudos permitiram a construção da “Curva de Keeling”, um gráfico com a concentração de CO₂ na atmosfera, medidos em parte por milhão (ppm) (KEELING ET AL., 1976; THONING; TANS; KOMHYR, 1989). No período analisado a concentração de CO₂ subiu de 316,5 ppm em 1959 para 386,5 ppm em 2009, tendo superado em 2013 a marca de 400 ppm, considerada uma marca limite para os cientistas (ABRANCHES, 2010, pp. 62-63).

De acordo com a ONU, o lançamento das bombas nucleares em Hiroshima e Nagasaki, no fim da Segunda Guerra Mundial, fez com que surgissem novas preocupações ambientais por causa da radiação. Alguns anos depois, em 1962, o movimento ambientalista ganhou destaque com a publicação do livro “A Primavera Silenciosa”, em que a autora de Rachel Carson faz um alerta sobre a necessidade de respeitar o ecossistema para proteger a saúde e o meio ambiente (CARSON, 2002; UN, 2012a).

Em 1968, foi realizada em Paris pela comunidade científica, a Conferência sobre Biosfera, despertando a consciência ecológica mundial (ANDRADE; TACHIZAWA; CARVALHO, 2002, p.2). No mesmo ano, a criação do Clube de Roma, permitiu a reunião de personalidades para o debate de assuntos relacionados à política, economia internacional, meio ambiente e o desenvolvimento sustentável, com objetivo de discutir meios de promoção de um crescimento econômico estável e sustentável para o mundo. O grupo tornou-se conhecido com a publicação “*The Limits to Growth*” no ano de 1972, elaborado por pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), liderados por Dennis Meadows, a pedido do Clube de Roma. A pesquisa realizada pelo grupo apresenta dados de uma modelagem computacional relacionando crescimento econômico e evolução populacional sem controle, com fontes de recursos finitos e reproduz algumas das preocupações e previsões de Thomas Malthus em seu ensaio de 1798 e prevê uma redução drástica da população devido aos problemas ambientais (MEADOWS, 1972).

Em meio à corrida espacial, em especial como consequência da chegada do homem à Lua em julho de 1969, a divulgação da primeira foto do planeta chamou a atenção da humanidade para o fato de que vivemos em um ecossistema frágil e interdependente, fazendo com que surgisse uma consciência coletiva sobre a proteção do meio ambiente (UN, 2012a). Neste contexto, promovido pelas Nações Unidas, surgem as grandes Conferências sobre o Meio Ambiente, tendo destaque as conferências de 1972, 1992, 2002 e 2012. Além destas conferências, foram publicados estudos e relatórios além de serem criadas estruturas para discussão dos problemas ambientais.

A ideia de convocar a Conferência sobre o Meio Ambiente Humano surgiu como contraproposta ao que seria a quarta conferência sobre o uso nuclear para fins pacíficos⁴, uma conferência destinada a atender aos interesses da indústria nuclear. Desta forma, proposta por diplomatas suecos, a conferência foi aprovada em 1967 pelo governo da Suécia e em 1968 pela Assembleia Geral da ONU (VEIGA, 2013). Realizada em 1972 na cidade de Estocolmo, na Suécia, a Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano (*United Nations Conference on the Human Environment* - UNCHE), conhecida como a primeira Conferência da ONU sobre o Meio Ambiente, chamou a atenção dos países para a questão ambiental. De acordo com a ONU, o evento foi um marco na discussão ambiental e, apesar de sua declaração final conter princípios e recomendações para orientar os países sobre preservação ambiental, representando um Manifesto Ambiental, alguns de seus princípios apontavam para que a política ambiental dos Estados-membros não deveriam dificultar o desenvolvimento dos países menos desenvolvidos (UNEP, 1972). Ao abordar a necessidade de “inspirar e guiar os povos do mundo para a preservação e a melhoria do ambiente humano”, o manifesto estabeleceu bases para a nova agenda ambiental (UN, 1972, UN, 2012a).

Na década de 1980, as evidências científicas relacionando as emissões de gases de efeito estufa causadas por atividades antrópicas com o aquecimento global, começaram a despertar o interesse acadêmico para o problema relacionado às mudanças climáticas e suas implicações ao ambiente global (CENAMO 2004, p. 2). Surgem então diversas linhas de pesquisa na área ambiental, destacando entre elas a inter-relação entre desenvolvimento e meio ambiente, que posteriormente (entre 1983 e 1987) foi formalizada e fortalecida pelo conceito de desenvolvimento sustentável.

⁴ As três primeiras conferências das Nações Unidas sobre o uso nuclear para fins pacíficos ocorreram em 1955, 1958 e 1964, organizadas pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA).

Em 1983, a médica Gro Harlem Brundtland foi convidada pela ONU para presidir a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento. Em 1987, a equipe organizada por Brundtland (Comissão Brundtland), publicou um relatório, “Nosso Futuro Comum”, que apresentava o conceito de desenvolvimento sustentável e que passou a ser aceito e adotado no mundo inteiro. De acordo com o relatório Brundtland (UN, 1987), “desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que encontra as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades”. Além deste conceito, o relatório chamou a atenção para que o desenvolvimento sustentável não ponha em risco os sistemas naturais que sustentam a vida na Terra, bem como recursos hídricos, recursos naturais, a atmosfera e os seres vivos. O relatório chamou a atenção do mundo para os problemas ambientais. Baseado então no relatório e na necessidade de continuidade de discussão sobre o tema, que havia sido iniciado na primeira Conferência sobre o Meio Ambiente em 1972, foi programada uma nova conferência sobre o meio ambiente para o ano de 1992 no Rio de Janeiro.

Em 1992, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento⁵ (CNUMAD), reforçou o conceito de desenvolvimento sustentável criado por Gro Brundtland, reconhecendo a participação dos países desenvolvidos nos danos ambientais além de contribuir para uma conscientização mundial sobre o tema (UN, 1987). Até 1992, este foi considerado o maior encontro intergovernamental realizado no planeta, com a presença de 180 países, incluindo a participação de 105 chefes de Estado (SACHS, 1993, p.57). A CNUMAD foi realizada com objetivo de conciliar o desenvolvimento socioeconômico com a conservação e proteção ambiental. A convenção foi ratificada pelos participantes da CNUMAD, com objetivo de redução de emissões de GEE e estabilização da concentração de gases na atmosfera. O tratado não fixou limites obrigatórios para as emissões de GEE, assim como não continha disposições coercitivas. Para estabelecer estes limites e outras resoluções, foram criados atualizações e complementos do tratado, chamados de protocolos (VEIGA, 2013).

Os principais resultados desta conferência foram a realização de um acordo sobre biodiversidade (Convenção⁶ da Biodiversidade) e a publicação da chamada Agenda 21, em

⁵ A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (*United Nations Conference on Environment and Development*) ocorrida em 1992 é também conhecida como ECO-92, Rio-92, Cimeira da Terra ou Cúpula da Terra.

⁶ Convenção é o acordo, norma ou determinação sobre um assunto. No Direito Internacional, o termo convenção é usado para referir-se a uma lei internacional que rege princípios a serem seguidos pelos países signatários.

que os governos estabeleceram um programa de ação em direção ao desenvolvimento sustentável, coordenando suas atividades para proteção dos recursos ambientais, incluindo proteção da atmosfera, combate ao desmatamento, questões relacionadas à desertificação e poluição da água e do ar. A Agenda 21 foi considerada o principal documento da CNUMAD de 1992, ao defender a viabilidade do desenvolvimento sustentável, propondo ações de curto, médio e longo prazos com ações concretas com metas, recursos e responsabilidades definidas (BARBIERI, 1997). No mesmo ano, 1992, foi criada a Comissão para o Desenvolvimento Sustentável que tinha como objetivo assegurar o apoio aos objetivos da Agenda 21. Com este objetivo, em 1997, a ONU realizou uma sessão especial, chamada de “Cúpula da Terra +5” para revisar e avaliar a implementação da Agenda 21, e fazer recomendações para sua realização (UN, 2012a).

Outro importante resultado da CNUMAD de 1992 foi a criação Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima⁷ (UNFCCC) que, a partir de 1995, organizou reuniões anuais regulares, chamadas de Conferência das Partes (COP), tomando lugar das grandes conferências da ONU sobre o clima e meio ambiente. A despeito disto, em 2002 e 2012 foram realizadas duas grandes conferências sobre o clima, conhecidas como Rio+10 (10 anos após a CNUMAD de 1992) e a Rio+20 (20 anos após a CNUMAD de 1992).

A Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável (*Earth Summit* 2002), realizada no ano de 2002 em Johannesburgo (África do Sul), teve como objetivo principal fazer um balanço dos avanços das ações propostas na reunião de 1992, em especial relativas à Agenda 21. Posteriormente, a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (*Earth Summit* 2012), realizada em 2012 no Rio de Janeiro, teve como objetivos avaliar os avanços feitos desde 2002, além de discutir a renovação do compromisso dos países em relação ao desenvolvimento sustentável. Neste sentido, dois temas centrais foram selecionados: (1) a transição para a chamada economia verde e (2) a governança global. O primeiro tema propunha a adoção de um novo modelo de produção, buscando maior eficiência no uso de recursos naturais, baixa emissão de GEE e inclusão social. O segundo tema central buscava caminhos para o desenvolvimento sustentável em termos de organização, leis, acordos e

⁷ Apesar de ser utilizada em português com o nome Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, sua sigla UNFCCC é frequentemente apresentada na literatura simplesmente como Convenções Quadro ou com as iniciais do nome em inglês *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC).

protocolos. Como resultado final da reunião de 2012, foi lançado o documento oficial chamado “O Futuro que Queremos” (MRE, 2004; UN, 2012b).

2.2 Estruturas ambientais das Nações Unidas e as negociações ambientais

Na esfera ambiental, a Organização das Nações Unidas tem três estruturas representativas, sendo uma organização e dois programas: a Organização Meteorológica Mundial (1950), o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (1965) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (1972). Além destas estruturas, o desenvolvimento de projetos e estudos conjuntos entre a Organização Meteorológica Mundial e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente deu origem, em 1988, ao Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.

2.2.1 Organização Meteorológica Mundial

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) é uma agência especializada das Nações Unidas, responsável pelos estudos e políticas conjunta sobre a atmosfera terrestre, sua interação com os oceanos, bem como o clima e a distribuição hidrográfica. Suas raízes datam do século XIX, relacionada diretamente com a Organização Meteorológica Internacional (OMI), fundada em 1873 e que se converteu na OMM em 1950, tornando-se uma agência especializada da ONU. A OMM sempre teve destaque internacional na discussão de questões climáticas, tendo lançado programas e sistemas de monitoramento climáticos, como o ocorrido em 1957 (Sistema Global de Observação do Ozônio), além de promover e organizar duas Conferências Mundiais sobre o Clima, uma em 1979 e outra em 1990 (WMO, 2014). Além de facilitar a cooperação internacional no estabelecimento de redes de observação de fenômenos geofísicos, relacionados ao meio ambiente, a OMM é responsável pela aplicação da meteorologia em diversas áreas em benefício da humanidade, como aviação, navegação, agricultura e questões hidrológicas.

2.2.2 Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

O Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) é um instrumento da Organização das Nações Unidas (ONU), criado em 1965, que atua na promoção do desenvolvimento local e global, bem como no combate à pobreza. Este programa, além de

funcionar como uma instituição multilateral de amplo alcance, promovendo o debate e a troca de experiências em direção a um esforço global para o desenvolvimento, é totalmente integrado aos objetivos dispostos nas Metas e Desenvolvimento do Milênio (UNPD, 2014)

Além de auxiliar países e instituições no desenvolvimento de políticas públicas, estimular a participação dos países carentes nos sistemas de governança (para a reestruturação destes países) e de propor alternativas para redução da pobreza por meio de reformas que gerem oportunidades econômicas e acesso aos meios de produção, esse programa da ONU abrange a área de Energia e Meio Ambiente, atuando em conjunto com os países nos desafios de alcançar um desenvolvimento sustentável e a distribuição igualitária de recursos.

Com relação ao desenvolvimento, Veiga (2013) destaca que um dos maiores desafios do desenvolvimento é a questão das desigualdades. Ainda que reconhecido que o desenvolvimento é limitado pela desigualdade social, não existe efetivamente compromisso real em sua redução. Segundo o autor, os países ricos com menos desigualdade são os países que sistematicamente exibem melhor desempenho nas dimensões mais relevantes para qualidade de vida, enquanto as sociedades ricas mais desiguais são responsáveis pelas mais altas perdas ecológicas, pela maior produção de lixo e maior consumo de água. Veiga (2013, p. 42) ainda aponta que “embora existam soluções em curso para a redução da pobreza pela ótica do consumo, quase nada se sabe sobre políticas capazes de aumentar a capacitação dos menos favorecidos para que ganhem mais e também conquistem mais acesso aos bens públicos”. Neste sentido, a desigualdade econômica gera desigualdade política, que por sua vez reproduz a desigualdade econômica.

2.2.3 Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

A questão ambiental tem sido discutida em âmbito global de maneira intensa. De acordo com Veiga (2013, p.45), em especial nos últimos anos, os entendimentos da comunidade internacional sobre a conservação do meio ambiente por meio de acordos, aditivos e protocolos, além de reuniões sobre questões ambientais têm se tomado importante lugar nas pautas das negociações. Ainda que as discussões sejam atualmente mais intensas e frequentes, o início das discussões sobre o meio ambiente se deu com a realização da Conferência sobre o Meio Ambiente Humano e a criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente.

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) é considerado o programa mais importante da ONU na temática de questões ambientais. O programa surgiu em decorrência das discussões da ONU na Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano de 1972, conhecida como Conferência de Estocolmo. A questão no meio ambiente tornou-se foco na Conferência de Estocolmo, esforços anteriores já abordavam questões ambientais, com maior ou menor relação com a questão econômica. De acordo com Quental, Lourenço e Silva (2011), os primeiros esforços neste sentido são relacionados à criação da União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN), em 1948, a Conferência Científica das Nações Unidas sobre a Conservação e Utilização dos Recursos, em 1949, as Conferências da População Mundial em 1954 e 1964 e da Conferência da Biosfera em 1968.

O PNUMA atua não somente em consonância com outras instâncias das Nações Unidas e demais organizações internacionais, mas também com governos e organizações não governamentais (ONGs), setores privados e de sociedade civil. Apresenta como principal objetivo coordenar as ações de proteção ao meio ambiente além de promover o desenvolvimento sustentável com atuação na liderança de captação de parcerias para a proteção do meio ambiente tanto nos âmbitos locais quanto nos regionais e internacionais.

Este programa visa avaliar condições e tendências ambientais no plano global, regional e nacional, desenvolvendo tanto instrumentos ambientais nacionais quanto acordos internacionais. Em consonância com o PNUMA, o PNUD busca fortalecer as instituições em favor de gestões com consciência ecológica, integrando proteção ambiental ao desenvolvimento econômico e facilitando transferências tecnológicas e de conhecimento rumo ao desenvolvimento sustentável. Para isto, o PNUD busca encorajar novas parcerias e formadores de opiniões na sociedade civil, bem como no setor privado (UNEP, 2012).

2.2.4 Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC⁸) é um órgão científico, criado em 1988 pela OMM e pelo PNUMA, sendo considerado o principal organismo internacional para a avaliação das mudanças climáticas. O IPCC fornece, através de milhares de cientistas-voluntários de diversas localizações mundiais, informações com embasamento

⁸ Apesar de ser utilizado em português com o nome Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, sua sigla (IPCC) é sempre utilizada no meio acadêmico, originada das iniciais do nome em inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).

científico sobre as mudanças climáticas como uma variação estatisticamente significativa em um parâmetro climático médio ou sua variabilidade, persistindo um período extenso (tipicamente décadas ou por mais tempo). Segundo Marengo (2008),

[...] desde a década de 1980, evidências científicas sobre a possibilidade de mudança do clima em nível mundial vêm despertando interesses crescentes no público e na comunidade científica em geral. Em 1988, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) estabeleceram o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). O IPCC ficou encarregado de apoiar com trabalhos científicos as avaliações do clima e os cenários de mudanças climáticas para o futuro. Sua missão é “avaliar a informação científica, técnica e socioeconômica relevante para entender os riscos induzidos pela mudança climática na população humana”. [...] O processo utilizado para produzir essas avaliações é criado para assegurar alta credibilidade tanto na comunidade científica como na política (MARENGO, 2008, p. 84).

O IPCC é um organismo aberto a todos os países membros da ONU e da OMM. Devido à sua natureza científica e intergovernamental, o IPCC incorpora uma oportunidade única para fornecer rigorosa e equilibrada informação científica para os tomadores de decisão. Ao aprovar os relatórios do IPCC, os governos reconhecem a autoridade do seu conteúdo científico. Desta forma, o trabalho da organização é, portanto, relevante para a política e governos. No momento de sua criação, em 1988, a tarefa inicial do IPCC foi preparar uma revisão abrangente e recomendações com relação ao estado de conhecimento da ciência da mudança climática, o impacto social e econômico da mudança climática e estratégias de respostas possíveis e elementos para inclusão em uma futura convenção internacional possível sobre o clima.

Periodicamente, o IPCC tem emitido relatórios científicos abrangentes sobre as mudanças climáticas produzidas em todo o mundo. Desde sua criação, em 1988, foram publicados quatro importantes relatórios, publicados em 1990, 1995, 2001 e 2007. Os relatórios do IPCC são publicados em quatro etapas e produzidos por três grupos de trabalho, além de uma equipe especial sobre inventários nacionais de gases do efeito estufa (GEE).

O primeiro grupo é responsável pelas informações científicas a respeito de mudanças climáticas, que reúne evidências científicas de que a mudança climática se deve à ação do homem; o segundo grupo avalia os impactos ambientais e socioeconômicos das mudanças climáticas e trata das consequências destas mudanças para o meio ambiente e para a saúde humana; e o terceiro grupo estuda maneiras de combater as mudanças climáticas, além de prover alternativas de adaptação para as populações e propor estratégias de resposta e opções

que permitiriam limitar as emissões de GEE. Um quarto relatório sintetiza as conclusões dos anteriores.

O primeiro deles, publicado em 1990, revelou a importância das alterações climáticas e foi um decisivo para a criação de um tratado internacional para reduzir o aquecimento global e lidar com as consequências das mudanças climáticas, ocorrido na Conferência de 1992. A partir deste primeiro relatório, o IPCC respondeu às necessidades de obtenção de informações técnicas e científicas dos grupos e estudo além de produzir metodologias e orientações para o estudo dos gases de efeito estufa (IPCC, 1990).

Em 1995 foi publicado o segundo relatório com uma avaliação da informação científica e socioeconômica disponível sobre a mudança climática. Este relatório preparava material importante para negociadores adotarem o Protocolo de Quioto, ocorrido em 1997, reforçando o conceito de desenvolvimento econômico sustentável. De acordo com o relatório, o dióxido de carbono seria o mais importante contribuinte para as alterações climáticas. Segundo o relatório, as projeções futuras de mudança da média de temperatura global e além das projeções do aumento do nível do mar causariam importantes impactos para o mundo (IPCC, 1995).

O terceiro relatório, publicado em 2001, é uma avaliação de informações científicas e socioeconômicas disponíveis sobre a mudança climática. O relatório transmite a ideia de um mundo em aquecimento e outras mudanças no sistema climático. De acordo com o relatório, as emissões de gases de efeito estufa continuam a alterar a atmosfera e o clima; a temperatura média global e do nível do mar são projetados para subir em todos os cenários do IPCC, além da constatação do aumento da frequência de ondas de calor. Também neste relatório, há novas evidências de que a maioria do aquecimento observado durante os últimos 50 anos é atribuída às atividades humanas. Como síntese do relatório, o texto consolida as informações acumuladas nos estudos anteriores (gerando um consenso científico). O relatório aponta que a confiança na capacidade dos modelos para projetar o clima futuro aumentou, ainda que os modelos não possam ainda simular todos os aspectos do clima e que o aquecimento futuro vai ter efeitos tanto benéficos e adversos, mas para níveis mais altos de aquecimento, os efeitos adversos irão predominar, sendo que os países em desenvolvimento e pobres são os mais vulneráveis à mudança climática (IPCC, 2001).

O mais recente relatório de avaliação do IPCC, publicado em 2007, chamou a atenção do mundo para a compreensão científica das mudanças presentes no nosso clima e aborda a humanidade como sendo a maior causadora do aquecimento global. O relatório é o maior e mais detalhado resumo da situação da mudança climática, produzido por milhares de autores, editores e revisores de dezenas de países. Os resultados em destaque do relatório foram que o aquecimento global é inequívoco e que a maior parte do aumento observado nas temperaturas médias globais, desde meados do século XX, muito provavelmente se deve ao aumento observado nas concentrações de gases de efeito estufa.

O relatório defende que é possível deter o aquecimento global, desde que o processo de redução da emissão de gases do efeito estufa se inicie antes de 2015. O próximo relatório do IPCC é esperado para o ano de 2014 (IPCC, 2007). Segundo o quarto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), a temperatura média da Terra aumentou de 13,4° centígrados para 14,0° centígrado entre 1980 e 2005 e que, se sua trajetória atual for mantida, a previsão é que aumente mais dois ou três graus. Segundo o relatório do IPCC (2007), outras evidências das mudanças climáticas são o aumento do nível do mar, a diminuição das extensões de neve e gelo, as mudanças nos padrões de precipitação, o aumento na frequência e intensidade de fenômenos climáticos extremos e da atividade ciclônica tropical (VIOLA; FRANCHINI; RIBEIRO, 2013, pp. 63-64).

Conforme apresentado anteriormente, o relatório de 1990 do IPCC serviu de base para a criação de um tratado internacional para reduzir o aquecimento global e lidar com as consequências das mudanças climáticas. Assim, em 1992, na Conferência do Clima ocorrida no Rio de Janeiro (ECO-92), foi criada a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

Em 2009, “tendo em vista as dimensões continentais do Brasil e a diversidade de regimes climáticos e de setores potencialmente afetados pelas variações e mudanças climáticas”, foi lançado no país o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), resultado da união e esforços dos Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e do Meio Ambiente (MMA), com objetivo de “fornecer avaliações científicas sobre as mudanças climáticas de relevância para o Brasil, incluindo os impactos, vulnerabilidades e ações de adaptação e mitigação”. Em 2013 foi divulgado o primeiro relatório do PBMC, com resultados que indicam aumento na temperatura (de 3 a 6 graus centígrados até o final do século), redução de chuvas em diversas áreas do país e alteração no padrão de circulação dos ventos. Como resultado, essas alterações devem afetar principalmente os biomas da floresta amazônica e caatinga, além de causar problemas para agropecuária (PBMC, 2013).

2.2.5 Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

A Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) é um tratado internacional que foi resultado da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD), realizada no Rio de Janeiro em 1992. Informalmente conhecida como Cúpula da Terra, Eco-92 ou Rio-92, a CNUMAD foi realizada com objetivo de conciliar o desenvolvimento socioeconômico com a conservação e proteção ambiental. Como resultado, a CNUMAD reforçou e consolidou o conceito de desenvolvimento sustentável, criado por Brundtland em 1987, no encontro da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento.

Este tratado foi ratificado por quase todos os países do mundo, com objetivo de redução de emissões de GEE e estabilização da concentração de gases na atmosfera. Inicialmente, na sua criação, o tratado não fixou limites obrigatórios para as emissões de GEE, assim como não continha disposições coercitivas. A razão destas medidas está baseada no princípio de responsabilidade comum (todos os Estados são responsáveis pelo aquecimento global), porém diferenciada (os países mais industrializados e desenvolvidos foram os responsáveis pela maior parte das emissões de GEE no meio ambiente no passado).

Este princípio penalizou os países pioneiros na industrialização (listados nos Anexos I e II da Convenção), permitiu que alguns países (que correspondiam, com raras exceções, ao G77⁹+China) não tivessem metas de redução de emissões, comprometendo o objetivo de preservação ambiental (VEIGA, 2013). Assim, cada país deveria ter uma responsabilidade diferente com relação às emissões, sendo então criados diferentes grupos para a divisão destes países com relação à sua responsabilidade. Estes grupos são divididos em países industrializados e economias em transição (chamado de Anexo I); países desenvolvidos, que arcam com os custos dos países em desenvolvimento (chamado de Anexo II) e os países em desenvolvimento (que não fazem parte do Anexo I, como nome em inglês de *Non-Annex I*). De acordo com Veiga (2013), o “princípio das responsabilidades comuns, porém diferenciadas” é considerado um obstáculo para a redução de emissões globais. Segundo o autor (2013),

[...] Do ponto de vista ético, as responsabilidades nacionais deveriam ser proporcionais às emissões decorrentes do consumo da população de cada

⁹ O Grupo dos 77 (G77 e China) foi estabelecido em 15 junho de 1964, durante uma Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento (UNCTAD), realizada em Genebra. Esta conferência marcou o início de um grupo de países em desenvolvimento, comprometendo-se a promover a igualdade na ordem econômica e social internacional e promover os interesses do mundo em desenvolvimento (FAO, 2013).

país, combinadas às suas diferentes capacidades de inovação tecnológica para a transição a uma economia de baixo carbono. Em vez disso, prevaleceu um perverso critério político de diferenciação: foram responsabilizadas exclusivamente as nações pioneiras no processo de industrialização por terem realizado suas emissões numa época em que até mesmo a comunidade científica desconhecia a gravidade do efeito estufa (VEIGA, 2013, p. 61).

Devido à diferenciação dos países e necessidade de um estudo inicial sobre como cada grupo de países (de acordo com a responsabilidade) deveria contribuir com o meio ambiente, não foram fixadas, de início, responsabilidades. Foi então definido que o tratado incluiria disposições, chamados de Protocolos, que deveriam criar os limites obrigatórios de emissões de GEE. Estes protocolos seriam discutidos e firmados nos encontros dos países signatários do tratado, chamado de Conferências das Partes (COP). O tratado proposto em 1992 na cúpula do Rio de Janeiro entrou em vigor apenas em 1994, tendo no ano seguinte sua primeira reunião de países, a I Conferência das Partes (COP-1). A partir de 1995, a cada ano os países se reúnem para discutir os problemas globais relacionados ao clima e meio ambiente.

2.2.6 Conferência das Partes

A Conferência das Partes (COP) é uma instância deliberativa da Convenção Quadro da Organização das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), formada pelos países que ratificaram o acordo. Desde a primeira reunião (COP), em 1995, da UNFCCC, a reunião que mais se destacou ocorreu em 1997 (COP 3), em que foi aprovado o Protocolo de Quioto.

As reuniões posteriores, de uma ou outra forma, vieram a discutir detalhes do protocolo ou medidas a serem tomadas após a expiração do acordo. Ainda que houvesse um esforço para discussão dos problemas climáticos e suas resoluções, a adoção do “princípio de responsabilidade comum, porém diferenciada”¹⁰ e o não comprometimento de alguns países¹¹ com as propostas do Protocolo de Quioto fizeram com que a expectativa de sucesso do acordo da COP 3 fosse reduzida. Como consequência, como abordado por Veiga (2013), com a ratificação do acordo, os países mais desenvolvidos passaram a reduzir suas emissões enquanto os menos desenvolvidos aumentaram. Ao analisar o grupo de países com maior emissão de gases de efeito estufa, chamado G20, observa-se esta tendência. O G20, ou grupo

¹⁰ Com a adoção deste princípio, países altamente poluidores como China e Índia deixaram de ter metas de redução por serem considerados países em desenvolvimento. Assim, ainda que outros países reduzissem suas emissões, o aumento das emissões destes países sem obrigações reduziriam as chances de sucesso do protocolo.

¹¹ A Rússia e a Austrália ratificaram o protocolo apenas algum tempo após ser lançado e os Estados Unidos não ratificaram o protocolo.

dos 20, é um grupo de países, formado em 1999 no contexto da crise financeira asiática, com o objetivo de discutir formas de fortalecer a economia global. O grupo é segmentado em blocos (G8, G5 e demais países que compõem o G20), em que percebe-se uma alteração no padrão das emissões de GEE ao longo do tempo. O primeiro grupo, G8 (grupo dos países mais ricos e industrializados) corresponde aos países Estados Unidos, Reino Unido, Itália, França, Alemanha, Japão, Canadá e Rússia.

O grupo seguinte corresponde ao grupo G5 (grupo dos países emergentes), que corresponde aos países Brasil, China, Índia, México e África do Sul. Os demais países serão agrupados em um grupo chamado novos emergentes, que correspondem aos demais países que compõem o chamado grupo dos 20, grupo de destaque nas decisões políticas e econômicas globais. Neste último grupo estão a Austrália, a Coreia do Sul, a Arábia Saudita, a Indonésia, a Turquia e a Argentina. A União Europeia (EU) completa o grupo, contudo para efeito de análise o Irã, país com mais alto padrão de emissões de GEE fora do G20, foi inserido no lugar da UE. O Irã, como outro fator de inserção, ainda está colocado entre as maiores economias (WORLD BANK, 2013; UN, 2013a).

Como forma de demonstração das consequências da cláusula de “princípio de responsabilidades comuns, porém diferenciadas”, os dados abaixo indicam a redução na participação das emissões dos países mais industrializados e desenvolvidos (G8) e o aumento nas emissões dos países emergentes (G5).

Gráfico 1 - Emissão de GEE (G8, G5 e demais países do G20)

Fonte: World Factbook (CIA, 2013)

A eleição do presidente Barack Obama, no final de 2008, acendeu a esperança nos Estados Unidos e na geopolítica global de que um novo acordo climático fosse estabelecido. De acordo com Abranches (2010, p. 75), a perspectiva da presidência de Obama deu novo alento aos que lutavam por um acordo na Convenção do Clima. A esperada mudança viria com a COP-15, em Copenhague no ano seguinte (2009), onde se esperavam os negociadores americanos e o próprio Barack Obama. Além disto, os Estados Unidos, China, Índia e Brasil sinalizavam a possibilidade de um acordo. Na COP-15, no entanto, não foram obtidos acordos esperados. “Copenhague, que deveria representar o grande encontro entre a ciência e a política do clima, foi o encontro da política das nações com a política do clima” (ABRANCHES, 2010, p.80)

De acordo com Veiga (2013, p. 65), na própria Convenção sobre Mudança do Clima havia uma lógica contrária ao interesse nacional dos Estados Unidos. Também a isto se soma o “princípio de responsabilidades comuns, porém diferenciadas” que permite que uma série de países não tenham metas de redução de GEE. Assim, como não poderia deixar de ser, do protocolo de Quioto decorreu um forte processo de inércia institucional que tornou as COPs seguintes ineficientes e sem sentido, em especial a reunião de Copenhague em 2009.

É indispensável realçar a importância do jogo diplomático entre os Estados Unidos e a China nessa significativa COP de Copenhague. Sem dar nenhum passo que pudesse ser mal visto por seus respectivos parceiros mais próximos, Obama e Wen Jiabao demonstraram ter mais interesses comuns que divergências, empenhando-se na manutenção do *status quo* (VEIGA, 2013, p. 65)

Da mesma forma, na COP 17, realizada em Durban, difundiu-se a ideia de que a comunidade internacional poderá anunciar em 2015 o efetivo enfrentamento da questão climática com um acordo que entraria em vigor em 2020. Além disto, a expectativa de soluções futuras inviabiliza soluções realistas imediatas como investimentos em pesquisa e tecnologia, precificação do carbono mediante taxa internacional e a substituição dos combustíveis fósseis por uma matriz energética mais sustentável.

Com o objetivo de discutir e solucionar os problemas específicos de cada período, as Conferências entre as Partes se reúnem periodicamente para discutir meios de reduzir os problemas ambientais e propor soluções neste sentido. A seguir são apresentados os dados de cada uma das reuniões realizadas entre 1995 e 2013. As reuniões com maior destaque ocorreram em 1997 (COP 3) em que foi proposto o Protocolo de Quioto, em 2009 (COP 15) em que se esperava um acordo mais abrangente e integrado devido a proximidade do fim do

protocolo de Quioto e em 2012 (COP 18), reunião que marcava o fim do referido protocolo. Os dados apresentados no Quadro 1 foram retirados dos relatórios oficiais sobre as decisões de cada um dos acordos, disponibilizados pela UNFCCC.

COP	Local	Temas Discutidos e Fatos Importantes
COP 1 (1995)	Berlim	“Mandato de Berlin” - Início das discussões climáticas.
COP 2 (1996)	Genebra	Estados Unidos rejeitam primeiras propostas do UNFCCC.
COP 3 (1997)	Quioto	Aprovação do Protocolo de Quioto e definição de metas de redução das emissões de GEE. Vários membros da UNFCCC não ratificaram Protocolo.
COP 4 (1998)	Buenos Aires	Discussão de questões pendentes sobre o Protocolo de Quioto. Acordo para esclarecer e desenvolver ferramentas para a implementação do Protocolo.
COP 5 (1999)	Bonn	Discussões sobre os mecanismos do Protocolo de Quioto (reunião técnica).
COP 6 (2000)	Haia	União Europeia recusa proposta de compromisso e negociações fracassam.
COP 6 “bis” (2000)	Bonn	(Reunião Extraordinária) - George Bush rejeita o Protocolo de Quioto. Discussão sobre mecanismos de flexibilidade (Crédito de Carbono e Mecanismos de Desenvolvimento Limpo e) inclusive em troca de compensação financeira.
COP 7 (2001)	Marraquech	Finalização da maioria dos detalhes das negociações sobre o Protocolo de Quioto, além do estabelecimento dos “Acordos de Marraquech”, estabelecendo regras para os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo.
COP 8 (2002)	Nova Delhi	Hesitação da Rússia em ratificar o Protocolo (questionamento da postura dos EUA e Austrália em não ratificar o Protocolo).
COP 9 (2003)	Milão	Esclarecimento dos detalhes técnicos do Protocolo de Quioto.
COP 10 (2004)	Buenos Aires	Discussão dos progressos alcançados desde a primeira COP e discussões sobre a expiração do Protocolo de Quioto no ano de 2012.
COP 11 (2005)	Montreal	Entrada em vigor do Protocolo de Quioto e discussões sobre a expiração do acordo. Propostas de estender o Protocolo para além de 2012.
COP 12 (2006)	Nairóbi	Avanços nas áreas de apoio aos países em desenvolvimento e discussões sobre um novo acordo pós Quioto, sem discussão sobre redução de emissões.
COP 13 (2007)	Bali	Adoção do Plano de Ação de Bali para o estabelecimento de um cronograma de negociações e estruturada sobre o quadro pós-2012.
COP 14 (2008)	Poznan	As negociações sobre um sucessor para o Protocolo de Quioto e aprovação de um mecanismo para incorporar a proteção das florestas.
COP 15 (2009)	Copenhague	A meta (não atingida) de estabelecer um ambicioso acordo climático global para o período de 2012.
COP 16 (2010)	Cancun	Proposta de Criação do Fundo Climático Verde e reconhecimento que as alterações climáticas representam uma ameaça urgente e potencialmente irreversível para o planeta, devendo ser resolvido por todas as partes.
COP 17 (2011)	Durban	Proposta de um novo acordo em 2015 incluindo todos os países na redução de GEE. Progresso na criação do Fundo Verde para o Clima como forma de ajuda financeira aos países pobres para se adaptarem aos impactos ambientais.
COP 18 (2012)	Doha	Compromisso de intensificar os esforços na definição de novos acordos climáticos e extensão do Protocolo de Quioto até 2020.
COP 19 (2013)	Varsóvia	Negociações fracassam, em especial pelo debate em torno da questão das “responsabilidades comuns, porém diferenciadas”. Foi aprovado um Plano de Ação que estabelece um cronograma de negociações até 2015.

Quadro 1- Principais temas discutidos nas COPs

Fonte: SEIFFERT (2013); UNFCCC (2013)

Durante a COP 17, realizada em 2011 na cidade de Durban, foi divulgado o ranking dos dez maiores poluidores, emissores de gases de efeito estufa. A China foi apontada como a líder em emissões, seguida dos Estados Unidos e da Índia. Os três países juntos correspondem a quase metade das emissões mundiais de gases de efeito estufa (GEE). De acordo com a publicação *The World Factbook*, disponibilizado pela *Central Intelligence Agency* (CIA, 2013), dos 209 países listados em seu relatório sobre emissões de gases de efeito estufa, os 17 maiores emissores correspondem a mais de 75% das emissões globais de GEE. Se forem considerados os países que compõe o G20, ou seja, incluindo a Indonésia, a Turquia e a Argentina, este número atinge quase 80% das emissões.

O Gráfico 2 apresenta a participação dos países que compõe o G20 nas emissões de GEE. Nota-se que a participação destes países nas emissões de gases de efeito estufa é relevante, sendo que entre 1986 e 2010 estes países correspondiam aproximadamente de 75% a 80% das emissões de dióxido de carbono. Ainda que estes dados sejam alarmantes, a informação que mais chama a atenção é o aumento na quantidade de gases emitidos, tendo aumentado 182,7% em 24 anos (entre 1986 e 2010).

Gráfico 2 - Emissões de dióxido de carbono do G20

Fonte: World Factbook (CIA, 2011)

As análises feitas sobre a emissão de GEE também apontam que grande parte das emissões globais são provenientes de países emergentes. Isto se deve ao fato que estas nações se desenvolvem em grande velocidade e por consequência, multiplicam seus níveis de poluição

(CIA, 2011). A seguir, são apresentados os fatos relevantes da participação da ONU nas negociações ambientais.

Figura 1 - Fatos relevantes da participação da ONU nas negociações ambientais

Fonte: Elaborado pelo autor

2.3 Aquecimento global e Conflitos Mundiais

Além da biodiversidade, o aumento da temperatura global tem sido um dos principais temas discutidos nas negociações climáticas organizadas pela ONU. De acordo com dados da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), há um aumento da média de temperatura global, em especial nas últimas décadas, que aponta uma tendência preocupante. Essa tendência é reforçada por Stern (2006), ao publicar um relatório sobre mudanças climáticas. O relatório afirma que a temperatura aumentou em mais de meio grau e aumentará outro meio grau nas próximas décadas somente pelo efeito da inércia do sistema climático, o que provocaria o deslocamento de 200 milhões de pessoas por motivos climáticos para o ano de 2050 (STERN, 2006). Esta previsão é mais alarmante quando considerado um aumento de três a quatro graus centígrados, que poderia elevar este número para 300 milhões de pessoas deslocadas, apenas pelas enchentes (VIOLA; FRANCHINI; RIBEIRO, 2013, p. 70).

A evolução da variação de temperatura, de 1880 a 2011, divulgada pela NASA, confirma a tendência de aumento.

Gráfico 3 - Variação de temperatura (1880-2011)

Fonte: NASA (2013)

O mundo está atravessando um processo de transformações significativas, caracterizado pela aceleração e aprofundamento das várias dimensões da globalização, crescimento populacional e um aumento sensível do consumo de energia, bens e serviços a nível global. Neste cenário de mudanças profundas, as condições e evolução do sistema climático terão uma influência definitiva sobre o destino das comunidades humanas, desde os âmbitos mais restritos até os mais universais. Uma desestabilização do sistema climático poderia causar uma retração

sensível da democracia como mecanismo de resolução pacífica das disputas em comunidades humanas. Neste sentido, apesar da existência de instituições destinadas a promover a paz, as interações entre indivíduos e grupos podem levá-los a um conflito (VIOLA; FRANCHINI; RIBEIRO, 2013, p. 61).

De acordo com Hsiang, Burke e Miguel (2013), a compreensão das causas dos conflitos tem sido uma importante área de pesquisa nas ciências sociais. Segundo os autores, pesquisadores de diversas áreas (antropologia, economia, geografia, história, ciência política, psicologia e sociologia) têm debatido por muito tempo a influência das mudanças climáticas como fatores responsáveis pela causa de conflitos, violência ou instabilidade política. Como consequência, nos últimos anos, o crescente reconhecimento de que o clima está mudando, juntamente com a melhoria da qualidade de dados e computação, provocou uma explosão de análises quantitativas que buscam testar essas teorias e quantificar a força dessas relações anteriormente propostas.

Uma das considerações apresentadas pelo relatório publicado por Stern (2006) aponta para o aumento de conflitos causados pelo aquecimento global. Segundo o autor, “as consequências das alterações climáticas se tornarão desproporcionalmente mais prejudiciais com o aumento do aquecimento global. As temperaturas mais elevadas aumentarão a chance de desencadear mudanças bruscas e de grande escala que levam à interrupção regional, migração e conflito” (STERN, 2006, p. 56).

Neste sentido, Hsiang, Burke e Miguel (2013), ao analisarem 60 estudos quantitativos¹² sobre eventos de conflitos em várias regiões do mundo, encontraram fortes evidências de relação de causalidade entre mudanças climáticas e conflito humano. Segundo os autores, ainda que as questões climáticas não tenham sido as causas principais motivadoras do conflito, grandes variações climáticas provocam uma substancial incidência de conflitos. Desta forma, a mudança climática antropogênica tem o potencial para aumentar substancialmente conflitos ao redor do mundo. A Figura 2 aponta o mapa dos principais conflitos mundiais, relacionados à mudanças climáticas, em seu estudo.

¹² Foram obtidos 60 estudos preliminares que analisam 45 diferentes conjuntos de dados de conflito publicados em 26 revistas diferentes e representam o trabalho de mais de 190 pesquisadores do mundo. Foram coletadas resultados, abrangendo de 10.000 a.C. até os dias de hoje nas principais regiões do mundo.

Figura 2 - Mapa dos conflitos mundiais relacionados à mudança climática

Fonte: Adaptado de Hsiang, Burke e Miguel (2013)

Para os autores, dadas as possíveis mudanças nos regimes de precipitação e temperatura projetadas para as próximas décadas (em todo o mundo habitado é esperado uma alteração no aquecimento global entre 2 a 4 desvios padrão até 2050), o aumento nas taxas do conflito humano poderiam representar um grande e crítico impacto social tanto em países de baixa quanto de alta renda. De acordo com os autores,

[...] desvios da precipitação normal e temperaturas amenas aumentam sistematicamente o risco de conflito, muitas vezes de forma substancial. [...] Nossa análise sobre estudos de populações na era pós-1950 sugere que a magnitude da influência do clima sobre o conflito moderno é substancial e altamente significativa ($P < 0,001$). Cada variação de 1 desvio padrão no clima para temperaturas mais quentes, ou chuvas mais extremas, aumenta a frequência de violência interpessoal em 4% e os conflitos intergrupos em 14% (HSIANG; BURKE; MIGUEL, 2013, p. 1212).

A Figura 3 apresenta a expectativa sobre a existência de conflitos devido a alteração do desvio padrão mundial esperado até 2050.

Figura 3 - Expectativas de alteração no desvio padrão na temperatura mundial (2050)

Fonte: Hsiang, Burke e Miguel (2013)

A questão do possível aumento dos conflitos discutido por Stern (2006) e Hsiang, Burke e Miguel (2013) também é abordada por outros autores. Hidalgo *et al.* (2010) também reforçam a ideia de que fatores climáticos são importantes causas geradoras de conflitos. Em seu estudo sobre os fatores determinantes para invasões de terras no Brasil, os autores analisaram um conjunto de 5.299 invasões entre 1988 e 2004, os pesquisadores apontaram que a questão da pluviosidade, assim como a desigualdade e má distribuição de renda, são fatores determinantes para o aumento de conflitos. Em seu estudo, os autores ainda apontam que em municípios altamente desiguais, choques negativos de renda causam o dobro de invasões de terra quando comparados à municípios com desigualdade média. Hidalgo *et al.* (2010) ainda destacam que a desigualdade pode estar associada à instituições políticas pobres e, com isso, canalizar pressões redistributivas.

2.4 Gases de Efeito Estufa e Camada de Ozônio

O aumento da preocupação ambiental tem motivado estudos científicos em diversas áreas do conhecimento e, como resultado destas pesquisas, vários fatores têm sido relacionados ao aumento da temperatura e consequente aquecimento global. Uma importante descoberta é que as principais causas de mudanças climáticas estão associadas à geração de emissões atmosféricas. Neste sentido, os gases de efeito estufa, em especial o dióxido de carbono, ocupam importante papel na questão ambiental, uma vez que foram identificados como fator relevante para as mudanças climáticas. De acordo com Bermann (2001, p. 69), a avaliação da

evolução das emissões de dióxido de carbono pelos países tem se tornado um indicador de sustentabilidade energética, não apenas pela relevância do problema em si, mas pela importância que a questão do aquecimento global decorrentes das emissões de gases de efeito estufa (GEE) vem assumindo no contexto internacional.

Outra importante descoberta, relacionada ao aquecimento global, é que a queima de combustíveis fósseis (óleo, carvão e gás natural) contribui para o aumento das emissões atmosféricas, sendo estes combustíveis as fontes mais poluentes. Neste sentido, as alterações na matriz energética mundial, com redução do uso de combustíveis fósseis e aumento do uso de recursos renováveis e energia limpa, são necessárias para mitigar os efeitos das mudanças climáticas (SEIFFERT, 2013).

Dentre os estudos pioneiros sobre os efeitos dos gases no meio ambiente, pesquisadores da Universidade da Califórnia começaram a estudar, em 1973, os impactos dos Clorofluorcarbonetos (CFCs) na atmosfera e relacionaram os CFCs com a quantidade de ozônio na estratosfera. Posteriormente, em 1985, cientistas britânicos descobriram que o ozônio estratosférico sobre a Antártida reduzia-se em 50% durante vários meses do ano, entre setembro e novembro. Como resultado desta observação, foram feitas várias pesquisas sobre o fenômeno e chegou-se à conclusão que a redução da camada de ozônio ocorria principalmente devido à ação dos CFCs, especialmente nas regiões próximas do Polo Sul e, mais recentemente, do Polo Norte (BRASIL, 2009; SEIFFERT, 2013, pp. 24-25).

No mesmo ano, em 1985, foi adotada no âmbito das Nações Unidas a Convenção de Viena para Proteção da Camada de Ozônio. Segundo Brasil (2009), em seguida à Convenção de Viena, adotou-se o Protocolo de Montreal sobre Substâncias que Destroem (empobrecem) a Camada de Ozônio (1987). Em setembro de 1987, o Protocolo foi aberto para adesões, tendo entrado em vigor em 1989 e sendo revisado em 1990 (Londres), 1992 (Copenhague), 1995 (Viena), 1997 (Montreal) e 1999 (Beijing). Os países que ratificaram o protocolo deviam cumprir a meta de eliminar completamente, até 2010, suas emissões de gases CFCs que contribuíssem para destruição da camada de ozônio (UNEP, 2000; BRASIL, 2009; SEIFFERT, 2013).

O Quadro 2 apresenta as substâncias que destroem a camada de ozônio, seu cronograma de eliminação e as principais fontes destas substâncias.

Anexo do Protocolo de Montreal	Substância	Cronograma de Eliminação das SDOs Protocolo de Montreal	Fonte
A-I	CFC-11	Eliminação em 2010	Propulsores, refrigeradores, aerossóis, espumantes e solventes
	CFC-12	Eliminação em 2010	Propulsores, refrigeradores, aerossóis, espumantes e solventes
	CFC-22	Eliminação em 2010	Refrigeradores
	CFC-113	Eliminação em 2010	Solventes
	CFC-114	Eliminação em 2010	Refrigeradores
	CFC-115	Eliminação em 2010	Refrigeradores
A-II	Halógenos	Eliminação em 2010	Extintores
B-I	Outros CFCs	Eliminação em 2010	Refrigeradores
B-II	Tetracloro de Carbono	Eliminação em 2010	Indústria Química
B-III	Metil Clorofórmio	Eliminação em 2015	Solventes
C-I	HCFCs	Eliminação em 2040	Fluidos de refrigeração em geladeiras e aparelhos de ar condicionado (surgem como alternativa aos CFCs)
C-II	HBFCs	Eliminação em 1996	Solventes, agentes de limpeza, extintores de incêndio e refrigerantes
C-III	Bromoclorometano	Eliminação em 2002	Extintores
E	Brometo de metila	Eliminação em 2015	Fumigação na agricultura e armazenamento de grãos

Quadro 2 - Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio (Protocolo de Montreal)

Fonte: UNEP (2000); Brasil (2009) e Seiffeirt (2013)

Em 1987, a publicação do relatório Brundtland alertou o mundo para outro problema, o aquecimento global, motivando desta vez estudos ligados ao efeito estufa. Neste contexto o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas publicou em 1988 um relatório reforçando a preocupação com o aquecimento global e com os gases causadores destas alterações climáticas.

Como resultado das novas pesquisas, descobriu-se que o dióxido de carbono era (e ainda é), um dos maiores responsáveis pelo aquecimento global. Além do dióxido de carbono, outros gases também foram listados como causadores do efeito estufa: o gás metano, o óxido nitroso, os hidrofluorcarbonos, os perfluorcarbonos e o hexafluoreto. O Quadro 3 lista os gases de efeito estufa e suas principais características.

Gás de Efeito Estufa (GEE)	Características
Dióxido de Carbono (CO ₂)	O dióxido de carbono é o mais abundante dos GEE, sendo emitido como resultado de inúmeras atividades humanas como, por exemplo, por meio do uso de combustíveis fósseis e também com a mudança no uso da terra.
Metano (CH ₄)	O gás metano é produzido pela decomposição da matéria orgânica, sendo encontrado geralmente em aterros sanitários, lixões e reservatórios de hidrelétricas e também pela criação de gado e cultivo de arroz .
Óxido Nitroso (N ₂ O)	O óxido nitroso cujas emissões resultam, entre outros, do tratamento de dejetos animais, do uso de fertilizantes, da queima de combustíveis fósseis e de alguns processos industriais .
Hidrofluorcarbonos (HFCs)	Os hidrofluorcarbonos são utilizados em geladeiras e aparelhos de ar condicionado, substituindo os clorofluorcarbonos (CFCs) e, além do aquecimento, provocam chuva ácida.
Perfluorcarbonos (PFCs)	Os perfluorcarbonos são utilizados como gases refrigerantes , solventes, propulsores, espuma e aerossóis.
Hexafluoreto (SF ₆)	O hexafluoreto de enxofre é utilizado principalmente na indústria elétrica como isolante térmico e condutor de calor.

Quadro 3 - Características dos Gases de Efeito Estufa

Fonte: BRASIL (2009) e MMA (2013b)

Conforme apresentado anteriormente, além do CO₂, outros gases (metano, óxido nitroso, hidrofluorcarbonos, perfluorcarbonos e hexafluoreto) são responsáveis pelo aumento da temperatura e aquecimento global. Para efeito de comparação entre os gases, foi criada uma medida, internacionalmente aceita, para avaliar a capacidade de agressão dos gases ao meio ambiente, baseado no que é chamado de equivalência de carbono. A equivalência de carbono (CO₂eq) expressa, em termos equivalentes da quantidade de dióxido de carbono, o potencial de aquecimento global dos gases de efeito estufa (BRASIL, 2009).

Segundo Seiffert (2013), a equivalência de carbono é uma medida usada para comparar emissões de diversos GEE, tendo como base a quantidade de dióxido de carbono que teria o mesmo potencial de aquecimento global (*Global Warming Potencial – GWP*), medido em um período de tempo especificado, permitindo estimar o impacto ambiental gerado.

O Quadro 4 apresenta os gases de efeito estufa e sua equivalência de carbono (potencial de aquecimento global dos gases de efeito estufa em comparação ao dióxido de carbono).

Grupo	Nome	Equivalência
CO ₂	Dióxido de Carbono	1 (usado como referência)
CH ₄	Metano	É 21 vezes mais ativo no efeito estufa do que o CO ₂
N ₂ O	Óxido Nitroso	É 310 vezes mais ativo no efeito estufa do que o CO ₂
HFCs	Hidrofluorcarbonos	Entre 140 e 11.700 vezes mais ativo no efeito estufa do que o CO ₂
PFCs	Perfluorcarbonos	Entre 6.500 a 9.200 vezes mais ativo no efeito estufa do que o CO ₂
SF ₆	Hexafluoreto	É 23.900 vezes mais ativo no efeito estufa do que o CO ₂

Quadro 4 - Equivalência de Carbono dos Gases de Efeito Estufa

Fonte: Seiffert (2013); MMA (2013b)

De acordo com Abranches (2010), a medição sistemática do dióxido de carbono na atmosfera, iniciada em 1958 por Charles David Keeling, permitiu o acompanhamento (evolução da concentração de CO₂ em partes por milhão) e a análise das relações entre aquecimento global e concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, em especial o dióxido de carbono. A quantidade de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera aumentou desde a era industrial devido a atividades humanas, principalmente pela queima de combustíveis fósseis e remoção de florestas (KEELING ET AL., 1976).

Em maio de 2013 foi registrado no observatório de Mauna Loa, no Havaí, a concentração de dióxido de carbono de 400,03 ppm (NOAA, 2013), um limite estabelecido pela comunidade científica, muito superior à concentração de 280 ppm na sociedade pré-industrial. Segundo Veiga (2013), há um consenso científico para que, para mitigar os efeitos do aquecimento global e evitar que a temperatura média não ultrapassasse dois graus centígrados neste século, a concentração média de dióxido de carbono deveria ficar próxima dos 350 ppm. O aumento de temperatura acima deste patamar compromete o meio ambiente (biodiversidade) e a economia mundial, dando início à uma série de problemas citados anteriormente, em especial por Stern (2006).

De acordo com o IPCC, com uma concentração média de 400 ppm, o aquecimento previsto da Terra será de pelo menos 2,4°C, com tendência de aumento nos próximos anos caso este ritmo de emissões continue. As propostas da reunião de Copenhague (COP 15) tinham como

meta estabilizar a concentração de dióxido de carbono em 450 ppm. Segundo Abranches (2010),

[...] a concentração na atmosfera do mais importante gás estufa antropogênico, o CO₂, cresceu de perto de 280 ppm, no período pré-industrial, para perto de 379 ppm, em 2005. Essa concentração em 2005 excede em muito os limites de variação natural dos últimos 650 mil anos, que foi de 180 ppm a 300 ppm, como se pode determinar pelas análises de núcleos de gelo. [...] O crescimento anual da concentração de dióxido de carbono em 12 meses tem sido maior nos últimos 10 anos do que em qualquer período desde que se começou a fazer medidas atmosféricas diretas (ABRANCHES, 2010, p. 76).

Veiga (2013) destaca que o patamar de dois graus centígrados tem sido associado a 450 ppm de CO₂ equivalente, o que inclui todos os outros gases de efeito estufa, e associado a um valor inferior a 450 ppm se medido apenas o CO₂. No Gráfico 4 é possível observar a evolução da concentração de dióxido de carbono entre janeiro de 2009 e dezembro de 2014, com o pico ocorrido em maio de 2013 em que a concentração atingiu a barreira das 400 ppm.

Gráfico 4 - Evolução da concentração de dióxido de carbono

Fonte: NOAA (2013)

Como forma de redução das emissões e da concentração de carbono na atmosfera, foram propostas, nas negociações ambientais, alterações na matriz energética dos países (redução do uso de combustíveis fósseis) além do desenvolvimento de mecanismos e projetos que promovam a sustentabilidade para este fim. Seiffert (2013) aponta que alguns projetos os quais estimulam o desenvolvimento sustentável por meio de Mecanismos de

Desenvolvimento Limpo (MDLs), no qual devem ser capazes de induzir à redução dos níveis de emissão de GEE no processo produtivo ou de promover a imobilização (remoção) de gases da atmosfera. Estes projetos são ligados aos sumidouros de GEE (sequestro de carbono por meio de reflorestamentos e florestamento), imobilização de GEE e adoção de projetos de redução de emissões (uso de energias alternativas e limpas, implantação de pequenas centrais hidrelétricas, aumento na eficiência no uso de combustíveis, uso de biomassa e biocombustíveis).

2.5 Desmatamento e absorção de carbono nas florestas

O Protocolo de Quioto estabeleceu metas para as emissões de gases de efeito estufa (CO_2 , CH_4 , N_2O , HFCs, PFCs, SF_6), que podem ser satisfeitas através de esforços e atividades em todos os setores, incluindo energia, processos industriais, agricultura e gestão de resíduos. As atividades relacionadas ao uso da terra, mudança no uso da terra e florestas (LULUCF¹³) também podem ser usadas de forma limitada para atingir as metas (HÖHNE ET AL., 2007).

As metas de redução de emissão de gases de efeito estufa, proposta pelo protocolo de Quioto em 1997, não foram alcançadas por diversos países. Segundo dados recentes das Nações Unidas, vários países não atingiram as metas de redução ainda que fossem consideradas as atividades relacionadas ao uso da terra (aumento da área de floresta e projetos de desenvolvimento limpo). Além disto, o “princípio de responsabilidades comuns, porém diferenciadas” permitiu que vários países aumentassem suas emissões sem penalizações imediatas. Neste sentido o princípio puniu os países precursores no processo de industrialização, gerando questionamentos sobre a eficácia do princípio.

Dos países que tinham metas de redução, cinco dos países que compõe o G20 (Rússia, Reino Unido, França, Itália e Alemanha) conseguiram atingir suas metas de redução, em parte devido às mudanças no uso da terra (florestamento e reflorestamento) conforme mostram os dados das Nações Unidas, apontado na Figura 4.

¹³ Apesar do termo ser conhecido em português, sua sigla é mais utilizada é originada do inglês Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF)

Figura 4 - Metas de redução (incluindo mudanças no uso da terra)

Fonte: UNFCCC (2014)

Seiffert (2013, pp.18-19) relata que, além das emissões de gases de efeito estufa, um fator que agravou o quadro das mudanças climáticas foi o processo de desmatamento, causado pelo uso da madeira como fonte de energia e matéria prima (desde antes da Revolução Industrial), pela expansão das cidades e pela expansão das atividades agropecuárias. Para o autor, o desmatamento reduz a dupla função ecológica das florestas (sequestro de carbono e efeito refrigerador) e torna-se ainda mais impactante quando o desmatamento ocorre por meio de queimadas, liberando rapidamente grandes quantidades de carbono na atmosfera.

Saatchi (2011) ainda aponta que o desmatamento e degradação florestal, localizados principalmente em áreas tropicais, foram responsáveis por 12 a 20% das emissões de GEE antropogênicas mundiais na década de 1990 e início dos anos 2000, sendo que estes processos (desmatamento e degradação florestal) também impactam na capacidade e potencial futuro de

remoção de carbono das florestas. Segundo Hendrick (2008), pela quantidade de carbono presente nos ecossistemas florestais (em suas árvores e solo) e pelo fluxo de dióxido de carbono para dentro e fora das florestas, os ecossistemas florestais desempenham um papel vital no ciclo global do carbono.

2.5.1 Redução de Emissões do Desmatamento (RED, REDD e REDD +)

Dada a importância das florestas como mecanismos de redução do desequilíbrio climático, foram incorporadas medidas para redução das emissões, relacionadas às florestas, no texto final do Protocolo de Quioto. Assim, de acordo com artigo 2º, cada parte incluída no Anexo I (países industrializados e economias em transição), ao cumprir seus compromissos quantificados de limitação e redução de emissões, a fim de promover o desenvolvimento sustentável, deve dentre outros: (1) estimular a eficiência energética em setores relevantes da economia nacional; (2) pesquisar, promover, desenvolver e incrementar tecnologias ambientais inovadoras, tecnologias de sequestro de CO₂ e novas alternativas de energia renovável; (3) proteger e promover melhorias de sumidouros (projetos que induzem à imobilização de GEE na atmosfera) e reservatórios de GEE; (4) promover práticas de manejo sustentável de florestas; (5) promover florestamentos (implantação de florestas em áreas que não eram florestadas naturalmente); (6) promover reflorestamentos (implantação de florestas em áreas naturalmente florestais); (7) promover formas sustentáveis de agricultura e (8) reduzir progressivamente as imperfeições de mercado, tais como subsídios e incentivos e isenções fiscais em todos os setores emissores de GEE (UN, 1998; SEIFFEIRT, 2013).

Segundo o texto da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, 1992) as florestas se enquadram nas definições de: fonte (qualquer processo ou atividade que libere aerossóis ou gases de efeito estufa na atmosfera), sumidouro (qualquer processo, atividade ou mecanismo que remova aerossóis ou gases de efeito estufa da atmosfera) e reservatório (componentes do sistema climático no qual ficam armazenados gases de efeito estufa).

De acordo com Corte *et al.* (2012), a questão das emissões de gases de efeito estufa oriundos do desmatamento e degradação das florestas merece atenção. Segundo os autores, cerca de

30% das emissões mundiais de gases de efeito estufa são provenientes dessa modalidade, contribuindo para o aquecimento global e as mudanças climáticas.

A estimação de parâmetros, métodos e padrões para a avaliação dos estoques de carbono e suas variações nas florestas é de responsabilidade do IPCC, que incluem as emissões de CO₂ e remoções decorrentes de mudanças nos estoques de carbono (C) na biomassa; emissões de fogo (queimadas); emissões de N₂O de todas as áreas manejadas, emissões de CH₄ (cultivo de arroz e pecuária); emissões provenientes de sistemas de manejo de dejetos e mudanças no estoque de carbono associada a produtos de madeira abatida (IPCC, 2006).

Assim, no sentido de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, foram feitas importantes iniciativas de âmbito global, com destaque para duas ações ligadas às Nações Unidas: (1) a redução das emissões proposta pelo Protocolo de Quioto e (2) e a inserção da questão do desmatamento e degradação florestal. Esta última temática vem sendo discutida desde a Conferência das Partes (COP 11) de Montreal, em 2005. Neste encontro foram discutidos projetos de Redução das Emissões do Desmatamento (RED), que evoluiu nas reuniões posteriores, na Conferência de Bali em 2007, para Redução de Emissões do Desmatamento e Degradação (REDD) e, finalmente para REDD + (ou REDD *plus*), englobando também o papel da conservação florestal, do aumento dos estoques de carbono (sequestro de carbono) e do manejo sustentável das florestas. Phelps *et al.* (2010) e o World Bank (2012), ainda destacam que tem sido comum em diversas publicações uma evolução do termo REDD + para REDD ++, incluindo a agricultura como garantia de melhores práticas, objetivando o não desmatamento. Segundo o World Bank (2012), o segundo + pode ter significados diferentes, dependendo do contexto, sendo que costuma implicar florestamento ou reflorestamento, salvaguardas sociais e uma visão de longo prazo para a contabilidade de carbono abrangente em todo o espectro da agricultura, floresta e outros usos da terra (AFOLU¹⁴), também conhecido como redução de emissões de todos os usos da Terra (REALU¹⁵).

As propostas de redução de emissões por desmatamento e degradação são classificadas e escolhidas de acordo com o escopo (atividades consideradas elegíveis para a geração de reduções de emissões, compreendendo projetos RED, REDD, e REDD+); com o nível de referência, que avalia como as reduções são mensuradas, definindo o período de referência e a

¹⁴ Originado do inglês Agriculture, Forest, and Other Land Uses (AFOLU)

¹⁵ Originado do inglês Reducing Emission from All Land Uses (REALU)

escala de medição das atividades do escopo; com a distribuição, que define como serão distribuídos ou alocados os benefícios das reduções por desmatamento e degradação e, por fim, de acordo com o financiamento, que se refere aos recursos usados para incentivar reduções em um mecanismo REDD (PARKER ET AL., 2009).

O surgimento do mecanismo REDD é uma evolução das propostas de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo. Os projetos de MDL, regulamentados em 2001 pelos Acordos de Marraquech na COP 7, foram concebidos originalmente para lidar com reduções de emissões e que, posteriormente, incluíram atividades de remoção de dióxido de carbono por meio de florestamento e reflorestamento. As atividades relacionadas ao uso da terra, mudança no uso da terra e florestas, elegíveis no MDL, são aquelas relativas à remoção de dióxido de carbono da atmosfera, por meio do crescimento das árvores (florestamento e reflorestamento) e pelo aumento da biomassa produzido pela fotossíntese, fazendo com que as florestas ajam como um sumidouro de carbono, promovendo o chamado sequestro de carbono.

Para Grainger *et al.* (2009), a premissa do REDD é que os países, em especial aqueles com florestas tropicais, possam contribuir na redução de gases de efeito estufa se reduzirem suas taxas de desmatamento e adotarem uma gestão sustentável das florestas e da conservação e aumento dos estoques de carbono florestal. Estas propostas, principalmente relacionadas ao financiamento destes mecanismos, são estruturadas para uma implementação bem sucedida. Muitos dos países que detêm florestas tropicais são países em desenvolvimento e, se não houve um forte incentivo, estes projetos de redução de emissões do desmatamento podem não ocorrer.

As propostas iniciadas nas Conferências das Partes em Montreal (2005) e Bali (2007) foram reafirmadas na reunião de Copenhague (2009) pelo “Acordo de Copenhague”, que reconheceu a importância da redução das emissões produzidas pelo desmatamento e degradação das florestas, a necessidade de implementação de mecanismos REDD +, além de também reconhecer a necessidade de promover meios de financiamento desta redução com recursos de países desenvolvidos (UNFCCC, 2009).

Da Conferência de 2007 surgiu um Plano de Ação, conhecido como Plano de Ação de Bali, que reconheceu, entre outros tópicos, a necessidade da adoção de políticas e incentivos positivos no que se refere à redução de emissões provenientes do desmatamento e degradação florestal nos países em desenvolvimento, considerando inclusive a necessidade da utilização de instrumentos de mercado para reduzir os custos das medidas de redução de

GEE, levando em conta assim as diferentes circunstâncias dos países desenvolvidos e em desenvolvimento (FERENZCY, 2012, p. 91).

Apesar da maioria dos *papers* afirmarem que o início das discussões sobre a redução das emissões do desmatamento ocorreu em 2005, Ferenzcy (2012) afirma que a proposta já havia sido apresentada, de maneira informal, pelo Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM) e parceiros, na Conferência das Partes ocorrida em Milão. O autor ainda aponta que o + ou '*plus*' ao final da sigla do REDD permeou os debates das COP's de 2007, 2008 e 2009, tendo sido de fato definido apenas na Conferência das Partes de Cancun, em 2010, figurado em seu acordo final.

2.5.2 Tipos de biomas e absorção de carbono

O conjunto dinâmico formado em determinada área geográfica pela comunidade biótica e seu ambiente constitui um ecossistema. Os ecossistemas podem ser agrupados em biomas (conjunto de diferentes ecossistemas, que possuem certo nível de homogeneidade), que refletem diferenças geográficas naturais em solos e clima e, conseqüentemente, diferentes tipos de vegetação (MAGNOLI; ARAUJO, 2001).

Segundo Magnoli e Araújo (2001), os biomas podem ser divididos em domínios florestados, que abrangem ecossistemas tropicais, temperados e boreais; domínio das formações herbáceas e arbustivas, que abrangem os ecossistemas tundra, savanas tropicais, pradarias (vegetação campestre), estepes tropicais e vegetação mediterrânea (conhecida como chaparral) e, por fim, o domínio dos desertos e montanhas. Nos relatórios do IPCC (2000), os principais ecossistemas apresentados são a floresta tropical, a floresta temperada, a floresta boreal, as savanas (cerrado), os campos temperados, os desertos e semidesertos, a tundra, o pantanal e as terras cultiváveis.

Dada as condições geológicas e climáticas, cada bioma apresenta característica e tipo de vegetação específica e, com isso, cada bioma apresenta diferente capacidade de assimilar e armazenar carbono. Segundo os relatórios do IPCC, o estoque de carbono pode ser armazenado tanto na vegetação quanto no solo, sendo o estoque total de carbono a soma do carbono do solo (raiz) e da vegetação. A Tabela 1 apresenta os estoques de carbono de cada um dos biomas em cada 10⁹ hectares de área.

Tabela 1 - Estoques de carbono globais (vegetação e solo até profundidade de 1 m)

Biomassas	Área (10 ⁹ ha)	Vegetação	Solo	Total	Média (ton C / 10 ⁹ ha)
Floresta Tropical	1,76	212	216	428	243,18
Floresta Temperada	1,04	59	100	159	152,88
Floresta Boreal (Taiga)	1,37	88	471	559	408,03
Savanas (Cerrado)	2,25	66	264	330	146,67
Campos Temperados	1,25	9	295	304	243,2
Desertos e Semidesertos	4,55	8	191	199	43,74
Tundra	0,95	6	121	127	133,68
Pantanal	0,35	15	225	240	685,71
Terras Cultiváveis	1,6	3	128	131	81,88
Total	15,12	466	2011	2477	163,82

Fonte: IPCC (2000)

De acordo com a tabela é possível observar que determinados biomas tem maior capacidade de estoque de carbono, com grande destaque para a floresta boreal, com capacidade de estocar 559 toneladas de carbono em uma área de 10⁹ hectares. Apesar de a floresta tropical apresentar a segunda maior capacidade de estoque de carbono, este bioma é considerado estratégico nos esforços de mitigar os efeitos ambientais. Dois fatores se destacam na importância da floresta tropical: o fato de que, em área total (considerando todos os países), é o tipo de bioma com a maior quantidade de carbono armazenado e, em segundo lugar, o fato de que a região em que este tipo de bioma está presente é relacionada à países em desenvolvimento (China, Índia, Brasil, México, parte da África e parte do sudeste asiático).

Estes países emergentes, por não serem considerados países desenvolvidos na ocasião da assinatura do protocolo de Quioto, não tinham metas de redução de emissões, ficando livres de sanções mais pesadas em caso de ações contra o meio ambiente. Também deve ser considerado que, em especial no período pós globalização, estes países apresentaram altas taxas de crescimento (com aumento no consumo e produção), ameaçando a preservação ambiental e o consumo sustentável.

De maneira sintética, a preocupação com a manutenção das florestas pode ser explicada por dois fatores: o aumento da capacidade de estoque de carbono e a tentativa de evitar desmatamento. O primeiro fator é relacionado com a capacidade dos biomas de absorver o carbono da atmosfera. Ainda que esta capacidade, em comparação com a quantidade de gases

de efeito estufa na atmosfera, seja pequena, quanto maior for a capacidade do bioma em absorver carbono, ou quanto maior for a área total deste bioma, maior será a capacidade de mitigar o efeito estufa.

O segundo fator, desmatamento, segue a lógica da capacidade de absorção. Quanto menor for a área do bioma, menor será a capacidade de absorção de carbono da atmosfera e, desta forma, menor será a capacidade de reduzir os efeitos do aquecimento global. O desmatamento ainda tem outro fator negativo. Em casos em que o desmatamento é feito para criação de gado ou para utilização agrícola, o desmatamento é feito por meio de queimadas, por ser uma maneira mais barata e rápida. Com a queimada, todo carbono armazenado nas plantas é liberado para o meio ambiente. Assim, o desmatamento tem uma função negativa dupla: redução da área de absorção e liberação de carbono (em caso de queimada).

Baseado em Olson *et al.* (2001), a GRID ARENDAL (2013) apresenta na Figura 5 a relação de biomas e a respectiva quantidade de carbono estocado em cada bioma. Os principais destaques são para a floresta tropical, floresta boreal e floresta temperada, detentoras respectivamente das maiores quantidades de carbono armazenada em seus biomas.

Figura 5 - Estoque de carbono armazenado nos biomas (gigatoneladas de carbono)

Fonte: Adaptado de Olson *et al.* (2001 *apud* GRID ARENDAL, 2013)

2.5.3 Florestamento, Reflorestamento e Desmatamento no G20

Florestamento, reflorestamento e desmatamento são alterações nas áreas de florestas que podem influenciar, positiva ou negativamente, o meio ambiente. Conceitualmente, florestamento é a implantação de florestas em áreas que não eram florestadas naturalmente enquanto reflorestamento consiste na implantação de florestas em áreas naturalmente florestais, que foram degradadas. O desmatamento (ou desflorestamento) é o processo de desaparecimento de florestas, causado em grande parte por atividade antropogênica.

Tanto o florestamento quanto o reflorestamento são consideradas atividades benéficas para o meio ambiente, uma vez que o aumento da área de floresta promove sequestro e estoque de carbono, que é armazenado nas raízes e na vegetação. Além disto, as trocas gasosas das árvores com o meio ambiente permitem que seja retirado dióxido de carbono atmosférico em troca de oxigênio por meio da fotossíntese. Seguindo a mesma lógica, o desmatamento é considerado prejudicial ao meio ambiente pela redução da área de floresta e pela forma em que ocorre o processo de desmatamento (queimadas), que libera grande quantidade de carbono para o meio ambiente.

Ao analisar a área de floresta do G20 é possível observar que alguns países, Rússia, Brasil, Canadá e Estados Unidos, detêm mais de 70% da área de floresta do grupo, sendo o Brasil o único com florestas tropicais. Dentre estes quatro países apenas o Brasil reduziu sua área de floresta, decorrente de desmatamento. O Canadá manteve constante a área florestal no período enquanto a Rússia teve um pequeno aumento e os Estados Unidos um aumento relativamente maior entre os quatro. A Tabela 2 apresenta a relação de países do G20 e a área de floresta entre 1990 e 2010.

Tabela 2 - Área de floresta dos países do G20 (+ Irã) em Km²

País	1990	2000	2010
África do Sul	92.410	92.410	92.410
Alemanha	107.410	110.760	110.760
Arábia Saudita	9.770	9.770	9.770
Argentina	347.930	318.610	294.000
Austrália	1.545.000	1.549.200	1.493.000
Brasil	5.748.390	5.459.430	5.195.220
Canadá	3.101.340	3.101.340	3.101.340
China	1.571.406	1.770.005	2.068.606

Coreia do Sul	63.700	62.880	62.220
Estados Unidos	2.963.350	3.001.950	3.040.220
França	145.370	153.530	159.540
Índia	639.390	653.900	684.340
Indonésia	1.185.450	994.090	944.320
Irã	110.750	110.750	110.750
Itália	75.900	83.690	91.490
Japão	249.500	248.760	249.790
México	702.910	667.510	648.020
Reino Unido	26.110	27.930	28.810
Rússia	8.089.500	8.092.685	8.090.900
Turquia	96.800	101.460	113.340

Fonte: World Bank (2013)

A Tabela 3 apresenta a variação da área de floresta no período de 1990 a 2010. De acordo com a tabela é possível observar que vários países aumentaram sua área de floresta, com destaque para a China, Itália, Turquia e Reino Unido, com aumento superior a 10% no período. Na outra ponta da tabela estão os países com maior área relativa desmatada. Os destaques negativos são a Indonésia, Argentina, Brasil e México, com um alto percentual de desmatamento. O maior destaque em reflorestamento é a China, com aumento de 31,64% na área de floresta no período. Segundo XU (2011), desde os anos 1990, a China já plantou mais de 4 milhões de hectares de novas florestas a cada ano. O autor, contudo, revela que a maior parte deste reflorestamento é destinado ao aumento de culturas arbóreas, como árvores de fruto, de borracha e de eucalipto e não recuperação da floresta natural, o que ameaça os serviços dos ecossistemas, a proteção especial das bacias hidrográficas e conservação da biodiversidade.

Uma importante observação é que dentre os países considerados mais ricos e industrialmente desenvolvidos (G8) não houve redução da área de floresta no período. Com exceção do Canadá, todos os outros países do G8 apresentaram em maior ou menor grau um aumento da área de floresta, tendo sido a Itália o membro do G8 com maior aumento relativo. Dentre os países emergentes (G5), apenas o Brasil e o México tiveram redução da área de floresta, enquanto a África do Sul permaneceu constante e a Índia e a China aumentaram sua área florestal.

Outra informação relevante, os países com maior percentual de desmatamento, com destaque para a Indonésia, Brasil e México, são países emergentes, com grande área de floresta

tropical. Esta constatação reforça a preocupação das Nações Unidas em tentar proteger áreas florestais em países em desenvolvimento com programas como RED, REDD e REDD+. Além disto, esta observação corrobora a ideia de que os países em desenvolvimento muitas vezes têm optado em estimular seu crescimento econômico em detrimento do meio ambiente, de maneira não sustentável. Os dados da variação da área de floresta dos países do G20 são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Variação da área de floresta no G20 (+ Irã)

Posição	País	$\Delta\%$ Área de Floresta (1990-2010)
1°	China	31,64%
2°	Itália	20,54%
3°	Turquia	17,09%
4°	Reino Unido	10,34%
5°	França	9,75%
6°	Índia	7,03%
7°	Alemanha	3,12%
8°	Estados Unidos	2,59%
9°	Japão	0,12%
10°	Rússia	0,02%
11°	África do Sul	0,00%
12°	Arábia Saudita	0,00%
13°	Canadá	0,00%
14°	Irã	0,00%
15°	Coreia do Sul	-2,32%
16°	Austrália	-3,37%
17°	México	-7,81%
18°	Brasil	-9,62%
19°	Argentina	-15,50%
20°	Indonésia	-20,34%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank (2013)

De acordo com Marengo (2006), os desmatamentos, queimadas e mudanças no uso da terra representam grande parte das emissões de gases de efeito estufa em diversos países, como no Brasil em que estes fatores são os principais responsáveis pelas emissões de GEE. O autor ainda aponta que estes fatores representam cerca de 4% do total mundial de emissões de gases. Com relação à este tema, além das emissões de gases de efeito estufa, outros problemas têm sido priorizados pelas Nações Unidas, como a questão da perda de biodiversidade (UN, 2010; UN, 2011).

Dawson *et al.* (2011) apontam que a mudança climática deve se tornar uma grande ameaça para a biodiversidade no século XXI, em um cenário de previsões imprecisas e soluções pouco eficazes. Segundo os autores, previsões alarmantes sobre os efeitos potenciais das alterações climáticas futuras têm direcionado as políticas ambientais do nível local ao nível global, com foco no potencial de perda da biodiversidade, na rescisão do potencial evolutivo e na interrupção dos serviços ecológicos. Dawson *et al.* (2011) também consideram que os modelos de previsão sobre mudanças climáticas, ligadas à biodiversidade, indicam grandes deslocamentos geográficos e extinções generalizadas, conforme já discutido neste tese.

De acordo com Hooper *et al.* (2012), há evidências de que as extinções estão alterando os processos-chave importantes para a produtividade e sustentabilidade dos ecossistemas da Terra. A perda de espécies vai acelerar a mudança em processos do ecossistema, gerando perda da diversidade e alteração no funcionamento dos ecossistemas. Segundo os autores, os efeitos da perda das espécies são comparáveis aos efeitos de outras mudanças ambientais globais, como o aumento de radiação ultravioleta e aquecimento climático, destruição da camada de ozônio, acidificação, elevação no nível de CO₂ e poluição por nutrientes

A importância da biodiversidade para o bem-estar e a saúde humana ganhou maior destaque quando o processo de perda de diversidade biológica chamou a atenção para a necessidade de conservação e uso racional dos recursos vivos para proteger o fluxo dos serviços dos ecossistemas naturais (ALHO, 2012, p. 151). Neste sentido, em 2002, os líderes mundiais comprometeram, por meio da Convenção sobre Diversidade Biológica (CDB), atingir uma redução significativa da taxa atual de perda de biodiversidade até 2010, tendo sido esta meta incorporada às Metas de Desenvolvimento do Milênio das Nações Unidas em reconhecimento do impacto da perda da biodiversidade no bem-estar humano (BUTCHART ET AL., 2010). De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, a CDB refere-se à biodiversidade em três esferas (ecossistemas, espécies e recursos genéticos) e está estruturada sobre três bases principais: (1) conservação da diversidade biológica; (2) uso sustentável da biodiversidade e (3) repartição justa e equitativa dos benefícios provenientes da utilização dos recursos genéticos (MMA, 2013a).

Dada a importância do tema biodiversidade, a Assembleia Geral da ONU declarou o período 2011-2020 como a Década das Nações Unidas sobre a Biodiversidade “para promover a

implementação de um plano estratégico para a biodiversidade e sua visão geral de viver em harmonia com a natureza”. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente,

[...] três razões principais justificam a preocupação com a conservação da diversidade biológica. Primeiro, porque se acredita que a diversidade biológica é uma das propriedades fundamentais da natureza, responsável pelo equilíbrio e estabilidade dos ecossistemas. Segundo, porque se acredita que a diversidade biológica representa um imenso potencial de uso econômico, em especial pela biotecnologia. Terceiro, porque se acredita que a diversidade biológica esteja se deteriorando, com aumento da taxa de extinção de espécies, devido ao impacto das atividades antrópicas (MMA, 2013c)

Marengo (2006, p. 75) aponta que “o aquecimento global está afetando os ecossistemas, causando a destruição ou a degradação do *habitat* e a perda permanente da produtividade, ameaçando tanto a biodiversidade como o bem-estar humano”. Segundo o autor as consequências das mudanças no clima alterariam a distribuição geográfica dos ecossistemas, afetando sua composição e funções além de promover a extinção de espécies e migrações de animais. Marengo ainda aponta que não só as plantas e animais terrestres seriam afetados, pois, baseado em Behrenfeld *et al.* (2006), o fitoplankton (primeiro elo da cadeia alimentar marítima) seria fortemente afetado, comprometendo a pesca em diversas regiões do globo.

3 Fontes e Matriz Energética

A geografia mundial propicia grande diversidade entre nações quanto à disponibilidade de recursos naturais e de limitações às nações. Neste sentido, a evolução histórica dessa diversidade resultou em mudanças econômicas e sociais que se refletem na desigualdade de condições de vida das pessoas. Segundo Leite (2013), diante dos sinais de que o planeta Terra não está suportando o crescimento populacional e os padrões de consumo, aumentam a preocupações com sua provável evolução, tendências e riscos.

A determinação dos impactos do aquecimento global no século XXI é um tema controverso, sem consenso e coberto de incertezas. Para Hinrichs, Kleinbach e Reis (2012, p. 338), grande parte das incertezas se deve ao fato de que “os modelos computadorizados utilizados para fazer simulações e prever os climas futuros são pouco adequados para simular como as coisas podem mudar em áreas e locais”. Estes modelos, baseados em informações sobre radiação solar, composição atmosférica, cobertura das nuvens, trocas de água e calor entre a atmosfera e os oceanos, quantidade e tipo de gases de efeito estufa emitidos (dentre outras informações), são passíveis de interpretações e dependem das chamadas retroalimentações (*feedback*) em que parcela do produto de saída (*output*) serve como entrada (*input*) para o sistema. Segundo Marengo (2006),

[...] esses modelos numéricos provêm de uma visão tridimensional do sistema climático, descrevendo os principais processos físicos e dinâmicos, assim como as interações entre as componentes do sistema climático e os mecanismos de retro-alimentação (*feedbacks*) entre os processos físicos. Estes modelos podem simular climas futuros em nível global e regional como resposta a mudanças (MARENGO, 2006, p. 20).

De acordo com Viola, Franchini e Ribeiro (2013), ainda que haja um certo consenso (90% dos pesquisadores) em acreditar que o aquecimento global é causado principalmente pela ação do homem, há um grupo de pesquisadores na comunidade científica, chamados de céticos, que não concorda com as premissas básicas da ruptura climática global. Este grupo é dividido em três categorias: (1) um grupo formado por pesquisadores que nega a existência de um fenômeno de desestabilização do sistema climático, atribuindo as pesquisas à manipulação científico-política das partes interessadas; (2) um grupo que reconhece o processo de ruptura climática global, mas atribui esse fenômeno ao ciclo natural da Terra e por fim, (3) um grupo

que aceita a existência do fenômeno de mudanças climáticas, mas que acredita que a sociedade humana é incapaz de detê-lo.

Considerando as várias interpretações de pesquisadores, interações entre *inputs* e *outputs* e as possíveis retroalimentações no sistema, Hinrichs, Kleinbach e Reis (2012) apontam os possíveis cenários de aquecimento ou resfriamento, baseados nas descobertas científicas. Os cenários são apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Possíveis cenários sobre aquecimento e resfriamento global

Fonte: Hinrichs, Kleinbach e Reis (2012, p. 342)

De acordo com Romeiro (2010, p. 22) “as circunstâncias históricas que explicam a emergência do princípio da preocupação começam com a mudança da percepção de risco da

população decorrente da crescente complexidade da civilização industrial”. Com uma estrutura institucional inadequada diante dos riscos decorrentes do funcionamento destas sociedades industriais, os quais, dado sua complexidade, são impossíveis de serem calculados.

Segundo Seiffert (2013), a principal contribuição do ser humano para as mudanças climáticas está associada ao volume de emissões atmosféricas geradas nos processos produtivos. Para o autor, a importância dessa influência foi aumentando após a revolução industrial com o início do processo de queima acelerado de combustíveis fósseis para a geração de energia, liberando óxidos de carbono, nitrogênio e enxofre para a atmosfera.

Em um período mais recente, a partir da década de 1940, o consumo energético cresceu em ritmo acelerado, refletindo a mudança profunda da civilização humana nos últimos 70 anos: aumento da população mundial, industrialização e difusão de eletrodomésticos e veículos particulares, concentração de população em centros urbanos e expansão de infraestrutura. De acordo com o autor, é previsto que algumas destas mudanças ainda estejam ocorrendo nos países em desenvolvimento, promovendo um aumento do consumo energético (ISHIGURO, 2002, p. 12).

De acordo com Leite (2013), o consumo de energia mundial cresceu mais rapidamente que a população e a produção de bens e serviços, sendo o suprimento de energia baseado principalmente no consumo de combustíveis fósseis. De acordo com o autor (2013), o mundo tem atravessado, no início do século XXI, um período de incerteza e preocupação, causado pela crise financeira e pela comprovação da gravidade da mudança climática. Neste contexto, o crescente aumento do consumo (por parte de alguns países, em especial os emergentes) e o esforço pelo crescimento econômico, juntamente com preocupações ambientais motivaram novos estudos sobre as mudanças climáticas, aquecimento global e outras ameaças.

Ainda que a questão ambiental seja um dos principais temas discutidos neste início de século, o primeiro estudo rigoroso sobre o aquecimento global foi realizado por cientistas da Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos em 1979, dando origem a um debate sobre questões associadas a este problema como (1) o questionamento do grau de responsabilidade da ação humana, (2) a verificação dos efeitos das mudanças climáticas, se são iminentes e irreversíveis e (3) a busca por soluções e alternativas para impedir que o problema se agrave. Neste sentido, algumas das sugestões foram direcionadas às alterações nas

matrizes energéticas. Seiffert (2013, p. 13) destaca que a adoção de alternativas energéticas é determinante para a definição do nível de sustentabilidade de uma nação, pois coloca em evidência necessidade de alteração na matriz energética, que incorpore aspectos qualitativos e quantitativos, tanto em países em desenvolvimento quanto em países desenvolvidos.

Segundo Pinto Junior *et al.* (2007), o principal condicionante das políticas energéticas no século XXI é a questão ambiental, pressionando governos a buscar melhor utilização de recursos e maior preservação ambiental. Neste sentido, o Protocolo de Quioto indica como prioridades (1) a restauração dos sistemas de transporte e energia; (2) a promoção do uso de fontes renováveis; (3) a limitação das emissões de metano no gerenciamento de resíduos e dos sistemas energéticos e (4) a redução do desmatamento através da proteção das florestas e outros sumidouros de carbono.

Para Ishiguro (2002), um fator que deve ser considerado na escolha da matriz energética é a competitividade econômica de cada fonte, especialmente nos investimentos para instalação e nos custos de geração de energia. Segundo o autor, o custo depende de uma série de fatores como a disponibilidade local do tipo de combustível, fonte ou matéria prima utilizada, o custo e a disponibilidade da mão de obra e aspectos tecnológicos. Bronzatti e Iarozinski Neto (2008) consideram que outros fatores também são importantes para a decisão da composição da matriz energética como o potencial de produção e a probabilidade do crescimento de reservas.

O conceito da alteração da matriz energética é que os países deveriam buscar fontes de energia renováveis e menos poluentes, ajudando a mitigar os efeitos das mudanças climáticas e aquecimento global. Neste sentido, devem ser consideradas para a tomada de decisão questões relativas às reservas energéticas e limitações de cada país, capacidade de aumentar a eficiência na geração de energia com a implementação de inovações tecnológicas e, também relevante, os custos tecnológicos e de produção de cada fonte energética.

É importante notar que, enquanto os custos nivelados são uma medida resumo conveniente da competitividade global das diferentes tecnologias de geração, decisões reais de investimento planta são afetadas pelas características tecnológicas e regionais específicas de um projeto, que envolvem inúmeras outras considerações. A taxa de utilização projetada, que depende do formato da carga e do *mix* de recurso existente em uma área onde é necessária uma capacidade adicional, é um desses fatores. O *mix* de recursos existentes em uma região pode afetar diretamente a viabilidade

econômica de um novo investimento através do seu efeito sobre a economia em torno do deslocamento dos recursos existentes (EIA, 2013).

Segundo Bermann (2001), o uso eficiente de energia se constitui em um pressuposto essencial para a concretização de uma estratégia energética em bases sustentáveis. Com o aumento da eficiência energética, vários benefícios diretos e indiretos ao meio ambiente tornam-se evidentes, como o aumento de produtividade, redução de custos, redução de contaminações e conservação dos recursos naturais.

A eficiência energética pressupõe a implementação de estratégias e medidas para combater o desperdício de energia ao longo do processo de produção e aumentar a eficiência no seu uso. A aplicação dessa perspectiva tende a implicar alterações no processo que são resultado de (1) modificações no processo de produção (mudanças de equipamentos, eliminação de processo, capacitação e aprimoramento de aquisição e estocagem de insumos); (2) substituição de insumos ou matérias-primas ou modificações no produto pelo uso de materiais reciclados; (3) utilização de insumos e matérias-primas alternativos menos tóxicos (com menor poder de degradação ambiental); (4) implementação de melhorias de infraestrutura do processo e (5) implementações de modificações tecnológicas (SEIFFERT, 2013, p. 123).

Para Leite (2013), há uma expectativa positiva com relação ao meio ambiente e ao aquecimento global baseado nos avanços tecnológicos e nas energias renováveis. Segundo o autor (LEITE, 2013, p. 19), o fenômeno da desaceleração do crescimento demográfico tem ocorrido simultaneamente com a aceleração do desenvolvimento científico e tecnológico, acompanhado pela mudança de hábitos da sociedade.

Bronzatti e Iarozinski Neto (2008), baseados em dados da Turkenburg Utrecht University, fizeram um levantamento dos custos de geração de energia de cada fonte energética (combustíveis fósseis, energia nuclear e fontes renováveis). Como resultado, os pesquisadores identificaram que o petróleo é a fonte energética como menor custo de geração enquanto a eólica e solar apresentam os maiores custos. De acordo com os autores (2008),

[...] para a energia eólica e solar, a maior parte do custo ainda advém do investimento na infraestrutura de geração, eficiência de geração, fator de disponibilidade e manutenção, o que indica que as respectivas tecnologias de produção não estão no seu período de maturidade e têm pouca difusão no mercado (BRONZATTI; IAROZINSKI NETO, 2008, p. 12).

Com um custo de geração de energia de US\$ 9,60 por megawatt-hora, o petróleo é a fonte energética mais barata, enquanto a energia solar, com US\$ 185,00 por megawatt-hora é a mais cara (BRONZATTI; IAROZINSKI NETO, 2008). Sob o ponto de vista estritamente econômico, as fontes mais limpas (solar e eólica) deveriam ser descartadas, contudo são as que menos agredem o meio ambiente. Além de seu baixo custo relativo do petróleo, Hinrichs, Kleinbach e Reis (2012) destacam que o petróleo alimentou a maior parte do aumento do consumo desde a primeira metade do século XX, devido também à sua adaptabilidade a diversos usos como aquecimento, transporte e produção de energia. Os dados da pesquisa de Bronzatti e Iarozinski Neto (2008) são apresentados no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Custo de geração de energia a partir das principais fontes energéticas

Fonte: Bronzatti e Iarozinski Neto (2008)

Em uma publicação mais recente, foram levantados os investimentos e custos para a construção e operação de plantas para geração de energia pela Agência Internacional de Energia (EIA). Segundo a EIA (2013), corroborando os estudos de Bronzatti e Iarozinski Neto (2008), a energia solar (térmica e fotovoltaica) e a eólica (quando estruturada no mar) são as mais caras, tanto no investimento quanto no custo total. Estas fontes, no entanto, apresentam apenas custos fixos de operações e manutenção, sem ter custos variáveis, o que dilui os custos em longo prazo. Os dados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Custo Médio¹⁶ de investimento e operações por tipo de fonte energética

Tipo de Planta	Custo de capital ¹⁷	Operações e Manutenção (Fixo)	Operações e Manutenção (Variável)	Investimento de transmissão	Custo total do sistema
Fontes Não renováveis					
Carvão Convencional	65,7	4,1	29,2	1,2	100,1
Carvão Avançado	84,4	6,8	30,7	1,2	123,0
Carvão Avançado com CCS ¹⁸	88,4	8,8	37,2	1,2	135,5
Gás Natural					
Ciclo Convencional	15,8	1,7	48,4	1,2	67,1
Ciclo Combinado Avançado	17,4	2,0	45,0	1,2	65,6
Ciclo Combinado Avançado com CCS	34,0	4,1	54,1	1,2	93,4
Convencional de turbina de combustão	44,2	2,7	80,0	3,4	130,3
Avançada combustão da turbina	30,4	2,6	68,2	3,4	104,6
Avançada Nuclear	83,4	11,6	12,3	1,1	108,4
Renováveis					
Geotérmica (gêisers)	76,2	12,0	0,0	1,4	89,6
Biomassa	53,2	14,3	42,3	1,2	111,0
Eólica	70,3	13,1	0,0	3,2	86,6
Eólica (no mar)	193,4	22,4	0,0	5,7	221,5
Solar Fotovoltaica	130,4	9,9	0,0	4,0	144,3
Solar Térmica	214,2	41,4	0,0	5,9	261,5
Hidrelétrica	78,1	4,1	6,1	2,0	90,3

Fonte: EIA (2013)

Se, por um lado, as fontes limpas necessitam de altos investimentos e tem um custo de geração alto, por outro lado são as fontes menos poluentes. Da mesma forma, os combustíveis fósseis são as fontes energéticas com custo baixo custo relativo, porém são os maiores emissores de dióxido de carbono para a atmosfera. Um levantamento feito pela Associação Brasileira de Energia Nuclear (ABEN, 2008), indica que o carvão, o petróleo e o gás natural são os principais emissores de gases de efeito estufa sendo que, dentre eles, o gás natural é considerado mais limpo. Os recursos renováveis (energia hidrelétrica, solar e eólica) são menos emissores de GEE, juntamente com a energia nuclear. O Gráfico 6 apresenta os dados das emissões por fonte energética.

¹⁶ Custo Médio (US\$ 2011/MWh) para as plantas que entram de serviço em 2018

¹⁷ Os custos de capital envolvem custos decorridos da aquisição de terrenos, edifícios, construção e na aquisição de equipamentos.

¹⁸ Controle e Sequestro de Carbono

Gráfico 6 - Emissões de Carbono por fonte energética

Fonte: ABEN (2008)

Pinto Junior *et al.* (2007) destacam a diferença de rendimentos entre as fontes e tecnologias para discutir a questão da equivalência entre as fontes. Segundo os autores, estabelecer equivalência entre as fontes energéticas é uma tarefa complexa, que faz uso de critérios físicos, técnicos e econômicos. Baseado nas propriedades físicas da energia, são avaliadas a capacidade de produzir trabalho (energia mecânica potencial) e a capacidade de produzir calor (energia térmica potencial). As equivalências técnicas levam em conta os rendimentos na transformação e utilização de energia, enquanto as econômicas baseiam-se na relação entre custo e preços.

Spadaro, Langlois e Hamilton (2000) apontam que a evolução tecnológica tende a reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Os autores, baseados na tecnologia de 1990 avaliaram as emissões diretas de carbono e emissões da cadeia produtiva em uma série de tipo de fontes energéticas. Segundo o estudo, a evolução da tecnologia permite uma importante redução nas emissões (ajudando na resolução do problema climático), em especial nos combustíveis fósseis. Os autores também apresentam as demais fontes energéticas, mais caras, contudo mais limpas. Os dados do trabalho de Spadaro, Langlois e Hamilton (2000) são apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Emissão de carbono na energia elétrica

Fonte: Spadaro, Langlois e Hamilton (2000)

A possibilidade de comparar as fontes em termos de quantidade de energia primária deu margem à construção da chamada equivalência em energia primária, fazendo com que o conteúdo energético deixasse de ser expresso em termos de energia térmica ou potencial para ser expresso em uma dada quantidade da fonte primária principal no sistema (que no caso dos países é expressa em óleo equivalente).

Segundo Rosa, Fraceto e Moschini-Carlos (2012), energia é um recurso fundamental para o desenvolvimento dos países e é vista de maneira estratégica no cenário internacional. De acordo com os autores, as fontes energéticas podem ser classificadas como renováveis (água,

vento, sol e biomassa) e fontes não renováveis, o que inclui os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) além da energia nuclear (minérios radioativos como o urânio). Baseado nesta classificação, são apresentadas as fontes energéticas na seguinte ordem: combustíveis fósseis, energia nuclear e fontes renováveis.

3.1 Combustíveis Fósseis

Por definição, combustível fóssil é o grupo de substâncias originadas pela fossilização de material orgânico, formada por meio de processos naturais como a decomposição de organismos soterrados. São fontes energéticas finitas e não renováveis, com alto teor de carbono e, desta forma, altamente poluente (MAGNOLI; ARAUJO, 2001). São fontes fósseis o petróleo, carvão e gás natural.

De acordo com a ANEEL (2008), o processo de produção de energia é similar em todas as usinas que utilizam como matéria-prima os combustíveis fósseis em estado sólido ou líquido. De maneira simplificada, a matéria prima é transportada até a usina, estocada e queimada em uma câmara de combustão (liberando o carbono para a atmosfera). Como resultado, o calor obtido nesse processo é usado para aquecer e aumentar a pressão da água, que se transforma em vapor, movimentando as turbinas que transformam a energia térmica em energia mecânica e, por meio de um gerador, ocorre a transformação da energia mecânica em energia elétrica. A seguir são apresentadas as principais fontes de combustíveis fósseis e suas principais características e peculiaridades.

3.1.1 Petróleo

O petróleo é um óleo inflamável e tem sua origem na decomposição de matéria orgânica, geralmente de fauna marinha (plantas, animais marinhos e vegetação) que, submetido a altas pressões e temperaturas associadas ao aterramento profundo durante milhões de anos, é convertida em petróleo. Nestas condições, o petróleo pode migrar para rochas adjacentes formando depósitos (como arenito, xisto e calcário, que absorvem o petróleo), das quais pode ser extraído (HINRICHS, KLEINBACH E REIS, 2012, P. 245).

Com o objetivo de encontrar e dimensionar o volume de reservas existentes são realizados estudos geológicos e geofísicos nas áreas sedimentares. Posteriormente é feita a perfuração (abertura de um poço) para comprovar a existência do petróleo e, em caso positivo, abertura de outros poços para avaliar a extensão da jazida. Com base nestas informações e na análise de mercado (oferta e demanda, cotações presentes e futuras do petróleo no mercado internacional) é determinado se o petróleo descoberto é comercialmente viável (ANEEL, 2008).

Os tipos de produtos derivados do petróleo dependem da qualidade do petróleo, do tipo de solo e da composição química. São classificados segundo sua densidade: leve (que dá origem à gasolina, GLP e naftas), médio (que dá origem ao óleo diesel e querosene) e o tipo pesado (que dá origem à óleos combustíveis e asfaltos). As maiores reservas de petróleo leve são encontradas em países do Oriente Médio enquanto as maiores reservas do tipo pesado são encontrados no Brasil e Venezuela. O petróleo de densidade média é encontrado em vários países. Como o petróleo extraído das reservas (petróleo cru) não tem aplicação direta para a indústria, sua utilização exige o processamento deste petróleo (refino), pelo qual são obtidos seus derivados (gás liquefeito ou gás de cozinha, gasolina, nafta, óleo diesel, querosene de aviação e de iluminação, óleo combustível, asfalto, lubrificante, combustível marítimo, solventes, parafinas e coque de petróleo). Assim, a cadeia produtiva do petróleo é compreendida pela (1) extração; (2) transporte do óleo cru (oleodutos ou navios), refino e distribuição (ANEEL, 2008).

A descoberta realizada em 1859 em Titusville (Pensilvânia, nos Estados Unidos) transformou o petróleo na mais competitiva fonte para a indústria energética e fundou a base tecnológica do desenvolvimento do século XX. O ingresso do petróleo no cenário internacional fez com que as discussões do setor energético deixassem de ser estritamente econômicas, tornando-se geradora de conflitos de interesses entre países, empresas e governos. Segundo Pinto Junior *et al.* (2007),

[...] o exame dos fatores econômicos e políticos na evolução da indústria mundial do petróleo tem como ponto de partida o reconhecimento da crescente interdependência criada pela indústria mundial do petróleo entre essa complexa e estruturalmente organizada gama de agentes, ao longo do período. O conceito de geopolítica, sempre referido ao tema petróleo, designa o objetivo (possível ou real) das nações de controlar os meios de produção próprios e das outras nações para gerar mais valor para si próprias, em face de uma regulação mundial inadequada e insuficiente para lidar com essa realidade. O petróleo, enquanto chave da prosperidade das nações,

desde o início do século XX, foi impregnado por esse desígnio (PINTO JUNIOR ET AL., 2007, p. 73).

Apesar de já ter sido usado por diversos povos (romanos, chineses e incas) em várias regiões do planeta, o óleo inflamável começou a ser utilizado em maior escala pelos Estados Unidos a partir de meados do século XIX como substituto do carvão mineral (produção de vapor) e do óleo de baleia (iluminação). Com a invenção do motor à explosão, ou motor de combustão interna, em 1870 (II Revolução Industrial), e a massificação do uso desta tecnologia em automóveis por Henry Ford, o uso desta fonte energética teve crescimento exponencial a partir do início do século XX, fazendo com que o petróleo se tornasse a principal fonte da matriz energética mundial. Além do uso na área de transportes, em especial na indústria automobilística, outros derivados passaram a ser utilizados na indústria para a fabricação de materiais de construção, embalagens, tintas, fertilizantes, farmacêuticos, plásticos, tecidos sintéticos, gomas de mascar e batons (ANEEL, 2008).

Considerando a importância do petróleo na matriz energética dos países, no setor de transportes, produção de eletricidade e indústria de maneira geral, o controle das reservas e o domínio das tecnologias de extração e refino são vantagens estratégicas para os países e, desta forma, têm importância geopolítica e conseqüentemente, importância para a segurança nacional. Em razão disto, é comum encontrar exemplos na história em que o petróleo foi relacionado à guerras e crises internacionais. Assim, dado seu caráter estratégico e a necessidade de pesados investimentos para exploração, extração, refino e infraestrutura, a indústria do petróleo tem como características a tendência de controle por parte do Estado¹⁹ nas atividades de exploração e prospecção e a presença de poucas companhias verticalizadas que dominam o mercado internacional, como é o caso das chamadas “Sete Irmãs”²⁰.

Em 1960, os países árabes constituíram a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) em resposta ao monopólio das grandes companhias de petróleo.

¹⁹ No Brasil, que exerceu o monopólio da extração, transporte e refino até 1995, “a descoberta de petróleo na camada pré-sal deu origem a uma grande controvérsia sobre se o Estado deveria ser o operador ou o poder concedente das atividades no local” (ANEEL, 2008, p. 110).

²⁰ “Sete Irmãs” é o nome dado às sete maiores companhias de petróleo, que dominaram o mercado petrolífero internacional até os anos 1960. Seu poder começou a declinar com a formação da OPEP em que os países produtores começaram a controlar a produção e o preço. As companhias que formaram este grupo foram: (1) Royal Dutch Shell (atualmente Shell); (2) Anglo-Persian Oil Company (Atualmente é conhecida pelas iniciais BP); (3) Standard Oil of New Jersey (atualmente, ExxonMobil); (4) Standard Oil of New York (fundiu-se com a Exxon, formando a ExxonMobil); (5) Texaco (fundiu-se com a Chevron); (6) Standard Oil of California (incorporou a Gulf Oil e posteriormente se fundiu com a Texaco) e (7) Gulf Oil (absorvida pela Chevron, posteriormente ChevronTexaco).

Uma das mais importantes crises, ocorrida em 1973, o primeiro choque do petróleo fez com que os países buscassem fontes alternativas de energia, dando origem ao investimento em energia nuclear, hidrelétricas e etanol em vários países do mundo. O primeiro choque do petróleo é um exemplo da conjugação de fatores geopolíticos. De acordo com Pinto Junior *et al.* (2007), entre 1950 e 1974 a demanda mundial do preço do petróleo cresceu a uma taxa média anual de 9,5% ao ano. Em 1973, com a Guerra do Yom Kippur, os países árabes ameaçaram reduzir em 5% as exportações para os países que apoiassem Israel. Como resultado, um dos desfechos desta cisma foi o aumento do preço do petróleo. Além do choque do petróleo e das perspectivas, na época, de esgotamento das reservas de petróleo, a década de 70 ainda é marcada pelo aumento das preocupações ambientais, reforçando a necessidade de uso de fontes alternativas de energia.

De acordo com Hinrichs, Kleinbach e Reis (2012), no início da guerra entre árabes e israelenses em outubro de 1973, os países árabes (membros da OPEP) impuseram um embargo contra alguns países ocidentais, incluindo os Estados Unidos, reduzindo sua produção. Entre 1978 e 1979, a revolução iraniana interrompeu a produção de quase 6 milhões de barris de petróleo diários. Por fim, depois de várias oscilações na década de 80, a invasão do Kuwait em 1990 desencadeou um novo aumento no preço do petróleo no mundo.

Das crises, as mais representativas ocorreram na década de 70. Em 1973, os países produtores do Oriente Médio, reunidos na Opep, decidiram reduzir o volume produzido a fim de provocar uma alta do preço do barril (que passou de US\$ 2,70 para US\$ 11,20). Com isso, enfrentaram a pressão das grandes companhias petrolíferas, que dominavam as quatro fases da cadeia produtiva: extração, transporte, refino e distribuição. Em 1979, a deposição do xá do Irã, um dos maiores fornecedores mundiais do óleo, fez com que o preço do barril novamente desse um salto e superasse US\$ 40,00. As duas crises provocaram problemas econômicos em vários países – inclusive um racionamento de derivados no Brasil - e sinalizaram para a necessidade de redução da dependência da substância (ANEEL, 2008, p. 108).

O gráfico a seguir apresenta a evolução do preço do petróleo desde o início da Segunda Guerra Mundial. É possível observar no mapa o aumento significativo na década de 70, resultado da guerra do Yom Kippur (em 1973) e da revolução iraniana (em 1979). Outras oscilações ocorreram com a invasão do Kwait e consequente guerra do Golfo (1990), o atentado terrorista aos Estados Unidos (2001), a invasão do Iraque (2003), recessão de 2008 (com queda no preço do petróleo) e a primavera árabe em 2011.

Gráfico 7 - Evolução do preço do petróleo (1939-2013)

Fonte: BP (2013)

De acordo com Pinto Junior *et al.* (2007), atualmente a maneira mais econômica de produzir derivados de petróleo (gasolina, diesel, querosene, insumos petroquímicos, etc.) é por meio do refino do petróleo convencional, contudo, existem várias alternativas tecnológicas que permitem a obtenção destes derivados, como: (1) a produção de derivados a partir do petróleo não convencional (petróleo pesado, ultrapesado, xisto betuminoso e areais betuminosas) e (2) produção de derivados sintéticos a partir de outras fontes de energia (carvão, gás natural e biomassa).

Com base nos dados de 2007, são apresentadas na Figura 8 as reservas mundiais de petróleo. A figura aponta que as principais reservas mundiais de petróleo são localizadas no Oriente Médio, Rússia, Venezuela, parte da América do Norte e da África, além de outras regiões espalhadas pelo globo (em especial na América do Sul, África e Ásia).

Figura 8 - Reservas mundiais de petróleo

Fonte: (BP, 2008 *apud* ANEEL, 2008)

De acordo com a BP (2013), o Oriente Médio detêm as maiores reservas de petróleo, com cerca de 48,4% do petróleo mundial. A Arábia Saudita, durante quase todo o período, deteve as maiores reservas de petróleo, tendo perdido a posição para a Venezuela em 2010. Segundo dados de 2012, as cinco maiores reservas mundiais de petróleo se encontram, respectivamente, na Venezuela, Arábia Saudita, Canadá, Irã e Iraque. Dentre os países do G20, a Rússia ocupa a 8ª posição, os Estados Unidos a 11ª posição, a China a 14ª posição e o Brasil a 15ª posição. Segundo os dados analisados, sete países do G20 estão entre as 15 primeiras posições nas reservas mundiais de petróleo. Como consequência, estes países tendem a fazer uso e aproveitar as reservas domésticas gerando impactos ambientais.

Os impactos ambientais do petróleo não estão limitados às emissões de gases de efeito estufa. A exploração, prospecção e produção podem provocar alterações e degradação do solo. Há também a possibilidade da ocorrência de vazamentos do óleo no mar, colocando em risco a fauna e a flora aquática. Além dos impactos ambientais, a descoberta de um campo de petróleo tem poder para mudar as características socioeconômicas da região, aumentando a atividade econômica, gerando empregos e renda, além de servir como um polo de atração regional. Isso ocorre em decorrência da necessidade de instalação de uma infraestrutura pesada e do pagamento de *royalties* pelas empresas petrolíferas, gerando valorização imobiliária, aumento de vendas do comércio e investimentos públicos municipais (ANEEL, 2008).

3.1.2 Gás Natural

O gás natural é combustível fóssil, formado pela decomposição da matéria orgânica (animais e vegetais) expostos ao calor e pressão durante milhões de anos. Segundo Pinto Junior *et al.* (2007), o gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos encontrado associado ou não ao petróleo em bacias sedimentares. Suas características de elevado poder calorífico, alto rendimento energético e baixos níveis de emissões de gases de efeito estufa o favorecem na substituição de outros combustíveis fósseis mais agressivos ao meio ambiente, podendo ser considerado um combustível mais limpo quando comparado ao petróleo e ao carvão.

Composto por átomos de carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos), o gás natural é encontrado em estado volátil no subsolo, em rochas porosas isoladas do meio ambiente por uma camada impermeável, sendo o gás metano o elemento predominante. Outros componentes (etano, propano, butano, gás carbônico, nitrogênio, água, ácido clorídrico e metanol) também são encontrados e fazem parte da composição do gás natural em menores proporções.

Dada sua versatilidade, seu uso é relacionado aos diversos setores da economia (indústria, comércio, serviços e residências), pois pode ser utilizado na geração de energia elétrica, em motores de combustão no setor de transporte, como substituto do gás liquefeito de petróleo (GLP), na produção de chamas, calor e vapor. Em suas primeiras etapas de decomposição, a matéria orgânica de origem animal produz o petróleo, sendo que nos últimos estágios de degradação é produzido o gás natural, o que justifica a descoberta do gás natural tanto associado ao petróleo quanto em campos isolados (ANEEL, 2008).

De acordo com Mathias (2008), uma das limitações do desenvolvimento da indústria do gás natural está ligada à aspectos geográficos e características desta fonte energética. Como o gás natural é encontrado em estado gasoso à temperatura e pressão ambientes, as reservas de gás natural e eventual produção deveriam ficar próximas aos mercados consumidores, como forma de redução dos custos de transporte e construção de dutos. Estas condições limitaram inicialmente o desenvolvimento das indústrias no mundo, favorecendo alguns poucos países como a Rússia, países do norte da Europa e Estados Unidos.

Segundo Pinto Junior *et al.* (2007), a indústria do gás natural emprega um sistema tecnológico complexo no percurso do gás natural das reservas até os consumidores finais. De acordo com o autor, as atividades da indústria do gás natural são divididas em *upstream* (da exploração à produção) e *downstream* (do processamento à distribuição). Desta forma, sua cadeia produtiva envolve seis etapas: (1) Exploração; (2) Exploração; (3) Produção, Processamento em campo e Transporte; (4) Processamento; (5) Transporte e armazenamento e (6) Distribuição.

Fase	Característica
Exploração	Consiste na verificação de ocorrência ou não do gás natural em determinada área.
Exploração	Consiste na instalação da infraestrutura necessária à operação do poço e nas atividades de perfuração, completação e recompletação de poços (colocação das cabeças de vedação, válvulas, comandos remotos e demais acessórios que permitirão a produção)
Produção, Processamento em campo e Transporte	Consiste na separação do gás natural do petróleo em caso de o gás ser associado e o transporte até a base de armazenamento.
Processamento	Consiste na retirada de frações pesadas no qual são realizadas a compressão do gás para a terra ou para a estação de tratamento
Transporte e armazenamento	Esta etapa é comum em países com clima frio, em que o gás natural é estocado para uso no inverno.
Distribuição	Consiste na que é a disponibilização do gás natural para o consumidor final

Quadro 5 - Cadeia produtiva do gás natural

Fonte: ANEEL (2008)

A indústria do gás natural pode ser considerada uma indústria antiga, cuja difusão foi dificultada pela concorrência com outras fontes de energia e pelos altos custos de transporte. Os choques do petróleo na década de 70, contudo, desencadearam um processo de profundas transformações nas matrizes energéticas mundiais, abrindo mercado para esta fonte energética, assim como para outras (hidrelétricas, etanol e outras fontes renováveis).

De acordo com Pinto Junior *et al.* (2007), a história da indústria do gás é anterior ao aproveitamento econômico do gás natural. Segundo o autor, com a descoberta do processo de gaseificação do carvão no fim do século XVIII, o gás era manufaturado a partir do carvão, sendo utilizado posteriormente pela empresa London and Westminster Gas Light and Coke Company no oferecimento de serviços de iluminação pública no ano de 1812.

Com a difusão da tecnologia, foram criadas novas empresas nos Estados Unidos e no Reino Unido, sendo que em 1866 havia cerca de 970 empresas de iluminação operando nos Estados Unidos enquanto no Reino Unido, em 1882, havia cerca de 500 empresas neste mesmo setor.

O uso industrial do gás natural teve início em 1821 quando uma reserva foi descoberta acidentalmente em Fredonia, estado de Nova York, nos Estados Unidos. De acordo com Hinrichs, Kleinbach e Reis (2012), antes que a indústria pudesse se expandir, era necessário que gasodutos fossem desenvolvidos para que o combustível chegasse aos consumidores.

No decorrer da história, o gás natural tem sido colocado ora como problema, ora como solução. No século XIX, apesar de seu uso na área de iluminação pública, o gás natural era considerado um problema ao ser encontrado junto com o petróleo, pois exigia procedimentos de segurança no processo de extração do petróleo, o que encarecia sua prospecção. Posteriormente, após a crise do petróleo e das demandas ambientais, o gás natural passou a ser uma alternativa menos agressiva ao meio ambiente e com isso teve, a partir da década de 80, um crescimento acelerado se tornando o combustível fóssil de maior crescimento no mundo, aquecendo sua comercialização entre os países.

O interesse pelo gás natural está diretamente relacionado à busca de alternativas ao petróleo e de fontes menos agressivas ao meio ambiente. Este comportamento resultou na intensificação das atividades de prospecção e exploração, particularmente entre os países em desenvolvimento. O resultado foi não só o aumento do volume, mas também a expansão geográfica das reservas provadas (ANEEL, 2008, p. 94).

Segundo a ANEEL (2008), o comércio do gás natural entre os países apresenta características peculiares. De acordo com a Agência, se por um lado o aumento da demanda estimula a expansão do consumo, por outro lado subordina os países consumidores à política externa do país fornecedor e às relações bilaterais entre os países, causando insegurança com relação ao suprimento. À exemplo disso, em 2006 a Rússia interrompeu o fornecimento do gás à Ucrânia, afetando a distribuição na Europa. Em 2007, na América Latina, houve uma redução do fornecimento do gás natural produzido pela Bolívia e pela Argentina, destinado ao Brasil, causando problemas entre os países e ameaças de apagões. Santos *et al.* (2002), ainda destacam o papel crescente do Oriente Médio, dono de grandes reservas de gás natural, que tem se estruturado para disputar com a Rússia o fornecimento de gás para a Europa.

Mathias (2008) aponta os principais fluxos de comércio de gás natural, partindo das regiões produtoras em direção aos principais mercados. Com base neste mapa, é possível identificar interesses geopolíticos na Europa, grande consumidora com várias opções de fluxo de gás natural, além do mercado japonês, norte-americano, brasileiro e asiático.

Figura 9 - Fluxos de Gás Natural

Fonte: Mathias (2008)

No caso brasileiro, o uso do gás natural está condicionado à oferta total de gás disponível para atendimento do mercado brasileiro (acesso a reservas domésticas e importação), a disponibilidade de infraestrutura para escoamento até os mercados consumidores; e o uso do gás natural em outras aplicações, nos setores da indústria, do comércio e de serviços de transporte. Entre os impactos socioambientais positivos, há a geração de royalties para os municípios em que as usinas estão localizadas, aumento da atividade econômica gerando empregos e aumento no consumo, além de poder ser construída próxima aos centros de consumo, eliminando a necessidade de grandes linhas de transmissão para transporte da energia produzida às instalações de distribuição (ANEEL, 2008).

No setor industrial a competitividade depende dos custos de energia. De acordo com Lima (2007), o gás natural é o combustível que vem se caracterizando como a fonte energética que proporciona poupança energética, elevação dos níveis de produção, aumento da vida útil dos equipamentos e meio ambiente mais limpo, quando comparado aos demais combustíveis fósseis utilizados pelo setor industrial. Além destas características, o gás natural pode diminuir os custos operacionais da indústria por ser menos agressivos aos equipamentos e também pelo seu preço, considerado atrativo para os consumidores.

Em comparação aos demais combustíveis fósseis, o preço do gás natural gira em torno de 15% a 20% do preço do carvão e do petróleo. Em comparação ao petróleo, o gás natural tem

mantido um preço constante (girando em torno de 17% do preço do petróleo) enquanto em relação ao carvão, o preço do gás natural tem aumentado consideravelmente desde 1998. Este aumento é devido, dentre outros fatores, ao aumento do consumo de gás natural (aumento de demanda) em detrimento do consumo de carvão, mais poluente. Os dados relativos do preço do gás natural são apresentados no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Preço do gás natural em relação aos demais combustíveis fósseis

Fonte: Adaptado de BP (2013)

Para Santos *et al.* (2002), o aumento da importância do gás natural no mundo fez com que os países buscassem novas reservas, aumentando consideravelmente suas reservas de gás entre 1970 e 2000. Segundo os autores, as principais vantagens do gás natural ao relacionadas às grandes reservas, que garantem o suprimento em médio e longo prazos e, às vantagens ambientais.

A Figura 10 apresenta o mapa com as principais reservas mundiais de gás natural (ANEEL, 2008). A figura indica que as principais reservas de gás natural são localizadas na Rússia, Oriente Médio, Austrália, Estados Unidos e regiões isoladas no mundo (como Venezuela e países da África e América do Sul).

Figura 10 - Reservas mundiais de gás natural

Fonte: (BP, 2008 *apud* ANEEL, 2008)

Com dados mais atualizados do que a ANEEL (2008), a BP (2013) aponta que as maiores reservas de gás natural estão no Oriente Médio (43,0%) e Europa (31,2%), com destaque para o Irã (1ª maior reserva), Qatar (3ª maior reserva), Turquemenistão (4ª maior reserva), Arábia Saudita (6ª maior reserva) e Emirados Árabes Unidos (7ª maior reserva) no Oriente Médio e a Rússia (2ª maior reserva) na Europa. Outros países em destaque são os Estados Unidos (5ª maior reserva) e Venezuela (8ª maior reserva). Em relação à 2007, a principal alteração foi que a Rússia perdeu o primeiro posto para o Irã em 2010, sinalizando investimentos em prospecção deste tipo de fonte pelo país do oriente médio.

Dentre os países do G20, nove países estão entre as 20 maiores reservas deste tipo de combustível fóssil. Em relação aos demais combustíveis fósseis, a utilização do gás natural é menos agressiva ao meio ambiente e por isso o gás natural tem uma vantagem significativa em relação aos demais combustíveis fósseis na questão do aquecimento global. De acordo com os autores,

[...] em substituição aos demais combustíveis fósseis, o gás provoca grande redução de emissões de CO₂ (cerca de 20 a 30% menos que o óleo combustível e 40 a 50% menos que os combustíveis sólidos como o carvão). No estágio tecnológico atual do uso de combustíveis fósseis, o gás natural é o menos poluente. A utilização desse combustível em equipamentos adaptados e adequados para a queima de gás também elimina a emissão de óxido de enxofre, fuligem e materiais particulados, enquanto as emissões de CO e NO_x podem ser relativamente bem controladas (SANTOS *ET AL.* 2002, pp. 93-94).

3.1.3 Carvão

O carvão é o combustível fóssil de maior disponibilidade no mundo, tendo sido utilizado pelo homem desde a antiguidade. Seu uso em larga escala se deu no século XVIII, em decorrência na Revolução Industrial, utilizado na geração de vapor para movimentar as máquinas, sendo que no final do século XIX também foi aproveitado na produção de energia elétrica. Com o desenvolvimento de motores de combustão interna, o carvão perdeu espaço para o petróleo na matriz energética mundial durante a primeira metade do século XX, voltando a ser uma importante alternativa na década de 70 em decorrência do choque do petróleo (ANEEL, 2008).

São conhecidos dois tipos básicos de carvão: o carvão vegetal (obtido a partir da carbonização da lenha) e o carvão mineral (formado pela decomposição da matéria orgânica expostos ao calor e pressão durante milhões de anos). O carvão é composto por átomos de carbono, oxigênio, nitrogênio, enxofre e são associados a impurezas (minerais e elementos rochosos). Quanto maior for a incidência de carvão, maior poder calorífico (medido em kilocaloria obtida por quilo do combustível) terá o minério.

Segundo a Agência Internacional de Energia, o carvão é dividido em quatro categorias (linhito, sub-betuminoso, betuminoso e antracito), de acordo com a sua qualidade e poder calorífico, teor de matéria volátil, teor de carbono, aglutinação e propriedades de coque ou alguma combinação de dois ou mais destes critérios. A classificação internacional do carvão, segundo a Comissão Econômica para Europa, é subdividida em duas grandes categorias: a hulha, sendo considerado o carvão de alta qualidade e o carvão marrom, de baixa qualidade (IEA, 2009). O Quadro 6 apresenta os tipos de carvão, suas características e poder calorífico.

Tipo	Característica	Poder Calorífico
Carvão vegetal	Mais utilizado no Brasil (maior produtor mundial)	Baixo poder calorífico
	Utilizado nas termelétricas locais	Alta quantidade de impurezas (minerais e elementos rochosos)
Carvão mineral	Tipo mais utilizado e comercializado no mundo	Alto poder calorífico Quantidade de impurezas variam determinando a qualidade e classificando o minério em linhito e sub-betuminoso (baixa qualidade) e hulha, subdividida nos tipos betuminoso e antracito (alta qualidade)

Quadro 6 - Tipos de carvão e poder calorífico

Fonte: ANEEL (2008)

De acordo com Scheweinfurth (2009, p. 15), no passado, a qualidade do carvão era avaliada apenas por seu poder calorífico e a emissão de cinzas, sendo que um carvão de alta qualidade produzia grande quantidade de calor com menor emissão de poluentes. Estudos atuais, no entanto, abrangem os aspectos da origem e da composição do carvão, a fim de compreender os vários fatores envolvidos na determinação da qualidade do carvão, como por exemplo, como e onde encontrar o carvão mais apropriado para um uso específico (produção de energia, produtos químicos, combustíveis sintéticos, recuperação de minerais, etc.) e como limpar o carvão para tornar a sua utilização mais ambientalmente e industrialmente aceitável. Segundo o autor, atualmente a preocupação com a saúde humana, o ambiente, a demanda de energia e o fornecimento de algumas matérias-primas têm ampliado o nosso conceito de qualidade do carvão, demandando maior conhecimento sobre esta fonte energética.

De acordo com Rosa, Fraceto e Moschini-Carlos (2012), por definição, carvão é todo mineral é todo material cristalino com teor de carbono livre entre 30 e 100%, sendo que quanto maior o teor de carbono, maior o conteúdo energético. Desta forma, a classificação dos tipos de carvão segundo seu teor de carbono e conteúdo energético é apresentada no Quadro 7.

Classificação	Carbono (%)	Conteúdo Energético (Btu/lb)
Linhito	30	5.000 - 7.000
Sub-Betuminoso	40	8000 - 10.000
Betuminoso	50 - 70	11.000 - 15.000
Antracito	90	14.000

Quadro 7 - Classificação do carvão segundo teor de carbono conteúdo energético

Fonte: Hinrichs, Kleinbach e Reis (2012)

Os tipos de carvão, segmentados por qualidade, são utilizados nas mais diversas atividades econômicas. O carvão de baixa qualidade (linhito e sub-betuminoso) é utilizado na geração de grande parte de energia elétrica e produção elétrica para uso industrial, enquanto o carvão de alta qualidade, com maior poder calorífico, é utilizado para uso metalúrgico na fabricação de ferro e aço, uso industrial (como fonte térmica para geração de vapor) e também uso doméstico na fabricação de combustíveis sintéticos (ANEEL, 2008).

De acordo com Hinrichs, Kleinbach e Reis (2012), o carvão pode ser convertido nas formas de gás natural (gaseificação) e óleo (liquefação), conhecidas como combustíveis sintéticos. A gaseificação, assim como a liquefação, é um processo que exige adição de hidrogênio, com a

separação posterior dos gases e líquidos produzidos. Seu uso, no entanto, ainda não é economicamente viável por causa dos altos custos e da tecnologia usada, condição que tende a ser eliminada com o desenvolvimento de novas tecnologias. A Figura 11 apresenta o uso do carvão e o percentual das reservas mundiais.

Figura 11 - Tipos de carvão, reservas e usos

Fonte: ANEEL (2008)

A principal aplicação do carvão mineral no mundo é a geração de energia elétrica por meio de usinas termelétricas, seguido da geração de calor (energia térmica) necessária para o uso em processos industriais, em especial nas siderúrgicas. A cogeração, utilização do vapor gerado nas indústrias para a produção de energia elétrica, têm crescido nos últimos anos. Rosa, Fraceto e Moschini-Carlos (2012) ainda consideram que dentre outras aplicações, o carvão é bastante demandado como combustível e como redutor do minério de ferro em siderúrgicas.

O ciclo de produção do carvão envolve etapas até sua transformação em energia térmica ou elétrica. Primeiramente o carvão é extraído do solo, fragmentado e armazenado para, posteriormente, ser transportado e armazenado em uma usina. Posteriormente o carvão é processado e transformado em pó, permitindo um melhor aproveitamento térmico ao ser queimado nas caldeiras. O calor liberado por esta queima é transformado em vapor, que por sua vez é transformada em energia mecânica que movimentará a turbina do gerador de energia elétrica. No ciclo do carvão, o transporte é a etapa mais dispendiosa de sua cadeia produtiva, sendo que são transportados apenas os tipos de carvão com alto poder calorífico, que são destinados ao comércio internacional (ANEEL, 2008).

Segundo a BP (2013), as principais reservas de carvão mineral estão localizadas na Ásia, América do Norte e em parte da Europa, sendo que as reservas do oriente médio, África e América Latina, juntos, correspondem a aproximadamente 5,3% do total mundial. Dentre os países do G20, os dados da BP (2013) indicam que no Brasil e na Coreia do Sul não há reservas significativas de carvão de alta qualidade (antracito e betuminoso) enquanto que na África do Sul não há reservas significativas de carvão de baixa qualidade. Segundo dados da BP (2013), destacados na Tabela 5, as seis maiores reservas de carvão mineral de alta qualidade, que correspondem a 84,9% das reservas deste tipo de carvão, estão em países do G20. O Brasil aparece apenas na 8ª posição dentre os países com reservas de baixa qualidade e na 14ª posição no total de reservas mundiais. Dos países do G20, apenas a Arábia Saudita, Irã, Argentina, França e Itália não apresentam reservas significativas de carvão mineral e têm seus dados agrupados.

Tabela 5 - Principais reservas mundiais de carvão mineral

Alta Qualidade (antracito e betuminoso)	Baixa Qualidade (Sub betuminoso e linhito)	Total de reservas
Estados Unidos (26,8%)	Estados Unidos (28,2%)	Estados Unidos (27,6%)
China (15,4%)	Rússia (23,7%)	Rússia (18,2%)
Índia (13,9%)	China (11,5%)	China (13,3%)
Rússia (12,1%)	Alemanha (8,9%)	Austrália (8,9%)
Austrália (9,2%)	Austrália (8,6%)	Índia (7,0%)
África do Sul (7,5%)	Ucrânia (4,1%)	Alemanha (4,7%)

Fonte: BP (2013)

Os dados da BP (2013) ainda apontam que os países com maior produção são a China, Estados Unidos, Índia e Austrália, sempre ocupando as primeiras quatro posições entre 1997 e 2013. Em 1985 a China ultrapassou os Estados Unidos e se manteve como o país com maior produção mundial de carvão. Os demais países com maior produção de carvão são a Indonésia, Rússia, África do Sul e Alemanha, sendo o principal destaque a Indonésia que, passou da 26ª posição em 1990 para a 5ª posição em 2012.

De certa maneira a produção de carvão reflete a disponibilidade de reservas que o país detém. Com exceção da Rússia, os quatro maiores produtores estão entre os países com as maiores reservas. As reservas mundiais de carvão mineral são apresentadas na Figura 12.

Figura 12 - Reservas mundiais de carvão mineral

Fonte: (BP, 2008 *apud* ANEEL, 2008)

Com grandes reservas e relativamente baixo custo, a principal restrição do uso do carvão é o impacto socioambiental provocado em todas as etapas do processo de produção (degradação das áreas de mineração) e também no consumo (emissão de gases de efeito estufa). Com vistas nessa preocupação, em especial a partir da década de 70 com o início das conferências ambientais, o carvão vem sendo pressionado a ser substituído por fontes menos poluentes.

Dada a grande quantidade de reservas mundiais, relativamente bem distribuídas, e sua estabilidade de preços, a participação do carvão na matriz mundial ainda deve ser prolongada. Com reservas mundiais de cerca de 1 trilhão de toneladas, mantidas as taxas de consumo atuais, o carvão ainda estará disponível pelos próximos 150 anos (ROSA; FRACETO; MOSCHINI-CARLOS, 2012, p. 149). Neste sentido, as alterações nas matrizes energéticas, com vistas para a redução de emissão de GEE enfrenta um entrave. Os preços do carvão, por sua vez, seguem o mesmo padrão de crescimento dos preços do petróleo (Gráfico 9 e Gráfico 10) e do gás natural, contudo o preço relativo do carvão tem caído quando comparado aos demais combustíveis fósseis gás natural e petróleo (Gráfico 10).

O Gráfico 9 apresenta a evolução dos preços dos combustíveis fósseis. Nota-se que há uma tendência de crescimento mais evidente a partir de 1999, refletindo o padrão crescimento mundial que durou até 2008. Com a crise de 2008 a grande maioria dos países reduziu sua

produção e consumo, fazendo com que o preço destas fontes energéticas se reduzisse entre 2008 e 2009. Os preços do carvão e do petróleo são apresentados à esquerda do gráfico enquanto o preço do gás natural está destacado no lado direito do gráfico.

Gráfico 9 - Evolução dos preços dos combustíveis fósseis

Fonte: BP (2013)

Ao fazer a comparação entre o carvão e as demais fontes fósseis nota-se que há uma desvalorização no preço do carvão. Entre 1987 e 2012 o preço do carvão aumentou cerca de 196% enquanto o preço do petróleo e do gás natural aumentou, nos dois casos, mais de 500% no mesmo período. Isso sugere que a demanda pelo gás natural e pelo petróleo tem se mantido estimulada enquanto a demanda por carvão tem sido reduzida, o que pode significar uma mudança de postura no consumo energético dos países.

Uma das possíveis respostas para estas variações nos preços pode ser relacionada ao aumento do consumo de gás natural (menos poluente) em detrimento do consumo do carvão (fonte energética mais poluente) pela construção de estruturas de transporte dos gases das áreas produtoras para os grandes centros consumidores e pela determinação de acordos internacionais sobre redução de emissões, como o ocorrido em Quioto. A seguir, o Gráfico 10 apresenta a evolução do preço relativo do carvão entre 1987 e 2012.

Gráfico 10 - Preço do carvão em relação ao gás natural e petróleo

Fonte: BP (2013)

A preocupação ambiental têm fomentado pesquisas envolvendo melhoria dos processos tecnológicos a fim de permitir um melhor aproveitamento do poder calorífico do carvão e redução das emissões de gases de efeito estufa. Rosa, Fraceto e Moschini-Carlos (2012) apontam que, além da emissão de gases de efeito estufa, uma parcela considerável dos problemas ambientais associados ao carvão reside na mineração. Os autores (2012) destacam a liberação de gás metano em bolsões onde são extraídos os minério de carvão, além do processo de purificação do carvão (retirada de metais pesados e enxofre, que podem contaminar o meio ambiente).

Para a Agência Nacional de Energia Elétrica, o futuro da utilização do carvão está ligado a investimentos em obras de mitigação e em desenvolvimento de tecnologias limpas (*Clean Coal Technologies*),

[...] focados na redução de impurezas, diminuição de emissões das partículas com nitrogênio e enxofre (NO_x e SO_x) e redução da emissão de CO₂ por meio da captura e armazenamento de carbono. Atualmente, as rotas mais importantes de tecnologias limpas são a combustão pulverizada supercrítica, a combustão em leito fluidizado e a gaseificação integrada a ciclo combinado. [...] Já os efeitos das técnicas para sequestro de carbono serão sensíveis apenas no médio e longo prazo. Projeções apontam que testes em escala comercial serão realizados em unidades de geração até 2015. Neste caso, a primeira usina com emissão zero de CO₂ entraria em operação em 2020 (ANEEL, 2008, pp. 140-141).

3.1.4 Pré-Sal, *Shale Gas* e *Tight Oil*

A combinação de avanços tecnológicos e da elevação do preço do barril de petróleo abriu um leque de alternativas para o desenvolvimento de oportunidade de petróleo e gás em áreas, inicialmente sem viabilidade econômica e geologicamente de difícil acesso. Neste contexto, algumas fontes começaram a despontar e ser exploradas, como o pré-sal, o *shale gas* e o *tight oil*, sendo estes dois últimos conhecidos como formações de folhelhos (também conhecido como *shale* (CORADESQUI; SANTOS, 2013)

A descoberta do pré-sal no final de 2006 fez com que o Brasil se tornasse um importante ator no setor energético mundial. Com grandes reservas de petróleo na camada do pré-sal e tecnologia para extração, o Brasil passou a ser polo de atração e interesse geopolítico de diversos países. De acordo com Machado (2013),

[...] o destaque do Brasil no cenário mundial da energia, até as descobertas de óleo no pré-sal a partir de 2006, era a diversidade das fontes na matriz nacional, com o peso expressivo dos recursos renováveis como a hidroeletricidade e a biomassa – característica que se mantém. [...] O pré-sal, no entanto, com prováveis reservas de 50 a 70 bilhões de barris, mudou o paradigma energético brasileiro, com impacto indiscutível, seja qual for o destino que o modelo regulatório dê à riqueza, sobre a dinâmica da economia e a geopolítica do país, tendo em vista a natureza estratégica do petróleo (MACHADO, 2013, p. 11).

Para Garman e Johnson (2013), uma das mais importantes mudanças no setor energético é relacionada ao pré-sal na América do Sul (em especial no Brasil) e ao gás de xisto (*shale gas*) e às jazidas de petróleo de xisto ou compacto (*tight oil*) na América do Norte. Segundo os autores, até recentemente, os custos elevados e as dificuldades geológicas impediam o acesso a recursos energéticos que estavam contidos em rochas, contudo, nos últimos anos foram desenvolvidos métodos de extração do petróleo e gás armazenados nestas rochas, contribuindo para redução dos custos de extração. A mesma tecnologia utilizada para extrair o gás de xisto das rochas dos Estados Unidos pode ser utilizada para extração do *tight oil* de formações rochosas mais antigas. Garman e Johnson (2013) ainda apontam que as perspectivas de extração são promissoras em diversos mercados da América do Sul, Canadá, China, França, Iraque e Austrália. Com a extração do *shale gas* e do *tight oil*, os Estados Unidos recuperam o nível de produção de petróleo que tinham no passado, reduzindo sua dependência do petróleo do Oriente Médio, influenciando a geopolítica nesta área energética.

3.2 Energia Nuclear

A energia nuclear é a energia liberada, durante a fissão ou fusão dos núcleos atômicos, produzindo grande quantidade de calor que é utilizada para movimentar turbinas e gerar energia. Vários elementos (átomos) podem ser utilizados como fonte de energia nuclear, contudo o elemento radioativo mais utilizado tem sido o urânio.

A importância do minério urânio está em sua capacidade de radiação de seu núcleo (emissão e propagação da energia de um ponto a outro), cujas aplicações se estendem às mais diversas áreas como medicina, produção de combustíveis e geração de energia. O uso descontrolado dessa radiação pode provocar graves acidentes nucleares. De acordo com a ANEEL, (2008), a maior aplicação do átomo de urânio é em usinas térmicas para a geração de energia elétrica (usinas termonucleares), em que o núcleo do átomo é submetido a um processo de fissão para gerar a energia. Se liberada rapidamente, a energia se manifesta sob a forma de luz, caso contrário se manifesta sob a forma de calor. Este último caso ocorre nas usinas termonucleares em que a energia é liberada lentamente para aquecer a água dos reatores a fim de produzir o vapor que movimenta as turbinas.

Para que seja utilizado nas usinas, o urânio passa por um processo complexo de processamento. Este processo, também conhecido como “ciclo do combustível nuclear” é dividido em quatro etapas principais: (1) mineração e beneficiamento, onde o minério é extraído, purificado e concentrado, dando origem a uma espécie de sal conhecido como *yellowcake* (U_3O_8); (2) a etapa da conversão, em que o *yellowcake* é dissolvido, purificado e convertido para o estado gasoso (UF_6) e, posteriormente, (3) a fase de enriquecimento, caracterizada pelo aumento da concentração de átomos de urânio 235. A última etapa abrange a destinação do material utilizado (dejetos radioativos), considerado um dos principais problemas no uso de tecnologia nuclear. Há dois ciclos básicos de combustível nuclear: um aberto (que envolve a deposição final do combustível utilizado) e um fechado, no qual o urânio residual e o plutônio produzidos voltam a ser utilizados na geração de energia como óxido misto (MOx). A extração, contudo, não é o único meio para obtenção do urânio utilizado nas usinas nucleares. As fontes secundárias (material obtido com a desativação de artefatos bélicos, estoques civis e militares, reprocessamento do urânio já utilizado e sobra do material usado no processo de enriquecimento) também são utilizadas em larga escala que,

em 2006, respondeu a cerca de 46% do urânio utilizado nas usinas nucleares do mundo (ANEEL, 2008).

A energia nuclear tem sido utilizada para geração elétrica desde a década de 1950, com baixa emissão de materiais radioativos pelas usinas nucleares e poucos efeitos ambientais. De acordo com Ishiguro (2002), a energia nuclear é uma das tecnologias mais seguras e menos poluentes. Os principais problemas em relação ao uso deste tipo de energia são relativos à tecnologia e aos custos de investimento e manutenção, riscos de acidentes nucleares com possível emissão de radiação (falha humana, falha mecânica e, em especial, acidentes ocorridos por causas naturais como o ocorrido na usina de Fukushima, causada pelo tsunami no Japão), pelas limitadas reservas de urânio, pela destinação do lixo nuclear e, em alguns países, pelo risco de atentados terroristas.

Atualmente, cerca de trinta países que fazem uso de energia nuclear em sua matriz energética, sendo em alguns casos a principal fonte de energia. O uso de energia nuclear geralmente está relacionado às características geográficas do país (que permitem ou restringem o uso de outras fontes energéticas) e à política energética e ambiental adotada pelo país. Segundo Ishiguro (2002), um dos casos do uso de energia nuclear por escassez de outros recursos naturais é o Japão, que ocupa a 3ª posição dentre os países do G20 no consumo desta fonte energética. O Japão, no entanto é um caso peculiar. Localizado no chamado círculo de fogo do pacífico, região sujeita à terremotos, tsunamis e atividade vulcânica, o Japão passou em 2011 por um acidente nuclear de grave intensidade na usina de Fukushima, levando o país a questionar o uso desta fonte em sua matriz energética.

Antes mesmo das repercussões do acidente de Fukushima em 2011, outros países já haviam levantado a questão da segurança nuclear e o uso deste tipo de energia. Em 1978 o parlamento austríaco votou pelo abandono da energia nuclear, mantido pelo parlamento em nova discussão ocorrida em 1997. Em 1980 a Suécia realizou um plebiscito e, como resposta à consulta popular, foi decidido que não seriam mais construídas novas usinas nucleares e que as usinas em atividade seriam progressivamente desativadas. Após o acidente de Chernobyl, ocorrido em 1986 na Ucrânia e considerado o pior acidente nuclear da história, vários países passaram a questionar o uso da energia nuclear, com destaque para Itália, Bélgica e Alemanha. Como resultado deste acidente, em 1987 foi realizado um referendo na Itália que decidiu encerrar a atividade nuclear no país, concretizada em 1990. Na Bélgica e na

Alemanha a discussão não estabeleceu prazos imediatos mas, ao questionar o uso da energia e possíveis acidentes nucleares, surgiu uma tendência de redução ou eliminação (ISHIGURO, 2002). Segundo dados da AIEA (2012), atualmente são 435 reatores nucleares em operação e 65 reatores em construção, distribuídos pelos países conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Usinas nucleares (reatores em operação) e reatores em construção

País	Reatores em Operação		Reatores em Construção		Reatores de Desligamento de longo prazo	
	Unidades	Total MW(e)	Unidades	Total MW(e)	Unidades	Total MW(e)
África do Sul	2	1.830				
Alemanha	9	12.068				
Argentina	2	935	1	692		
Armênia	1	375				
Bélgica	7	5.927				
Brasil	2	1.884	1	1.245		
Bulgária	2	1.906	2	1.906		
Canadá	18	12.604			4	2.726
China	16	11.816	26	26.620		
Coreia do Sul	21	18.751	5	5.560		
Eslováquia	4	1.816	2	782		
Eslovênia	1	688				
Espanha	8	7.567				
Estados Unidos	104	101.465	1	1.165		
Finlândia	4	2.736	1	1.600		
França	58	63.130	1	1.600		
Holanda	1	482				
Hungria	4	1.889				
Índia	20	4.391	7	4.824		
Irã	1	915				
Japão	50	44.215	2	2.650	1	246
México	2	1.300				
Paquistão	3	725	2	630		
Reino Unido	18	9.953				
República Tcheca	6	3.766				
Romênia	2	1.300				
Rússia	33	23.643	10	8.188		
Suécia	10	9.326				
Suíça	5	3.263				
Taiwan	6	5.018	2	2.600		
Ucrânia	15	13.107	2	1.900		
Total	435	368.791	65	61.962	5	2.972

Fonte: AIEA (2012)

Dentre os países do G20, apenas a Arábia Saudita, Austrália, Indonésia, Itália e Turquia não possuem usinas nucleares, sendo que destes, a Itália abandonou seu programa nuclear a partir de 1990. Dos países do G20, outro importante destaque é o Irã, que apesar de ter apenas um reator nuclear é considerado uma ameaça para os demais países pela possibilidade de uso não pacífico desta tecnologia. A Figura 13 apresenta os países com uso de energia nuclear, destacando o número de reatores em operação. Uma observação deste gráfico é que a grande concentração de usinas nucleares está localizada no hemisfério norte, concentrado principalmente nos países mais desenvolvidos, conforme apontam Magnoli e Araújo (2001).

Figura 13 - Mapa dos países com uso de energia nuclear (número de reatores em operação)

Fonte: AIEA (2012)

Na década de 70, com a crise do petróleo e o início dos debates ambientais, a energia nuclear voltou a ser considerada na composição das matrizes energéticas dos países. Conhecida desde a década de 40, o urânio figura como fonte primária de energia na matriz energética dos países desde a década de 60. No final da década de 70 e início da década de 80, dois acidentes nucleares interromperam o ciclo de crescimento da energia nuclear no mundo. O acidente nuclear na usina de Three Mile Island em março de 1979 no estado da Pensilvânia (Estados Unidos), juntamente com o acidente de Chernobyl, em abril de 1986 na Ucrânia, chamaram a atenção do mundo para o perigo e as consequências do uso deste tipo de energia. Como resultado, alguns países interromperam a construção de novas usinas ou optaram pelo encerramento de seus programas nucleares. As discussões sobre segurança nuclear voltaram a

ser colocadas em pauta com o acidente nuclear de Fukushima, ocorrido em março de 2011 no Japão (MAGNOLI; ARAUJO, 2001; HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2012).

Nos últimos anos a energia nuclear voltou a ter destaque por ser considerada uma fonte limpa, uma vez que há pouca liberação de gases de efeito estufa em sua operação. Com a existência de reservas abundantes no planeta, garantindo suprimento em médio e longo prazos, a energia nuclear passou a ser opção para diversos países. As principais reservas mundiais de urânio estão distribuídas por 14 países, com destaques para a Austrália, Cazaquistão e Canadá. O Brasil, apesar de possuir cerca de 6% do volume mundial de reservas conhecidas de urânio, tem produção de energia nuclear relativamente baixa quando comparada aos demais países do G20 (OCDE, 2010).

O consumo de energia nuclear é concentrado principalmente no hemisfério norte do globo, com poucas exceções no hemisfério sul (Brasil, Argentina, África do Sul). Esse padrão de consumo é resultado da localização das reservas e do desenvolvimento tecnológico dos países, em especial na década de 1970 quando foram feitas as principais iniciativas para o desenvolvimento desta tecnologia. O consumo mundial de energia nuclear é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Consumo de energia nuclear no mundo

Fonte: (BP, 2008 *apud* ANEEL, 2008)

O futuro da energia nuclear não é certo e depende de fatores como a competitividade do custo de geração, disponibilidade de urânio, segurança no fornecimento de outros combustíveis e aceitação pela sociedade da segurança das unidades nucleares (ANEEL, 2008, p. 121). O comportamento dos preços reflete a relação entre oferta e consumo. Durante a fase de expansão das usinas nucleares os preços subiram de maneira acentuada, contudo recuaram na década de 80, após os acidentes nucleares de Three Mile Island (1979) e Chernobyl (1986) e se mantiveram em baixa durante quase 20 anos. De acordo com a ANEEL (2008), as projeções da Agência Internacional de Energia Atômica²¹ (AIEA) indicam que os estoques de urânio resultantes da conversão de armas atômicas devem acabar entre 2020 e 2030, que com a entrada em operação de novos geradores e usinas poderá implicar em aumento dos preços.

Hinrichs, Kleinbach e Reis (2012) destacam que uma das questões cruciais que a indústria nuclear enfrenta é o desenvolvimento de um método, aceitável e seguro, para isolar os resíduos radioativos do meio ambiente por milhares de anos. Segundo os autores, esta questão tem sido estudada por mais de 30 anos sem uma resolução satisfatória, dado os potenciais riscos à saúde relacionados à radioatividade e a toxicidade destes resíduos. O principal risco é que um vazamento se desenvolva na estrutura de contenção e que o material radioativo atinja a rede de água e contamine a água potável e alimentos. Além de serem armazenados em piscinas próximas ao reator ou em invólucros de casco seco próximo ao prédio do reator, outros métodos de descarte propostos são a utilização de camadas de gelo da Antártida para o resfriamento (pela deposição dos resíduos em contêineres na superfície gelada) ou o descarte em leito marinho (por meio de colocação controlada de resíduos lacrados em fossas profundas no oceano).

Segundo Alvim *et al.* (2007, p. 210), os riscos ambientais da energia nuclear podem ser esquematizados em quatro aspectos: (1) riscos na operação normal da usina; (2) riscos em caso de acidente; (3) riscos no ciclo do combustível (produção da mina ao combustível) e (4) riscos no armazenamento dos rejeitos.

²¹ A Agência Internacional de Energia Atômica foi constituída em 1957 no âmbito das Nações Unidas com o objetivo de garantir o uso pacífico da energia nuclear e contribuir com as pesquisas científicas. Após a adoção do Tratado de Não-Proliferação Nuclear (TNP) de 1968, a Agência passou a inspecionar e investigar suspeitas de uso não pacífico da tecnologia nuclear.

No Brasil a instalação de usinas nucleares foi decidida no final da década de 60 com o objetivo de adquirir conhecimento sobre a nova tecnologia e suprir a necessidade de eletricidade no Rio de Janeiro. Em 1972 teve início a construção de Angra I com tecnologia da norte-americana (da empresa Westinghouse), adquirida sem transferência de tecnologia (entrando em operação comercial em 1983). Em 1975, o Brasil assinou com a República Federal da Alemanha o Acordo de Cooperação para o Uso Pacífico da Energia Nuclear e adquiriu as usinas de Angra II e Angra III da empresa alemã Kraftwerk Union A.G, (subsidiária da Siemens), com contrato de transferência parcial de tecnologia. Angra II entrou em operação em 2000 e Angra III, por uma série de razões foi paralisada durante muitos anos. As operações de Angra III estão previstas para ter início em 2018 (ISHIGURO, 2002; ANEEL, 2008)

3.3 Fontes Renováveis

Fontes renováveis de energia são aquelas originárias de fontes naturais e que possuem a capacidade de regeneração (renovação) e, desta forma, não são exauríveis como a energia hidrelétrica. Além da energia hidrelétrica, considerada uma das fontes mais limpas de energia na emissão de GEE, outras fontes de energia também são consideradas ambientalmente adequadas como forma de geração de energia uma vez que são renováveis e com potencial de uso para redução de combustíveis fósseis. Estes tipos de energia são geradas pela iluminação solar (solar térmica e fotovoltaica), ação dos ventos (eólica), resíduos de natureza orgânica (biomassa) dentre outros (hidrogênio, biogás, geotérmica e a energia originada do mar) (ANEEL, 2008, HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2012).

A utilização destas fontes limpas ainda está condicionada ao custo e características geográficas dos países. De acordo com a ANEEL (2008), em função do custo elevado enquanto a tecnologia ainda não está consolidada, o grupo “outros renováveis” depende de apoio e investimento governamental por meio de subsídios, tarifas especiais, desoneração fiscal, aporte direto de recursos ou por regulamentação (aquisição compulsória deste tipo de recurso).

Além do custo, o uso de determinadas fontes pode ser limitado pelas características do país ou pelas características geográficas. Como exemplo disto, no caso dos países nórdicos Suécia,

Finlândia, Noruega, Dinamarca e Islândia, a posição geográfica (altas latitudes) não permite o uso da energia solar em função do foto-período curto e reduzida intensidade luminosa. Desta forma, para estes países, a energia nuclear poderia ser utilizada como alternativa. Em outros casos, como no Oriente Médio, vários países têm carência de água, fazendo com que o uso de hidrelétricas seja reduzido ou praticamente descartado (SEIFFERT, 2013).

A despeito dos discursos em favor do uso de fontes limpas e renováveis, Bermann (2001) considera que, em maior ou menor grau, todas as fontes de energia provocam danos ao meio ambiente. Um dos exemplos usados para corroborar esta afirmação é relativo à energia hidrelétrica, em que os danos ambientais deste tipo de fonte energética são relacionados à destruição da fauna e flora, desmatamento e alterações das vazões e dos cursos dos rios (e não propriamente do aquecimento global). A seguir são apresentadas as fontes energéticas renováveis e suas principais características.

3.3.1 Hidrelétricas

A água é o recurso natural mais abundante da Terra, recobrando dois terços da superfície do planeta sob a forma de oceanos, calotas polares, rios, lagos e aquíferos, sendo uma das fontes mais limpas de energia (com baixa emissão de gases de efeito estufa), a água é uma fonte renovável (ANEEL, 2008). Ainda que seu uso tenha limitações, as grandes reservas e as baixas emissões de GEE fazem deste recurso uma potencial fonte energética para os países.

Segundo Hinrichs, Kleinbach e Reis (2012), historicamente a energia hidráulica tem sido utilizada para geração de trabalho útil como moer de grãos, serrar madeiras e fornecer energia para outras tarefas. Posteriormente, a força das águas foi transferida para uma série de máquinas de movimentos rotatórios ampliando sua aplicação. A energia hidrelétrica, assim como a eólica, vem sendo utilizada pelo homem desde a antiguidade. Utilizada na Grécia nos processos de moagem de trigo, seu uso como alternativa para produção de energia elétrica começou a partir da segunda metade do século XIX, junto às quedas d'água das cataratas do Niágara.

Ainda que possam ser elencados vários benefícios do uso de hidrelétricas, seu uso na matriz energética mundial é muito baixo, devido principalmente à distribuição da água pelo planeta,

às características geográficas de cada país e ao uso intenso e desordenado por parte de alguns países. Para Seiffert (2013), o uso da energia hidrelétrica também depende de dois principais fatores: a disponibilidade volumétrica de recursos hídricos (vazão) e o relevo do país (que permitam quedas d'água). Segundo a ANEEL (2008),

[...] nos últimos 30 anos, também de acordo com levantamentos da IEA, a oferta de energia hidrelétrica aumentou em apenas dois locais do mundo: Ásia, em particular na China, e América Latina, em função do Brasil, país em que a hidroeletricidade responde pela maior parte da produção da energia elétrica. Nesse mesmo período, os países desenvolvidos já haviam explorado todos os seus potenciais, o que fez com que o volume produzido registrasse evolução inferior ao de outras fontes, como gás natural e as usinas nucleares (ANEEL, 2008, p. 52).

Por ser uma fonte renovável, não é possível quantificar reservas deste tipo de fonte energética, contudo, dado as características dos países com relação ao volume de água e relevo é possível identificar os países com maiores potenciais hidrelétricos. Desta forma, os países com maior potencial de geração de energia baseado na fonte hidrelétrica são a China (13%), Rússia (12%), Brasil (10%), Canadá (7%), Índia (5%), República do Congo (5%) e Estados Unidos (4%). Com grande participação no potencial hidrelétrico, devido ao inverno rigoroso e congelamento de rios, o Canadá e a Rússia não conseguem aproveitar todo potencial hidrelétrico durante o ano inteiro. O mapa com o potencial hidrelétrico dos principais países (em relação aos demais países), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) é apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Principais potenciais hidrelétricos tecnicamente aproveitáveis no mundo

Fonte: (EPE, 2007 *apud* ANEEL, 2008)

As usinas hidrelétricas, de acordo com sua capacidade de geração de energia, são classificadas como (1) microusinas hidrelétricas (menos de 1 MW); (2) pequenas centrais hidrelétricas (entre 1 MW e 30 MW) e as usinas hidrelétricas (acima de 30 MW). No âmbito dos projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDLs), as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) recebem maior ênfase pois o impacto socioambiental da instalação e operação do projeto é reduzido, a metodologia dos projetos de pequena escala é mais simplificada e o licenciamento ambiental pode ser simplificado (SEIFFERT, 2013). Segundo a ANEEL (2008, p. 53), as usinas hidrelétricas são classificadas de acordo com a altura da queda d'água, vazão, capacidade ou potência instalada, tipo de turbina empregada, localização, tipo de barragem e reservatório.

Apesar de ser considerada de baixo impacto ambiental e considerada uma fonte renovável e ilimitada, seu processo de construção, instalação e operação podem causar danos ao meio ambiente como destruição da fauna e da flora (represamento de água), destruição de área de floresta e emissão de gases em seu funcionamento (ANEEL, 2008; SEIFFERT, 2013). De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica, o principal argumento contrário à construção das usinas hidrelétricas para geração de energia não está ligado ao aquecimento global, e sim “ao impacto provocado sobre o modo de vida da população, flora e fauna locais, pela formação de grandes lagos ou reservatórios, aumento do nível dos rios ou alterações em seu curso após o represamento” (ANEEL, 2008, p. 52)

3.3.2 Energia Solar Térmica e Fotovoltaica

Descoberto por Heinrich Hertz em 1887 e explicado por Albert Einstein em 1905, o princípio por trás do uso direto da energia solar para produção de eletricidade foi usado em diversas aplicações, desde o fornecimento de eletricidade e aquecimento até o uso no abastecimento de bombas d'água, como ocorre no Quênia (HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2012).

O uso da energia solar para aquecimento é antigo. Alguns dos primeiros relatos referem-se à Antiguidade, quando espelhos foram utilizados por Arquimedes para direcionar raios solares e atacar uma frota hostil, incendiando suas velas. Outras referências apontam o uso dos raios

solares para derreter metais, usados entre os séculos XVII e XVIII por Lavoisier e outros cientistas. No fim do século XIX, August Mouchot fez funcionar uma máquina de impressão usando o vapor produzido por um artefato construído com espelhos, utilizando a luz solar. Há vários outros relatos no Chile, Egito e Estados Unidos, dentre outros países, que também fizeram uso desta tecnologia (HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2012).

De acordo com a ANEEL (2008), a irradiação solar na superfície da terra poderia ser capaz de atender ao consumo energético mundial, contudo essa radiação não chega uniforme à crosta terrestre, dependendo da latitude, estação ao ano e das condições atmosféricas (nebulosidade e umidade relativa do ar). Para a produção de energia elétrica são utilizados o sistema heliotérmico (irradiação solar é convertida em calor para uso nas termelétricas) e o fotovoltaico (transformação da radiação solar em eletricidade por meio de um material semicondutor). Loster (2006), NASA (2006) e o World Resources Institute (WRI, 2014) destacam as principais regiões de insolação para uso de energia solar. A Figura 16 apresenta as regiões de insolação nas diversas regiões do planeta, segundo o World Bank (NASA, 2006).

Figura 16 - Radiação solar direta global (kWh/m²/dia)

Fonte: NASA (2006) e WRI (2014)

A energia solar é uma fonte limpa e chega à Terra nas formas térmica e luminosa. Seu uso assume grande importância em áreas isoladas e de difícil acesso, onde os custos de

implantação de energia elétrica são altos. Seu uso, no entanto, depende da duração solar do dia (fotoperíodo), que corresponde ao período de visibilidade do Sol ou de claridade, sendo variável em algumas regiões e períodos do ano e mais intensas nas regiões polares (ANEEL, 2008; SEIFFERT, 2013). Segundo Seiffert (2013), a vantagem deste tipo de fonte energética é o baixo impacto ambiental, que é limitado à geração de resíduos sólidos com a substituição e manutenção de painéis solares.

A grande vantagem dos painéis solares é que contribuem duplamente para as metas do Protocolo de Quioto. Em primeira instância, ao se utilizar este tipo de energia mais limpa outras fontes impactantes de energia estarão deixando de ser utilizadas e emissões de GEEs deixarão de ser geradas. Além disso, a instalação de painéis solares contribuirá naturalmente para a redução da formação de ilhas de calor em nível local e efeito estufa em nível global (SEIFFERT, 2013, p. 110).

Segundo Bermann (2001) a conversão fotovoltaica (conversão de luz em energia elétrica) surge como alternativa de suprimento, possibilitando a geração de empregos locais, a manutenção da receita de produção e comercialização da energia na própria região, promovendo um desenvolvimento auto-sustentado. Hinrichs, Kleinbach e Reis (2012, p. 447) corroboram com Bermann ao colocar que “em diversas áreas remotas, sistemas fotovoltaicos autônomos são as únicas fontes de energia viáveis”. De acordo com Hinrichs, Kleinbach e Reis (2012), depois da energia eólica, a energia fotovoltaica é a fonte renovável que mais cresce no mundo, com um crescimento de 24% ao ano.

Alguns países, como forma de incentivo, exigem uma participação mínima de aquecimento de água por meio de energia solar. Durante muito tempo apenas Israel propunha esta medida, que foi seguida pela Espanha (em 2006), Índia, Coreia do Sul, China e Alemanha (em 2007). O Brasil é privilegiado em termos de insolação, em especial na incidência solar próximo à linha do Equador. Apesar do potencial, o uso desta fonte energética é reduzido uma vez que as regiões com maior atividade econômica apresentam latitudes maiores (distantes da linha do Equador) e que o custos de infra-estrutura ainda são altos e dependem de apoio e investimento governamental. Neste sentido, “a expectativa é que a expansão do número de usinas solares ocorra exatamente na zona rural, como integrante de projetos de universalização do atendimento focados em comunidades mais pobres e localizadas a grande distância das redes de distribuição” (ANEEL, 2008, p. 86).

3.3.3 Energia Eólica

Ainda que a energia eólica seja utilizada como meio de geração de energia desde os primórdios da civilização humana na China e na Babilônia, entre 2000 e 1700 a.C., para bombear água e moer grãos, a percepção de sua importância como alternativa para geração de energia renovável é recente e vem ganhando importância em virtude das discussões sobre os impactos das emissões de GEE no uso de combustíveis fósseis e consequente aquecimento global. Em grande parte dos países, os principais incentivos feitos à essa tecnologia ocorreram a partir do choque do petróleo em 1973 que, aliado à preocupação ambiental, fomentou desenvolvimento e investimento por parte de muitos países (HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2012 e SEIFFERT, 2013).

Basicamente, a energia eólica é obtida da energia cinética gerada pela migração das massas de ar provocada pelas diferenças de temperatura existentes na superfície do planeta. Dentre os argumentos favoráveis ao uso desta fonte de energia estão a grande disponibilidade, independência de importações e custo zero para obtenção de suprimento, ao fato de ser uma fonte renovável e à perenidade (perpetuidade). Outro ponto favorável ao seu uso é relacionado aos ganhos de eficiência e avanço da tecnologia. O principal argumento contrário ao uso da energia eólica está relacionado ao custo que, embora seja decrescente, ainda é elevado na comparação com outras fontes (ANEEL, 2008).

Hinrichs, Kleinbach e Reis (2012) ainda apontam que, além do custo, problemas com a poluição visual e sonora, interferência nas comunicações e acidentes com aves também são elencados. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica,

[...] a evolução da tecnologia permitiu o desenvolvimento de equipamentos mais potentes. Em 1985, por exemplo, o diâmetro das turbinas era de 20 metros, o que acarretava uma potência média de 50 kW (quilowatts). Hoje, esses diâmetros chegam a superar 100 metros, o que permite a obtenção, em uma única turbina, de 5 mil kW (ANEEL, 2008, p. 81).

De acordo com Hinrichs, Kleinbach e Reis (2012), além das construções em terra (fazendas de vento) as costas marinhas (*offshore*) são uma das áreas que vem crescendo muito nas turbinas eólicas, dentre outros fatores pela vantagem de apresentar maiores velocidades de vento e menor turbulência. Assim, vários países tendem a aumentar sua capacidade de produção e seu potencial de geração de energia eólica.

Seiffert (2013) aponta que, com relação à capacidade instalada no mundo, a China é o país com maior participação no uso de energia eólica, seguido dos Estados Unidos, Alemanha, Espanha, Índia, Reino Unido, Itália e França. Juntos, estes oito países são responsáveis por 82,1% de toda capacidade instalada de energia eólica global. Os dados da capacidade de produção são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Energia Eólica - capacidade de produção instalada (MW)

Ranking 2012	País	2000	2005	2010	2012
1°	China	352	1.266	41.800	75.324
2°	Estados Unidos	2.564	9.149	40.200	60.007
3°	Alemanha	6.095	18.428	27.190	31.307
5°	Índia	1.267	4.430	13.065	18.421
6°	Reino Unido	409	1.353	5.204	8.445
7°	Itália	427	1.718	5.797	8.124
8°	França	68	757	5.970	7.473
9°	Canadá	137	683	4.008	6.200
13°	Japão	142	1.040	2.304	2.614
14°	Austrália	30	579	2.020	2.584
15°	Brasil	22	29	931	2.508
18°	Turquia	19	20	1.329	2.312
24°	México	0	2	517	1.348
30°	Coreia do Sul	0	119	379	483
40°	Argentina	16	27	60	167
45°	Irã	11	32	92	91
62°	Rússia	0	14	17	15
66°	África do Sul	13	17	10	10
82°	Indonésia	0	1	1	1
101°	Arábia Saudita	0	0	0	0

Fonte: The Wind Power (2013)

O Brasil, no entanto, é um país favorecido pela quantidade de ventos (com presença duas vezes superior à média mundial) e por isso tem um grande potencial de crescimento de geração de energia eólica (ANEEL, 2008). Outro fator positivo para o Brasil é que a velocidade dos ventos costuma ser maior em épocas de estiagem, fazendo com que esta fonte energética possa ser usada como fonte complementar às hidrelétricas, que sofrem com a falta de chuva nestes períodos. Assim, em períodos de estiagem, com carência de chuvas que causam problemas na geração de energia hidrelétrica, o uso de energia eólica poderia suprir esta falta e reduzir a dependência de combustíveis fósseis (e mais poluentes).

3.3.4 Biomassa

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento, tanto no mercado internacional quanto no doméstico, pela sua importância na diversificação da matriz energética dos países e por ser uma potencial fonte para redução do uso dos combustíveis fósseis (ANEEL, 2008).

A biomassa pode ser obtida de qualquer resíduo de natureza orgânica (resíduos de madeira, agrícolas, atividades pecuárias, florestas e resíduos industriais orgânicos). Caso estes resíduos não fossem processados, seriam depositados em lixões, aterros controlados ou sanitários e gerariam impactos negativos como ocupação do aterro, contaminação do solo e recursos hídricos, poluição atmosférica pela liberação de dióxido de carbono e metano (SEIFFERT, 2013). Segundo Bermann (2001), o potencial de biomassa depende basicamente da insolação e da fertilidade da terra. Neste sentido, países como o Brasil contam com condições privilegiadas na produção deste tipo de energia.

De acordo com Seiffert (2013), quando em substituição aos combustíveis fósseis, a biomassa representa uma alternativa importante para redução da poluição localizada e global. Por meio de seu processamento, a biomassa pode gerar (1) o biogás (semelhante ao gás natural) que pode ser utilizado para geração de energia elétrica, combustível para automóveis e produção de hidrogênio e; (2) os biocombustíveis (como o etanol e o biodiesel) para o uso em motores de combustão interna. Segundo Pinto Junior *et al.* (2007), do ponto de vista tecnológico os biocombustíveis devem ser segmentados em dois grupos distintos, os chamados biocombustíveis de primeira geração (que incluem o etanol de cana-de-açúcar e o biodiesel feito a partir de óleos vegetais) e os biocombustíveis de segunda geração (caracterizado por utilizar como matéria prima biomassas de baixo valor como resíduos ou palhas).

O Brasil é pioneiro na produção de álcool combustível a partir da produção da cana de açúcar, utilizando tanto o álcool hidratado como o álcool anidro. Neste sentido, o Proálcool lançado em 1975, no âmbito das políticas energéticas para minimizar a dependência do petróleo, tornou-se referência internacional. O biodiesel, por sua vez, é um biocombustível produzido pela transesterificação de óleos vegetais. Sua produção se desenvolveu inicialmente na Europa, a partir do óleo de colza (uma variação da canola), sendo considerado uma fonte alternativa ao uso dos derivados do petróleo. Por ser biodegradável, não tóxico e livre de

enxofre trata-se de uma energia limpa, o que resulta em benefícios ambientais (PINTO JUNIOR ET AL., 2007). Bermann (2001) ainda aponta que, dentre as possibilidades de aproveitamento da biomassa para fins energéticos, a cogeração (produção simultânea de energia elétrica e vapor) é a mais promissora devido ao aumento de eficiência do ciclo.

Para transformar a biomassa em energia são utilizadas várias técnicas: combustão direta, pirólise, gaseificação, digestão anaeróbica, fermentação e transesterificação (ANEEL, 2008).

A técnica, os processos e os derivados são apresentados no Quadro 8.

Técnica	Processo
Combustão direta	Processo para obtenção de calor. Ocorre em fogões (cocção de alimentos), fornos (metalurgia) e caldeiras, para a geração de vapor.
Pirólise ou carbonização	É o mais antigo e simples dos processos de conversão de um combustível sólido (normalmente lenha) em outro de melhor qualidade e conteúdo energético (carvão vegetal, alcatrão e ácido piro-lenhoso).
Gaseificação	Ocorre por meio de reações termoquímicas (vapor quente e oxigênio) para transformar o combustível sólido em gás (mistura de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono e nitrogênio) e é utilizado em motores de combustão interna e em turbinas para geração de eletricidade.
Digestão anaeróbica	Consiste na decomposição do material pela ação de bactérias (na ausência do ar) e tem como produto final o biogás, composto basicamente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2).
Fermentação	É o mais comum na agroindústria, pelo qual os açúcares de plantas (batata, milho, beterraba e cana-de-açúcar) são convertidos em álcool pela ação de microorganismos e tem como produto final o etanol.
Transesterificação	É a reação de óleos vegetais com um produto intermediário ativo obtido pela reação entre metanol ou etanol e uma base (hidróxido de sódio ou de potássio). Os derivados deste processo são a glicerina e o biodiesel.

Quadro 8 - Processo de transformação da biomassa em energia

Fonte: ANEEL (2008, pp. 68-69)

Apesar dos benefícios da biomassa, sua participação nas matrizes energéticas dos países ainda é pequena. Além de seu uso moderado em decorrência do intenso uso de combustíveis fósseis, sua contabilização é imprecisa, uma vez que, por definição, pode ser obtida de qualquer resíduo de natureza orgânica (o que engloba uma grande quantidade de possíveis matérias) e também pode ser consumida em áreas isoladas. De acordo com a ANEEL (2008),

[...] a pequena utilização e a imprecisão na quantificação são decorrências de uma série de fatores. Um deles é a dispersão da matéria-prima – qualquer galho de árvore pode ser considerado biomassa, que é definida como matéria orgânica de origem vegetal ou animal passível de ser transformada em energia térmica ou elétrica. Outro é a pulverização do consumo, visto que ela é muito utilizada em unidades de pequeno porte, isoladas e distantes dos grandes centros. Finalmente, um terceiro é a associação deste energético ao desflorestamento e à desertificação. (ANEEL, 2008, p. 66)

3.3.5 Outras fontes Renováveis

As chamadas “outras fontes”, hidrogênio, biogás, energia geotérmica e originadas pelo mar, têm em comum o fato de serem usadas como fontes complementares na geração de energia. Estes tipos de fontes, coadjuvantes, são apresentadas na literatura de maneira agrupada e, geralmente não são tratadas ou estatisticamente analisadas individualmente.

O hidrogênio, elemento abundante no universo, apresenta grande capacidade de geração de energia. Obtido em diversas fontes (água, gás natural, biogás e etanol), por se uma fonte renovável, inesgotável e limpa, é considerada como uma fonte alternativa de energia. O hidrogênio, no entanto, não é economicamente competitivo quando comparado à outras fontes de energia uma vez que, para sua obtenção, normalmente requer uma quantidade maior de energia do que produz. Assim, dados os limites tecnológicos na obtenção de energia com custos baixos, o hidrogênio deve ser apenas uma alternativa futura (SEIFFERT, 2013). De acordo com Pinto Junior *et al.* (2007), o uso energético do hidrogênio é percebido como uma inovação ainda que predominem projetos conceituais com objetivos de exploração do que propriamente projetos de utilização em escala comercial. Segundo o autor (2007), os esforços de desenvolvimento são focados para utilização em grande escala, especialmente na área de transporte.

O biogás é uma das fontes mais favoráveis ao meio ambiente, uma vez que permite a redução dos gases causadores do efeito estufa e contribui com o combate à poluição do solo e dos lençóis freáticos. É obtido da biomassa contida em dejetos e esgotos e passa naturalmente do estado sólido para o estado gasoso pela ação dos microorganismos. Neste sentido, a utilização do lixo para a produção de energia permite o direcionamento e utilização deste gás e a redução do volume dos dejetos em estado sólido. Os procedimentos tecnológicos para a utilização do lixo para a produção de energia são a combustão direta, a gaseificação e a reprodução artificial do processo de ação de microorganismos (ANEEL, 2008).

A energia geotérmica é obtida pelo calor que existe no interior da Terra, por meio dos gêiseres ou pelo calor existente no interior das rochas para o aquecimento da água. O calor da água e o vapor dos gêiseres são utilizados em usinas termelétricas para movimentar as turbinas. Apesar

de pouco utilizada, a energia geotérmica é conhecida desde 1904 e é utilizada por países como Itália, México, Japão, Filipinas, Quênia, Austrália, Islândia e Estados Unidos (ANEEL, 2008).

Por meio das marés, correntes marítimas, ondas, energia térmica e gradientes de salinidade, os mares apresentam potencial de geração de energia. De acordo com a ANEEL (2008), a eletricidade pode ser obtida a partir da energia cinética produzida pelo movimento das águas ou pela energia derivada da diferença do nível do mar entre as marés alta e baixa. Este tipo de tecnologia é utilizado na Argentina, Austrália, Canadá, Índia, Coreia do Sul, México, Reino Unido, Estados Unidos e Rússia, além de projetos para o uso em outros países como Brasil e França.

4 Eficiência e Análise de Desempenho

Esta seção é destinada à compreensão dos principais conceitos de eficiência e análise de desempenho. Desta forma, esta seção está dividida em conceitos básicos (em que são apresentados os conceitos de eficiência e produtividade), técnicas para mensuração de eficiência (em que são apresentadas as técnicas paramétricas e não paramétricas para mensuração de eficiência), Análise Envolvória de Dados (técnica escolhida para realização dos testes desta tese de doutorado), as etapas para análise de eficiência e os estudos e aplicações envolvendo a técnica DEA²² (Análise Envolvória de Dados).

De acordo com Colin (2007), em termos de programação matemática, a análise por envoltória de dados é uma técnica considerada relativamente nova que tem sido usada com frequência em programação linear e Pesquisa Operacional. A origem da Pesquisa Operacional pode ser encontrada há quase 75 anos, tendo sido cunhado por volta de 1938, para descrever o esforço de pesquisadores e cientistas na análise de situações militares, geralmente atribuída a iniciativas militares na Segunda Guerra Mundial. Por causa do esforço de guerra, havia uma necessidade de alocação de recursos escassos às várias operações militares e às atividades relacionadas a cada operação. Após o término da guerra, houve um direcionamento destes conhecimentos para outras áreas, como as atividades organizacionais e usos em governo (HILLIER; LIEBERMAN, 2006; MOREIRA, 2010).

Segundo Moreira (2010), dois fatores foram responsáveis pelo crescimento e propagação dos estudos relativos ao tema, sendo um deles o desenvolvimento do método Simplex para resolver problemas de programação linear, desenvolvido por George Dantzig em 1947 e a popularização de computadores (que transformou longos e impraticáveis cálculos em procedimentos comuns). Segundo o autor, a Pesquisa Operacional lida com problemas de como conduzir e coordenar determinadas operações em organizações, com usos para indústrias, operações militares e governos. Dada a complexidade de informações, cálculos e restrições, este tipo de estudo é frequentemente utilizado para a tomada de decisão, sendo considerado o campo de estudos em que são aplicados métodos analíticos (modelagem matemática) para a tomada de decisão. Além das contribuições do método Simplex de 1947, a Pesquisa Operacional também ofereceu soluções em problemas de análise de eficiência, baseados na comparação de desempenho por meio de programação linear.

²² DEA é a sigla mais utilizada para Análise Envolvória de Dados, que é originada do inglês *Data Envelopment Analysis* (DEA)

4.1 Conceitos Básicos

Os estudos sobre eficiência são muito comuns em diversas áreas do conhecimento. A grande maioria dos conceitos busca relacionar *outputs* (volume de bens e/ou serviços produzidos) e *inputs* (volume de recursos consumidos). Neste sentido Farrel (1957) busca distinguir dois tipos de eficiência: a eficiência técnica (capacidade máxima da produção dada uma quantidade de insumos) e a eficiência alocativa (combinação ótima para um determinado nível de preços de *input* ou *output*). Campello (2003), em um levantamento sobre conceitos e definições sobre eficiência, identificou que na definição de alguns autores, a produtividade é mencionada.

Segundo Mariano (2008), o primeiro trabalho da literatura referente à produtividade de unidade tomadora de decisão (Unidade Tomadora de Decisão ou, como é mais conhecido DMU) foi feita por Frank Knight. O cálculo proposto por Knight (1933) pode ser entendido como sendo

o cálculo da produtividade [...] para um único *input* virtual e um único *output* virtual, sendo que esse *input* virtual e esse *output* virtual podem ser definidos, respectivamente, como uma combinação linear de todos os *inputs* e uma combinação linear de todos os *outputs* de uma dada DMU. O *input* virtual e o *output* virtual recebem esse nome porque, apesar de estarem simulando *inputs* e *outputs* reais, não existem de fato; são apenas entidades fictícias que representam, respectivamente todos os *inputs* e todos os *outputs* de uma DMU, como um valor único (MARIANO, 2008, p. 23).

A produtividade apresentada por Knight (1933) é dada pela fórmula:

$$P = \frac{u_1 \cdot y_1 + u_2 \cdot y_2 + u_3 \cdot y_3 + \dots + u_i \cdot y_i}{v_1 \cdot x_1 + v_2 \cdot x_2 + v_3 \cdot x_3 + \dots + v_j \cdot x_j} = \frac{O_v}{I_v}$$

Em que

P: Produtividade atual de uma DMU (*Decision Making Unit* ou Unidade Tomadora de Decisão)

u_i : Utilidade do *output* i

y_i : Quantidade do *output* i

v_j : Utilidade do *input* j

x_j : Quantidade do *input* j

O_v : *Output virtual*

I_v : *Input virtual*

Segundo Almeida (2007), a distinção entre os conceitos de produtividade e eficiência é essencial. De acordo com a autora, a produtividade pode ser conceituada como a razão entre o que foi produzido (*output*) com o que foi gasto para produzir (*input*), sendo que tem-se um ganho de produtividade quando se consegue produzir mais *outputs* com a mesma quantidade de *inputs* (ou produzir a mesma quantidade de *outputs* com uma menor quantidade de *inputs*). A eficiência, por sua vez, pode ser definida como a relação entre um indicador e seu correspondente máximo (ótimo), resultando em um valor entre 0 e 1. Almeida (2007) ainda aponta que a eficiência pode ser absoluta ou relativa. Na eficiência absoluta a produtividade máxima é um valor teórico e idealizado, enquanto na eficiência relativa a produtividade máxima é representada como a produtividade da concorrente mais eficiente dessa unidade. As equações que representam a produtividade e eficiência são apresentadas a seguir.

$$Produtividade = \frac{\sum outputs}{\sum inputs}$$

$$Eficiência = \frac{Produtividade}{Produtividade_{Máx}}$$

Segundo Carlucci (2012), na técnica DEA a eficiência pode ser orientada ao *input* ou ao *output*. Quando orientada ao *input* (insumo), a eficiência é representada pela quantidade de insumos que pode ser reduzida, sem diminuir a produção (*output*). Da mesma forma, quando orientada ao *output* (produção), representa a capacidade de aumentar a produção sem aumentar os insumos (*inputs*). Segundo o autor, com o aumento da quantidade de produtos pode haver economia ou deseconomia de escala, sendo que o primeiro caso (economia de escala) ocorre quando um aumento relativo menor nos *inputs* provoca um aumento em maior escala nos *outputs* enquanto o segundo caso (deseconomia de escala) ocorre quando há um aumento relativo maior nos *inputs* gerando um aumento relativo menor nos *outputs*.

Estes conceitos foram apresentados graficamente por Farrel (1957), conforme apresentados na Figura 17.

Figura 17 - Fronteira Eficiente com economia ou deseconomia de escala

Fonte: Farrel (1957)

A mensuração da eficiência pode ser feita por meio de várias técnicas, dependendo das características do problema, da base de dados e do que se quer obter (função ou fronteira de eficiência). As principais técnicas para mensuração da eficiência são apresentadas a seguir.

4.2 Técnicas para mensuração da eficiência

Existem duas abordagens principais para estimar a eficiência relativa entre organizações: a abordagem paramétrica e a abordagem não-paramétrica. A principal diferença entre estas duas abordagens é que a primeira especifica uma forma funcional para a função produção, enquanto a abordagem não paramétrica não especifica. A abordagem paramétrica baseia em técnicas econométricas, incluindo a análise de regressão e a análise da fronteira, sendo que os métodos de fronteira são segmentados em fronteira determinística e fronteira estocástica. As abordagens não-paramétricas usam técnicas de programação matemática, sendo os principais métodos os números índices e a análise por envelopamento de dados (SARAFADIS, 2002). Segundo Mariano (2008), a diferença entre as técnicas paramétricas e não paramétricas de análise de eficiência está na maneira como as fronteiras de eficiência são construídas e utilizadas. Para o autor (2008),

[...] enquanto as técnicas paramétricas estimam os parâmetros de uma função para fronteira de eficiência e fazem os cálculos a partir dessa função, as técnicas não-paramétricas calculam a eficiência a partir de um conjunto de formulações, oriundas da construção empírica da fronteira de eficiência a partir dos dados referentes aos *inputs* e *outputs* das DMUs analisadas, sem estimar a função da fronteira (MARIANO, 2008, p. 63).

Baseado em Sarafadis (2002), com detalhamento dos Métodos de Fronteira em Mariano (2008), a mensuração da eficiência pode ser feita por análise de regressão simples, pelo método de fronteira determinista, pela fronteira estocástica, pelos números índices e pela análise envoltória de dados, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Organograma das técnicas de avaliação de eficiência

Fonte: Adaptado de Sarafidis (2002) e Mariano (2008)

Ainda a análise de regressão tenha sido colocada como abordagem paramétrica, há também a regressão não paramétrica, que se distingue da primeira abordagem pela ausência (completa ou quase completa) de conhecimento *a priori* a respeito da forma da função que está sendo estimada. A escolha da técnica, paramétrica ou não paramétrica, depende do tipo do problema, das variáveis e da quantidade de DMUs que serão comparadas. Algumas limitações como correlação entre variáveis, presença de *outliers*, quantidade de DMUs na amostra e quantidade de *inputs* e *outputs* influenciam a escolha do modelo.

O Quadro 9 apresenta as diferenças entre as técnicas paramétricas e não paramétricas na análise de eficiência e as características e restrições de cada uma.

Grupo	Paramétricas	Não-paramétricas
Em que a técnica é baseada	Na determinação da função produção	Na construção empírica da fronteira de eficiência
Correlação entre <i>inputs</i> e <i>outputs</i>	Não é necessária alta correlação	Necessária alta correlação
<i>Outliers</i> e Ruídos	Menos sensíveis	Mais sensíveis
Testes estatísticos	Possibilitam testes estatísticos	Não possibilitam testes estatísticos
Quantidade de DMUs necessárias	Necessitam de um maior número de DMUs	Necessitam de poucas DMUs
Técnicas presentes	Análise de Regressão Funções pré-determinadas (determinística) Fronteira Estocástica	Números Índices Análise por Envoltória de Dados
Restrições	Devem ser utilizados em análises com um único <i>output</i>	Podem ser utilizados em análises com múltiplos <i>outputs</i>

Quadro 9 - Comparação entre as técnicas paramétricas e não paramétricas na análise da eficiência

Fonte: Mariano (2008, p. 66)

4.2.1 Análise de Regressão

A análise de regressão simples é um dos métodos utilizados para calcular a função produção, envolvendo a utilização do método dos mínimos quadrados para a medição de eficiência. Para isso, o primeiro passo é formular um modelo de regressão com o objetivo de identificar a relação que melhor se ajusta aos dados observados. Posteriormente devem ser estimados os resíduos da regressão, que são tratados como medidas de ineficiência (SARAFADIS, 2002). A Figura 19 apresenta um exemplo de análise de eficiência utilizando como técnica a análise de regressão.

Figura 19 - Análise de eficiência utilizando a análise de regressão

Fonte: Adaptado de Sarafadis (2002)

Em que A, B, C, D, E e F são organizações ou, mais genericamente, unidades tomadoras de decisão (DMU²³).

De acordo com o gráfico as DMUs C, E e F seriam consideradas relativamente eficazes, pois se encontram abaixo da linha de regressão ajustada e DMUs A, B e D seriam consideradas relativamente ineficazes, uma vez que se encontram acima desta função. Este método é geralmente chamado de "análise de regressão simples", ou de regressão de mínimos quadrados ordinários (OLS – *Ordinary Last Squares*). Baseado nos mesmos pressupostos, Sarafadis (2002) destaca que uma extensão do OLS é o método dos Mínimos Quadrados Ordinários Corrigidos (COLS – *Corrected Ordinary Last Squares*), que altera a função para baixo até que todos os resíduos (a diferença entre o real e o previsto) sejam positivos. A ineficiência é medida pela distância da DMU até a curva de regressão, exceto para as DMUs eficientes, para o qual o residual é zero.

O principal ponto forte da análise de regressão é que é computacionalmente fácil e simples de ser executado, além de poder estimar o impacto de fatores ambientais (fora de controle) sobre a eficiência. Como ponto fraco, tanto no modelo OLS quanto no COLS, os resíduos da estimativa refletem a eficiência relativa, o erro de medida na variável dependente e o ruído estatístico, ao invés de apenas medir a ineficiência. Além disto, as limitações dos modelos quanto à multicolinearidade (correlação entre as variáveis explicativas) e a falta de graus de liberdade (diferença entre o número de observações disponíveis e o número de fatores²⁴ explicativos) podem causar problemas na análise (SARAFADIS, 2002).

4.2.2 Métodos de Fronteira

Além da análise de regressão, as técnicas paramétricas envolvem os métodos de fronteira (fronteira estocástica e fronteira determinística). O método de fronteira estocástica (SFA - *Stochastic Frontier Analysis*) difere da análise de regressão simples em diversos aspectos. Enquanto que a regressão simples utiliza mínimos quadrados para encontrar o melhor ajuste da função da fronteira, o SFA utiliza técnicas de estimativa (chamados de "máxima

²³ As unidades tomadoras de decisão são mais frequentemente apresentadas na literatura como *Decision Making Units* (DMUs) e por isto a sigla apresentada é referente ao nome em inglês.

²⁴ Variáveis

verossimilhança") para estimar a função de fronteira em uma dada amostra. Além disso, SFA separa os componentes de erro a partir de componentes de ineficiência, podendo levar a medidas mais precisas de eficiência relativa. A estimativa do modelo de fronteira estocástica é feita pelo desenvolvimento de uma forma funcional (função) para a relação entre os *inputs* e *outputs* e de forma funcional para a distribuição de probabilidade do termo eficiência. Desta forma, ao estimar os parâmetros de inclinação (β), são obtidas as estimativas para a fronteira (SARAFADIS, 2002). A Figura 20 apresenta um exemplo de análise de eficiência utilizando como técnica a fronteira estocástica.

Figura 20 - Análise de eficiência utilizando a fronteira estocástica

Fonte: Adaptado de Sarafadis (2002)

O método de fronteira estocástica reconhece a presença de componentes erros e busca separar estes componentes das medidas de ineficiência. A presença de *outliers* pode fazer com que a análise de eficiência seja prejudicada, fazendo com que muitas empresas pareçam ser relativamente eficazes (prejudicando a análise de eficiência). Neste modelo a diferença entre cada observação e a fronteira é atribuída parcialmente à ineficiência, sendo que parte da diferença é vista como um erro na medição do desempenho.

As técnicas determinísticas não consideram cálculos estatísticos em sua formulação. As técnicas estocásticas, por sua vez, baseiam-se em análises estatísticas e são capazes de isolar, na formulação da função produção, a componente de erro aleatório. Segundo Mariano (2008, pp. 66-67), a principal técnica determinística de análise de eficiência é a técnica das funções

pré-determinadas, que são funções-produção já prontas que se ajustam a muitas situações, sendo que dentre os modelos desta técnica (função pré-determinada) estão a função Cobb-Douglas e a função trans-logarítmica. A apresenta Figura 21 apresenta a função Cobb-Douglas.

Figura 21 - Função Cobb-Douglas

Fonte: Coelli *et al.* (1997)

De acordo com Mariano (2008), nas funções determinísticas o componente de erro aleatório não está presente, não são necessárias muitas DMUs para análise, contudo são mais sensíveis aos ruídos. Nas funções estocásticas ocorre o contrário: o componente de erro aleatório está presente, são necessárias muitas DMUs para a análise e são menos sensíveis aos ruídos.

4.2.3 Números Índices

Os números índices representam uma das técnicas não paramétricas para mensurar a eficiência. Considerados métodos simples, os números índices presumem uma relação linear entre *inputs* e *outputs* (retornos de escala constantes) e ponderam os mesmos pesos dos *inputs* e *outputs* para todas as empresas (SARAFADIS, 2002).

Por meio desta técnica é possível calcular a eficiência relativa de uma DMU com ela mesma em períodos diferentes ou dela mesma com apenas mais outra DMU. Por ser comparada duas

a duas (apenas), seu uso é limitado, uma vez que grande parte dos problemas de eficiência envolvem várias DMUs, com múltiplos *inputs* e *outputs*.

Os principais Números Índices utilizados para o cálculo de eficiência são: o Índice de Fischer, o Índice de Törnqvist, o Índice de Malmquist, o Índice de Laspeyres e o Índice de Paasche (MARIANO, 2008). As características dos modelos são apresentadas no Quadro 10.

Modelos	Definição	Utilidades Usadas	Utilidades	Tipos de eficiência	Usos	DMUs necessárias
Índice de Laspeyres	É a relação entre os <i>inputs</i> (ou <i>outputs</i>) virtuais das DMUs base e em análise	São utilizadas apenas as utilidades da DMU Base	Devem ser fornecidas	Apenas total	Serve tanto para comparar duas DMUs diferentes quanto para comparar a mesma DMU em dois períodos de tempo diferentes	Duas
Índice de Paasche	É a relação entre os <i>inputs</i> (ou <i>outputs</i>) virtuais das DMUs base e em análise	São utilizadas apenas as utilidades da DMU em análise				
Índice de Fischer	É a média geométrica entre os índices de Laspeyres e Paasche	São utilizadas tanto as utilidades da DMU base quanto as da DMU em análise				
Índice de Törnqvist	É a média geométrica ponderada da relação entre os <i>inputs</i> (ou <i>outputs</i>) das DMUs base e em análise comparados de dois em dois					
Índice de Malmquist	É calculado comparando-se as DMUs base e em análise por meio de suas distâncias a um ponto fixo, relativas à Fronteira de Eficiência		São calculadas pelo próprio modelo	Total e técnica nas parcelas AE (aumento da eficiência) e AT (aumento de tecnologia)	Serve apenas para comparar a mesma DMU em dois períodos de tempo diferentes	Várias

Quadro 10 - Comparação entre os modelos da Técnica de Números índices

Fonte: Mariano (2008, p. 174)

4.2.4 Análise Envoltória de Dados

A Análise Envoltória de Dados (DEA) é uma abordagem não-paramétrica que depende de programação matemática em vez de técnicas econométricas, com a resolução de um conjunto de problemas através da maximização ou minimização de um determinado objetivo, sujeito à algumas restrições (SARAFADIS, 2002). Segundo Mariano (2008), as técnicas não paramétricas buscam calcular a eficiência a partir da construção de uma fronteira de eficiência (lugar geométrico ocupado por todas as DMUs), enquanto as técnicas paramétricas buscam

calcular a eficiência por meio de uma função produção (formulação matemática que descreve a fronteira de eficiência, indicando a quantidade máxima de *outputs* que pode ser produzida, dada uma determinada quantidade de *inputs*). De acordo com Ferreira e Gomes (2012), por ser uma técnica não paramétrica, a análise envoltória de dados,

[...] não utiliza inferências estatísticas nem se apegua a medidas de tendência central, testes de coeficientes ou formalizações de análise de regressão. O DEA não exige a determinação de relações funcionais entre os insumos e os produtos, nem se restringe a medidas únicas, singulares dos insumos e produtos e permite utilizar variáveis discricionárias, instrumentais ou de decisão, variáveis não discricionárias ou exógenas (fixas) e categóricas (tipo *dummies*) em suas aplicações (FERREIRA; GOMES, 2012, p. 19).

Para Sarafadis (2002), a DEA utiliza técnicas de programação linear matemáticas a fim de encontrar o conjunto de pesos para cada DMU que maximize o seu *score* de eficiência, sujeito à restrição de que nenhuma das DMUs tem uma eficiência pontuação superior a 100 por cento para aqueles pesos. Desta forma, na técnica DEA, a DMU é comparada com sua projeção na fronteira eficiente, sendo que o valor da eficiência é limitado, entre 0 e 1 (em que a eficiência é máxima). Assim, uma DMU pode ser considerada ineficiente se for menos eficiente que outra DMU no conjunto de pesos que maximiza a sua eficiência relativa.

Frequentemente na literatura a análise envoltória de dados é comparada com as demais técnicas de mensuração de eficiência. Assim, são apresentadas a seguir as comparações entre a análise envoltória de dados e as demais técnicas (análise de regressão, modelos de fronteira e números índices), considerando os principais argumentos e limitações em favor de cada técnica.

De acordo com Pimentel (2009), é comum na literatura a comparação entre DEA e análise de regressão. No caso da regressão linear, a análise de regressão resulta em uma reta que não representa o desempenho das unidades analisadas. Charnes *et al.* (1997) discute a utilização de métodos paramétricos para a análise da eficiência. Segundo os autores (1996), a abordagem paramétrica requer a imposição de uma função que relaciona variáveis independentes com a variável dependente, além de exigir pressupostos específicos sobre a distribuição dos termos de erro e muitas outras restrições (em contraste com a DEA que não requer qualquer suposição sobre a forma funcional). Niederauer (1998), baseado na publicação de Charnes *et al.* (1997), apresenta um gráfico comparando a análise de regressão

e o DEA. Conforme observado na Figura 22, a reta de regressão não representa as DMUs eficientes, fazendo do DEA uma ferramenta comparativamente mais precisa para este tipo de análise.

Figura 22 - Comparação entre DEA e Análise de Regressão

Fonte: Niederauer (1998)

A comparação entre os dois modelos de análise depende de uma série de fatores. Devem ser analisadas a quantidade de *inputs* e *outputs*, a necessidade de especificação de uma forma funcional (função que representa a fronteira), o surgimento de *outliers* nos dados, o tamanho da amostra, a colinearidade, correlação, o surgimento de ruídos e a verificação do modelo.

Em comparação à análise de regressão (técnica paramétrica), a análise envoltória de dados apresenta algumas vantagens e desvantagens. Como vantagens, a análise envoltória de dados consegue ser realizada com múltiplos *inputs* e *outputs*, não necessita de uma forma funcional (que pode estar errada) e também não necessita de muitas DMUs. As vantagens da análise de regressão são relacionadas ao fato de que ela não é tão sensível à presença de *outliers* e que permite a realização de testes estatísticos para a verificação do modelo e da seleção de variáveis. Niederauer (2002) faz a comparação entre a análise envoltória de dados e a análise de regressão.

O Quadro 11 apresenta a comparação entre as duas técnicas.

Problema	Análise Envoltória de Dados	Análise de Regressão
Técnica utilizada	Paramétrica	Não-paramétrica
Vários insumos e produtos	Simples	Complexo e raramente compreendido
Especificação da forma funcional	Não é necessário	É necessário e pode estar incorreta
<i>Outliers</i> ou observações não usuais	Avaliação incorreta de eficiência	Não é tão sensível
Tamanho da amostra	Pequenas amostras podem ser adequadas	Se necessárias amostras de tamanho moderado. Estatísticas tornam-se irreais se a amostra for muito pequena e fatores importantes podem ser omitidos da amostra
Fatores exploratórios altamente colineares	Melhor discriminação	Possível perda de interpretação da correlação
Os fatores exploratórios têm baixa correlação	Todos os <i>scores</i> de eficiência tendem a ser próximos da unidade	Não há problema
Ruídos, tais como erro de medição	Altamente sensível	Afetado, mas não tão severamente como o DEA
Verificação, incluindo seleção de variáveis	É possível efetuar análise de sensibilidade, mas é complexa, sendo mais subjetiva	Testes estatísticos diretos

Quadro 11 - Quadro comparativo entre o DEA e Análise de Regressão

Fonte: Adaptado de Niederauer (2002)

Comparado com a análise de fronteira estocástica (outra técnica paramétrica), a DEA tem a vantagem de que não é necessário empregar um pressuposto para a forma funcional de fronteira, não correndo o risco de cometer erros na construção da função. Em comparação com a análise de regressão e, em parte, a análise de fronteira estocástica (SFA), a DEA tem a vantagem que leva em conta apenas as DMUs mais eficientes na formação da fronteira. Além disto, a DEA é computacionalmente menos intenso do que a SFA (pelo menos em sua forma básica) e por esta razão o método tem sido mais amplamente utilizado. Como desvantagens das duas técnicas, tanto a DEA quanto a SFA podem ter a análise de eficiência comprometida por *outliers*. Enquanto na SFA a presença de *outliers* pode fazer com que o modelo deixe de encontrar ineficiência como um todo, na DEA um único *outlier* pode resultar em enormes deficiências, pois ele pode ser a DMU eficiente.

Em comparação com a outra técnica paramétrica (Números Índices) para análise de eficiência produtiva, a Análise por Envoltória de Dados possui algumas vantagens. Além da análise por Números Índices ser limitada à comparação de duas DMUs de cada vez, o uso de números índices requer que as utilidades sejam fornecidas ou calculadas (aumentando a possibilidade de erros), enquanto na DEA as utilidades de todos os *inputs* e *outputs* das DMUs são calculadas e fornecidas para o modelo.

De acordo com Cooper, Seiford e Tone (2007), para a obtenção de resultados consistentes na análise envoltória de dados, é importante que as DMUs sejam comparáveis (realizem as mesmas atividades e tenham objetivos semelhantes) e atuem nas mesmas condições; operem e utilizem múltiplos *inputs* e *outputs* (com diferenças apenas na intensidade de magnitude para cada DMU) e que o número de DMUs seja suficiente para validar o modelo. Ainda que seja possível utilizar dados numéricos negativos para cálculos em programação linear, alguns *softwares* não operam com estes números. Thanassoulis (2001) ainda complementa que as variáveis precisam ter um forte grau de correlação para que possam conseguir resultados representativos.

De acordo com Pimentel (2009), subsidiado pelos estudos de Azambuja (2002), Belloni (2000), Kassai (2002) e Niederauer (2002), a técnica DEA apresenta vantagens e desvantagens. As principais vantagens da DEA são que a técnica permite análise individual da eficiência de cada DMU, diferenciando organizações eficientes de ineficientes. Comparado aos outros modelos, a DEA consegue captar ineficiências que outras técnicas não podem, além de utilizar em seus cálculos, simultaneamente, vários *inputs* e *outputs*. Por ser um método não paramétrico, não necessita da especificação de uma função de produção prévia para construção da fronteira. Como desvantagens, os principais pontos observados são a presença de *outliers*, ruídos ou erros de medições que podem comprometer a construção da fronteira, dos *scores* de eficiência e da análise. Além disto, as alterações na base de dados (DMUs, *inputs* e *outputs*) podem alterar os resultados da análise (PIMENTEL, 2009).

4.3 Análise Envoltória de Dados

Dentre os vários modelos propostos para a análise de eficiência, este trabalho adota como modelo a análise envoltória de dados. As discussões sobre os modelos e técnicas que justificam a escolha foram apresentadas na seção anterior. Assim, esta seção é reservada para discussão das origens, dos conceitos básicos, dos modelos DEA, das etapas para análise de eficiência utilizando a DEA e os estudos sobre a técnica no mundo.

4.3.1 Origens

Os primeiros fundamentos da análise envoltória de dados encontram-se na teoria da produção microeconômica, abordados por Johann-Heinrich von Thünen na obra “*Der Isolierte Staat*”, publicada entre 1842 a 1863. Von Thünen foi um dos primeiros autores a formular a teoria da produtividade marginal (princípio da substituição entre os fatores de produção). Isoladamente outros cientistas também pesquisaram temas correlatos à análise envoltória de dados, em especial estudos sobre teoria da produção, programação linear e medidas de eficiência, tendo se destacado os pesquisadores Cournot, Walras, Pareto, Moore e Marshall (FERREIRA; GOMES, 2012).

Posteriormente, a partir da elaboração dos trabalhos de Charles Cobb e Paul Douglas (que em 1928 formalizaram o conceito matemático da função de produção), de Knight (que em 1933 fez a primeira referência ao cálculo de produtividade com múltiplos *inputs* e múltiplos *outputs*), de John von Newman (que em 1935 desenvolveu um modelo de programação de expansão da economia) e de George Dantzig (que em 1947 reestruturou o problema de programação linear, divulgado apenas em 1951) começaram a surgir as formulações que dariam origem à Análise Envoltória de Dados (MARIANO, 2008, FERREIRA; GOMES, 2012).

Segundo Toresan (1998), a partir da década de 50 surgem as primeiras contribuições para a análise da eficiência técnica com os trabalhos de Koopmans, Debreu, Shephard e Farrel. Em 1951, Tjalling Koopmans estabeleceu o conceito básico de eficiência técnica na produção quando são envolvidos múltiplos produtos e múltiplos insumos. No mesmo período outras importantes contribuições foram feitas no sentido de estabelecer medidas de eficiência. Gerard Debreu (em 1951), Sten Malmquist (em 1953) e Ronald Shephard (também em 1953) propuseram a ideia de função distância como medida de eficiência

Outra obra importante, “*The Measurement of Productive Efficiency*”, publicada por Michael Farrel no fim da década de 1950, contribuiu para a evolução dos conceitos de medidas de eficiência. O trabalho de Farrell (1957) chamou a atenção para o conceito de eficiência produtiva e as consequências do seu reconhecimento para a modelagem de processos de produção.

A formulação mais conhecida da Análise Envolvente de Dados começa apenas em 1970, como resultado das pesquisas de Edward Rhodes, em sua tese de doutorado sobre eficiência de uma série de programas educacionais financiados pelo governo federal que ajudaram alunos desfavorecidos, sob a supervisão de William Cooper. Após várias tentativas, sem sucesso, de analisar os dados utilizando técnicas econométricas tradicionais, Rhodes encontrou no artigo de Farrell (1957) ideias que foram usadas para a definição de eficiência relativa e, desta forma, foram base para seus estudos futuros. Como resultado destas pesquisas, Rhodes e Cooper escreveram juntamente com Abraham Charnes um artigo em que apresentam um modelo de análise de eficiência, que se tornou o mais aceito modelo de DEA (CHARNES; COOPER. RHODES, 1978). Neste artigo, Charnes, Cooper e Rhodes (1978) abordaram as deficiências ou limitações do modelo proposto por Farrel em 1957. Segundo Sutton (2010), as deficiências do modelo de Farrel, abordada por Charnes, Cooper e Rhodes, foram que:

(1) ele assume que cada DMU (unidade tomadora de decisão) tem igualdade de acesso a todas as entradas embora isso não implique que todas as DMUs irão utilizar uma quantidade igual de insumos, (2) a medida Farrell representa apenas “ineficiência técnica”, ignorando assim a possibilidade de folgas diferentes de zero e (3) a medida Farrell está restrita ao caso de saída única e trabalho de Farrell com várias saídas não funciona para conjuntos de dados maiores (SUTTON, 2010, p. 6).

4.3.2 Conceitos Básicos

Na DEA, as organizações (ou atividades) são denominadas, de maneira genérica, unidades operacionais ou unidades tomadoras de decisão (DMU²⁵). Essa denominação comum permite que vários tipos de organizações e atividades econômicas, sociais, empresariais, públicas ou privadas, dos mais diversos tipos e setores sejam analisados, incluindo países, pessoas, processos, associações e empresas (dentre outros). De acordo com Salgado Junior, Bonacim e Pacagnella Junior (2009, p. 499), a definição de DMU é genérica e flexível, desde que utilizem processos tecnológicos semelhantes para transformar os mesmos insumos e recursos em produtos e resultados semelhantes.

Uma das vantagens da DEA é a possibilidade de considerar vários insumos e produtos ao mesmo tempo, além de rendimentos constantes ou variáveis de escala. Segundo Mariano

²⁵ O termo DMU, originado do inglês *Decision Making Units*, é o termo mais utilizado para as unidades tomadoras de decisão.

(2008), a presença de múltiplas entradas e múltiplas saídas torna difícil a comparação do desempenho entre as DMUs e o uso da programação linear da técnica DEA permitiu a resolução deste problema.

Os elementos de uma unidade tomadora de decisão, com múltiplos *inputs* e múltiplos *outputs* são apresentados na Figura 23.

Figura 23 - Elementos de uma unidade tomadora de decisão (DMU)

Fonte: Jubran (2006)

Segundo Ferreira e Gomes (2012), o objetivo da DEA é avaliar o desempenho de organizações e atividade, por meio de medidas de eficiência técnica. A eficiência técnica é um conceito relativo que compara o que foi produzido por unidade de insumo utilizado com o que poderia ser produzido. Assim, a definição geral de eficiência técnica de uma organização ou atividade produtiva está relacionada à produção de um bem ou serviço com a menor utilização possível de recursos, que por sua vez está relacionada à tecnologia adotada e ao respectivo processo de produção. Os autores ainda defendem que o conceito de eficiência técnica não deve ser confundido com eficácia (relacionado ao atendimento do objetivo que se visa atingir, sem considerar os recursos utilizados) e com produtividade (que está relacionada à forma de utilização de recursos para realizar a produção). Segundo os autores,

[..] o conceito de produtividade sugere que o consumo esteja sendo utilizado da melhor forma possível, ou seja, sem excesso. Na Análise Envoltória de Dados, que usa o recurso de otimização da programação linear, a utilização de insumos além do estritamente necessário (excesso) ou a produção aquém da adequada (escassez) são denominadas folgas. (FERREIRA; GOMES, 2012, p. 23)

Farrel (1957), na tentativa de desenvolver métodos para analisar a produtividade, alegava que as medidas encontradas eram muito restritivas, pois não conseguiam combinar múltiplos insumos para criar um único indicador de eficiência. O trabalho de Farrel “limitava-se à um

único produto, uma vez que o uso de múltiplos produtos não atendia aos requisitos necessários para a aplicação a grandes conjuntos de dados” (FERREIRA; GOMES, 2012, p. 21). Neste sentido, a solução (DEA) desenvolvida por Charnes, Cooper e Rhodes (1978), generalizava as medidas de Farrel e permitia medir a eficiência produtiva com múltiplos produtos e múltiplos insumos. Farrel (1957) estabeleceu uma medida empírica de eficiência relativa com base na função distância, conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Isoquanta convexa para medição de eficiência

Fonte: Farrel (1957) com adaptações de Coeli (2008) e Almeida (2012)

Conforme apresentado na Figura 24, no caso de análises de DMUs com dois *inputs* e um *output*, a visualização desta função tridimensional é feita por meio de isoquantas (curva que mostra combinações eficientes de *inputs* para produzir determinada quantidade de *output*). Cada isoquanta do gráfico representa a combinação perfeita de *inputs* para produzir determinado *output*. Assim, todas as DMUs que estiverem na isoquanta são consideradas eficientes.

A eficiência de um sistema produtivo, chamada de eficiência produtiva, se refere à relação entre os *inputs* e *outputs* produzidos e utilizados por esse sistema. A eficiência produtiva resulta da comparação entre os valores observado e ótimo, sendo a eficiência uma relação entre um indicador de desempenho e o máximo que esse indicador poderia alcançar. Neste sentido, a DMU operará com eficiência produtiva se (1) nenhum dos *outputs* puder ser aumentado sem que algum outro *output* seja reduzido ou algum input seja aumentado; e (2) nenhum dos *outputs* puder ser reduzido sem que algum outro *input* seja aumentado ou algum *output* reduzido (MARIANO, 2008, pp. 24-25).

Segundo Ferreira e Gomes (2012, p. 25), a função produção estática de curto prazo referente a um processo de produção de um único produto (*output*) que utiliza um único insumo (*input*). Desta forma, a quantidade de produto é dada em função do insumo. Esta relação pode ser expressa pela seguinte expressão matemática:

$$Q_y = f_y(\text{insumo } X_i)$$

Esta função está representada na Figura 25. A função produção (representada pela fronteira de eficiência - curva S) é formada a partir da composição entre os *inputs* (Eixo x) e os produtos (eixo Y), indicando o máximo que foi produzido para cada nível de recurso e representa as combinações eficientes entre insumo e produto. Nesta função, os pontos B e C são tecnicamente eficientes, uma vez que se referem às produções máximas de Q_y (obtidas em função das utilizações dos insumos X_i).

Figura 25 - Função de produção (variações da produtividade e da eficiência)

Fonte: Mello *et al.* (2005) e Ferreira e Gomes (2012)

Segundo Mariano (2008), a produtividade de uma DMU pode ser calculada pela tangente do ângulo da reta que liga a origem a essa DMU enquanto sua eficiência pode ser calculada com base na distância relativa dessa DMU até a fronteira. Quanto maior for o ângulo, maior a produtividade da DMU. A Figura 26 apresenta esta relação.

Desta forma, na Figura 25, é possível observar que a produtividade do ponto C é maior que a produtividade do ponto B, em função da tangente dos ângulos que os pontos formam com a origem e que o ponto A, fora da curva, representa uma produção ineficiente (com a mesma

quantidade de insumos de B, produz uma quantidade inferior de produtos). Assim, o cálculo da produtividade de uma DMU pode ser calculado com base na tangente, conforme apresenta a Figura 26.

Figura 26 - Cálculo da produtividade de uma DMU (pela tangente)

Fonte: Mariano (2008, pp. 30)

A função produção de uma DMU pode sofrer influência da escala de produção, sendo esta função apresentada nas formas de retornos constantes ou retornos variáveis à escala. Desta forma, a função da produção pode ser segmentada graficamente em quatro regiões: crescente, constante, decrescente e negativo.

Na região crescente, o aumento no número de *inputs* ocasiona um aumento desproporcionalmente maior no número de *outputs* (produção abaixo da capacidade ótima). Posteriormente, na região gráfica constante, o aumento do número de *inputs* ocasiona um aumento proporcional nos *outputs* (capacidade ótima). Na região decrescente, o aumento do número de *inputs* ocasiona um aumento desproporcionalmente menor no número de *outputs* (produção acima da capacidade ótima) e, por fim, na última região gráfica, em que ocorre crescimento negativo, o aumento do número de *inputs* ocasiona uma redução no número de *outputs* (operando muito acima da capacidade ótima). As regiões gráficas são apresentadas na Figura 27.

Figura 27 - Regiões gráficas da influência da escala de produção

Fonte: Mariano (2008, p. 38)

4.3.3 Modelos de Análise Envoltória de Dados

Segundo Mariano (2008), os principais modelos DEA são o modelo CCR (das iniciais de Charnes, Cooper e Rhodes), modelo BCC (das iniciais de Banker, Charnes e Cooper), além dos modelos Multiplicativos Variante e Invariante, dos modelos Aditivos Variante e Invariante e do modelo FDH. O Quadro 12 apresenta as publicações que deram origem aos modelos DEA.

Modelo	Autores	Características
CCR	Charnes, Cooper e Rhodes (1978)	Generalizava as medidas de Farrel (1957) e permitia medir a eficiência produtiva com múltiplos produtos e múltiplos insumos (Retornos Constantes de Escala)
BCC	Banker, Charnes e Cooper (1984)	Generaliza o modelo CCR, considerando tecnologias com rendimentos variáveis de escala (Retornos Variáveis de Escala)
Multiplicativos	Charnes, Cooper, Seiford e Stutz (1982)	Baseiam-se em combinações multiplicativas em que o <i>input</i> e <i>output</i> virtual são resultados da multiplicação entre os <i>inputs</i> e os <i>outputs</i>
Aditivos	Charnes, Cooper, Golany, Seiford e Stutz (1985)	Versão dos modelos de análise envoltória de dados que considera, simultaneamente, a possibilidade de redução de insumo e de aumento da produção, baseado nas folgas de insumos e produtos
FDH	De Prins, Simar e Tulkens (1984)	O modelo relaxa a suposição de convexidade do DEA e surgiu porque os autores não concordavam com a existência de DMUs virtuais

Quadro 12 - Publicações que deram origem aos modelos DEA

Fonte: Autor, baseado em Charnes, Cooper e Rhodes (1978); Banker, Charnes e Cooper (1984); Charnes, Cooper, Seiford e Stutz (1982); Charnes *et al.* (1985) e De Prins, Simar e Tulkens (1984)

Segundo Ferreira e Gomes (2012), os modelos de Análise Envoltória de Dados podem ser orientados a insumo ou a produtos e, em geral, consideram vários insumos e produtos em espaços de n dimensões (que não podem ser visualizadas graficamente). A Figura 28 apresenta a análise envoltória de dados orientada tanto para produtos, quanto para insumos. Nos modelos orientados à insumos (região identificada pela letra B) a representação gráfica no espaço de duas dimensões é feita com uma isoquanta poliangular convexa com relação à origem. Nos modelos orientados à produtos (região identificada pela letra A) a representação gráfica no espaço de duas dimensões é feita com uma isoquanta poliangular côncava com relação à origem.

Figura 28 - Regiões de soluções possíveis da Análise Envoltória de Dados

Fonte: Ferreira e Gomes (2012)

Segundo Ferreira e Gomes (2012, p. 51), o espaço de soluções possíveis, constituído pela região A, inclui os pontos sobre a fronteira de produção eficiente, assim como o espaço de soluções possíveis da região B também inclui os pontos sobre a sua fronteira de produção.

Em um modelo representado por dois insumos e um produto, a representação gráfica pode ser feita por meio de um plano tridimensional, representando as variáveis do modelo conforme é apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Isoquanta da DMU_k com dois insumos e um produto

Fonte: Ferreira e Gomes (2012)

Sendo que

Y_k é o produto 1

X_1 é o insumo 1

X_2 é o insumo 2

$Y_{1k} = Y_k$ (constante)

O modelo CCR, primeiro modelo matemático para a técnica DEA, também pode ser denominado modelo dos Retornos Constantes à Escala, tem como hipótese que os *inputs* e *outputs* são proporcionais entre si. Desta forma, o formato da fronteira de eficiência do modelo CCR é uma reta de 45°. O modelo BCC, também conhecido como modelo de Retornos Variáveis à Escala, propõe comparar DMUs que operem em escala semelhante, fazendo com que a fronteira de eficiência seja constituída por um conjunto de retas de ângulos variados.

Devido às diferenças de tipo de retorno, os dois modelos calcularão tipos diferentes de eficiência, sendo que o modelo CCR calcula a eficiência total ou produtiva enquanto o modelo BCC calcula a eficiência técnica (MARIANO, 2008). Mello *et al.* (2004) apresenta na Figura 30 a representação das fronteiras BBC e BCR para o caso bidimensional.

Figura 30 - Comparação entre os modelos BBC e CCR

Fonte: Mello *et al.* (2004, p. 92)

Os modelos CCR e BCC podem ser orientados tanto à *inputs* quanto à *outputs*. Segundo Vilela (2004), nos modelos orientados à *inputs*, busca-se identificar qual o nível de redução *inputs* pode ser feita, sem alterar a produção (*outputs*). Pelo mesmo raciocínio, nos modelos orientados à *outputs*, busca-se identificar qual o maior nível de produção (*outputs*) se pode obter, mantendo constantes os níveis de *inputs*. Kassai (2002), baseada em um trabalho de Charnes *et al.* (1997) apresenta na Figura 31 a classificação entre as escalas e orientação dos modelos.

Figura 31 - Classificação entre ganhos e escala e orientação

Fonte: Charnes *et al.* (1997, p. 67) e Kassai (2002)

De acordo com Kassai (2002), os modelos lineares podem ser combinados pela orientação (insumo ou produto) e pela escala (constante ou variável), originando quatro tipos de modelos: dois modelos CCR (orientados a insumo ou produto) e BCC (orientados a insumo ou produto).

Figura 32 - Variáveis necessárias para o cálculo da eficiência por uma orientação qualquer

Fonte: Mariano (2008)

Modelo CCR

O modelo CCR, com retornos constantes de escala, determina a eficiência técnica pela otimização da divisão entre a soma ponderada de *outputs* e a soma ponderada de *inputs*. A eficiência técnica da DMU_o (objetivo) pode ser calculada por:

$$Ef_o = \frac{\sum_{j=1}^m u_j y_{jo}}{\sum_{i=1}^r v_i x_{io}} = \frac{u_1 y_{1o} + u_2 y_{2o} + \dots + u_m y_{mo}}{v_1 x_{1o} + v_2 x_{2o} + \dots + v_r x_{ro}} \quad (1)$$

Em que

Ef_o é a eficiência técnica da DMU_o

$u_1 y_{1o} + u_2 y_{2o} + \dots + u_m y_{mo}$ é o Produto virtual

$v_1 x_{1o} + v_2 x_{2o} + \dots + v_r x_{ro}$ é o Insumo virtual

u_j e v_i são os pesos que devem ser determinados para cada DMU_o

Com o objetivo de maximizar entre o produto virtual e o insumo virtual é necessário que os pesos u_j e v_i sejam determinados.

De acordo com Ferreira e Gomes (2012, p. 69), o cálculo da eficiência técnica pressupõe pesos iguais para todas as k DMUs, contudo é preciso de programação matemática para a DMU possa ter valores diferentes das variáveis produtos e insumos, e pesos diferentes que possam ser mais favoráveis quando comparados aos das demais DMUs. Para isto, é necessário solucionar a programação matemática fracionária (PMF) a seguir (que posteriormente será transformada em programação linear).

$$PMFo \rightarrow Ef_o = \frac{\sum_{j=1}^m u_j y_{jo}}{\sum_{i=1}^r v_i x_{io}} = \frac{u_1 y_{1o} + u_2 y_{2o} + \dots + u_m y_{mo}}{v_1 x_{1o} + v_2 x_{2o} + \dots + v_r x_{ro}} \quad (2)$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_{j=1}^m u_j y_{jk}}{\sum_{i=1}^r v_i x_{ik}} = \frac{u_1 y_{1k} + u_2 y_{2k} + \dots + u_m y_{mk}}{v_1 x_{1k} + v_2 x_{2k} + \dots + v_r x_{rk}} \leq 1, \forall k$$

$$u_1, u_2, \dots, u_m \geq 0 \quad \forall j$$

$$v_1, v_2, \dots, v_r \geq 0 \quad \forall i$$

Por meio do modelo de retornos constantes de escala (CCR), a eficiência da DMUo é dada por:

$$\text{Maximizar a Função Objetivo } Ef_o = \frac{\sum_{j=1}^m u_j y_{jo}}{\sum_{i=1}^r v_i x_{io}} \quad (3)$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_{j=1}^m u_j y_{jk}}{\sum_{i=1}^r v_i x_{ik}} \leq 1, \forall k$$

$$u_j, v_i \geq 0 \quad \forall i, j$$

A resolução dessa programação matemática resulta valores para as incógnitas u_j e v_i que maximizam a medida de eficiência técnica da DMUo, sujeitos a restrição de que todas as medidas de eficiência de todas as DMUs sejam menores ou iguais 1. Segundo Ferreira e Gomes (2012, p. 71), com o objetivo de transformar essa programação matemática em programação linear deve-se tornar o denominador da função objetivo igual a uma constante (normalmente 1, eliminando o denominador) e tornar a restrição uma diferença entre o numerador e o denominador que seja menor ou igual a zero. Assim, as expressões 2 e 3 transformam-se em modelos com orientação a insumo ou orientação a produto por meio dos multiplicadores CCR.

Orientação a Insumo

$$\text{Maximizar } Ef_o = \sum_{j=1}^m u_j y_{jo}$$

(u, v)

Sujeito a

$$\sum_{i=1}^r v_i x_{io} = 1$$

$$\sum_{j=1}^m u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^r v_i x_{ik} \geq 0 \quad \forall k$$

$$u_j, v_i \geq 0 \quad \forall i, j$$

Orientação a Produto

$$\text{Minimizar } Ef_o = \sum_{i=1}^r v_i x_{io}$$

(u, v)

Sujeito a

$$\sum_{j=1}^s u_j y_{jo} = 1$$

$$\sum_{j=1}^s u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^r v_i x_{ik} \leq 0 \quad \forall k$$

$$u_j, v_i \geq 0 \quad \forall i, j$$

Graficamente o modelo CCR é representado por uma reta (fronteira de eficiência) em que as DMUs ineficientes ficam abaixo desta fronteira enquanto as DMUs eficientes ficam na fronteira. A Figura 33 representa o modelo CCR.

Figura 33 - Fronteira eficiente em um modelo DEA do tipo de retorno de escala constante (CCR)

Fonte: Cooper, Seiford e Tone (2007)

Modelo BCC

O modelo criado por Banker, Charnes e Cooper (1984), modelo BCC, generaliza o modelo CCR, considerando tecnologias com rendimentos variáveis de escala (RVE). Segundo Ferreira e Gomes (2012), quando o conjunto de DMUs tem tamanho e características diversas (empregados, tamanho do ativo, tecnologia, dentre outros), elas tendem a ter diferentes rendimentos em escala, que podem ser constantes, crescentes ou decrescentes. No caso de rendimentos constantes de escala (RCE) as variações nos insumos resultam em variações proporcionais nos produtos. Quando as variações nos insumos resultam em variações mais do que proporcionais nos produtos há rendimentos de escala não decrescentes (RND) ou, em outras palavras, rendimentos crescentes e constantes. Por fim, quando as variações nos insumos resultam em variações menos do que proporcionais nos produtos prevalecem os rendimentos não crescentes de escala (RNC) ou, em de outra forma, rendimentos constantes e

decrecentes. (FERREIRA; GOMES, 2012). Em consideração as perspectivas (primal ou dual), de acordo com Thanassolis (2001) e Mariano (2008),

[...] a perspectiva Primal, também conhecida como forma dos multiplicadores, é obtida a partir da linearização da perspectiva fracionária. Essa linearização transforma o problema de programação fracionária, com infinitas soluções, em um problema de programação linear, que possui uma única solução. [...] A todo problema de programação linear associa-se outro problema de programação linear chamado Dual, cujo resultado da função objetivo é o mesmo do problema original que é chamado de Primal (MARIANO, 2008, p. 85; THANASSOLIS, 2001).

A formulação dos modelos dos multiplicadores com rendimentos variáveis de escala são apresentados a seguir.

Dual Orientação a Insumo

$$\text{Maximizar } Ef_o = \sum_{j=1}^m u_j y_{jo} + u_0$$

(u, v)

Sujeito a

$$\sum_{i=1}^r v_i x_{io} = 1$$

$$\sum_{j=1}^m u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^r v_i x_{ik} + u_0 \leq 0 \quad \forall k$$

$$u_j, v_i \geq 0 \quad (\varepsilon) \quad \forall i, j$$

RCE acrescentar $u_0 = 0$

RVE acrescentar u_0 livre

RNC acrescentar $u_0 \leq 0$

RND acrescentar $u_0 \geq 0$

Dual Orientação a Produto

$$\text{Minimizar } Ef_o = \sum_{i=1}^r v_i x_{io} + v_0$$

(u, v)

Sujeito a

$$\sum_{j=1}^s u_j y_{jo} = 1$$

$$\sum_{j=1}^s u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^r v_i x_{ik} + v_0 \leq 0 \quad \forall k$$

$$u_j, v_i \geq 0 \quad (\varepsilon) \quad \forall i, j$$

RCE acrescentar $v_0 = 0$

RVE acrescentar v_0 livre

RNC acrescentar $v_0 \geq 0$

RND acrescentar $v_0 \leq 0$

Figura 34 - Fronteira eficiente em um modelo DEA do tipo de retorno de escala constante (BCC)

Fonte: Cooper, Seiford e Tone (2007)

Modelo Multiplicativo

De acordo com Mariano (2008), os modelos Multiplicativos (Variante e Invariante) foram propostos por Charnes, Cooper, Seiford e Stutz em 1982. Estes modelos baseiam-se em combinações multiplicativas em que o *input* e *output* virtual são resultados da multiplicação entre os *inputs* e os *outputs*. Com os modelos Multiplicativos é possível calcular a elasticidade entre os fatores, de forma a avaliar quanto o aumento unitário de um *input* ou *output* gera de impacto de eficiência (CHARNES ET AL., 1982).

Os modelos multiplicativos, que assumem as formas variante (que possui retornos variáveis de escala) e invariante (retornos constantes de escala), baseiam-se em combinações multiplicativas em que o *input* ($\prod_{j=1}^n x_{j0}^{v_j}$) e o *output* ($\prod_{i=1}^n u_{i0}^{v_i}$) virtual (MARIANO, 2008).

Modelo Aditivo

Os primeiros modelos, CCR e BCC, eram equacionados para operar de duas formas: poderiam ser orientados a insumos (quando minimizam a quantidade de insumos, mantendo o mesmo volume de produção) ou orientados a produto (quando maximizam a produção mantendo a mesma utilização de insumos). Em 1985, Charnes, Cooper, Golany, Seiford e Stutz desenvolveram uma versão dos modelos DEA que considera, simultaneamente, a possibilidade de redução de insumo e de aumento da produção, baseado nas folgas de insumos e produtos (CHARNES ET AL., 1985).

O modelo aditivo, ou modelo baseado nas folgas, pressupõe que o valor marginal das folgas dos insumos e produtos maiores que zero seja igual. Assim como no caso do modelo multiplicativo, os modelos aditivos também assumem as formas variante (que possui retornos variáveis de escala) e invariante (retornos constantes de escala). Segundo Gomes, Soares de Mello e Biondi Neto (2003, p. 19), o modelo aditivo pode ser visto como uma combinação dos modelos DEA BCC orientados a *input* e a *output*, que maximiza as folgas em direção a uma DMU eficiente, sem redução equiproporcional ou determinação de orientação. O modelo original orientado a produto é expresso por:

$$\text{Maximizar}_{(\lambda_k, S_i^-, S_m^+)} \quad \sum_{i=1}^r S_i^- + \sum_{m=1}^r S_m^+$$

Sujeito a

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k X_{ik} + S_i^- = X_{i0} \quad i = 1, 2, \dots, r;$$

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k X_{mk} + S_m^+ = Y_{m0} \quad m = 1, 2, \dots, s;$$

$$\lambda_k, S_i^-, S_m^+ \geq 0 \quad k = 1, 2, \dots, n;$$

$$\text{RCE} \quad \lambda_k \geq 0 \quad \forall k \quad k = 1, 2, \dots, n;$$

$$\text{RVE acrescentar} \quad \sum_{k=1}^n \lambda_k = 1$$

$$\text{RNC acrescentar} \quad \sum_{k=1}^n \lambda_k \leq 1$$

$$\text{RND acrescentar} \quad \sum_{k=1}^n \lambda_k \geq 1$$

De acordo com Ferreira e Gomes (2012, p. 127), o modelo aditivo permite que sejam introduzidos “julgamentos de valor” de especialistas conhecedores do ramo de atividade e das DMUs, por meio de pesos que atribuam importância diferenciada na avaliação de insumos e produtos. Assim, o modelo aditivo, com julgamento de valor é expresso por:

$$\text{Maximizar}_{(\lambda_k, S_i^-, S_i^+)} \quad \sum_{i=1}^r W_i^- S_i^- + \sum_{m=1}^r W_i^+ S_m^+$$

Sujeito a

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k X_{ik} + S_i^- = X_{i0} \quad i = 1, 2, \dots, r;$$

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k X_{mk} + S_i^+ = Y_{m0} \quad m = 1, 2, \dots, s;$$

$$\lambda_k, S_i^-, S_m^+ \geq 0 \quad k = 1, 2, \dots, n;$$

$$\text{RCE} \quad \lambda_k \geq 0 \quad \forall k \quad k = 1, 2, \dots, n;$$

$$\text{RVE acrescentar} \quad \sum_{k=1}^n \lambda_k = 1$$

$$\text{RNC acrescentar} \quad \sum_{k=1}^n \lambda_k \leq 1$$

$$\text{RND acrescentar} \quad \sum_{k=1}^n \lambda_k \geq 1$$

Graficamente, o modelo aditivo (com folgas) pode ser representado pela Figura 35. Neste modelo observa-se um modelo BCC, com rendimento variável de escala, em que ocorrem folgas.

Figura 35 - Exemplos de folga como correção da fronteira linear por partes

Fonte: Mariano (2008, p. 99)

Modelo FDH

O modelo de Livre Disposição de Envoltória, também conhecido como modelo *Free Disposal Hull* (FDH) busca medir a eficiência comparando a DMU com a DMU eficiente e real mais próxima a ela, ignorando DMUs virtuais que poderiam servir de meta. Desenvolvido por Dominique De Prins, Leopold Simar e Henry Tulkens em 1984, o modelo FDH relaxa a suposição de convexidade do DEA (DE PRINS; SIMAR; TULKENS, 1984). Segundo Ferreira e Gomes (2012), o modelo surgiu porque os autores De Prins, Simar e Tulkens não concordavam com a existência de DMUs virtuais (combinações lineares convexas de algumas DMUs eficientes) e queriam assegurar que a determinação dos *scores* de medidas de eficiência das DMUs tivesse como base apenas dados reais observados, sem restrição de convexidade e DMUs virtuais.

De acordo com Mariano (2008, p. 131), a fronteira de eficiência do modelo FDH apresenta o formato de degraus, eliminando as combinações lineares entre DMUs e fazendo com que a DMU ineficiente seja comparada apenas com DMUs reais. O gráfico da fronteira de eficiência FDH é apresentado na Figura 36.

Figura 36 - Comparação do modelo FDH com o modelo BCC

Fonte: Mariano (2008, p. 132)

Os modelos FDH, com orientação a insumo e orientação a produto, são apresentados a seguir.

Orientação a Insumo

Minimizar θ
 (θ, λ)

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k X_{ik} + S_i^- = \theta X_{i0} \quad \forall i$$

$$i = 1, 2, \dots, r;$$

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k X_{mk} + S_i^+ = Y_{m0} \quad \forall m$$

$$m = 1, 2, \dots, s;$$

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1; \quad \lambda_k \in \{0,1\}, \text{ binário}$$

Orientação a Produto

Maximizar ϕ
 (ϕ, λ)

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k X_{ik} + S_i^- = X_{i0} \quad \forall i$$

$$i = 1, 2, \dots, r;$$

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k X_{mk} + S_i^+ = \phi Y_{m0} \quad \forall m$$

$$m = 1, 2, \dots, s;$$

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1; \quad \lambda_k \in \{0,1\}, \text{ binário}$$

4.3.4 Comparativo entre os modelos DEA

Mariano (2008) apresenta um quadro resumo dos modelos da técnica DEA.

Modelo	Retorno à Escala	Forma da Fronteira	Tipo de Eficiência	Formulação Original	Orientação	Unidade de Medição	Vantagens Adicionais	Folga
Aditivo Variante	Variável	Linear por partes	Não calcula	Programação Linear	Mista	Influencia o Resultado	Calcula a eficiência de menor esforço	Servem de parâmetro no cálculo das metas
Aditivo Invariante	Constante	Reta de 45°				Não influencia o resultado	Calcula as elasticidades e lida com superfícies côncavas e convexas	
Multiplicativo Variante	Variável	Cobb-Douglas por partes						
Multiplicativo Invariante	Constante	Log-Linear						
FDH	Variável	Degraus	Técnica	Programação inteira mista	Ao <i>input</i> ou ao <i>output</i>		Analisa em separado <i>inputs</i> e <i>outputs</i>	Servem para corrigir distorções na fronteira de eficiência
BCC	Variável	Linear por partes						
CCR	Constante	Reta de 45°	Total	Programação Fracionária				

Quadro 13 - Resumo dos modelos DEA

Fonte: Mariano (2008)

4.4 Etapas da análise de eficiência

A metodologia de análise de eficiência produtiva envolve seis etapas: seleção das DMUs, seleção de *inputs* e *outputs*, escolha da técnica, modelo e perspectiva, escolha da ferramenta computacional, implementação técnica e análise dos resultados. A metodologia para análise da eficiência produtiva é apresentada no Quadro 14.

Etapas	Objetivos
Seleção das DMUs	As DMUs devem possuir os mesmos <i>inputs</i> e <i>outputs</i> (que podem variar em intensidade). Para evitar distorções, devem ser selecionadas uma quantidade mínima de DMUs, calculadas ²⁶ em função da quantidade de <i>inputs</i> e <i>outputs</i> .
Seleção de <i>inputs</i> e <i>outputs</i>	A seleção de <i>inputs</i> e <i>outputs</i> pode ser feita por diversos critérios como propõem Golany e Roll (1989), Mello <i>et al.</i> (2004), Senra, Naci e Angulo Meza (2005) e Senra <i>et al.</i> (2007), sendo que depois de selecionados devem ser feitos testes estatísticos para verificar se a escolha foi adequada.
Escolha da técnica, modelo e perspectiva	As técnicas (paramétricas ou não paramétricas), modelos e perspectivas devem ser escolhidas de acordo com o problema que se quer resolver, o que depende do número de <i>inputs</i> e <i>outputs</i> .
Escolha da ferramenta computacional	A ferramenta computacional depende da complexidade do problema e da técnica escolhida (Excel, Matlab, Lindo, Otimiza, Frontier Analyst dentre outros)
Implementação técnica	Aplicação do modelo escolhido na ferramenta computacional

²⁶ Segundo Cooper *et al.* (2001), a quantidade mínima de DMUs é dada em função da fórmula: $z = \text{MAX} \{n.m; 3.(n+m)\}$; em que n é o número de *inputs*; m é o número de *outputs*; e z é o número de DMUs em avaliação. Para Jubran (2006), o número recomendado deve ser pelo menos $2.m.n$ (duas vezes o número de *inputs* pelo número de *outputs*).

Análise dos resultados	Fazer análise criteriosa dos resultados obtidos
------------------------	---

Quadro 14 - Metodologia para análise de eficiência produtiva

Fonte: Adaptado de Mariano (2008)

De acordo com Senra, Nanci e Angulo Meza (2005) alguns procedimentos metodológicos podem ser utilizados na escolha das variáveis (*input* e *output*) como: (1) Método Multicritério; (2) Método Multicritério Combinatório Inicial; (3) Método Multicritério Combinatório por Cenários, (4) Método Multicritério Total e (5) Método Multicritério Total Simplificado.

Segundo Senra *et al.* (2007), o Método Multicritério, é um método com alta participação do tomador de decisão, que deve escolher um *input* e um *output* que farão parte, obrigatoriamente do modelo. Neste método, a relação causal é medida através de um ajuste à fronteira, calculado pela eficiência média de todas as DMUs. O Método Multicritério Combinatório Inicial, por sua vez, parte do princípio que o tomador de decisão não deseja, não é capaz ou é indiferente de emitir opiniões sobre o par inicial a ser incluído no modelo. O Método Multicritério Combinatório por Cenários “é uma evolução na linha de exigir menos informação” ao tomador de decisão, de modo que todas as variáveis devem ser incluídas para em seguida ser feita a comparação entre os modelos com diferentes números de variáveis. Desta forma, este é um método em duas fases, uma (1ª fase) em que se constrói cenários que serão analisados para que o melhor cenário seja escolhido posteriormente (2ª fase).

Senra *et al.* (2007) ainda cita o método I-O *Stepwise* (*input-output Stepwise*). Segundo os autores, o método I-O *Stepwise* parte da premissa que a seleção de variáveis deve obedecer ao princípio de máxima relação causal entre *inputs* e *outputs*, baseando-se na observação das variáveis que contribuem muito ou pouco para a eficiência média do modelo. Assim, as variáveis que pouco contribuem podem ser retiradas no modelo. Neste método, o tomador de decisão identifica previamente as variáveis (*inputs* e *outputs*) para avaliar o acréscimo da eficiência média na inclusão de uma variável.

Para Senra, Nanci e Angulo Meza (2005) o Método Multicritério Total adota uma aproximação diferente de todos outros, levando ao melhor grupo de variáveis, baseado na comparação de todas as combinações possíveis entre todas as variáveis (combinações n a n). Este método, entretanto, por testar todas as alternativas, é praticamente inviável para modelos

complexos e com grande número de variáveis. Por fim, o Método Multicritério Total Simplificado tem como objetivo desenvolver um procedimento que encontre os bons resultados do Método Multicritério Total, aliado a um baixo custo de cálculo da metodologia de inserção de variáveis. Para isto, este método utiliza a construção de cenários (Método Combinatório por Cenários) com as alterações inseridas pelo Método Combinatório Total quanto ao critério de seleção.

Outros autores também discutiram o processo de seleção de variáveis. Para Golany e Roll (1989), o processo de seleção de variáveis envolve as etapas: (1) *Judgmental screening*; *Non-DEA quantitative analysis*; e *DEA based analysis*. Segundo Angulo-Meza *et al.* (2007), a primeira etapa refere-se à distinção entre variáveis determinantes de eficiência e variáveis explicativas de ineficiência. A segunda etapa sugere o uso de análise de regressão para determinar se uma variável deve ser *input* ou *output*. Por fim, a terceira etapa pode ser usada para identificar as variáveis que deverão ser excluídas (sem eficiência significativa ao modelo). O modelo proposto por Golany e Roll é apresentado na Figura 37.

Figura 37 - Fluxograma para desenvolvimento de uma aplicação DEA

Fonte: Golany e Roll (1989, p.240)

Mello *et al.* (2004) consideram duas formas como as melhores para seleção automática de variáveis em modelos DEA, sendo que a primeira forma busca o melhor ajuste da DMU à fronteira eficiente (baseado na correlação entre as variáveis de forma a provocar maior eficiência ao modelo), enquanto a segunda forma, considera a DEA como ferramenta Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA - *Multicriteria Decision Aid*).

4.5 Estudos sobre Análise Envoltória dos Dados (DEA)

Desde o desenvolvimento da técnica, a análise envoltória de dados tem se expandido nas mais diversas áreas do conhecimento humano. Com pouco mais de 35 anos da publicação de sua forma mais conhecida, a técnica é aplicada em mais de 27 áreas do conhecimento e utilizada em várias partes do mundo, com destaque importante para a China e Estados Unidos, segundo dados da base Scopus.

Alguns autores tem se dedicado a fazer um levantamento sobre as publicações envolvendo a técnica, apontando as áreas de conhecimento com maior destaque (AVKIRAN; PARKER, 2010), os principais autores citados (EMROUZNEJADA, PARKER, TAVARES, 2008; LIU ET AL., 2013b) e a evolução das publicações (LIU ET AL., 2013a). Várias publicações foram feitas entre 2008 e 2010, período em que a técnica completou 30 anos, contudo foram selecionados apenas alguns trabalhos para sintetizar este levantamento.

Avkiran e Parker (2010) fizeram um levantamento das publicações sobre a técnica, em períodos agrupados de cinco anos (de 1978 a 2007). Até o ano de 2007 as principais publicações sobre a análise envoltória de dados eram relacionadas às (1) ciências da decisão, (2) ciências sociais, (3) área de negócios, gestão e contabilidade, (4) engenharia, (5) economia, econometria e finanças, (6) matemática e (7) ciências da computação.

Os dados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Publicações sobre DEA por área do conhecimento

Área	1978- 1982	1983- 1987	1988- 1992	1993- 1997	1998- 2002	2003- 2007
Agrárias e Ciências Biológicas				3	24	94
Bioquímica, Genética e Biologia Mol.			3	10	11	26
Ciência Ambiental		2	8	14	19	73
Ciência da Computação			10	22	59	139
Ciência dos Materiais				1	4	13
Ciências da Decisão	2	14	41	169	278	386
Ciências Sociais		3	35	110	252	363
Ciências da Terra e Planetárias		2	3	12	4	13
Economia, Econometria e Finanças	1		13	59	172	290
Energia				4	11	38
Enfermagem		2	6	10	11	16
Engenharia		2	16	40	95	302
Engenharia Química					3	13
Física e Astronomia					3	17
Imunologia e Microbiologia			4	7	14	9
Matemática		2	25	77	161	290
Medicina		2	9	10	25	69
Multidisciplinar				1	1	15
Negócios, Gestão e Contabilidade	2	6	21	94	218	363
Neurociências					1	
Odontologia					1	1
Profissões de Saúde		2	5	9	21	17
Psicologia					4	14
Química					1	1
Veterinária				2		5
Total	5	37	199	654	1393	2567

Fonte: Avkiran e Parker (2010)

Em um levantamento mais recente, feito na base Scopus entre 2008 e 2013, as áreas do conhecimento que mais utilizaram a DEA permanecem praticamente as mesmas, alterando apenas a posição relativa das publicações. Neste último período analisado, os estudos na área de engenharia tem sido responsáveis pela maior quantidade de publicações sobre a técnica, seguido da área de negócios, gestão e contabilidade e da área das ciências da decisão. As outras quatro áreas com maior número de publicações são matemática; ciências da computação; economia, econometria e finanças e ciências sociais como apresentado no Gráfico 11. Juntas, estas sete áreas do conhecimento corresponderam a 58,1% das publicações sobre o tema nos últimos 6 anos.

Gráfico 11 - Publicações sobre DEA por área do conhecimento

Fonte: Base de dados Scopus

Com outro foco, Emrouznejada, Parker, Tavares (2008) e Liu *et al.* (2013b) fizeram um levantamento sobre os principais pesquisadores da técnica DEA, buscando identifica-los pela quantidade de citações em trabalhos científicos e pelos índices de publicações de cada autor.

Emrouznejada, Parker, Tavares (2008) fizeram um levantamento sobre os autores citados nas pesquisas sobre a Análise Envoltória de Dados, avaliando o percentual de publicações dos 12 principais pesquisadores do tema. Com base nesta pesquisa, Emrouznejada, Parker, Tavares (2008) conseguiram evidenciar quais são os principais autores de DEA, colocando em destaque os trabalhos de William Cooper, Rolf Färe, Shawna Grosskopf, Jati Sengupta, Abraham Charnes, Lovell, Emmanuel Thanassoulis, Rajiv Banker, Toshiyuki Sueyoshi, Jose Zhu, Wade Cook e Lawrence Seiford. Os dados do levantamento são apresentados no Gráfico 12.

Gráfico 12 - Autores com a maioria das referências

Fonte: Emrouznejada, Parker, Tavares (2008)

Liu *et al.* (2013b), também com o objetivo de identificar os autores com as maiores contribuições para a pesquisa sobre a análise envoltória de dados, fizeram um levantamento baseado no índice-g e o índice-h. O índice-g é definido como sendo o maior número de publicações de um pesquisador que, juntas, receberam um total de citações igual ou maior que g^2 . O índice-h, por sua vez, é utilizado para quantificar a produtividade e o impacto de cientistas baseando-se nos seus artigos mais citados. Os autores encontrados por Liu *et al.* (2013b) são praticamente os mesmos encontrados por Emrouznejada, Parker, Tavares (2008), com apenas algumas exceções: o autor Jati Sengupta não aparece na relação de Liu *et al.* (2013b) enquanto os autores Leopold Simar e Roert Thrall não são destacados no levantamento de Emrouznejada, Parker, Tavares (2008). Os dados do levantamento de Liu *et al.* (2013b) são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Principais autores sobre DEA, pelos índices G e H

Ranking Índice G	Ranking Índice H	Autor	Índice G	Índice H	Anos em atividade	Publicações
1	1	Cooper, W. W.	82	30	1978–2009	82
2	4	Banker, R. D.	43	22	1980–2010	43
3	2	Charnes, A.	42	25	1978–1997	42
4	5	Seiford, L. M.	42	22	1982–2009	42
5	3	Grosskopf, S.	41	23	1983–2010	69
6	6	Färe, R.	40	22	1978–2010	79
7	9	Lovell, C. A. K.	33	17	1978–2007	40
8	10	Thanassoulis, E.	30	16	1985–2010	45

9	7	Zhu, J.	29	18	1995–2010	70
10	12	Simar, L.	29	15	1995–2010	29
11	13	Cook, W. D.	27	15	1985–2010	63
12	15	Thrall, R. M.	27	14	1986–2004	27
13	8	Sueyoshi, T.	26	18	1986–2010	58
14	11	Golany, B.	26	16	1985–2008	26
15	14	Wilson, P. W.	26	15	1993–2009	26
16	16	Dyson, R. G.	22	13	1985–2010	22
17	17	Talluri, S.	21	13	1997–2007	22
18	18	Athanassopoulos, A. D.	20	13	1995–2004	23
19	19	Pastor, J. T.	19	12	1995–2010	25
20	22	Forsund, F. R.	19	9	1979–2010	22

Fonte: Liu *et al.* (2013b)

Em outra publicação, Liu *et al.* (2013a) fizeram um levantamento sobre a evolução das publicações sobre a análise envoltória de dados e destacaram a evolução exponencial das publicações da técnica. Ao observar o gráfico é possível observar, além do crescimento de publicações, o aumento do número de artigos com aplicações da técnica em diversas áreas, corroborando com o levantamento feito por Avkiran e Parker (2010).

Desta forma, as publicações deixam de ser direcionadas apenas para discussão metodológica, sendo aplicadas como ferramenta de análise de eficiência nas diversas áreas do conhecimento. O Gráfico 13 apresenta a evolução de publicações sobre DEA.

Gráfico 13 - Evolução das publicações sobre DEA

Fonte: Liu *et al.* (2013a)

Dentre as publicações com uso da DEA, Zhou, Ang e Poh (2008) fazem um levantamento de publicações de análise de eficiência nas áreas de energia e meio ambiente. No período analisado foram encontradas 100 publicações sendo a mais antiga de 1983. Segundo os autores, as empresas de eletricidade são responsáveis pelo maior número de estudos nesta área (energia e meio ambiente com utilização do DEA), seguido pelas áreas de modelagem de desempenho ambiental e estudo de eficiência energética.

Além do levantamento de Zhou, Ang e Poh (2008), outros 36 estudos, retirados da base Scopus, foram analisados para avaliar as características da análise de desempenho nas áreas de energia e meio ambiente, bem como as variáveis utilizadas nos estudos. O Quadro 15 apresenta a relação de estudos complementares à Zhou, Ang e Poh.

Autor	Input	Output	DMUs
Ramanathan (2006)	Consumo de fontes de energia não fósseis	PIB, Emissão de CO ₂	Comparação de eficiência global entre 1980 e 2001
Chien e Hu (2007)	Trabalho, capital social e consumo de energia	PIB	45 países (OCDE e não OCDE)
Lee (2008)	Intensidade do uso de energia (observado)	Intensidade do uso de energia (previsto)	47 escritórios do governo de Taiwan
Lozano e Gutierrez (2008)	População	PIB (<i>output</i> desejável), Consumo de energia primária e GEE (<i>outputs</i> indesejáveis)	Países do anexo B do Protocolo de Quioto
Zhou e Ang (2008)	Estoque de Capital, força de trabalho, fontes energéticas (carvão, petróleo, gás e “outros”)	PIB, Emissões de CO ₂	21 países da OCDE
Bosetti e Buchner (2009)	Índice de Gini e temperatura global	PIB	11 cenários de políticas climáticas globais
Feroz <i>et al.</i> (2009)	Uso de fertilizantes, uso de pesticidas, consumo de energia e emissões de CO ₂	PIB per capita e expectativa de vida além dos 60 anos	36 países participantes do protocolo de Quioto
Managi e Kaneko (2009)	Número de funcionários, Salário na indústria, Estoque de capital	Águas residuais, resíduos sólidos e efluentes gasosos	29 províncias na China
Sozen e Alp (2009)	Consumo de energia	Emissão de GEE e outros poluentes locais e regionais	Países da União Europeia
Yang e Pollitt (2009)	Capacidade instalada, trabalho e combustível	Geração de energia (<i>output</i> desejável) e Emissões de SO ₂ (<i>output</i> indesejável)	221 usinas de carvão na China

Bi, Liang e Wu (2010)	Consumo de Energia e População	PIB e geração de energia (<i>outputs</i> desejáveis) e Emissão de CO ₂ (<i>output</i> indesejável)	26 países da OCDE
Bian e Yang (2010)	Número de trabalhadores, investimento em ativos fixos, consumo de água e consumo de energia	PIB (<i>output</i> desejável) e demanda química de oxigênio de descarga, descarga de nitrogênio, e emissão de dióxido de enxofre (<i>outputs</i> indesejáveis)	30 províncias chinesas
Chiu e Wu (2010)	Trabalho e capital real (<i>inputs</i> desejáveis) e consumo de energia elétrica, consumo de carvão e consumo de gasolina (<i>inputs</i> indesejáveis)	PIB	27 províncias da China
Sozen, Alp e Ozdemir (2010)	Indicadores de produção	Custo de produção do combustível e emissão de gases	Usinas de energia na Turquia
Yang e Pollitt (2010)	Capacidade instalada, combustível e número de trabalhadores	Geração de energia (<i>output</i> desejável) e emissões de SO ₂ , NO _x e CO ₂ (<i>outputs</i> indesejáveis)	582 usinas de carvão chinesas
Behrouznia <i>et al.</i> (2010)	PIB e População	Consumo de Gás	Brasil, Argentina, Colômbia, Venezuela e Cuba
Coli, Nissi e Rapposelli (2011)	Presença de danos ambientais (poluição e emissão de gases, contaminação da água e do solo)	PIB	103 províncias italianas
Cristobal (2011)	Taxa de investimento, período de implementação e custos operacionais e de manutenção	Potência gerada, horas de funcionamento, vida útil e toneladas de CO ₂ evitadas	13 tipos de fontes de energia aprovadas pelo governo espanhol segmentadas por energia eólica, hidrelétrica, solar, biomassa, biogás e biocombustíveis
Hu <i>et al.</i> (2011)	Número de empregados, consumo de energia doméstico e comercial, consumo de energia industrial, venda de gasolina e venda de diesel	Renda real total	23 regiões em Taiwan
Sueyoshi e Goto (2011)	Capacidade de geração de energia, número de empregados, carvão, petróleo e gás natural	Geração de energia (<i>output</i> desejável) e Emissão de CO ₂ (<i>output</i> indesejável)	9 empresas de energia entre 2004 e 2008
Sueyoshi e Goto (2012a)	Número de funcionários em cada usina, soma de todos os custos e investimento, o custo total operação e manutenção e o consumo de combustível (carvão) de cada usina	Geração de energia (<i>output</i> desejável) e emissão de NO _x , SO ₂ e CO ₂ (<i>outputs</i> indesejáveis)	30 usinas de carvão nos Estados Unidos

Sueyoshi e Goto (2012b)	Total de Ativos, número de empregados, total de energia consumida, total de água consumida	Vendas totais (<i>output</i> desejável), emissão de GEE e emissão de resíduos (<i>outputs</i> indesejáveis)	85 indústrias japonesas
Sueyoshi e Goto (2012c)	Quantidade de reservas de petróleo, quantidade de reservas de gás, o custo operacional total e o número de empregados	Quantidade de produção de petróleo e quantidade de produção de gás (<i>outputs</i> desejáveis) e quantidade de emissão de CO ₂ (<i>output</i> indesejável)	19 companhias mundiais de petróleo
Sueyoshi e Goto (2012d)	Capacidade de geração de energia, consumo de combustível	Geração de energia (<i>output</i> desejável) e emissão de SO ₂ , NO _x e CO ₂ (<i>outputs</i> indesejáveis)	Usinas de energia de combustíveis fósseis nos Estados Unidos
Rezaee, Moini e Makui (2012)	Capacidade de geração de energia, total de horas de operação, consumo interno de energia e combustível, número de funcionários, custo de energia gerada e de treinamento	Vendas totais, total de energia gerada e emissão de CO ₂	24 usinas termelétricas
Bian, He e Xu (2013)	Capital, Trabalho, Carvão, Petróleo, Gás Natural, fontes de energia não fósseis	PIB (<i>output</i> desejável) e emissão de CO ₂ (<i>output</i> indesejável)	31 regiões na China
Çelen (2013)	O número de empregados, o comprimento da linha de distribuição em km, a capacidade de transformação em MVA e a qualidade da energia	Elettricidade produzida (entregue) e número de consumidores	21 companhias turcas de distribuição de energia
Choi, Zhang, Chen e Luo (2013)	Trabalho, capital fixo e consumo de energia	PIB (<i>output</i> desejável); quantidade de emissões de SO ₂ , volume de águas residuais e a quantidade de resíduos sólidos gerados (<i>outputs</i> indesejáveis)	30 províncias da China
Costa <i>et al.</i> (2013)	Custo de investimento, Custo de Operação e Manutenção e Emissão de GEE	Produção potencial (milhões de litros por ano) e geração de trabalho potencial	13 diferentes tipos de insumos (fontes de energia) para produção do biodiesel
Fang <i>et al.</i> (2013)	Capital e força de trabalho	Valor agregado na indústria e consumo de carvão e energia (variáveis ambientais não controladas)	27 setores industriais chineses
Fang, Hu e Lou (2013)	Capital, trabalho e consumo de energia	PIB	Eficiência em 32 empresas do setor de serviços de Taiwan
Sueyoshi, Goto e Sugiyama (2013)	Número de funcionários, custo total da planta, custo de Operação e Manutenção e consumo de combustíveis	Geração de energia líquida (<i>output</i> desejável), emissão de SO ₂ , NO _x e CO ₂	50 avaliações de usinas de produção de carvão nos Estados Unidos entre 1995 e 2007

Goto, Otsuka e Sueyoshi (2014)	Capital, Trabalho e Energia	PIB (<i>output</i> desejável), CO ₂ , SO _x , NO _x e poeira	47 indústrias no Japão
Shakouri, Nabae e Aliakbarisania (2014)	Fonte de energia primária, material utilizado, trabalho, capacidade de energia elétrica, combustíveis fósseis e consumo de energia	Perdas radioativas, Emissão de CO ₂ e Eletricidade produzida	Comparação entre usinas nucleares e de produção de carvão
Song e Guan (2014)	População, formação de capital fixo e consumo de energias não renováveis	PIB a preços constantes e emissão de SO ₂	17 observações na cidade de Wanjiang (China)
Sueyoshi e Goto (2014)	Ativo total, número de funcionários, consumo de energia, custo total para a proteção ambiental	Vendas totais (<i>output</i> desejável), emissões de gases de efeito estufa e quantidade total de descargas de resíduos	Comparação entre indústrias químicas e farmacêuticas no Japão entre 2007 e 2010

Quadro 15 - Variáveis utilizadas em estudos ambientais com aplicação da técnica DEA

Fonte: Autor, baseado em pesquisa no *Scopus*

A seguir são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho.

5 Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos metodológicos deste trabalho envolvem a classificação da pesquisa e a definição do método de pesquisa. Com base nestes procedimentos, é feita a seleção das variáveis e aplicação das técnicas para análise de eficiência.

5.1 Classificação da Pesquisa

Este trabalho busca responder de que maneira as alterações na matriz energética e as variações na área de floresta (florestamento, reflorestamento ou desmatamento) podem garantir o mesmo padrão de produção para os países, com menor emissão de gases de efeito estufa. Para responder este questionamento este trabalho avalia a eficiência energética (manutenção do padrão de produção, com redução de emissão de gases de efeito estufa) dos países do G20, considerando as variações nas matrizes e florestas. A resposta desta pergunta explica, dentre outros fatores, qual a influência do tipo de fonte energética e do desmatamento na emissão de gases na atmosfera.

Assim, o tipo de pesquisa desta tese é a pesquisa explicativa, que utiliza como delineamento a pesquisa bibliográfica.

De acordo com Gil (2006), as pesquisas explicativas têm como preocupação fundamental identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência de fenômenos. É o tipo de pesquisa “que mais aprofunda o conhecimento da realidade, por explicar a razão, o porquê das coisas” (GIL, 2009). O delineamento²⁷ desta tese foi feito por pesquisa bibliográfica, desenvolvida a partir de livros e artigos nacionais e internacionais. As bases de dados utilizadas para a seleção de artigos esta pesquisa foram a *Scopus*, *Science Direct*, *Web of Science*, além das bases nacionais Scielo, RAUSP, RAE, RAC e portais com dissertações e teses das principais universidades do país.

²⁷ Segundo Lakatos e Marconi (2004), o delineamento da pesquisa refere-se ao planejamento da pesquisa em sua dimensão mais ampla, considerando o ambiente em que são coletados os dados, bem como as formas de controle das variáveis envolvidas.

5.2 Método de Pesquisa

De acordo com Richardson (2007, p. 70), “método de pesquisa é a escolha de procedimentos sistemáticos para a descrição e explicação de fenômenos”. Assim, este trabalho utiliza como método de pesquisa o método quantitativo e comparativo.

O uso do método quantitativo é utilizado neste trabalho para o cálculo dos *scores* de eficiência, utilizando a técnica de análise de desempenho DEA. Para o uso desta técnica são feitos testes preliminares para avaliar a correlação entre as variáveis e viabilizar o modelo e, posteriormente, analisar a eficiência relativa de cada uma das unidades tomadoras de decisão.

Por comparar matrizes energéticas e variação de área de floresta, o presente trabalho faz uso do método comparativo. Segundo Lakatos e Marconi (2004) e Gil (2006), o método comparativo “procede pela investigação de indivíduos, classes, fenômenos ou fatos, com vistas a ressaltar as diferenças e similaridades entre eles” e é indicado nas ciências sociais para comparar diferentes culturas, sistemas políticos, formas de governo ou países.

5.2.1 Definição das variáveis

Este estudo busca verificar se a alteração da matriz energética e a variação na área de floresta dos países do G20 permitem manter o mesmo padrão de produção com redução de emissões de GEE. Para isto as fontes das matrizes energéticas dos países são relacionadas com as emissões de gases de efeito estufa e com as variações de estoque de carbono dos países.

Assim, este trabalho considera como variáveis de *input* as fontes energéticas petróleo, carvão, gás natural, energia nuclear, hidrelétricas e outras fontes renováveis (medidas em milhões de toneladas de óleo ou de óleo equivalente) e, como *output*, as emissões de gases de efeito estufa (medidos em quilo toneladas de CO₂ ou CO₂ equivalente), com dedução da absorção de CO₂ pelas florestas (coeficiente de mudança no uso da terra - C_{mut}) por cada um dos países. O Quadro 16 apresenta as variáveis utilizadas neste trabalho.

Grupo	Variável	Unidade	Fonte
Energia	Petróleo	milhões de toneladas (mt)	BP Global ²⁸
Energia	Carvão	mt de óleo equivalente	BP Global
Energia	Gás Natural	mt de óleo equivalente	BP Global
Energia	Energia Nuclear	mt de óleo equivalente	BP Global
Energia	Hidrelétricas	mt de óleo equivalente	BP Global
Energia	Outros Renováveis	mt de óleo equivalente	BP Global
GEE	Dióxido de Carbono (CO ₂)	kilo tonelada (kt)	The World Bank
GEE	Metano (CH ₄)	kt de CO ₂ equivalente	The World Bank
GEE	Óxido Nitroso (N ₂ O)	kt de CO ₂ equivalente	The World Bank
GEE	Outros GEE (HFC, PFC, SF ₆)	kt de CO ₂ equivalente	The World Bank
GEE	Coefficiente de Mudanças no Uso da Terra (C_{mut})	kt de CO ₂	Elaborado pelo autor baseado nos dados do World Bank

Quadro 16 - Variáveis de input e output utilizadas no trabalho

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a construção do modelo, os gases de efeito estufa (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e outros gases) são agrupados em um único *output*. O coeficiente de mudanças no uso da terra, proposto neste trabalho, visa inserir no modelo o efeito do florestamento, reflorestamento e desmatamento e consequente acúmulo ou perda de carbono para o meio ambiente. O carbono é sequestrado e estocado no meio ambiente em florestas, por meio do crescimento da biomassa e das trocas gasosas com a atmosfera.

A metodologia de absorção, sequestro e estoque de carbono, no entanto, não é consenso no meio acadêmico, em especial por envolver questões financeiras relacionadas aos créditos de carbono²⁹. Vários autores têm apresentado fórmulas e metodologias para seu cálculo, envolvendo conceitos de diversas áreas como biologia e estatística, além de especificidades de cada tipo de bioma. Dentre as propostas de cálculo da absorção, sequestro e variações no estoque de carbono estão metodologias sugeridas pelos autores Lubowski, Plantinga e Stavins (2006), Gibbs *et al.* (2007), Gorte (2009), Ruiz-Peinado, Del Rio e Montero (2011), Baccini *et al.* (2012) além dos organismos internacionais IPCC (2000), FAO (2010) e IPCC (2013).

A redução (desmatamento) ou aumento (florestamento ou reflorestamento) na área de floresta de cada país, juntamente com as trocas com o meio (fotossíntese), implicam nas variações de

²⁸ BP Global (*Beyond Petroleum* - nova denominação da *British Petroleum*)

²⁹ O mercado de créditos de carbono surgiu em decorrência do Protocolo de Quioto, que estabeleceu metas de redução nas emissões de gases de efeito estufa para países desenvolvidos. Com a criação dos chamados Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, projetos que promovem a redução de emissões de GEE têm direito a créditos de carbono (mediante à redução certificada das emissões) e pode comercializá-los com os países que têm metas de redução a cumprir.

estoque de carbono em cada país. Desta forma, a redução da área de floresta implica em redução do estoque de carbono e redução na capacidade de absorção de CO₂ e o aumento da área de floresta, por sua vez, implica em maior absorção e consequente sequestro de carbono pelo meio ambiente. Neste sentido, a redução da área de floresta, além de reduzir a capacidade de absorção de CO₂ pode promover liberação do carbono estocado para o meio ambiente por meio de queimadas.

Assim, para a análise de eficiência este modelo avalia qual combinação de fontes energéticas (matriz energética de cada país) produz uma menor quantidade de gases de efeito estufa. Dado a limitação dos *softwares* em não operarem com números negativos, para efeito de cálculo, o *output* é dado pelo inverso da diferença entre o total de gases de efeito estufa e o coeficiente de mudança do uso da terra, conforme apresentado pela fórmula a seguir.

$$Output = \frac{1}{(GEE - C_{mut})}$$

Em que GEE representa a soma dos gases de efeito estufa e o C_{mut} representa o coeficiente de mudança do uso da terra.

O número de variáveis utilizadas no modelo (6 *inputs* e 1 *output*) implica em um número mínimo de DMUs variando entre 14 (JUBRAN, 2006) e 21 (COOPER ET AL., 2001). Assim, este trabalho considera 20 DMUs, referente aos países do G20, além do Irã que foi inserido por ser um país com alta emissão de GEE.

Quanto às variáveis escolhidas, para a realização deste estudo foi necessário o uso de todas as variáveis de *input* (que correspondem às fontes energéticas), uma vez que um dos objetivos deste trabalho é verificar se as alterações na matriz energética dos países promove redução de emissões. Assim, no intuito de não excluir quaisquer variáveis de interesse para a análise, não foi utilizado um método de seleção de variáveis conforme proposto por Senra, Nanci e Angulo Meza (2005) e Senra *et al.* (2007).

Desta forma, o modelo utilizado neste trabalho incorpora vários *inputs* e um único *output*, conforme é apresentado na Figura 38.

Figura 38 - Inputs e Output do modelo

Fonte: Elaborado pelo autor

Ainda que os valores de absorção, sequestro e estoque de carbono pareçam pouco significativos em relação ao total de gases de efeito estufa liberados no meio ambiente, a técnica DEA capta estas variações mais sensíveis e incorpora ao modelo a influência da área de floresta e variações no estoque de carbono nas florestas. Segundo Machado (2005), o carbono encontrado no solo, na vegetação e na atmosfera é pouco representativo quando comparado ao carbono dos oceanos. Para o autor, o carbono nos oceanos representa cerca de 80% do total de carbono da Terra, equivalente a cerca de 50 vezes o carbono encontrado na atmosfera, o que o faz uma importante fonte de sequestro e absorção de carbono global.

Ainda que a absorção dos oceanos seja importante, este trabalho visa considerar o efeito da absorção, ainda que pequena, das florestas e determinar o efeito das mudanças no uso da terra nas emissões globais. Assim, além de considerar a soma dos gases de efeito estufa, o *output* também considera as alterações de estoque de carbono nas florestas dos países. O detalhamento do coeficiente de mudanças no uso da terra é apresentado na subseção sobre tratamento de dados.

5.2.2 Escolha e Orientação do Modelo DEA

O modelo DEA adotado para este trabalho é o modelo BCC, orientado a *output*.

O modelo BCC generaliza o modelo CCR, considerando tecnologias com rendimentos variáveis de escala. Neste modelo o conjunto de DMUs tem características diversas (tamanho,

tecnologia, produtividade, qualidade dos insumos dentre outros fatores) o que gera diferentes rendimentos em escala (constantes, crescentes ou decrescentes). Desta forma, as variações no consumo resultam em variações em diferentes proporções na emissão de gases de efeito estufa. Quando orientado à *output* (produção), o modelo representa a capacidade de aumentar a produção sem aumentar os insumos (*inputs*). Assim, busca-se com este modelo que para o mesmo nível de *inputs* o *output* seja maximizado, o que significa, em outras palavras, que os países mais eficientes terão redução de emissões de dióxido de carbono, dado uma mesma estrutura de energética.

A Figura 39 apresenta a representação do modelo (BCC) e a orientação. Todas as DMUs que estiveram na fronteira serão consideradas eficientes, enquanto as DMUs que estiverem abaixo da fronteira, serão consideradas ineficientes.

Figura 39 - Representação gráfica da escolha e orientação do modelo DEA

Fonte: Adaptado pelo autor

5.2.3 Definição das Unidades Tomadoras de Decisão (DMUs)

Para a realização deste trabalho foram selecionadas 20 DMUs, representando os países que compõem o grupo dos 20 ou G20. Os países selecionados são frequentemente segmentados em grupos: o grupo dos 8 (G8); o grupo dos 5 (G5) e os demais países do G20.

O grupo formado pelo G8 é considerado o grupo de países mais ricos e industrializados (G7) além da Rússia. Este grupo foi, durante muito tempo, responsável pelas emissões de gases de efeito estufa no mundo, pela industrialização e pelo alto poder de consumo. Uma consideração importante sobre estes países é que eles receberam metas de redução de emissões, definidas pelo protocolo de Quioto, fazendo com que buscassem meios para reduzir as emissões.

O segundo grupo, o G5, é considerado como o grupo de países emergentes. São países com industrialização um pouco mais recente, com taxa de crescimento relativamente alta e com grande população (juntos os 5 países representam mais de 40% da população mundial). Os países deste grupo não tiveram metas estabelecidas pelo protocolo de Quioto que, juntamente com a industrialização recente e a grande população, tem contribuído para o aumento da participação nas emissões de gases de efeito estufa.

Por fim, os demais países do G20 também são países emergentes, porém com crescimento inferior ao outro grupo de emergentes (G5). Representam este grupo (Outros Emergentes) os países Arábia Saudita, Argentina, Austrália, Coreia do Sul, Indonésia e Turquia. Além destes países (19 ao todo), a União Europeia também é considerada como membro do G20, mas não será analisada neste trabalho. Os países dos grupos G8, G5 e demais países do G20 são apresentados na Figura 40 e no Quadro 17.

Figura 40 - Mapa com os países do G8, G5 e demais países que compõem o G20

Fonte: Adaptado pelo autor

No quadro a seguir estão listados os países do G20, segmentados pelos grupos que fazem parte, além do continente de sua localização e de suas características básicas. Neste trabalho, além do G20 ainda é considerada a participação do Irã, devido sua participação nas emissões globais e o tamanho de sua economia. O Irã, ao longo do tempo tem aumentado sua participação nas emissões de GEE, sendo o 7º país com maior emissão de gases de efeito estufa em 2010 e a 21ª maior economia em 2012, segundo dados do World Bank.

Grupo	País	Localização	Características
G8	Alemanha	Europa	Países mais ricos e industrializados (grande poder de consumo)
	Canadá	América do Norte	
	Estados Unidos	América do Norte	
	França	Europa	
	Itália	Europa	
	Japão	Ásia	
	Reino Unido	Europa	
	Rússia	Europa/Ásia	
G5	África do Sul	África	Países emergentes (industrialização mais recente que o G20 e grande população)
	Brasil	América do Sul	
	China	Ásia	
	Índia	Ásia	
	México	América do Norte	
Outros	Arábia Saudita	Oriente Médio	Outros países do G20 (países emergentes com economia e população menor que o G5)
	Argentina	América do Sul	
	Austrália	Oceania	
	Coreia do Sul	Ásia	
	Indonésia	Ásia	
	Turquia	Europa/Ásia	

Quadro 17 - Países do G20

Fonte: G20

5.2.4 Tratamento dos Dados

Os dados utilizados para a análise de eficiência foram retirados da BP Global e do World Bank. Da BP Global foram utilizados dados referentes às fontes energéticas (*inputs*) petróleo, carvão, gás natural, energia nuclear, hidrelétricas e outras fontes renováveis. Todos os dados já foram fornecidos em milhões de toneladas de óleo (ou óleo equivalente), não necessitando tratamento específico para ajuste de unidades.

Da base de dados do World Bank foram selecionados dados referentes à emissão de gases de efeito estufa (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e outros gases de efeito estufa),

também fornecidos em quilo toneladas de CO₂ (ou CO₂ equivalente). Desta forma, para o cálculo total de GEE, um dos componentes do *output*, foi feita a soma de cada um dos gases especificados na literatura.

O tratamento especial foi relacionado ao cálculo do coeficiente de mudanças no uso da terra (que avalia considera absorção, sequestro e estoque de carbono para cada um dos países), levando em conta os estoques de carbono de cada tipo de bioma (IPCC, 2000), as características geográficas de cada país e sua respectiva área de floresta. Para efetuar o cálculo, foram utilizados os dados propostos pelo IPCC, sintetizados na Tabela 10, juntamente com os dados dos biomas de cada um dos países do G20 (DMUs do modelo), apresentados no Quadro 18, as variações da área de floresta da Tabela 11 e adaptações de Lubowski, Plantinga e Stavins (2006), Gibbs et al. (2007), Gorte (2009), Ruiz-Peinado, Del Rio e Montero (2011), Baccini et al. (2012)

A Tabela 10 apresenta a quantidade de estoque de carbono, medida em toneladas de carbono em cada 10⁹ hectares de cada tipo de bioma. Os dados da tabela indicam que alguns tipos de biomas, característicos de determinados países, possuem uma menor quantidade de carbono estocado, como é o caso dos desertos e semidesertos. Por outro lado, outros tipos de biomas como o pantanal (áreas alagadiças) e a floresta boreal (clima frio) possuem maior capacidade de estoque de carbono. A composição de florestas de cada país determina uma quantidade de estoque de carbono pelas florestas. Assim, se fez necessário avaliar a composição de floresta dos países do G20.

Tabela 10 - Estoques de carbono globais (resumido)

Biomas	Média (ton C / 10 ⁹ ha)
Floresta Tropical	243,18
Floresta Temperada	152,88
Floresta Boreal (Taiga)	408,03
Savanas (Cerrado)	146,67
Campos Temperados	243,2
Desertos e Semidesertos	43,74
Tundra	133,68
Pantanal	685,71
Terras Cultiváveis	81,88
Total	163,82

Fonte: IPCC (2000)

O Quadro 18 apresenta a composição dos biomas de cada país. Os dados são aproximados, baseados nas características climáticas e diversas fontes de referências (MAGNOLI; ARAÚJO, 2001; OLSON ET AL., 2001; GRID ARENDAL, 2013). As características climáticas de cada país determinam, ou ao menos estimulam ou restringem, o surgimento de determinados tipos de vegetação. Países de clima tropical são mais propensos a terem vegetações e florestas tropicais, assim como países de clima semiárido são mais propensos a terem desertos e semidesertos como vegetações predominantes. Ainda que o clima determine, em parte, as características climáticas, alguns países conseguem superar as restrições com investimento e tecnologia e apresentam biomas diversificados, como é o caso da Arábia Saudita, país rico em função das reservas de petróleo, que durante anos investiu na irrigação de parte de sua terra. Os dados dos biomas são apresentados a seguir.

País	Bioma
África do Sul	Cerrado (50%); Campos temperados (25%) e Deserto e Semideserto (25%)
Alemanha	Temperada (80%) e Campos temperados (20%)
Arábia Saudita	Deserto e Semideserto (50%); Cerrado (30%) e Tropical (20%)
Argentina	Subtropical (70%) e Campos temperados (30%)
Austrália	Deserto e Semideserto (50%); Cerrado (30%) e Subtropical (20%)
Brasil	Tropical (40%); Cerrado (25%), Subtropical (20%) e Desertos e Semidesertos (15%)
Canadá	Boreal (50%); Temperada (40%) e Tundra (10%)
China	Tundra (20%); Temperada (50%), Subtropical (20%) e Desertos e Semidesertos (10%)
Coreia do Sul	Tropical (60%); Temperada (30%) e Campos temperados (10%)
Estados Unidos	Temperada (45%); Cerrado (25%) e Deserto e Semideserto (20%) e F. Boreal (10%)
França	Temperada (60%); Boreal (30%) e Campos temperados (10%)
Índia	Tropical (60%) e Subtropical (40%)
Indonésia	Tropical (70%) e Cerrado (30%)
Irã	Deserto e Semideserto (90%) e Cerrado (10%)
Itália	Temperada (70%) e Campos temperados (30%)
Japão	Temperada (75%); Boreal (10%) e Campos temperados (15%)
México	Tropical (80%) e Deserto e Semideserto (20%)
Reino Unido	Temperada (75%); Boreal (15%) e Campos temperados (10%)
Rússia	Boreal (50%); Temperada (30%), Tundra (10%) e Campos Temperados (10%)
Turquia	Temperada (80%) e Campos temperados (20%)

Quadro 18 - Biomas característicos dos países do G20

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Magnoli e Araújo (2001); Olson *et al.* (2001) e GRID ARENDAL, 2013)

Por fim, a Tabela 11 apresenta a evolução da área de floresta dos países do G20. Em alguns países, como África do Sul, Arábia Saudita, Canadá e Irã, a área de floresta não foi alterada nos três períodos analisados, contudo em alguns países houve aumento da área de floresta

(sugerindo reflorestamento) enquanto em outros houve queda na área de floresta (sugerindo desmatamento).

Nos países Coreia do Sul, Austrália, México, Brasil, Argentina e Indonésia houve queda na área de floresta, sendo a Indonésia e o Brasil os países com maior redução (desmatamento). O desmatamento, além de liberar gases de efeito estufa para o meio ambiente, muitas vezes pela queimada, reduz a capacidade de absorção, estoque e sequestro de carbono pelas florestas. Desta forma, estes países com redução na área de floresta tendem a ter a análise de eficiência comprometida na análise DEA, em maior ou menor grau dependendo da área desmatada.

Por outro lado, países como China, Itália, Turquia, Reino Unido, França, Índia, Alemanha, Estados Unidos, Japão e Rússia aumentaram, em maior ou menor grau, sua área de floresta, refletindo também na análise de desempenho. Dentre estes países que aumentaram a área de floresta, os principais destaques estão para a China, Itália, Turquia e Reino Unido. Os dados da evolução da área de floresta dos países do G20 são apresentados a seguir.

Tabela 11 - Área de floresta dos países do G20 (em km²)

País	1990	2000	2010
África do Sul	92.410	92.410	92.410
Alemanha	107.410	110.760	110.760
Arábia Saudita	9.770	9.770	9.770
Argentina	347.930	318.610	294.000
Austrália	1.545.000	1.549.200	1.493.000
Brasil	5.748.390	5.459.430	5.195.220
Canadá	3.101.340	3.101.340	3.101.340
China	1.571.406	1.770.005	2.068.606
Coreia do Sul	63.700	62.880	62.220
Estados Unidos	2.963.350	3.001.950	3.040.220
França	145.370	153.530	159.540
Índia	639.390	653.900	684.340
Indonésia	1.185.450	994.090	944.320
Irã	110.750	110.750	110.750
Itália	75.900	83.690	91.490
Japão	249.500	248.760	249.790
México	702.910	667.510	648.020
Reino Unido	26.110	27.930	28.810
Rússia	8.089.500	8.092.685	8.090.900
Turquia	96.800	101.460	113.340

Fonte: The World Bank (2013)

Vale destacar que o aumento da área de floresta indica que o país tem adotado medidas de florestamento ou reflorestamento, o que aumenta o potencial de sequestro de carbono. A absorção de dióxido de carbono pelo meio ambiente ocorre de diversas formas, sendo que no caso das florestas as formas de maior destaque são pela fotossíntese e pelo crescimento das florestas (em que o CO_2 é absorvido e armazenado na árvore como um todo).

Com base nestas informações, os procedimentos para determinação dos estoques de carbono de cada país do G20 seguiram os seguintes passos. Em primeiro lugar foi calculada a média ponderada de estoque de carbono de cada país, baseado na composição de florestas de cada país (Quadro 18) e a quantidade de estoque de cada bioma (Tabela 10). Com isto foi estabelecido quanto de carbono cada país estocava em toneladas de carbono em cada 10^9 hectares.

O passo seguinte foi fazer a conversão de carbono para dióxido de carbono. Esta transformação é necessária para que as unidades utilizadas na composição do *output* do DEA sejam as mesmas (CO_2 ou CO_2 equivalente). Assim, seguindo as orientações de conversão sugeridas por Clark (1982), foi estabelecida a quantidade de CO_2 equivalente carbono que cada país estocava em cada 10^9 hectares. Por fim, utilizando como base a Tabela 11, foi feita a conversão de área (inicialmente em toneladas de carbono em cada 10^9 hectares) para a unidade definir a quantidade de CO_2 equivalente cada país tinha, baseado na área de floresta de cada país (em km^2).

Com estas alterações, o modelo consegue captar as diferentes características de cada país (dado pelos tipos de biomas existentes) e a influência antropogênica (desmatamento ou reflorestamento) no cálculo da eficiência.

6 Apresentação e Análise dos Resultados

Esta seção é destinada à apresentação e análise dos resultados. Para isto são apresentados os resultados da análise DEA temporal e com dados em painel para avaliar o desempenho do país em relação aos demais países e em relação a ele mesmo. Posteriormente é apresentada a comparação de desempenho do modelo utilizado com outro modelo que não faz uso do coeficiente de mudança do uso da terra. Por fim, os dados dos países são apresentados detalhadamente para que seja feita a síntese da análise de eficiência.

6.1 Análise de desempenho pela Análise Envoltória de Dados (DEA)

Este trabalho busca avaliar a eficiência energética dos países do G20, considerando as variações nas matrizes e florestas. Desta forma, os testes indicam quais variações nas estruturas das matrizes energéticas e nas florestas permitem que ocorra redução nas emissões de gases de efeito estufa. Assim, o modelo DEA escolhido foi o modelo proposto por Banker, Charnes e Cooper, com retornos variáveis de escala, orientados à *output*. Para efeito de análise foram feitas duas medições de desempenho, uma delas (análise temporal) considerando as vinte nações em cada período isolado e outra (análise por dados em painel) considerando o desempenho de todas as nações, em todos os períodos.

Desta forma, a análise temporal permite que sejam avaliados os países com melhor desempenho em um ano específico. Ao desenvolver as três análises é possível verificar qual foi o desempenho relativo de cada uma das nações em determinado ano e comparar com o desempenho relativo nos outros anos. Com isso é possível observar quais países (DMUs) melhoraram seu desempenho relativo e tornaram-se mais ou menos eficientes. A análise por dados em painel, por sua vez, permite que seja avaliado o desempenho de cada país em relação à ele mesmo, utilizando como referência o ano base de 1990. Assim é possível analisar se as alterações na matriz energética e área de floresta permitiram melhoria de desempenho do país em relação às emissões de 1990.

Dos países analisados, dez países apresentaram melhora ou tendência de melhora no desempenho relativo segundo a análise temporal, sendo que destes países apenas quatro (Alemanha, Itália, Reino Unido e Rússia) apresentaram melhora de desempenho em relação ao próprio desempenho de 1990 (análise por dados em painel). Dentre os países do G20, cinco países permaneceram relativamente eficientes em cada um dos anos analisados, contudo todos

perderam eficiência em relação ao ano base. Por fim, cinco países (Brasil, China, Coreia do Sul, Índia e Indonésia) apresentaram redução de desempenho tanto na análise temporal quanto na análise por dados em painel.

Nas subseções seguintes são apresentados os dados de cada país e sua respectiva análise de eficiência. Como forma de auxiliar a compreensão das análises, a Tabela 12 apresenta o crescimento econômico dos países nos decênios 1991-2000 e 2001-2010. Esta tabela permite que sejam comparados o crescimento do consumo energético e o crescimento econômico médio do país no período. Como pode ser observado na tabela, em alguns países (DMUs) o crescimento econômico anual médio é alto em todo período, como é o caso da China, implicando em aumento do consumo energético e consequente aumento das emissões de gases de efeito estufa. Em outros casos, como a Rússia, no decênio 1991-2000 o crescimento foi negativo, resultado da reestruturação do país com o fim da União Soviética e das crises no fim da década. Outra importante consideração é que no decênio 2001-2010 houve a crise imobiliária nos Estados Unidos e a crise econômica de 2008, causando redução no crescimento médio de alguns países. A Tabela 12 apresenta os dados do crescimento.

Tabela 12 - Crescimento econômico médio nos decênios 1991-2000 e 2001-2010

País	Cresc. Econômico Médio 1991-2000	Cresc. Econômico Médio 2001-2010
África do Sul	1,8%	3,6%
Alemanha	1,9%	1,0%
Arábia Saudita	2,8%	5,4%
Argentina	4,7%	3,4%
Austrália	3,3%	3,1%
Brasil	2,6%	3,6%
Canadá	2,9%	1,9%
China	10,5%	10,5%
Coreia do Sul	6,2%	4,2%
Estados Unidos	3,5%	1,7%
França	2,0%	1,1%
Índia	5,6%	7,6%
Indonésia	4,4%	5,2%
Irã	3,8%	5,1%
Itália	1,6%	0,4%
Japão	1,1%	0,8%
México	3,6%	1,8%
Reino Unido	3,1%	1,7%
Rússia	-3,6%	4,9%
Turquia	3,7%	4,0%

Fonte: World Bank (2013)

Os resultados da análise de eficiência são apresentados a seguir.

6.1.1 Análise Temporal

Na análise temporal os países são comparados isoladamente a cada ano. Os dados da análise de eficiência temporal (desempenho relativo) são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultado da análise de eficiência temporal pelo modelo BCC (DEA)

Países	1990	2000	2010
África do Sul	100,0%	100,0%	100,0%
Alemanha	5,8%	12,2%	23,1%
Arábia Saudita	100,0%	100,0%	100,0%
Argentina	100,0%	100,0%	100,0%
Austrália	55,8%	84,5%	100,0%
Brasil	100,0%	99,9%	57,3%
Canadá	21,8%	20,8%	32,0%
China	11,2%	2,6%	0,5%
Coreia do Sul	100,0%	100,0%	54,5%
Estados Unidos	0,2%	0,2%	0,4%
França	17,1%	36,1%	51,3%
Índia	11,0%	6,3%	5,0%
Indonésia	100,0%	88,9%	74,3%
Irã	100,0%	81,0%	100,0%
Itália	43,7%	60,6%	99,5%
Japão	3,5%	6,3%	7,8%
México	47,1%	47,2%	47,5%
Reino Unido	16,9%	35,8%	83,7%
Rússia	1,9%	14,2%	17,0%
Turquia	100,0%	100,0%	100,0%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

Com base nos dados foi feita uma segmentação dos países para análise: (1) países sempre eficientes (estiveram na fronteira de eficiência em todos os períodos); (2) países que tornaram-se eficientes; (3) países sempre ineficientes, com melhoria na eficiência relativa; (4) países sempre ineficientes com tendência de melhoria na eficiência relativa; (5) países que tornaram-se ineficientes e (6) países sempre ineficientes com tendência de queda na eficiência relativa.

O primeiro grupo, países sempre eficientes correspondem aos países com *score* igual a 100% em todos os períodos analisados e correspondem aos países África do Sul, Arábia Saudita, Argentina e Turquia. O segundo grupo, Austrália e Irã, corresponde aos países que se tornaram eficientes em 2010, ou seja, que tinham *score* inferior a 100% nos anos de 1990 e 2000 e atingiram o desempenho relativo máximo em 2010.

O terceiro grupo, importante para a análise, corresponde aos países que melhoraram sua eficiência relativa, com a maior variação entre o *score* inicial em 1990 e o final de 2010. Os países que representam este grupo são a Alemanha, França, Itália, Reino Unido e Rússia. Dentre os países deste grupo, apenas a França não melhorou seu desempenho relativo ao ano base (1990), sendo que os demais, além de apresentarem melhora na análise temporal, também apresentaram evolução no desempenho na análise por dados em painel.

O quarto grupo corresponde aos países que apresentam tendência de melhora no desempenho, ainda que de maneira mais discreta. São países que apresentaram melhora no desempenho da análise temporal, mas que pioraram seu desempenho relativo na análise por dados em painel, indicando que no ano base tinham eficiência relativa superior aos demais anos.

Os dois últimos grupos são formados por países que pioraram seu desempenho, sendo que o quinto grupo relaciona os países que foram considerados eficientes em 1990, mas que nos anos posteriores tiveram queda de desempenho (representado pelo Brasil, Coreia do Sul e Indonésia) e o sexto grupo são os países que sempre foram ineficientes e que ao longo do tempo pioraram seu desempenho.

Os países do G20 podem ser visualizados nos mapas fornecidos pelo software utilizado, sendo plotados o *score* de cada país, relacionado com o *output*. A Figura 41 apresenta este gráfico para o ano de 1990. Os países no topo do gráfico são os países eficientes, com *score* 100% enquanto os demais países são plotados no gráfico.

É possível observar que a Austrália, México e Itália estão em um patamar intermediário entre os países eficientes e os demais países do G20. Em um segundo grupo intermediário estão o Canadá, a França e o Reino Unido. Por fim, os demais países estão relacionados na base da figura.

A seguir, a Figura 41 apresenta a plotagem da eficiência relativa dos países do G20 em 1990, relacionando os *scores* de cada país com seu respectivo *output* (kt CO₂).

Figura 41 - Análise temporal (relação entre *score* e *output*) em 1990

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

Da mesma forma, que no caso anterior, a Figura 42 apresenta a plotagem dos países do G20 para o ano de 2000. Em comparação à 1990 é possível observar que há uma dispersão maior, com menos países eficientes e, na parte intermediária, uma distribuição maior dos países. O Brasil, ainda que de maneira discreta, o Irã e a Indonésia perdem eficiência entre 1990 e 2000 enquanto outros países apresentam melhora (como Austrália, Alemanha, França, Itália, Reino Unido e Rússia).

Dentre os países que perderam eficiência (reduziram seu *score*) entre 1990 e 2000, destacam-se a China e a Índia. O *score* da China caiu de 11,2% em 1990 para 2,6% em 2000 enquanto na Índia o *score* de eficiência caiu de 11,0% em 1990 para 6,3% em 2010. Os Estados Unidos, em posição ruim na análise relativa de desempenho tanto em 1990 quanto em 2000, manteve o mesmo *score* de desempenho no período (0,20%). Nos dois períodos os Estados Unidos apresentaram o menor *score* de eficiência dentre os países do G20.

Os *scores* de eficiência dos países do G20 no ano 2000 estão plotados na Figura 42, relacionando os *scores* de cada país com seu respectivo *output* (kt CO₂).

Figura 42 - Análise temporal (relação entre *score* e *output*) em 2000

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

Por fim, a Figura 43 apresenta os dados plotados para o ano de 2010. Nota-se que, em comparação a 2000, há alterações importantes com queda no desempenho de vários países, sendo um grupo formado por países que tornaram-se ineficientes (Brasil, Coreia do Sul e Indonésia) e outro grupo que sempre foram ineficientes, contudo pioraram seu desempenho relativo entre 1990 e 2010 (que corresponde aos países China e Índia).

Dentre os destaques positivos em 2010 estão a Austrália e o Irã, que atingiram um *score* de eficiência de 100%, além do Reino Unido, Estados Unidos, Alemanha, Itália, Canadá, França, Japão e Rússia que apresentaram melhora de desempenho relativo no período, em especial quando comparada a variação dos *scores* entre um ano e outro.

Nesta última plotagem é possível identificar a formação de blocos, sendo um deles o grupo de países eficientes ou que caminham para se tornarem eficientes, um segundo bloco intermediário, com países melhorando e outros piorando seu desempenho, e um último grupo, mais disperso, com *scores* de eficiência mais baixos. Os dados da plotagem do ano de 2010 são apresentados na Figura 43.

Figura 43 - Análise temporal (relação entre *score* e *output*) em 2010

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

Além da análise temporal, que avalia a evolução do desempenho relativo dos países em cada um dos anos, foi realizada a análise de desempenho utilizando dados em painel.

6.1.2 Análise em Painel

Os dados em painel são utilizados para analisar o desempenho relativo dos países (com eles mesmos) ao longo do tempo. Desta forma, este tipo de análise permite avaliar se o país melhorou ou piorou seu próprio desempenho em comparação com um ano base, que neste trabalho é 1990.

Para a análise destes dados também foi utilizado o modelo BCC, com rendimentos variáveis de escala, e orientação à *output*. A grande maioria dos países teve queda no desempenho, sendo que apenas quatro países, Alemanha, Itália, Reino Unido e Rússia, melhoraram seu desempenho com a análise de dados em painel. Isso indica que apenas estes quatro países conseguiram ser relativamente mais eficientes em 2010 do que eram em 1990.

Com este desempenho estes países seguem em direção aos objetivos lançados pelas Nações Unidas de que os países deveriam reduzir suas emissões em relação aos níveis de 1990. Os dados da análise com dados em painel são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultado da análise de eficiência com dados em painel pelo modelo BCC

Países	1990	2000	2010
África do Sul	100,0%	76,1%	65,9%
Alemanha	5,8%	6,9%	8,6%
Arábia Saudita	100,0%	73,8%	49,6%
Argentina	100,0%	100,0%	73,5%
Austrália	55,8%	47,0%	45,1%
Brasil	100,0%	39,6%	15,9%
Canadá	21,8%	13,4%	11,7%
China	11,2%	0,6%	0,1%
Coreia do Sul	100,0%	39,4%	18,7%
Estados Unidos	0,2%	0,1%	0,1%
França	17,1%	17,4%	16,6%
Índia	11,0%	2,6%	1,4%
Indonésia	100,0%	53,10%	34,5%
Irã	100,0%	53,6%	38,9%
Itália	43,7%	42,3%	47,0%
Japão	3,5%	2,6%	2,7%
México	47,1%	23,9%	17,2%
Reino Unido	16,9%	20,8%	26,6%
Rússia	1,9%	5,8%	2,5%
Turquia	100,0%	71,4%	56,9%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

Ao observar a variação dos *scores* dos países entre 1990 e 2010, percebe-se que os países com maior variação positiva foram Reino Unido, Alemanha, Rússia, Itália e França enquanto os países com maior variação negativa (queda de eficiência) foram China, Índia, Brasil, Coreia do Sul e Indonésia. Os dados também apontam que a maior concentração de países eficientes ocorre em 1990, sugerindo que houve queda no desempenho dos países ao longo do tempo, corroborando a proposta da ONU (Protocolo de Quioto) em reduzir as emissões aos níveis de 1990.

A seguir são detalhados os grupos de países que sempre foram eficientes, tornaram-se eficientes, melhoraram o desempenho relativo, pioraram seu desempenho relativo e tornaram-se ineficientes.

6.2 Comparação do desempenho das DMUs em função do C_{mut}

A metodologia adotada para este trabalho prevê um modelo com vários *inputs* e um único *output*, que considera tanto as emissões de gases de efeito estufa, quanto a absorção em cada tipo de bioma dos países (medida através do coeficiente de mudança no uso da terra - C_{mut}). Na seção 5.2 são apresentadas as variáveis utilizadas no modelo, que reproduzidas a seguir.

Figura 44 - Modelo com Coeficiente de mudança do uso da terra

Fonte: Elaborado pelo autor

Um dos objetivos deste trabalho é avaliar o efeito das mudanças no uso da terra, mais especificamente relacionado ao desmatamento ou aumento da área de floresta. Para ampliar a discussão sobre estes efeitos, o modelo proposto neste trabalho é comparado com um modelo que não considera os efeitos das mudanças no uso da terra, como mostra a Figura 45.

Figura 45 - Modelo sem o Coeficiente de mudança do uso da terra

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados desta comparação são apresentados na Tabela 15 (Análise Temporal) e Tabela 16 (Análise com dados em Paineis). Ao comparar os modelos, percebe-se que os principais resultados não se alteram. Os países que apresentaram ganhos de eficiência continuam os mesmos, assim como os países que pioraram seu desempenho. As principais alterações são em relação aos *scores* de eficiência de alguns países que, em função do uso da terra, apresentam melhor ou pior desempenho. Os resultados corroboram a teoria ao apontar que, ainda que pouco representativa, as florestas podem promover alterações na eficiência e no desempenho dos países.

Na Tabela 15, análise temporal, é possível observar que alguns países perderam eficiência quando não são consideradas as florestas, como é o caso do Brasil e Indonésia (países com grande cobertura de floresta tropical). O mesmo ocorre com a Rússia e o Canadá, detentores de grandes áreas de floresta.

Os dados da comparação entre os modelos são apresentados a seguir.

Tabela 15 - Análise Temporal (desempenho das DMUs sem considerar mudanças no uso da terra)

Países	Considerando C_{mut} no <i>Output</i>			Sem considerar C_{mut} no <i>Output</i>		
	1990	2000	2010	1990	2000	2010
África do Sul	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Alemanha	5,8%	12,2%	23,1%	6,1%	12,4%	23,6%
Arábia Saudita	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Argentina	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Austrália	55,8%	84,5%	100,0%	50,6%	77,0%	100,0%
Brasil	100,0%	99,9%	57,3%	49,9%	60,9%	41,8%
Canadá	21,8%	20,8%	32,0%	10,7%	12,0%	18,7%
China	11,2%	2,6%	0,5%	11,0%	2,6%	0,6%
Coreia do Sul	100,0%	100,0%	54,5%	100,0%	100,0%	54,8%
Estados Unidos	0,2%	0,2%	0,4%	0,2%	0,2%	0,4%
França	17,1%	36,1%	51,3%	17,7%	37,2%	53,0%
Índia	11,0%	6,3%	5,0%	10,9%	6,3%	5,2%
Indonésia	100,0%	88,9%	74,3%	85,3%	76,4%	70,8%
Irã	100,0%	81,0%	100,0%	100,0%	80,7%	100,0%
Itália	43,7%	60,6%	99,5%	44,4%	60,7%	99,4%
Japão	3,5%	6,3%	7,8%	3,6%	6,4%	8,0%
México	47,1%	47,2%	47,5%	43,3%	45,2%	46,0%
Reino Unido	16,9%	35,8%	83,7%	17,2%	36,1%	84,5%
Rússia	1,9%	14,2%	17,0%	1,4%	8,7%	10,7%
Turquia	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

Na análise com dados em painel, o mesmo padrão se repete. Ao desconsiderar o uso de florestas no modelo o desempenho de alguns países cai, como é o caso do Brasil e Indonésia, Rússia e Canadá. Da mesma forma que ocorreu na análise temporal, o padrão dos países continua o mesmo, com alterações nos *scores* de eficiência.

A Tabela 16 apresenta os dados da comparação entre os modelos no desempenho dos países com dados em painel.

Tabela 16 - Análise com dados em Painel (desempenho das DMUs sem considerar o C_{mut})

Países	Considerando C_{mut} no <i>Output</i>			Sem considerar C_{mut} no <i>Output</i>		
	1990	2000	2010	1990	2000	2010
África do Sul	100,0%	76,1%	65,9%	100,0%	76,2%	65,9%
Alemanha	5,8%	6,9%	8,6%	6,1%	7,2%	9,0%
Arábia Saudita	100,0%	73,8%	49,6%	100,0%	73,9%	49,6%
Argentina	100,0%	100,0%	73,5%	100,0%	100,0%	75,0%
Austrália	55,8%	47,0%	45,1%	50,6%	43,0%	41,6%
Brasil	100,0%	39,6%	15,9%	49,9%	24,8%	11,7%
Canadá	21,8%	13,4%	11,7%	10,7%	7,9%	7,0%
China	11,2%	0,6%	0,1%	11,0%	0,6%	0,1%
Coreia do Sul	100,0%	39,4%	18,7%	100,0%	39,4%	18,7%
Estados Unidos	0,2%	0,1%	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%
França	17,1%	17,4%	16,6%	17,7%	18,2%	17,5%
Índia	11,0%	2,6%	1,4%	10,9%	2,7%	1,4%
Indonésia	100,0%	53,1%	34,5%	85,3%	45,8%	31,7%
Irã	100,0%	53,6%	38,9%	100,0%	53,4%	38,9%
Itália	43,7%	42,3%	47,0%	44,4%	42,8%	47,6%
Japão	3,5%	2,6%	2,7%	3,6%	2,7%	2,8%
México	47,1%	23,9%	17,2%	43,3%	23,0%	17,3%
Reino Unido	16,9%	20,8%	26,6%	17,2%	21,3%	27,0%
Rússia	1,9%	5,8%	2,5%	1,4%	3,5%	1,6%
Turquia	100,0%	71,4%	56,9%	100,0%	71,9%	57,4%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

6.3 Países na fronteira de eficiência em todos os períodos (eficiência relativa)

Com base nos dados analisados, quatro países apresentaram *score* de eficiência de 100% nos três períodos analisados. São eles a África do Sul, a Arábia Saudita, a Argentina e a Turquia. A seguir são detalhadas as características de cada país e alterações no uso da terra.

6.3.1 África do Sul

A África do Sul é um país altamente dependente de combustíveis fósseis (97,4%), estando atrás apenas da Arábia Saudita (100%) e do Irã (98,0%), sendo que, dentre os combustíveis fósseis, o carvão é a fonte energética de maior dependência do país. Esta grande dependência é resultado da disponibilidade de reservas de alta qualidade de carvão no país, o que estimula seu consumo. A África do Sul é detentora da 6ª maior reserva de carvão de qualidade do mundo, com alto poder calorífico e menor emissão de poluentes (quando comparado com carvão de baixa qualidade).

A segunda maior fonte energética é a energia nuclear, oscilando entre 2,33% e 3,06% no período analisado. A participação das fontes renováveis de energia é muito pequena e praticamente estável, representando valores inferiores a 0,3% em todo o período. Em relação ao G20, a participação de hidrelétricas na matriz energética é apenas maior que a da Arábia Saudita (em todos os períodos) e a participação de outras fontes renováveis é apenas maior que da Arábia Saudita e Irã (no ano de 2010). A Tabela 17 apresenta os dados da participação dos combustíveis fósseis na matriz energética da África do Sul.

Tabela 17 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (África do Sul)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
África do Sul (1990)	97,40%	2,33%	0,27%
África do Sul (2000)	96,56%	3,06%	0,38%
África do Sul (2010)	97,22%	2,48%	0,30%
Variação (%)	-0,19%	6,35%	13,00%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ao analisar a evolução no período 1990-2010 percebe-se que há uma importante diminuição do uso do carvão na composição da matriz energética do país, compensado principalmente com aumento do uso do gás natural e do petróleo. Essa mudança faz com que o país tenha redução de gases de efeito estufa uma vez que, dentre os combustíveis fósseis, o carvão é o maior poluente enquanto o gás natural é o que menos polui. Com isso o país tende a ter uma redução das emissões de gases de efeito estufa. Os dados da participação de cada fonte energética na matriz da África do Sul são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (África do Sul)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
África do Sul (1990)	19,2%	0,3%	77,9%	2,3%	0,3%	0,0%	100%
África do Sul (2000)	21,7%	1,0%	73,8%	3,1%	0,3%	0,1%	100%
África do Sul (2010)	21,2%	2,9%	73,1%	2,5%	0,2%	0,1%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Outro fator importante é que, apesar da dependência de combustíveis fósseis, em relação ao G20 a África do Sul apresenta um baixo consumo relativo de petróleo e de gás natural (menor que 1% do consumo do G20 em todos os anos, apresentado na Tabela 19). Quanto ao carvão, ainda que seja o país com maior dependência desta fonte em sua matriz, a África do Sul representava 3,82% do consumo do carvão do G20 em 1990, com queda nos anos seguintes, passando a representar 2,92% do consumo em 2010. Esta queda, no entanto, é devida principalmente ao aumento do consumo relativo da China que passou a representar 52,24% do consumo de carvão do G20 em 2010.

Quando comparado ao G20, a África do Sul é um dos países que menos consome petróleo (estando apenas à frente da Argentina nos anos 2000 e 2010), e é também o país que menos consome gás natural. Com relação ao consumo do carvão o país oscila entre a 6ª e 7ª posição, atrás da China, Estados Unidos, Índia, Japão, Rússia e a Alemanha (em 1990 e 2000). O país ainda ocupa as últimas colocações no consumo de fontes limpas de energia (hidrelétrica e outros renováveis). Os dados da posição relativa e participação do consumo no G20 são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (África do Sul)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	20° (0,71%)	19° (0,82%)	19° (0,89%)
Gás Natural	20° (0,02%)	20° (0,07%)	20° (0,17%)
Carvão	7° (3,82%)	7° (3,74%)	6° (2,92%)
Nuclear	9° (0,55%)	11° (0,63%)	12° (0,58%)
Hidrelétricas	19° (0,07%)	19° (0,08%)	19° (0,05%)
Renováveis	16° (0,00%)	16° (0,20%)	18° (0,06%)
Consumo Energético	15° (1,42%)	17° (1,40%)	18° (1,33%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com relação ao consumo energético total, a África do Sul apresenta baixo consumo relativo ao G20, ocupando a 15ª posição no ano de 1990 (caindo para a 18ª posição em 2010). Apesar do consumo energético na África do Sul aumentar 42,47% entre 1990 e 2010, quando

comparado com o G20, houve no período queda do consumo relativo (de 1,42% para 1,33%). Assim, a queda relativa do consumo, juntamente com as alterações na matriz energética, é um dos fatores responsáveis pelo desempenho do país na análise de eficiência. Os dados do consumo energética da África do Sul são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Consumo energético (África do Sul)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
África do Sul (1990)	86,39	1,42%	15°
África do Sul (2000)	101,26	1,40%	17°
África do Sul (2010)	123,08	1,33%	18°
Variação (%)	42,47%	-6,47%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

As emissões de gases de efeito estufa são baseadas nas características da matriz energética do país e na mudança do uso da terra. Em relação ao total de gases emitidos pelo G20, a África do Sul representa uma parcela cada vez menor nas emissões totais de GEE, passando da 14ª posição em 1990 para a 18ª posição nas emissões do G20 em 2010, estando à frente apenas da Turquia e Argentina neste último período.

Um importante destaque se dá pelas emissões de CO₂, gás mais abundante dos GEE, que apresentou redução no período analisado. Este gás é emitido como resultado do uso de combustíveis fósseis e alterações no uso da terra. A redução das emissões de CO₂ indica que as alterações no uso de combustíveis fósseis na matriz energética surtiu efeito positivo para as emissões do país. Assim, a redução das emissões dos gases de efeito estufa influenciou o desempenho do país.

Os dados sobre as emissões dos gases de efeito estufa são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (África do Sul)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	11° (2,02%)	13° (1,94%)	18° (1,48%)
Metano (CH ₄)	16° (1,24%)	15° (1,42%)	14° (1,29%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	17° (1,25%)	18° (1,31%)	17° (1,16%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	20° (0,60%)	17° (0,39%)	16° (0,36%)
Total GEE	14° (1,80%)	17° (1,79%)	18° (1,40%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Além da queda nas emissões de GEE, entre 1990 e 2010 também houve queda no consumo relativo ao G20, sendo que a redução nas emissões (redução de 22,07% - Tabela 22) ocorreu de forma mais significativa que a redução no consumo (redução de 6,47% - Tabela 20). Também é possível observar que não houve alterações na área de floresta e consequente absorção de CO₂ pelo meio ambiente. Considerando que o país é referência (*score* 100%), o bom desempenho relativo do país é baseado no baixo consumo e na redução de emissão de GEE, que no caso da África do Sul se dá pela alteração na matriz energética (redução do uso de carvão e aumento de gás natural) e não pelo florestamento o reflorestamento. A Tabela 22 apresenta os dados relativos da absorção de CO₂ e emissão de GEE.

Tabela 22 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (África do Sul)

País	Absorção de CO ₂ (kt)	Absorção de CO ₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO ₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
África do Sul (1990)	4.911,84	0,2298%	409.900,65	1,80%	1,20%
África do Sul (2000)	4.911,84	0,2322%	452.986,81	1,79%	1,08%
África do Sul (2010)	4.911,84	0,2326%	437.228,51	1,40%	1,12%
Variação (%)	0,00%	1,22%	6,67%	-22,07%	-6,25%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Em relação ao desempenho, a África do Sul apresentou *score* de eficiência de 100% nos três anos analisados (quando considerada a avaliação temporal). Desta forma, juntamente com a Arábia Saudita, Argentina e Turquia, a África do Sul forma o grupo que sempre se mostrou relativamente eficiente. Este grupo apresenta baixa emissão de GEE, sendo que os países ocupam as últimas posições nas emissões totais de gases de efeito estufa no G20. A África do Sul ocupava a 14^a posição neste ranking em 1990 caindo para a 18^a posição em 2010.

Com os dados em painel, o país apresentou eficiência apenas no primeiro ano analisado (1990), tendo piorado seu desempenho nos anos seguintes. Isso indica que o país piorou seu desempenho quando comparado a ele mesmo em outros períodos, o que reforça a proposta da ONU em reduzir as emissões de GEE para os mesmos níveis de 1990. Os dados da análise temporal e com dados em painel da África do Sul são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Eficiência Temporal e com dados em painel (África do Sul)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
África do Sul (1990)	100,00%	100,00%
África do Sul (2000)	100,00%	76,10%
África do Sul (2010)	100,00%	65,90%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

A análise de desempenho da África do Sul, por meio do DEA, indica que o país sempre teve um bom desempenho quando comparado aos outros países. Considerando as análises anteriores, com uma área e floresta relativamente pequena e sem alterações no período, o desempenho relativo do país é explicado pelas características da matriz energética e pelo baixo consumo e tamanho do país, relativamente pequeno quando comparado principalmente à Rússia, China, Índia e Estados Unidos.

6.3.2 Arábia Saudita

A Arábia Saudita é o único país com total dependência de combustíveis fósseis, sendo utilizado em sua matriz apenas petróleo e gás natural. Com maior participação na matriz energética, o consumo de petróleo apresenta redução, representando 64,2% da matriz energética em 1990, caindo para 61,0% em 2010. Da mesma forma houve aumento de gás natural no período, de 35,8% para 39,0%.

Ainda que a Arábia Saudita seja dependente de combustíveis fósseis, a redução de petróleo e aumento no uso de gás é um importante fator na redução das emissões de GEE uma vez que o país não utiliza carvão em sua matriz energética. Os dados dos tipos de combustíveis utilizados na matriz energética são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Arábia Saudita)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Arábia Saudita (1990)	100,00%	0,00%	0,00%
Arábia Saudita (2000)	100,00%	0,00%	0,00%
Arábia Saudita (2010)	100,00%	0,00%	0,00%
Variação (%)	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ao analisar a matriz energética da Arábia Saudita, observa-se que o país não faz uso de energias renováveis (hidrelétricas ou outras fontes renováveis), assim como também não faz uso da energia nuclear. Com relação aos combustíveis fósseis, o país não faz uso de carvão (fonte energética mais poluente) em sua matriz energética o que é um dos fatores

preponderantes para que o país faça parte deste grupo. Os dados da participação de cada fonte energética na matriz da Arábia Saudita são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Arábia Saudita)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Arábia Saudita (1990)	64,2%	35,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100%
Arábia Saudita (2000)	62,0%	38,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100%
Arábia Saudita (2010)	61,0%	39,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Em relação ao consumo, a Arábia Saudita é um país com baixo consumo energético quando comparado aos demais países do G20, contudo com tendência de aumento no consumo relativo. Em 1990 o país ocupava o 16º lugar dentre os maiores consumidores (com 1,38% do consumo do G20), passando para o 13º posto em 2010 com uma participação de 2,18% no consumo energético do G20.

Em números absolutos, o consumo energético aumentou 140,08% no período, com destaque para a variação entre 2000 e 2010. Em relação ao G20, a participação do país no consumo também aumentou no período. Os dados do consumo energético da Arábia Saudita são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Consumo energético (Arábia Saudita)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
Arábia Saudita (1990)	84,32	1,38%	16º
Arábia Saudita (2000)	117,88	1,63%	15º
Arábia Saudita (2010)	202,43	2,18%	13º
Variação (%)	140,08%	57,61%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ao relacionar o consumo energético e suas emissões relativas, a Arábia Saudita apresentou aumento do consumo energético (aumento de 140,08% - Tabela 26) em maior intensidade que as emissões de gases de efeito estufa (aumento de 101,65% - Tabela 27). Isso indica que houve um ganho de eficiência na emissão de gases de efeito estufa, muito provavelmente relacionado às alterações na matriz energética (já que não houve alterações na área de floresta e absorção de CO₂). Com um clima quente e uma pequena área de floresta em relação ao G20, o país apresenta pequena absorção de CO₂. Desta forma, a absorção de CO₂ não influencia

significativamente a redução de GEE no país, reforçando a ideia de que as alterações na matriz energética podem causar impacto importante na emissão de gases. Os dados relativos à absorção e emissão de GEE são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (Arábia Saudita)

País	Absorção de CO ₂ (kt)	Absorção de CO ₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO ₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Arábia Saudita (1990)	409,89	0,0192%	255.585,15	1,12%	0,16%
Arábia Saudita (2000)	409,89	0,0194%	346.061,73	1,36%	0,12%
Arábia Saudita (2010)	409,89	0,0194%	515.386,18	1,65%	0,08%
Variação (%)	0,00%	1,22%	101,65%	47,32%	-50,41%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Apesar da grande dependência do petróleo pela Arábia Saudita, em relação ao G20 o país ocupou apenas a 13^a e 14^a posição entre os países que mais utilizam esta fonte nos anos de 1990 e 2000, tendo aumentado sua posição relativa no último período analisado (Tabela 28). Em 2010 o país aumentou sua participação relativa, passando a ser o 6^o maior consumidor de petróleo dentre os países do G20 com participação de 4,2%, atrás apenas dos Estados Unidos, China, Japão, Índia e Rússia. Com relação ao gás natural, o país aumentou a participação relativa no consumo do G20 (de 2,3% em 1990 para 3,8% em 2010), oscilando entre a 8^a e 9^a posição no consumo desta fonte energética. A participação das demais fontes é pouco significativa. Os dados referentes à posição relativa no G20 e participação das fontes na matriz energética são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Arábia Saudita)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	13° (2,33%)	14° (2,73%)	6° (4,2%)
Gás Natural	8° (2,34%)	9° (2,76%)	8° (3,82%)
Carvão	20° (0,00%)	20° (0,00%)	20° (0,00%)
Nuclear	14° (0,00%)	15° (0,00%)	15° (0,00%)
Hidrelétricas	20° (0,00%)	20° (0,00%)	20° (0,00%)
Renováveis	17° (0,00%)	19° (0,00%)	20° (0,00%)
Consumo Energético	16° (1,38%)	15° (1,63%)	13° (2,18%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Com relação às emissões de gases de efeito estufa, a Arábia Saudita é um dos países com menor emissão dentre os países do G20, ocupando a 18^a posição nos anos de 1990 e 2000

(acima apenas da Argentina e Turquia), subindo para a 15ª posição em 2010. Esse aumento nas emissões relativas se dá pelo aumento das emissões de dióxido de carbono e pelo aumento das emissões do metano. Ainda que o país tenha reduzido a participação do petróleo em sua matriz energética, o aumento no consumo e consequente participação relativa ao G20 foi responsável pelo aumento da emissão destes gases, principalmente o dióxido de carbono. Os dados das emissões de gases de efeito estufa são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Arábia Saudita)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	15° (1,32%)	17° (1,57%)	11° (1,91%)
Metano (CH ₄)	20° (0,69%)	19° (1,00%)	16° (1,20%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	20° (0,32%)	20° (0,34%)	20° (0,33%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	17° (0,98%)	18° (0,30%)	18° (0,32%)
Total GEE	18° (1,12%)	18° (1,36%)	15° (1,65%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Com relação ao desempenho, a Arábia Saudita atingiu o *score* máximo de eficiência relativa nos três períodos analisados isoladamente (DEA Temporal). Quando os dados são analisados em painel, a análise DEA indicou que a Arábia Saudita apresentou eficiência apenas no primeiro período (1990), tendo caído nos anos seguintes. Isso indica que o país, em relação a ele mesmo, tem se tornado ineficiente com o passar do tempo e que os níveis de emissões, relativas ao consumo, eram melhores em 1990 (também corroborando com as propostas da ONU de redução das emissões aos níveis de 1990). Os dados relativos à análise de eficiência temporal e com dados em painel são apresentados na Tabela 29.

Tabela 30 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Arábia Saudita)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Arábia Saudita (1990)	100,00%	100,00%
Arábia Saudita (2000)	100,00%	73,80%
Arábia Saudita (2010)	100,00%	49,60%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

Um dos fatores que explica o desempenho da Arábia Saudita é que o país não utiliza carvão em sua matriz energética e tem alterado a participação do petróleo e do gás natural melhorando as emissões, além do país ter uma das menores emissões de gases de efeito estufa do G20.

6.3.3 Argentina

A Argentina, apesar de ser um país com alta dependência de combustíveis fósseis (participação média de 85,7% na matriz energética), ocupa entre a 15ª e 16ª posição entre os países do G20 no consumo deste tipo de combustível. Além de combustíveis fósseis, o país faz uso de outras fontes, com destaque para hidrelétricas e energia nuclear.

Em relação aos combustíveis fósseis, o carvão tem pequena participação na matriz energética do país, que faz uso do petróleo e do gás natural, sendo que no período analisado houve uma queda importante do uso do petróleo e aumento do uso de gás natural. Esta combinação de combustíveis fósseis (uso cada vez menor de carvão, redução do uso de petróleo e aumento do uso do gás natural) é potencialmente redutora de emissão de gases de efeito estufa, uma vez que as fontes energéticas que mais poluem são, em primeiro lugar, o carvão, seguido do petróleo.

Os dados da participação dos combustíveis fósseis na matriz energética da Argentina são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Argentina)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Argentina (1990)	87,05%	3,69%	9,26%
Argentina (2000)	84,59%	2,32%	13,09%
Argentina (2010)	85,35%	2,06%	12,59%
Variação (%)	-1,96%	-44,05%	35,95%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com relação às demais fontes, o país tem aumentado a participação no consumo das hidrelétricas e demais fontes renováveis, que são menos poluidoras, e tem reduzido a participação da energia nuclear. Ao analisar a matriz energética, observa-se uma redução importante no consumo de petróleo, carvão e energia nuclear e um aumento na participação do gás natural, hidrelétricas e outras fontes renováveis. Essa combinação permite uma redução das emissões de gases de efeito estufa. Os dados da participação de cada fonte na matriz energética da Argentina são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Argentina)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Argentina (1990)	44,0%	40,9%	2,1%	3,7%	9,2%	0,1%	100%
Argentina (2000)	33,7%	49,6%	1,3%	2,3%	12,8%	0,3%	100%
Argentina (2010)	33,7%	50,4%	1,3%	2,1%	11,9%	0,7%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

A Argentina é o país de menor consumo energético dentre os países do G20, sendo que o uso de petróleo e carvão ocupam as últimas posições no consumo total do grupo. Ainda que a participação de cada fonte energética no consumo do G20 seja pequena quando comparada aos demais países do grupo, o país ocupa entre a 12^a e 14^a posição no consumo do gás natural, entre a 10^a e 13^a posição no consumo de energia nuclear e entre a 10^a e 12^a posição no consumo hidrelétrico, sendo estas três fontes menos poluentes.

Os dados da posição relativa e participação no consumo da Argentina no G20 são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Argentina)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	19° (0,85%)	20° (0,76%)	20° (0,88%)
Gás Natural	12° (1,42%)	12° (1,84%)	14° (1,89%)
Carvão	19° (0,05%)	19° (0,04%)	18° (0,03%)
Nuclear	10° (0,45%)	13° (0,29%)	13° (0,30%)
Hidrelétricas	12° (1,25%)	10° (1,94%)	11° (1,68%)
Renováveis	12° (0,11%)	14° (0,46%)	16° (0,44%)
Consumo Energético	20° (0,73%)	20° (0,83%)	20° (0,83%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com o menor consumo energético do grupo, a Argentina aumentou seu consumo energético em 72,97% entre 1990 e 2010. O consumo relativo, comparado aos demais países do G20, foi um pouco menor no período (13,55%). Para o país, o principal aumento do consumo ocorreu entre 1990 e 2000. Entre os anos de 2000 e 2010 o país cresceu de maneira proporcional ao grupo, não tendo melhorado sua participação no consumo relativo (continuando na 20^a posição em todo o período). Os dados do consumo energético da Argentina são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Consumo energético (Argentina)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
Argentina (1990)	44,67	0,73%	20°
Argentina (2000)	60,24	0,83%	20°
Argentina (2010)	77,26	0,83%	20°
Variação (%)	72,97%	13,55%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Houve, na Argentina, redução da área de floresta entre 1990 e 2000, que refletiu em uma redução de 15,50% na absorção de CO₂ pelo país. Com a 10ª maior área de floresta dentre os países do G20 (com cerca de 1,2% da área de floresta do grupo), a Argentina foi o segundo país com maior redução na área de floresta, atrás apenas da Indonésia. Apesar das emissões de GEE aumentarem (21,40%) no país, em relação aos demais países do G20 houve redução na participação das emissões, indicando que houve aumento maior nas emissões dos outros países do que na Argentina. Com a redução da absorção e o aumento das emissões, a relação entre absorção e emissões apresenta queda. Os dados relativos à absorção e emissões de CO₂ são apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (Argentina)

País	Absorção de CO ₂ (kt)	Absorção de CO ₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO ₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Argentina (1990)	22.944,03	1,0736%	255.386,87	1,12%	8,98%
Argentina (2000)	21.010,54	0,9932%	282.570,02	1,11%	7,44%
Argentina (2010)	19.387,65	0,9182%	310.031,41	0,99%	6,25%
Variação (%)	-15,50%	-14,47%	21,40%	-11,31%	-30,39%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Com relação aos gases de efeito estufa, o país ocupa a última posição na emissão de dióxido de carbono em todos os períodos, reflexo do baixo consumo energético do país. A Argentina, no entanto, ocupa entre a 10ª e 11ª posição dentre os países emissores de metano, originado pela decomposição de matéria orgânica nos reservatórios das hidrelétricas e, possivelmente, pela criação de gado no país. O aumento das emissões de óxido nitroso refere-se, é possivelmente causado pelo aumento do uso de fertilizantes e de processos industriais no país. Os demais gases de efeito estufa tem participação muito reduzida nas emissões do G20. Os dados relativos às emissões de gases de efeito estufa no país são apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Argentina)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	20° (0,68%)	20° (0,74%)	20° (0,73%)
Metano (CH ₄)	10° (2,38%)	10° (2,37%)	11° (1,72%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	13° (2,24%)	11° (2,36%)	7° (2,76%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	18° (0,93%)	20° (0,09%)	20° (0,11%)
Total GEE	19° (1,12%)	20° (1,11%)	20° (0,99%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

O aumento de consumo energético na Argentina foi de 72,97% (Tabela 34) enquanto o aumento das emissões de GEE foi 21,40% (Tabela 35). Assim, o aumento do consumo energético foi mais intenso que o aumento das emissões, ainda que o país tenha reduzido sua área de floresta. Com relação ao consumo energético do G20 houve um pequeno aumento relativo na participação do consumo do grupo ao passo que houve redução nas emissões de GEE. A área de floresta, assim como a absorção de CO₂ apresentou redução na comparação com os países do G20.

Com baixo consumo energético e alterações na matriz energética, a Argentina apresentou *score* máximo de eficiência na análise envoltória de dados nos três períodos analisados (DEA Temporal). Com os dados em painel, o país apresentou queda no ano de 2010, quando comparado aos outros anos, em especial o ano base. Isso significa que o país tornou-se ineficiente em relação à ele mesmo a partir de 2000, possivelmente causada pela redução na área de floresta e consequente redução na absorção de CO₂. Os dados da análise de eficiência temporal e com dados em painel são apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Argentina)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Argentina (1990)	100,00%	100,00%
Argentina (2000)	100,00%	100,00%
Argentina (2010)	100,00%	73,50%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

6.3.4 Turquia

A Turquia é o segundo país de menor consumo energético dentre os países do G20, estando à frente apenas da Argentina. Com uma alta dependência de combustíveis fósseis (média de 89,2% nos três períodos analisados), o país ainda depende de energia hidrelétrica (uma média de 10,5% nos três períodos) e, em pequena escala, de outras fontes renováveis. A Turquia não possui energia nuclear como fonte energética em sua matriz. Os dados relativos à participação dos combustíveis fósseis na matriz energética da Turquia são apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Turquia)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Turquia (1990)	88,63%	0,00%	11,37%
Turquia (2000)	90,37%	0,00%	9,63%
Turquia (2010)	88,55%	0,00%	11,45%
Variação (%)	-0,09%	0,00%	0,70%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Apesar da participação de combustíveis fósseis ser relativamente estável, há uma importante redução do uso de petróleo (de 47,7% em 1990 para 28,8% em 2010) e no uso do carvão (de 34,4% em 1990 para 28,0% em 2010), compensado pelo aumento do gás natural, menos poluente, aumentando de 6,6% em 1990 para 31,8% em 2010. A participação das hidrelétricas na matriz energética do país é relativamente estável e com pouca alteração enquanto a participação de outras fontes renováveis aumenta no período. Os dados das fontes energéticas da Turquia são apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Turquia)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Turquia (1990)	47,7%	6,6%	34,4%	0,0%	11,3%	0,0%	100%
Turquia (2000)	41,9%	17,9%	30,6%	0,0%	9,5%	0,1%	100%
Turquia (2010)	28,8%	31,8%	28,0%	0,0%	10,6%	0,8%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Assim como a Argentina, há um baixo consumo em relação aos países do G20. No entanto, em comparação aos demais países do G20, há aumento na participação de todas as fontes energéticas do país (exceto a energia nuclear que não é utilizada no país). Dentre as fontes energéticas, o carvão, a energia hidrelétrica e outras fontes renováveis merecem destaque. Ainda que tenha reduzido sua participação na matriz energética, a Turquia ocupa entre a 12ª e

13ª posição no consumo de carvão do G20. Com relação às hidrelétricas, o país passou da 11ª posição para a 9ª posição entre 1990 e 2010 e, no uso de outras fontes renováveis, ocupou entre a 13ª e 15ª posição no período. O petróleo, mesmo representando 47,7% da matriz energética do país em 1990, era pouco representativo quando comparado ao G20. A participação do petróleo no grupo é pequena, sendo que o país ocupa apenas a 18ª posição no consumo do grupo. Os dados da posição relativa e participação do consumo do G20 são apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Turquia)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	18° (0,95%)	18° (1,15%)	18° (1,08%)
Gás Natural	17° (0,24%)	18° (0,81%)	17° (1,70%)
Carvão	13° (0,90%)	12° (1,12%)	12° (1,00%)
Nuclear	20° (0,00%)	20° (0,00%)	20° (0,00%)
Hidrelétricas	11° (1,59%)	12° (1,75%)	9° (2,14%)
Renováveis	13° (0,08%)	15° (0,20%)	14° (0,76%)
Consumo Energético	19° (0,76%)	19° (1,02%)	19° (1,19%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com o segundo menor consumo do G20, a Turquia aumentou seu consumo em 138,67% no período analisado, tendo aumentado também seu consumo relativo (em 56,68%). Ainda que tenha aumentado o consumo, o país se manteve em todo o período na 19ª posição entre os países do G20 no ranking de consumo energético. Os dados do consumo da Turquia são apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 - Consumo energético (Turquia)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (%) G20)	Ranking Consumo G20
Turquia (1990)	46,25	0,76%	19°
Turquia (2000)	73,36	1,02%	19°
Turquia (2010)	110,39	1,19%	19°
Variação (%)	138,67%	56,68%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ao analisar a absorção de dióxido de carbono e as emissões de gases de efeito estufa nota-se que o país aumentou em 17,09% a absorção de CO₂, reflexo do aumento da área de floresta no país. Com relação ao reflorestamento, a Turquia foi o terceiro país com maior aumento da área de floresta dentre os países do G20 no período analisado, estando atrás apenas da China e

da Itália. Como reflexo disto, houve aumento da absorção relativa ao G20, influenciando o desempenho comparado do país. Em comparação ao G20, houve um aumento na participação das emissões, fazendo com que a relação entre absorção e emissão tivesse uma queda. Em relação aos valores absolutos, houve no período um aumento de 138,67% no consumo (Tabela 41) contra um aumento de 74,18% nas emissões de gases de efeito estufa do país (Tabela 42) indicando que, apesar de um aumento significativo no consumo, as emissões não acompanharam este aumento. Os dados relativos à absorção e emissões de gases da Turquia são apresentados na Tabela 42.

Tabela 42 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (Turquia)

País	Absorção de CO ₂ (kt)	Absorção de CO ₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO ₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Turquia (1990)	6.063,09	0,2837%	221.294,23	0,97%	2,74%
Turquia (2000)	6.354,97	0,3004%	307.991,25	1,21%	2,06%
Turquia (2010)	7.099,08	0,3362%	385.448,97	1,24%	1,84%
Variação (%)	17,09%	18,51%	74,18%	27,25%	-32,78%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Com uma das mais baixas emissões de gases de efeito estufa do G20 (ocupando entre a 19^a e 20^a posição), a Turquia tem como destaque o aumento nas emissões do metano e do óxido nitroso que, assim como na Argentina, referem-se às emissões relativas à matéria orgânica das hidrelétricas e processos industriais. As baixas emissões de GEE totais da Turquia são reflexo, principalmente das baixas emissões de dióxido de carbono, superiores apenas à Argentina. Os dados das emissões de GEE da Turquia são apresentados na Tabela 43.

Tabela 43 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Turquia)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	19° (0,88%)	19° (1,14%)	19° (1,14%)
Metano (CH ₄)	18° (1,02%)	16° (1,35%)	13° (1,53%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	16° (1,69%)	14° (1,86%)	12° (1,85%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	16° (1,04%)	15° (0,57%)	15° (0,82%)
Total GEE	20° (0,97%)	19° (1,21%)	19° (1,24%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

O consumo energético da Turquia apresenta aumento relativo quando comparado aos demais países do G20. As emissões também apresentam aumento, contudo em menor intensidade que o consumo. Com relação à absorção de CO₂, houve no país um aumento da área de floresta e,

consequentemente, aumento relativo na absorção de gases. Desta forma, as alterações na matriz energética e aumento da área de floresta foram fatores que auxiliaram a redução das emissões no país. Assim, tanto a alteração na matriz energética quanto a absorção de CO₂ pelas florestas contribuiu para a melhoria no desempenho do país.

Com relação ao desempenho, o país foi considerado eficiente nos três períodos analisados, com *score* de 100% na análise DEA Temporal. O baixo consumo energético e as baixas emissões foram os principais responsáveis pela eficiência em 1990 e as alterações na matriz energética e as mudanças no uso da terra fizeram com que o país mantivesse essa eficiência. Com dados em painel, a Turquia apresentou eficiência no ano base, 1990, com queda nos anos posteriores. Isso sugere que o país piorou seu desempenho quando comparado ao próprio desempenho de 1990. Os dados da análise de eficiência são apresentados na Tabela 44.

Tabela 44 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Turquia)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Turquia (1990)	100,00%	100,00%
Turquia (2000)	100,00%	71,40%
Turquia (2010)	100,00%	56,90%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

A Turquia, juntamente com a África do Sul, Arábia Saudita e Argentina, apresentou eficiência nos três períodos analisados. São países que têm em comum baixo consumo energético e baixa emissão de gases de efeito estufa. Além disto, estes quatro países aumentaram a participação de gás natural em sua matriz energética (com aumento desta fonte na participação relativa ao G20) e reduziram a participação de carvão (com exceção da Arábia Saudita que não faz uso desta fonte energética).

6.4 Países que se tornaram eficientes (eficiência relativa)

Os países que se tornaram eficientes na emissão de gases de efeito estufa foram a Austrália e o Irã. Os dados dos países são apresentados a seguir.

6.4.1 Austrália

A Austrália é um dos países com maior dependência de combustíveis fósseis, ocupando a 5ª posição nos anos de 1990 e 2000 e ganhando a 4ª posição em 2010. Além dos combustíveis fósseis, o país também utiliza em sua matriz energética a energia hidrelétrica. Apesar de possuir as maiores reservas de urânio do mundo, a Austrália não faz uso de energia nuclear e o uso de outras fontes renováveis é muito baixo, especialmente nos anos 1990 e 2000. Os dados da participação de combustíveis fósseis da Austrália são apresentados na Tabela 45.

Tabela 45 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Austrália)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Austrália (1990)	95,99%	0,00%	4,01%
Austrália (2000)	96,44%	0,00%	3,56%
Austrália (2010)	96,14%	0,00%	3,86%
Variação (%)	0,16%	0,00%	-3,77%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com relação à participação dos combustíveis fósseis em sua matriz energética, a principal fonte energética da Austrália é o carvão (uma média de 42,4% no período analisado), seguido por petróleo (36,0%) e gás natural (17,8%). O país também é detentor de uma das maiores reservas de carvão do mundo, atrás apenas dos Estados Unidos, Rússia e China, sendo que o país tem a 5ª maior reserva do mundo de carvão de alta qualidade.

A grande participação do carvão em sua fonte energética é devido às grandes reservas de carvão encontradas em seu território, sendo utilizado principalmente o carvão de alta qualidade (baixo teor de cinzas e grande geração de calor). Considerando as condições geográficas, a Austrália é um dos países do G20 que mais utiliza este recurso em sua matriz energética (ocupando a 4ª colocação, atrás apenas da África do Sul, China e Índia). Ainda que esteja entre os países que mais usam carvão em sua matriz energética, a participação relativa da Austrália no consumo do G20 é pequena, ocupando apenas a 9ª posição com consumo de 1,67% em relação aos países analisados.

Ainda que a matriz energética australiana não tenha sofrido significativas alterações, a participação do petróleo sofreu uma redução de 3,79% (na composição da matriz), enquanto o gás natural teve um aumento de 8,05% e o carvão permaneceu relativamente estável, com

participação de 41,7% na composição da matriz energética em 1990, passando para 41,9% em 2010.

Outro importante ponto a ser considerado foi o aumento da participação de fontes renováveis, que teve um importante crescimento (passando de 0,2% em 1990 para 1,5% em 2010), se tornando o sexto país (do G20) com maior participação de recursos renováveis em sua matriz energética. Os dados da participação de cada fonte energética na matriz da Austrália são apresentados na Tabela 46.

Tabela 46 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Austrália)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Austrália (1990)	36,9%	17,4%	41,7%	0,0%	3,8%	0,2%	100%
Austrália (2000)	35,6%	17,3%	43,6%	0,0%	3,3%	0,2%	100%
Austrália (2010)	35,5%	18,8%	41,9%	0,0%	2,3%	1,5%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com relação aos países do G20, houve um pequeno aumento na participação do consumo de petróleo, por parte da Austrália, entre os países do grupo, assim como uma pequena redução na participação do consumo de gás natural. As alterações mais significativas são relativas à redução da participação do carvão no consumo relativo do G20, com queda de 19,32% entre 1990 (2,07% do consumo do grupo) e 2010 (1,67% do consumo do grupo) e o aumento da participação do consumo de energia renovável, tendo dobrado sua participação no período analisado. Os dados comparativos do consumo energético da Austrália com os demais países do G20 são apresentados na Tabela 47.

Tabela 47 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Austrália)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	16° (1,39%)	17° (1,43%)	17° (1,49%)
Gás Natural	14° (1,18%)	16° (1,14%)	19° (1,12%)
Carvão	9° (2,07%)	8° (2,34%)	9° (1,67%)
Nuclear	15° (0,00%)	16° (0,00%)	16° (0,00%)
Hidrelétricas	14° (1,02%)	14° (0,90%)	15° (0,52%)
Renováveis	10° (0,76%)	13° (0,65%)	13° (1,58%)
Consumo Energético	14° (1,44%)	16° (1,48%)	17° (1,33%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com baixo consumo energético dentre os países do G20 (14ª posição no grupo), o país teve um aumento de 40,79% no consumo entre 1990 e 2010 (Tabela 48), contudo o consumo relativo caiu 7,58%. Isso indica que, ainda que o país tenha aumentado o consumo, outros países aumentaram em uma proporção maior, fazendo com que a Austrália tivesse redução relativa. Assim, o país caiu da 14ª posição para a 17ª posição no consumo do grupo (a frente da África do Sul, Turquia e Argentina) se tornando um dos países com menor consumo energético do G20. Os dados do consumo energético da Austrália são apresentados na Tabela 48.

Tabela 48 - Consumo energético (Austrália)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
Austrália (1990)	87,52	1,44%	14°
Austrália (2000)	107,11	1,48%	16°
Austrália (2010)	123,22	1,33%	17°
Variação (%)	40,79%	-7,58%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com relação às mudanças no uso da terra, entre 1990 e 2010 houve redução da área de floresta, refletindo em uma absorção menor de dióxido de carbono pelas florestas do país. Neste período foi constatado que houve aumento de 40,79% consumo enquanto as emissões de GEE aumentaram 20,46%. Quando comparado ao G20, nota-se uma redução de 12,0% nas emissões relativas, indicando que, em média, os demais países do G20 tiveram um aumento nas emissões de GEE maior do que a Austrália. Os dados da absorção e emissões de dióxido de carbono são apresentados na Tabela 49.

Tabela 49 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (Austrália)

País	Absorção de CO ₂ (kt)	Absorção de CO ₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO ₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Austrália (1990)	54.596,39	2,5546%	470.318,95	2,06%	11,61%
Austrália (2000)	54.744,81	2,5879%	537.116,43	2,12%	10,19%
Austrália (2010)	52.758,84	2,4986%	566.543,01	1,82%	9,31%
Variação (%)	-3,37%	-2,19%	20,46%	-12,00%	-19,78%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

A Austrália é um dos países com emissão de GEE relativamente baixa, oscilando entre a 10ª e 14ª posição nas emissões totais de gases de efeito estufa. Entre 1990 e 2010 o país passou

para a 16ª posição de emissões de dióxido de carbono (gás mais abundante dos GEE), indicando uma melhora na emissão deste tipo de gás, além da redução na participação de outros gases no consumo do G20.

Tabela 50 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Austrália)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	13° (1,74%)	15° (1,74%)	16° (1,64%)
Metano (CH ₄)	9° (2,68%)	7° (3,06%)	7° (2,43%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	9° (3,67%)	7° (4,25%)	8° (2,73%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	12° (1,96%)	14° (0,93%)	13° (1,01%)
Total GEE	12° (2,06%)	10° (2,12%)	14° (1,82%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Com relação ao desempenho, a Austrália apresentou aumento do *score* de eficiência temporal, se tornando relativamente eficiente ao G20 no ano de 2010. Na análise temporal de 1990 a Austrália foi o país com maior *score* dentre os países ineficientes, estando na zona intermediária de eficiência (com *score* 55,80% no ano de 1990). Com relação aos dados em painel, o país perdeu eficiência quando comparado com o desempenho do de 1990, indicando que seu desempenho no ano base o país era relativamente mais eficiente que nos anos posteriores.

Alguns fatores explicam o desempenho da Austrália. Com relação ao *score* temporal, o aumento de eficiência relativa da Austrália pode ser explicado pela redução da participação do consumo de carvão em relação ao G20 e o aumento da participação de recursos renováveis em sua matriz energética. Outro fator que pode ser considerado para explicar o desempenho é que o aumento no consumo energético do país (40,79% - Tabela 48) é superior ao aumento das emissões (20,46% - Tabela 49).

Comparativamente ao G20, houve queda tanto no consumo quanto nas emissões, fazendo com que a Austrália, comparativamente, tivesse desempenho superior. Os dados da eficiência temporal e com dados em painel são apresentados na Tabela 51.

Tabela 51 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Austrália)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Austrália (1990)	55,80%	55,80%
Austrália (2000)	84,50%	47,00%
Austrália (2010)	100,00%	45,10%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

Os dados analisados indicam que os fatores significantes pela melhoria do desempenho da Austrália foram as alterações na matriz energética, a redução do consumo e a redução da participação relativa do uso do carvão. Também foi verificado que houve uma redução nas emissões de gases entre 1990 e 2010 e que esta redução é proporcionalmente menor do que a redução do consumo neste período. Por fim, não há indícios de que a área de floresta e a absorção de GEE tiveram grande influência sobre o desempenho.

6.4.2 República do Irã

A República Islâmica do Irã é fortemente dependente de combustíveis fósseis (entre 98,01% e 99,31% de sua matriz energética no período analisado), sendo o segundo país com maior dependência deste recurso, perdendo apenas para a Arábia Saudita (que têm dependência de 100% de combustíveis fósseis). Além dos combustíveis fósseis, o país também usa energia hidrelétrica (fonte renovável) em sua matriz energética. Os dados relativos à participação dos combustíveis fósseis são apresentados na Tabela 52.

Tabela 52 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Irã)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Irã (1990)	98,01%	0,00%	1,99%
Irã (2000)	99,31%	0,00%	0,69%
Irã (2010)	99,01%	0,00%	0,99%
Variação (%)	1,02%	0,00%	-50,14%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Em 1990 o Irã concentrava a maior parte do seu consumo energético em petróleo (68,5%), tendo reduzido gradativamente no período para 39,9% em 2010. O consumo de carvão, que já tinha pequena participação na composição da matriz energética (1,5% em 1990), caiu para 0,4% em 2010. Também houve no período o aumento do uso de gás natural (menos poluente

dentre os combustíveis fósseis), passando de 28,0% em 1990 para 58,8% em 2010. Estas alterações na matriz energética do país são potencialmente redutoras de emissões de gases de efeito estufa. Os dados referentes à participação de cada fonte na matriz energética do Irã são apresentados na Tabela 53.

Tabela 53 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Irã)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Irã (1990)	68,5%	28,0%	1,5%	0,0%	2,0%	0,0%	100%
Irã (2000)	52,8%	45,7%	0,9%	0,0%	0,7%	0,0%	100%
Irã (2010)	39,9%	58,8%	0,4%	0,0%	1,0%	0,0%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ainda que tenha reduzido o uso de petróleo em sua matriz energética, comparativamente aos outros países do G20, o Irã apresentou um aumento na participação do consumo do petróleo, uma vez que houve redução por parte das principais economias consumidoras de petróleo da década de 90 (Estados Unidos, Rússia, Japão, Alemanha, China, Itália, França e Reino Unido). Desta forma, o Irã passa de 14º maior consumidor de petróleo no G20, em 1990, para o 12º lugar em 2010.

O aumento do consumo de gás natural fez com que a participação dentro do G20 passasse de 1,6% do consumo total no grupo em 1990 para 6,3% em 2010, saindo da 11ª colocação em consumo dentro do G20 para a 3ª colocação no último período analisado, atrás apenas dos Estados Unidos e Rússia. O carvão, por sua vez, é pouco representativo no consumo do grupo, com participação de 0,1% em 1990 e apresentando redução no período para 0,03% e, 2010, fazendo com que o Irã ocupasse apenas a 19ª posição no consumo do G20 desta fonte energética. Os dados da posição relativa de consumo no G20 são apresentados na Tabela 54.

Tabela 54 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Irã)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	14º (2,15%)	15º (2,45%)	12º (3,00%)
Gás Natural	11º (1,59%)	8º (3,48%)	3º (6,30%)
Carvão	18º (0,06%)	18º (0,05%)	19º (0,03%)
Nuclear	18º (0,00%)	18º (0,00%)	18º (0,00%)
Hidrelétricas	15º (0,44%)	18º (0,21%)	16º (0,39%)
Renováveis	19º (0,00%)	20º (0,00%)	19º (0,03%)
Consumo Energético	17º (1,20%)	14º (1,72%)	11º (2,39%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com baixo consumo em 1990, o país aumentou o consumo energético em 203,78% no período. Desta forma o Irã, que ocupava a 17ª posição em consumo energético, chegou em 2010 ocupando a 11ª posição no consumo energético do G20. Seu consumo relativo também aumentou, de forma menos intensa. Os dados do consumo energético do Irã são apresentados na Tabela 55.

Tabela 55 - Consumo energético (Irã)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
Irã (1990)	72,90	1,20%	17°
Irã (2000)	123,90	1,72%	14°
Irã (2010)	221,47	2,39%	11°
Variação (%)	203,78%	99,42%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com relação às mudanças no uso da terra, não houve no período alteração na área de floresta e consequente mudança na quantidade de dióxido de carbono absorvida pelas florestas, contudo a absorção relativa aumentou 1,22% no período. Isso sugere que enquanto o país não reduziu suas áreas de florestas, o desmatamento de todos os países do grupo fez com que o país aumentasse sua absorção relativa. Outro dato importante é que, enquanto o consumo energético aumentou 203,75% as emissões de gases de efeito estufa aumentaram de maneira menos intensa (125,22%). Sem ter alterações na absorção e com aumento nas emissões, a relação entre absorção e emissão apresentou queda no período analisado. Os dados referentes à absorção e emissão de GEE são apresentados na Tabela 56.

Tabela 56 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (Irã)

País	Absorção de CO ₂ (kt)	Absorção de CO ₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO ₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Irã (1990)	2.192,44	0,1026%	289.211,86	1,27%	0,76%
Irã (2000)	2.192,44	0,1036%	478.328,48	1,89%	0,46%
Irã (2010)	2.192,44	0,1038%	651.360,41	2,09%	0,34%
Variação (%)	0,00%	1,22%	125,22%	64,53%	-55,60%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

O aumento no consumo do Irã gerou reflexos no aumento das emissões, em especial do dióxido de carbono e do gás metano. O aumento, principalmente destes dois gases, fez com

que o país passasse da 17ª posição dentre os países com maior emissão de GEE no G20 para a 10ª posição em 2010. Com relação ao dióxido de carbono, a variação entre 1990 e 2000 foi mais significativa, o que provavelmente fez com que o país tivesse redução no *score* de eficiência no ano de 2000. Os dados da posição relativa ao G20 e participação nas emissões de GEE do Irã são apresentados na Tabela 57.

Tabela 57 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Irã)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	16° (1,28%)	12° (1,97%)	9° (2,18%)
Metano (CH ₄)	15° (1,32%)	13° (1,91%)	9° (2,29%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	18° (1,09%)	17° (1,36%)	16° (1,27%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	15° (1,04%)	16° (0,41%)	17° (0,34%)
Total GEE	17° (1,27%)	16° (1,89%)	10° (2,09%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Com relação à eficiência, o Irã apresenta oscilação, sendo considerado eficiente (100% eficiência relativa) em 1990, caindo em 2000 para 81,0%, e voltando a ser eficiente em 2010. O aumento do *score* temporal é explicado pela alteração da matriz energética, com tendência a melhoria com o passar do tempo devido as alteração dos combustíveis fósseis. Outro importante fato que contribuiu foi o baixo uso de carvão, fonte energética mais poluente. A queda em 2000 pode ser explicada pelo aumento considerável de consumo entre 1990 e 2000 (passando de 1,27% para 1,72% na participação do G20) e consequente aumento de emissões de CO₂. O clima desfavorável e a pouca vegetação não tiveram grande influência na absorção de dióxido de carbono, sendo creditada a melhoria de desempenho principalmente à alteração na matriz energética do país.

Os *scores* da análise por envoltória, com dados em painel, indica que o país apresenta tendência de redução de desempenho quando comparado ao ano de 1990, reduzindo gradativamente para 53,6% em 2000 e para 38,9% em 2010. Com base na análise por painel entende-se que o desempenho do Irã, comparado ao longo do tempo, tem piorado, sendo seu melhor desempenho em 1990. Os dados da análise de eficiência energética do Irã são apresentados na Tabela 58.

Tabela 58 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Irã)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Irã (1990)	100,00%	100,00%
Irã (2000)	81,00%	53,60%
Irã (2010)	100,00%	38,90%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

De maneira sintética, os dados analisados indicam que os fatores responsáveis pela melhoria do desempenho do Irã foram as alterações na matriz energética. Constatou-se também que o aumento das emissões de gases entre 2000 e 2010 é proporcionalmente menor do que o aumento do consumo neste período. Por fim, no caso deste país, a área de floresta e a absorção de GEE não tiveram influência sobre o desempenho.

6.5 Países sempre ineficientes (com melhora na eficiência relativa)

Dentre os países que nunca foram considerados eficientes (*score* de eficiência 100%), alguns países apresentaram aumento significativo em suas avaliações de desempenho. Essa variação no aumento dos *scores* fez com que estes países fossem agrupados nos países ineficientes com melhora na eficiência relativa. A seguir são detalhados os países Alemanha, Itália, Reino Unido e Rússia.

6.5.1 Alemanha

A Alemanha é um dos grandes consumidores energéticos do G20, ocupando a 5ª posição entre os maiores consumidores entre 1990 e 2000 e a 6ª posição em 2010. Com alta dependência de combustíveis fósseis, o país tem alterado a composição de sua matriz energética, reduzindo a participação do carvão (altamente poluente) e aumentando o uso de gás natural (combustível fóssil menos poluente) além de outras fontes renováveis de energia. Com isso o país passou da 12ª para a 16ª posição no consumo de combustíveis fósseis entre 1990 e 2010 e se tornou o 7º maior consumidor de fontes renováveis dentre os países do G20. O consumo do petróleo permanece estável no país, assim como o consumo de energia nuclear. As hidrelétricas são pouco representativas na matriz energética do país. Os dados da participação de combustíveis fósseis na Alemanha são apresentados na Tabela 59.

Tabela 59 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Alemanha)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Alemanha (1990)	88,91%	9,87%	1,22%
Alemanha (2000)	85,94%	11,53%	2,53%
Alemanha (2010)	82,80%	9,87%	7,33%
Variação (%)	-6,86%	-0,04%	500,06%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ao analisar a matriz energética percebe-se que o país optou por uma redução do uso de combustíveis mais poluentes, aumentando o uso de fontes energéticas mais limpas e menos poluentes. Desta forma, houve um aumento significativo na participação do gás natural e outras fontes renováveis na matriz energética da Alemanha e uma forte redução na participação do carvão. Estas alterações na matriz energética são potencialmente redutoras de gases de efeito estufa. Os dados relativos às fontes energéticas da Alemanha são apresentados na Tabela 60.

Tabela 60 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Alemanha)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Alemanha (1990)	36,4%	15,4%	37,1%	9,9%	1,1%	0,1%	100%
Alemanha (2000)	39,0%	21,5%	25,5%	11,5%	1,7%	0,8%	100%
Alemanha (2010)	35,8%	23,3%	23,8%	9,9%	1,5%	5,9%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Em relação ao G20, o país apresentou redução de quase todas as fontes energéticas, com exceção das fontes renováveis. Essa mudança sinaliza um investimento maior e uma preocupação com fontes de energia mais limpas e com menos emissões de GEE. Com isso a Alemanha passou a ser, dentre os países do G20, o segundo país com maior uso de fontes renováveis de energia, estando atrás apenas dos Estados Unidos.

Outro fato de destaque na Alemanha é que houve redução no consumo energético no período, fazendo com que o país perdesse uma posição dentre o G20 no consumo energético. Os dados do consumo relativo da Alemanha são apresentados na Tabela 61.

Tabela 61 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Alemanha)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	4° (5,47%)	4° (4,86%)	8° (3,92%)
Gás Natural	4° (4,19%)	5° (4,40%)	9° (3,63%)
Carvão	4° (7,35%)	6° (4,25%)	7° (2,49%)
Nuclear	4° (9,49%)	4° (7,85%)	6° (6,06%)
Hidrelétricas	13° (1,19%)	13° (1,41%)	13° (0,87%)
Renováveis	8° (1,51%)	3° (7,50%)	2° (15,64%)
Consumo Energético	5° (5,74%)	5° (4,61%)	6° (3,47%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Conforme apontado anteriormente, apesar de alto consumo energético, o consumo do país foi reduzido em 7,76% entre 1990 e 2010 fazendo com que o país perdesse uma posição no ranking de consumo dos países do G20. Como a grande maioria do G20 aumentou seu consumo, a redução da Alemanha fez com que o consumo relativo comparado aos demais países do grupo fosse reduzido de maneira significativa (redução de 39,45% entre 1990 e 2010), conforme apresentado na Tabela 62.

Tabela 62 - Consumo energético (Alemanha)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
Alemanha (1990)	349,56	5,74%	5°
Alemanha (2000)	333,01	4,61%	5°
Alemanha (2010)	322,42	3,47%	6°
Variação (%)	-7,76%	-39,45%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Além da queda do consumo, houve no país aumento da área de floresta, fazendo com que a absorção relativa ao G20 aumentasse no período analisado. Como resultado das alterações na matriz energética e da redução do consumo, houve redução das emissões de gases de efeito estufa, fazendo com que a relação entre absorção e emissão de gases aumentasse entre 1990 e 2010. Os dados relativos da absorção e emissões de GEE são apresentados na Tabela 63.

Tabela 63 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (Alemanha)

País	Absorção de CO₂ (kt)	Absorção de CO₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Alemanha (1990)	6.727,65	0,3148%	1.214.317,30	5,33%	0,55%
Alemanha (2000)	6.937,48	0,3279%	979.190,47	3,86%	0,71%
Alemanha (2010)	6.937,48	0,3286%	888.081,07	2,85%	0,78%
Variação (%)	3,12%	4,37%	-26,87%	-46,57%	41,00%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Como reflexo do alto padrão de consumo (5° maior consumo energético em 1990), dentre o G20 o país é um dos maiores emissores de GEE, sendo o 5° maior emissor de dióxido de carbono no ano de 1990. No período analisado, no entanto, o país reduziu a participação nas emissões de dióxido de carbono e reduziu a participação nas emissões de metano, tornando-se o 17° país do grupo nas emissões deste tipo de gás. Os demais tipos de gases também tiveram participação reduzida, reflexo das alterações na matriz energética e no consumo. As alterações no consumo (queda), na matriz energética (fontes menos poluentes) e mudanças no uso da terra (aumento da área de floresta) fizeram com que a Alemanha reduzisse as emissões totais de GEE, passando de 5,33% das emissões do G20 em 1990 para 2,85% em 2010. Os dados da posição relativa e participação nas emissões do G20 da Alemanha são apresentados na Tabela 64.

Tabela 64 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Alemanha)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	5° (6,13%)	6° (4,39%)	6° (3,26%)
Metano (CH ₄)	8° (2,69%)	14° (1,82%)	17° (1,13%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	7° (4,26%)	8° (2,95%)	10° (2,25%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	5° (5,06%)	5° (4,12%)	6° (2,99%)
Total GEE	6° (5,33%)	6° (3,86%)	7° (2,85%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Dado o alto consumo energético (5° maior consumidor), o alto índice de emissões (6° maior emissor de GEE) e a grande dependência de combustíveis fósseis em 1990, a análise de eficiência indicou que o país é ineficiente na emissão de gases de efeito estufa. No entanto, a Alemanha é um país que, ainda que ineficiente em todos os períodos analisados, apresentou melhora dos indicadores de desempenho, tanto na análise temporal (em períodos distintos) quanto na análise de dados em painel.

Essa análise indica que, a Alemanha melhorou seu desempenho, reduzindo emissões de gases de efeito estufa, quando comparada aos outros países (DEA Temporal) e também melhorou seu desempenho em relação a ela mesma (DEA Painei) apresentando desempenho superior ao ano base (1990), conforme apresentado na Tabela 65.

Tabela 65 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Alemanha)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Alemanha (1990)	5,80%	5,80%
Alemanha (2000)	12,20%	6,90%
Alemanha (2010)	23,10%	8,60%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

De maneira sintética, com relação ao G20, houve uma queda tanto no consumo energético quanto nas emissões. Em termos relativos, a participação da Alemanha nas emissões de GEE é inferior ao consumo energético em todos os períodos analisados. Houve mudança no uso de terras, com aumento da área de floresta e consequente absorção relativa. Em termos absolutos, houve redução no consumo energético de 7,76% e redução nas emissões de 26,87%. Como pode ser observado, houve uma redução mais intensa de emissões do que de consumo, resultado das alterações na matriz energética, focada principalmente na redução do uso de combustíveis fósseis, em especial redução do uso de carvão, e aumento do uso de fontes de energia limpa.

6.5.2 Itália

A Itália é um dos países analisado que merece grande destaque, tanto pela evolução no *score* de eficiência temporal, quanto pela evolução do *score* de eficiência nos dados em painel. O bom desempenho nos dois *scores* indica que a Itália melhorou se tornou mais eficiente quando comparada com os outros países do G20 (em cada ano – análise temporal) como quando comparada ao próprio desempenho de 1990 (dados em painel). Este resultado é reflexo de uma série de medidas tomadas pelo país, tanto na esfera energética, alterando sua matriz ao longo do tempo, como também na esfera ambiental, aumentando sua área de floresta e consequente absorção. Outro fator que parece ter contribuído para isto foi a redução da participação no consumo energético relativo aos países do G20, sendo que esta última observação pode ser relacionada tanto a fatores endógenos quanto exógenos.

A Itália, assim como a grande maioria dos países, é fortemente dependente de combustíveis fósseis em sua matriz energética, sendo que em 1990 os combustíveis fósseis representavam 94,9% da matriz energética do país. Entre 1990 e 2010 houve uma alteração importante na matriz energética além da redução do consumo de combustíveis fósseis que, em 2010, passou a representar 89,9% da matriz energética, fazendo da Itália o 10º país com maior uso deste tipo de fonte energética dentre os países do G20. No mesmo sentido, o aumento no uso de fontes renováveis fez com que a Itália passasse da 9ª posição para a 5ª posição dentre os países com maior consumo de fontes renováveis de energia (hidrelétricas e outras fontes renováveis). Os dados referentes aos combustíveis fósseis são apresentados na Tabela 66.

Tabela 66 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Itália)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Itália (1990)	94,87%	0,00%	5,13%
Itália (2000)	93,38%	0,00%	6,62%
Itália (2010)	89,95%	0,00%	10,05%
Variação (%)	-5,19%	0,00%	96,12%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ainda que fortemente dependente de combustíveis fósseis, em 1990 a Itália tinha no petróleo sua principal fonte energética (representando 60,5%), seguido de gás natural (25,3%) e carvão (9,1%). Entre 1990 e 2010 a Itália reduziu a participação de carvão em sua matriz energética em quase 10% (fator positivo para redução de GEE), reduziu a participação do petróleo em 30,25% (fator positivo para redução de GEE) e aumentou a participação de gás natural em 56,13%. Com isso, as emissões de gases de efeito estufa, originadas pelos combustíveis fósseis, foram reduzidas no período.

Outro fator importante, relacionado às matrizes energéticas, foi o aumento do uso de energia hidrelétrica e aumento do uso de fontes renováveis. Com isso, a Itália passou a ser o 6º país do G20 com maior uso de energia hidrelétrica em sua matriz energética e o 2º país com maior uso de outras fontes renováveis em sua matriz, atrás apenas da Alemanha neste quesito (Tabela 68). Com o aumento de energia limpa a Itália reduziu sua dependência de combustíveis fósseis, reduzindo ainda mais as emissões de GEE no entre 1990 e 2010. Os dados relativos às fontes energéticas da Itália são apresentados na Tabela 67.

Tabela 67 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Itália)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Itália (1990)	60,5%	25,3%	9,1%	0,0%	4,6%	0,5%	100%
Itália (2000)	53,2%	33,2%	6,9%	0,0%	5,7%	0,9%	100%
Itália (2010)	42,2%	39,5%	8,2%	0,0%	6,7%	3,4%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com relação ao G20 também houve alterações importantes. A participação do consumo de petróleo no grupo foi reduzida de 4,02% para 2,48%, assim como a participação do consumo de carvão (de 0,8% em 1990 para 0,46% em 2010). Neste sentido houve aumento, na participação relativa ao G20, do consumo de outras fontes renováveis (passando de 3,42% para 4,85% no grupo). Estas alterações fizeram que a Itália, em relação ao G20, passasse de 6º maior consumidor de petróleo em 1990, para a 15ª posição em 2010. Com relação ao gás natural, a Itália passa de 7ª maior consumidora em 1990 (em relação ao G20) para 10ª posição em 2010. O carvão, apesar da redução da participação em sua matriz energética, não altera sua posição (14ª maior consumidora em 1990 e 2010). Os dados comparativos com o G20 são apresentados na Tabela 68.

Tabela 68 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Itália)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	6º (4,02%)	9º (3,50%)	15º (2,48%)
Gás Natural	7º (3,03%)	7º (3,59%)	10º (3,32%)
Carvão	14º (0,80%)	16º (0,61%)	14º (0,46%)
Nuclear	19º (0,00%)	19º (0,00%)	19º (0,00%)
Hidrelétricas	9º (2,18%)	9º (2,51%)	10º (2,11%)
Renováveis	6º (3,42%)	6º (4,36%)	7º (4,85%)
Consumo Energético	10º (2,54%)	12º (2,43%)	15º (1,87%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com relação ao consumo, em valores absolutos o país aumentou o consumo energético em 11,96% no período, contudo, em relação ao G20, houve redução no consumo de 26,50% no período. Conforme apresentado anteriormente, a Itália foi um dos países que tiveram menor variação no consumo energético entre 1990 e 2000. Essas alterações fizeram com que a Itália passasse da 10ª posição no ranking de consumo para a 15ª posição no grupo (conforme apresentado na Tabela 69), refletindo nas emissões de GEE e na avaliação do desempenho do país.

Tabela 69 - Consumo energético (Itália)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
Itália (1990)	154,72	2,54%	10°
Itália (2000)	175,71	2,43%	12°
Itália (2010)	173,23	1,87%	15°
Variação (%)	11,96%	-26,50%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Além das alterações na matriz energética, houve mudanças no uso da terra, com aumento da área de floresta, refletindo na absorção de dióxido de carbono pelas florestas. A Itália, dentre os países do G20, foi o segundo país que mais aumentou sua área de floresta (em valores percentuais), atrás apenas da China. Entre 1990 e 2010 houve redução nas emissões do país, refletido nas emissões relativas ao G20. Com isso houve um aumento na relação entre absorção e emissões de gases em 29,64%. Com estas alterações, enquanto o consumo do país aumentou 11,96% (Tabela 69), as emissões foram reduzidas em 7,02% (Tabela 70).

Tabela 70 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (Itália)

País	Absorção de CO₂ (kt)	Absorção de CO₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Itália (1990)	5.005,18	0,2342%	506.754,86	2,22%	0,99%
Itália (2000)	5.518,89	0,2609%	534.201,20	2,11%	1,03%
Itália (2010)	6.033,25	0,2857%	471.194,75	1,51%	1,28%
Variação (%)	20,54%	22,01%	-7,02%	-32,07%	29,64%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Uma importante consequência das alterações na matriz energética e mudança no uso da terra é relacionada com as emissões de gases de efeito estufa. As alterações no país fizeram com que o país caísse da 11ª posição em emissão de GEE do grupo em 1990 para a 17ª posição em 2010, sendo que o dióxido de carbono (gás mais abundante) teve uma queda significativa, reflexo das alterações na matriz energética e reflorestamento. Os dados relativos à posição e participação relativa da Itália nas emissões de GEE são apresentados na Tabela 71.

Tabela 71 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Itália)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	9° (2,57%)	9° (2,36%)	14° (1,70%)
Metano (CH ₄)	17° (1,10%)	18° (1,12%)	19° (0,74%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	15° (1,76%)	16° (1,72%)	18° (1,04%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	13° (1,64%)	10° (1,95%)	9° (1,73%)
Total GEE	11° (2,22%)	11° (2,11%)	17° (1,51%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Com relação ao desempenho, houve aumento de eficiência relativa, tanto na análise temporal quanto nos dados em painel. Na análise temporal a eficiência relativa em 1990 passa de 43,70% para 99,50% em 2010. Nos dados em painel, a eficiência relativa passa de 43,70% para 47,0%. Desta forma, a Itália, juntamente com Alemanha, Reino Unido e Rússia (com algumas ressalvas), apresentou melhoras no *score* de eficiência dos dados em painel, o que indica melhoria de desempenho em relação ao seu próprio desempenho de 1990. Além da alteração na matriz energética, outro fator responsável pela melhoria no desempenho foi a redução no consumo energético em relação ao G20 (tendo reduzido, em 2010, 26,38% em relação à 1990) e o aumento da área de floresta e consequente absorção de GEE. Os dados da análise de eficiência temporal e com dados em painel são apresentados na Tabela 72.

Tabela 72 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Itália)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Itália (1990)	43,70%	43,70%
Itália (2000)	60,60%	42,30%
Itália (2010)	99,50%	47,00%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

De maneira resumida, os fatores responsáveis pelo desempenho da Itália, que apresentou evolução na eficiência relativa tanto na análise temporal quanto nos dados em painel, foram (1) a alteração da matriz energética, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis além de alterar a participação de cada combustível fóssil em sua matriz; (2) o aumento da área de floresta, aumentando a absorção de GEE e (3) a redução do consumo relativo.

6.5.3 Reino Unido

O Reino Unido tem grande dependência de combustíveis fósseis (média de 91,1% no período analisado), complementada pelo uso de energia nuclear, com importantes alterações em sua matriz energética no decorrer do tempo. Uma das alterações é relacionada com a redução do uso de combustíveis fósseis na matriz energética e aumento no uso de recursos renováveis. Os recursos renováveis, com participação muito pequena em 1990, tiveram um crescimento constante nos anos posteriores, fazendo que com o país se tornasse o 8º país com maior uso deste tipo de fonte dentre os países do G20. Os dados referentes à participação dos combustíveis fósseis na matriz energética do Reino Unido são apresentados na Tabela 73.

Tabela 73 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Reino Unido)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Reino Unido (1990)	92,34%	7,05%	0,61%
Reino Unido (2000)	90,40%	8,60%	1,00%
Reino Unido (2010)	90,68%	6,58%	2,74%
Variação (%)	-1,80%	-6,64%	346,85%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Das alterações significativas relacionadas aos combustíveis fósseis, há uma importante redução no uso de carvão (sua participação na matriz energética em 2010 caiu para menos da metade do que era em 1990), redução no uso de petróleo e aumento no uso de gás natural, que quase dobrou no período. Estas alterações, reduzindo as fontes mais poluentes, são potencialmente redutoras de emissões de GEE. Com relação à participação da energia nuclear e das hidrelétricas na matriz energética do Reino Unido, estas fontes sofreram pequenas alterações com tendência de queda enquanto as outras fontes renováveis apresentaram um significativo aumento, conforme apresentado na Tabela 74.

Tabela 74 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Reino Unido)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Reino Unido (1990)	39,2%	22,3%	30,8%	7,0%	0,5%	0,1%	100%
Reino Unido (2000)	35,1%	38,9%	16,4%	8,6%	0,5%	0,5%	100%
Reino Unido (2010)	34,4%	41,8%	14,5%	6,6%	0,4%	2,4%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Quando comparado aos demais países do G20, a participação do consumo relativo do carvão, petróleo, energia nuclear e hidrelétricas também foram reduzidas, enquanto a participação do

gás natural e outras fontes renováveis aumentou, com reflexos importantes na análise de desempenho. Em relação ao grupo, o Reino Unido passou da 8ª posição para a 14ª no consumo do petróleo e da 8ª posição para a 11ª posição no consumo do carvão.

Apesar do aumento significativo da participação do gás natural em sua matriz energética, o país se manteve na 5ª posição no uso desta fonte energética, indicando que o aumento no consumo do país desta fonte seguiu o mesmo padrão dos outros países. Com relação aos outros recursos renováveis, o país teve um importante aumento na participação relativa do consumo destas fontes quando comparado ao G20, sendo que em 1990 o consumo do Reino Unido representava apenas 0,60% do consumo do G20 enquanto em 2010 passou a representar 4,17% do consumo do grupo.

Os dados relativos à posição relativa e participação do Reino Unido no consumo do G20 são apresentados na Tabela 75.

Tabela 75 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Reino Unido)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	8° (3,56%)	13° (2,94%)	14° (2,50%)
Gás Natural	5° (3,66%)	3° (5,37%)	5° (4,33%)
Carvão	8° (3,68%)	10° (1,84%)	11° (1,01%)
Nuclear	7° (4,09%)	7° (3,94%)	9° (2,68%)
Hidrelétricas	18° (0,35%)	16° (0,29%)	18° (0,15%)
Renováveis	11° (0,60%)	9° (2,93%)	8° (4,17%)
Consumo Energético	8° (3,47%)	9° (3,10%)	12° (2,30%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com um consumo energético relativamente alto em 1990, o país teve no período analisado um crescimento no consumo de apenas 1,21%, caindo da 8ª para a 12ª posição na participação do consumo energético dos países do G20. Como resultado disso, o consumo relativo recuou 33,56% no período. O baixo crescimento do consumo energético do Reino Unido ocorreu principalmente entre os anos 2000 e 2010, quando houve uma redução no consumo do país, conforme apresenta a Tabela 76.

Tabela 76 - Consumo energético (Reino Unido)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
Reino Unido (1990)	211,19	3,47%	8°
Reino Unido (2000)	223,96	3,10%	9°
Reino Unido (2010)	213,75	2,30%	12°
Variação (%)	1,21%	-33,56%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Além da redução no consumo, houve mudanças no uso da terra no Reino Unido, com aumento da área de floresta, promovendo consequentemente aumento na absorção de dióxido de carbono pelas florestas. Como resultado da alteração na matriz energética, do baixo crescimento do consumo e do aumento na absorção de CO₂, houve redução nas emissões de gases de efeito estufa no país, refletindo em um aumento na relação entre absorção e emissão. As emissões de GEE caíram 21,72%, ainda o país tenha aumentado o consumo energético (1,21%), sugerindo aumento na eficiência. Os dados relativos à absorção e emissão de gases de efeito estufa são apresentados na Tabela 77.

Tabela 77 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (Reino Unido)

País	Absorção de CO ₂ (kt)	Absorção de CO ₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO ₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Reino Unido (1990)	1.915,14	0,0896%	748.023,10	3,28%	0,26%
Reino Unido (2000)	2.048,63	0,0968%	672.064,29	2,65%	0,30%
Reino Unido (2010)	2.113,18	0,1001%	585.531,56	1,88%	0,36%
Variação (%)	10,34%	11,68%	-21,72%	-42,81%	40,96%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Em todos os gases houve redução na participação do país nas emissões de GEE do G20. Com exceção dos outros gases de efeito estufa (HFC, PFC e SF₆), sempre em menor quantidade que os demais, houve melhoria na posição relativa de todos os GEE. Como pode ser observado na Tabela 78, o dióxido de carbono passou da 7ª para a 10ª posição, devido à alteração na matriz energética do país; o metano passou da 7ª para a 15ª posição, possivelmente devido à redução da participação das hidrelétricas no país e do aumento de área de floresta e do óxido nitroso, referente ao baixo crescimento do consumo energético (relacionado aos processos industriais).

Tabela 78 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Reino Unido)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	7° (3,45%)	7° (2,87%)	10° (2,07%)
Metano (CH ₄)	7° (2,73%)	11° (2,06%)	15° (1,21%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	10° (3,21%)	13° (1,92%)	14° (1,41%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	11° (2,11%)	11° (1,87%)	10° (1,59%)
Total GEE	7° (3,28%)	9° (2,65%)	13° (1,88%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

As mudanças na matriz energética, no consumo e no uso da terra fizeram com que a eficiência do país melhorasse, tanto na análise temporal quanto nos dados em painel. Na análise temporal, houve uma significativa melhora, com a tendência do Reino Unido se tornar eficiente quando comparado à outros países do grupo. Ao analisar a variação dos *scores* de eficiência, o Reino Unido teve a segunda maior variação (atrás apenas da Rússia). Os dados em painel indicam que, quando comparado ao próprio desempenho de 1990, o país melhorou sua eficiência. Isso significa que, ao ser analisado isoladamente com outros países o Reino Unido tende a se tornar eficiente e, ao ser comparado com o próprio desempenho, o Reino Unido tem adotado mudanças que o tornam mais eficiente ao longo do tempo. Os dados relativos à análise de desempenho são apresentados na Tabela 79.

Tabela 79 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Reino Unido)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Reino Unido (1990)	16,90%	16,90%
Reino Unido (2000)	35,80%	20,80%
Reino Unido (2010)	83,70%	26,60%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

De maneira sintética, o consumo energético do país apresentou um discreto aumento (1,21%), contudo comparado ao G20, houve redução na participação do consumo do G20. Ainda que o Reino Unido tenha tido um aumento do consumo, as emissões de GEE caíram 21,72%, causadas pela alteração na matriz energética e pelas mudanças no uso da terra, que gerou um aumento de absorção de CO₂. Com isso, houve um aumento na relação entre absorção e emissão, indicando que o Reino Unido consegue absorver cada vez mais CO₂ em relação aos gases que emite. Desta forma o país melhorou o desempenho quando comparado aos demais países e a ele mesmo.

6.5.4 Rússia

A Rússia é um país com alto consumo energético, alta dependência de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, um dos países com maior emissão de GEE no G20. Baseado principalmente no consumo de gás natural, a Rússia tem reduzido sua participação no consumo de combustíveis fósseis, em especial com a redução do uso de carvão e do petróleo. Com isso, o país passou da 9ª para a 11ª posição no consumo de combustíveis fósseis no G20, reduzindo suas emissões de gases de efeito estufa. Além da redução de carvão e petróleo (fontes mais poluentes), a Rússia aumentou o uso de energia nuclear e hidrelétricas que também emitem menos gases de efeito estufa permitindo melhora no desempenho. Os dados relativos à participação de combustíveis fósseis na matriz energética do país são apresentados na Tabela 80.

Tabela 80 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Rússia)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Rússia (1990)	92,53%	3,10%	4,37%
Rússia (2000)	89,19%	4,77%	6,04%
Rússia (2010)	88,61%	5,72%	5,67%
Variação (%)	-4,24%	84,56%	29,68%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ao analisar a participação de cada fonte na matriz energética do país (Tabela 81) observa-se uma importante redução no uso do petróleo e do carvão, dando lugar principalmente ao gás natural (menos poluente dentre os combustíveis fósseis). Além disto, o país aumentou a participação da energia nuclear (fazendo com que o país se tornasse o 4º maior consumidor no G20 desta fonte) e das hidrelétricas em sua matriz. Os outros recursos renováveis são pouco representativos quando comparados com as outras fontes energéticas do país. Os dados da participação das fontes na matriz energética da Rússia são apresentados na Tabela 81.

Tabela 81 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Rússia)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Rússia (1990)	29,1%	42,5%	20,9%	3,1%	4,4%	0,0%	100%
Rússia (2000)	19,8%	52,4%	17,0%	4,8%	6,0%	0,0%	100%
Rússia (2010)	19,9%	55,3%	13,4%	5,7%	5,7%	0,0%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Quando comparado aos demais países do G20, a Rússia tem queda na participação do consumo de quase todas as fontes energéticas, com exceção da energia nuclear (que permanece praticamente constante) e dos recursos renováveis (em que ocorre oscilação). Um importante destaque é que, ainda que o país tenha aumentado a participação de gás natural em sua matriz energética, em comparação com os demais países do grupo, houve redução da participação no consumo de gás natural no G20 (em que a Rússia representava 28,47% do consumo em 1990 passando a representar 18,06% em 2010), o que sugere que outros países passaram a investir proporcionalmente mais no uso desta fonte energética (menos poluente dentre os combustíveis fósseis). Ainda assim o país se manteve na segunda posição dentre os países que mais consomem gás natural no G20, atrás apenas para os Estados Unidos. Os dados relativos à posição relativa e participação no consumo do G20 são apresentados na Tabela 82.

Tabela 82 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Rússia)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	2° (10,82%)	5° (4,60%)	5° (4,56%)
Gás Natural	2° (28,47%)	2° (19,97%)	2° (18,06%)
Carvão	3° (10,25%)	4° (5,27%)	5° (2,93%)
Nuclear	5° (7,36%)	5° (6,04%)	4° (7,35%)
Hidrelétricas	4° (11,49%)	5° (9,39%)	5° (6,95%)
Renováveis	15° (0,06%)	18° (0,05%)	17° (0,10%)
Consumo Energético	2° (14,17%)	3° (8,58%)	3° (7,26%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Perdendo apenas para a China e os Estados Unidos, a Rússia é um dos países com maior consumo energético do G20. Seu consumo energético, no entanto, caiu 21,96% entre 1990 e 2010, fazendo com que seu consumo relativo ao G20 caísse de maneira ainda mais acentuada. O país, 2° maior consumidor em 1990 (atrás apenas dos Estados Unidos), perdeu a posição para a China nos anos de 2000 e 2010.

A Rússia, juntamente com a Alemanha, apresentou redução no consumo energético no período analisado. Os dados relativos ao consumo energético da Rússia são apresentados na Tabela 83.

Tabela 83 - Consumo energético (Rússia)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
Rússia (1990)	863,76	14,17%	2º
Rússia (2000)	619,42	8,58%	3º
Rússia (2010)	674,04	7,26%	3º
Variação (%)	-21,96%	-48,77%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Além das alterações da matriz energética e da redução no consumo energético, outro fator que contribuiu para o desempenho do país, ainda que de maneira discreta, foi a mudança no uso da terra. No período analisado houve um pequeno aumento na área de floresta, que refletiu em um aumento na absorção de dióxido de carbono. A Rússia é o país com maior área de floresta do G20, representando um enorme potencial de absorção de dióxido de carbono.

Como reflexo destas mudanças na Rússia, as emissões de GEE no país reduziram 28,27% no período analisado, fazendo com que a relação entre absorção e emissão tivessem um aumento entre 1990 e 2010. Enquanto o consumo energético do país caiu 21,96% (Tabela 83), as emissões de GEE caíram de maneira mais acentuada (queda de 28,27% - Tabela 84). Os dados relativos à absorção e emissões de GEE são apresentados na Tabela 84.

Tabela 84 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (Rússia)

País	Absorção de CO ₂ (kt)	Absorção de CO ₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO ₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Rússia (1990)	852.350,68	39,8816%	3.125.637,50	13,71%	27,27%
Rússia (2000)	852.686,27	40,3083%	2.167.578,37	8,55%	39,34%
Rússia (2010)	852.498,19	40,3741%	2.242.024,91	7,19%	38,02%
Variação (%)	0,02%	1,23%	-28,27%	-47,60%	39,44%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Como reflexo ao alto consumo energético, o país é um dos maiores emissores de gases de efeito estufa do G20, perdendo apenas para a China, Estados Unidos e Índia no ano de 2010. Em todos os gases analisados (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e outros gases) a Rússia tem alta participação, reflexo do tamanho de sua economia e de seu padrão de consumo. Sua participação nas emissões do grupo, no entanto, tem reduzido no período, tendo sido a Rússia responsável por 13,71% das emissões totais de GEE em 1990 e, no ano de 2010, responsável por 7,19% das emissões conforme apresenta a Tabela 85. No caso do dióxido de

carbono, o país reduziu sua participação no consumo para menos da metade de 1990. Essa redução na participação das emissões é atribuída à redução nas emissões da Rússia e no aumento relativo das emissões da China.

Tabela 85 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Rússia)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	3° (14,06%)	3° (8,22%)	4° (6,77%)
Metano (CH ₄)	3° (14,55%)	4° (11,15%)	3° (10,58%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	5° (8,78%)	5° (5,25%)	6° (3,38%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	3° (10,40%)	3° (11,29%)	4° (7,05%)
Total GEE	3° (13,71%)	3° (8,55%)	4° (7,19%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Com relação à eficiência, a Rússia melhorou seu desempenho tanto na análise em períodos isolados (análise temporal) quando pela análise por dados em painel. Isso indica que, ainda que ineficiente, o país melhorou sua eficiência relativa ao longo dos anos quando comparado com outros países do grupo e também indica que melhorou sua eficiência quando comparado ao seu próprio desempenho no ano de 1990. Os dados da análise de eficiência temporal e com dados em painel são apresentados na Tabela 86.

Tabela 86 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Rússia)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Rússia (1990)	1,90%	1,90%
Rússia (2000)	14,20%	5,80%
Rússia (2010)	17,00%	2,50%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

De maneira resumida, o desempenho da Rússia é explicado pela redução do consumo energético e respectivas emissões, sendo que a redução das emissões ocorreu de maneira mais intensa. As alterações na matriz energética permitiram que o país reduzisse o uso de fontes mais poluidoras por fontes mais limpas, reduzindo as emissões. No período analisado houve um discreto aumento na área de floresta, que refletiu na absorção de GEE do país.

6.6 Países sempre ineficientes (com tendência de melhora na eficiência relativa)

Dentre o grupo de países ineficientes há um grupo de países que apresentaram tendência de melhora na eficiência relativa. Estes países, diferentemente do grupo anterior, apresentaram variações mais discretas entre os *scores* de eficiência e por isso são considerados países com tendência de melhora de desempenho. Os países que fazem parte deste grupo são a França, Canadá, Estados Unidos, Japão e México.

6.6.1 França

A França é um país com baixa dependência de combustíveis fósseis que, a partir de 2000, passou a ser o país com menor dependência deste tipo de fonte energética dentre os países do G20. Em 1990 o país tinha 61,8% de combustíveis fósseis em sua matriz energética, concentrados principalmente em petróleo e energia nuclear. Entre 1990 e 2010 houve redução da participação de combustíveis fósseis (de 61,83% para 54,7%) na matriz energética do país, aumento da participação de energia nuclear (de 32,43% para 38,3%) e aumento da participação de outras fontes renováveis (de 5,74% para 7,01%). Os dados da participação dos combustíveis fósseis, nuclear e renováveis são apresentados na Tabela 87.

Tabela 87 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (França)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
França (1990)	61,83%	32,43%	5,74%
França (2000)	56,79%	36,91%	6,30%
França (2010)	54,70%	38,29%	7,01%
Variação (%)	-11,54%	18,10%	22,08%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com relação à matriz energética do país, houve redução na participação do petróleo e do carvão, com aumento de gás natural (combustíveis fósseis), fazendo com que fossem trocadas fontes de energia altamente poluentes por uma fonte menos poluente. O aumento da participação de outras fontes renováveis ajudou no processo de redução de emissões. Apesar dos possíveis problemas com uso de energia nuclear, a França faz uso intenso desta tecnologia, sendo a energia nuclear muito importante na composição da matriz energética do país. Dentre os países do G20 a França é o segundo país com maior consumo de energia

nuclear, estando atrás apenas dos Estados Unidos. Os dados da participação de cada fonte energética são disponíveis na Tabela 88.

Tabela 88 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (França)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
França (1990)	40,8%	12,0%	9,0%	32,4%	5,6%	0,2%	100%
França (2000)	37,3%	13,9%	5,7%	36,9%	6,0%	0,3%	100%
França (2010)	33,4%	16,9%	4,5%	38,3%	5,7%	1,4%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Em relação ao G20, o país apresenta uma importante redução na participação do consumo de petróleo e de carvão do grupo, com aumento da participação de outros recursos renováveis. Essa mudança fez com que o país se tornasse um dos países que menos consome carvão (fonte energética mais poluente) do G20, ficando com a 16ª posição entre os consumidores de carvão, à frente apenas do México, Irã, Argentina e Arábia Saudita. Além disto, o país passou a ser o 13º país com maior consumo de petróleo.

A Tabela 89 apresenta a participação no consumo energético da França, relativo ao G20. Em relação ao consumo total, a França reduziu sua participação no consumo energético do G20. Em 1990 a França era o 7º país com maior consumo energético dentre os países do G20, tendo reduzido sua participação no consumo do grupo, sendo ultrapassada pelos países Índia, Brasil e Coreia do Sul. Esta alteração, somada às alterações na matriz energética, tende a proporcionar melhora de eficiência na França.

Tabela 89 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (França)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	7º (3,84%)	8º (3,55%)	13º (2,87%)
Gás Natural	9º (2,05%)	11º (2,17%)	13º (2,07%)
Carvão	12º (1,12%)	13º (0,72%)	16º (0,37%)
Nuclear	2º (19,55%)	2º (19,21%)	2º (18,47%)
Hidrelétricas	8º (3,71%)	8º (3,85%)	8º (2,61%)
Renováveis	7º (1,77%)	12º (1,86%)	10º (2,84%)
Consumo Energético	7º (3,60%)	8º (3,53%)	10º (2,73%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Entre 1990 e 2010 a França aumentou o consumo energético em 15,45% contudo, quando comparado aos demais países do G20, o país teve uma redução no consumo relativo de

24,21%. Como resultado, o país que era o 7º maior consumidor energético do grupo em 1990 passou a ser o 10º consumidor em 2010. A França foi um dos países com menor crescimento do consumo energético entre os países do G20, com consumo superior apenas à Itália, Reino Unido, Alemanha e Rússia. Os dados do consumo energético da França são apresentados na Tabela 90.

Tabela 90 - Consumo energético (França)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
França (1990)	219,21	3,60%	7º
França (2000)	254,58	3,53%	8º
França (2010)	253,08	2,73%	10º
Variação (%)	15,45%	-24,21%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Outro importante fato referente à França é relacionado às mudanças no uso da terra, em que o país aumentou a área de floresta, refletindo em uma absorção maior de dióxido de carbono pelas florestas do país. Com a redução do consumo e aumento da área de floresta houve redução de 9,55% nas emissões de GEE entre 1990 e 2010 e consequente redução na participação das emissões do G20. Como resultado, a relação entre absorção e emissões apresentou um aumento de 21,33% conforme apresentado na Tabela 91.

Tabela 91 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (França)

País	Absorção de CO₂ (kt)	Absorção de CO₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
França (1990)	12.701,21	0,5943%	554.897,27	2,43%	2,29%
França (2000)	13.414,16	0,6341%	516.193,56	2,04%	2,60%
França (2010)	13.939,26	0,6602%	501.909,74	1,61%	2,78%
Variação (%)	9,75%	11,08%	-9,55%	-33,92%	21,33%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Como consequência destas alterações, o país passou a ocupar a 16ª posição entre os países emissores de gases de efeito estufa no G20, reduzindo a participação nas emissões de todos os gases. Um importante destaque é o dióxido de carbono que teve uma importante redução na participação das emissões no grupo, reflexo das alterações na matriz energética, fazendo com que o país ocupasse apenas a 17ª posição na emissão deste tipo de gás em 2010. Os dados da posição relativa e participação nas emissões de GEE da França são apresentados na Tabela 92.

Tabela 92 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (França)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	10° (2,41%)	14° (1,93%)	17° (1,53%)
Metano (CH ₄)	13° (1,76%)	12° (2,05%)	12° (1,66%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	8° (4,11%)	9° (2,93%)	11° (2,05%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	8° (3,82%)	9° (2,89%)	8° (2,41%)
Total GEE	10° (2,43%)	14° (2,04%)	16° (1,61%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

A análise em períodos distintos (DEA Temporal) indica melhora no desempenho, com um aumento importante nos *scores* entre 1990 e 2010. Essa primeira análise indica que o país, ao ser analisado em períodos isolados, tem aumentado sua eficiência relativa em direção à 100% de eficiência. Os dados em painel, contudo, indicam queda de eficiência quando o país é comparado com seu próprio desempenho no ano base. Isso significa que o país, em relação dos demais países do G20 tem se tornado eficiente, no entanto, quando comparado ao seu próprio desempenho de 1990, o país tem uma discreta queda de eficiência. Os dados são apresentados na Tabela 93.

Tabela 93 - Eficiência Temporal e com dados em painel (França)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
França (1990)	17,10%	17,10%
França (2000)	36,10%	17,40%
França (2010)	51,30%	16,60%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

De maneira resumida, com relação ao consumo energético, a França teve um aumento de 15,45% no consumo e redução de 9,55% nas emissões. Além disso o país aumentou a área de floresta, o que fez com que a absorção de CO₂ também tivesse um aumento. Ainda que ineficiente, as alterações na matriz energética e os ganhos com absorção de CO₂ fazem com que o país se mova em direção à eficiência energética na emissão de GEE.

6.6.2 Canadá

O Canadá é um dos países com menor dependência de combustíveis fósseis, atrás apenas do Brasil (que tem grande consumo de energia hidrelétrica) e da França (que tem grande consumo de energia nuclear). Em 1990 o Canadá era o 6º maior consumidor de energia do G20, caindo uma posição em 2010. Sua matriz energética é composta por 67,0% (média dos três anos) de combustíveis fósseis, com importante participação de energia hidrelétrica e complementada em menor escala pela energia nuclear. Os demais recursos renováveis são utilizados em menor escala como apresentado na Tabela 94.

Tabela 94 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Canadá)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Canadá (1990)	66,49%	6,52%	26,99%
Canadá (2000)	67,28%	5,40%	27,32%
Canadá (2010)	67,12%	6,43%	26,45%
Variação (%)	0,95%	-1,36%	-2,02%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ao analisar a matriz energética do país observa-se que a participação do petróleo teve pequena alteração, oscilando entre 1990 e 2010. Da mesma forma, a energia nuclear e as hidrelétricas também oscilaram com alterações pequenas no período analisado. As alterações mais importantes na matriz energética do Canadá são relativas ao carvão, gás natural e outras fontes renováveis. A participação do carvão na matriz foi reduzida enquanto o gás natural e outros recursos renováveis tiveram um aumento no período, sugerindo redução nas emissões de GEE. Os dados da participação de cada fonte na matriz energética do Canadá são apresentados na Tabela 95.

Tabela 95 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Canadá)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Canadá (1990)	31,7%	24,0%	10,8%	6,5%	26,6%	0,4%	100%
Canadá (2000)	29,7%	27,5%	10,0%	5,4%	26,7%	0,7%	100%
Canadá (2010)	32,1%	27,1%	7,9%	6,4%	25,2%	1,3%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Em relação ao G20, há redução da participação no consumo de carvão e de gás natural, mantendo-se relativamente estável o consumo de petróleo. Como o país aumentou o uso de gás em sua matriz energética, essa análise relativa ao G20 indica que, em comparação aos

demais países do G20, o aumento de gás natural feito pelo Canadá em sua matriz energética foi inferior ao aumento de outros países, fazendo com que o país passasse a ocupar a 6ª colocação no consumo desta fonte energética fóssil menos poluente.

Além da redução do consumo relativo do gás natural (menos poluente), outro ponto negativo observado é com relação às demais fontes de energia, menos poluentes, em que também houve redução quando comparada ao G20. Assim, apesar do Canadá aumentar o uso de alguns recursos renováveis e fontes de energia limpas, outros países aumentaram este uso de maneira mais intensa. Os dados da posição relativo e participação do Canadá no consumo do G20 são apresentados na Tabela 96.

Tabela 96 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Canadá)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	9° (3,43%)	11° (3,37%)	10° (3,44%)
Gás Natural	3° (4,68%)	4° (5,14%)	6° (4,14%)
Carvão	10° (1,54%)	11° (1,52%)	13° (0,81%)
Nuclear	6° (4,51%)	8° (3,34%)	7° (3,87%)
Hidrelétricas	2° (20,36%)	1° (20,26%)	3° (14,49%)
Renováveis	5° (4,20%)	5° (5,44%)	9° (3,37%)
Consumo Energético	6° (4,13%)	6° (4,20%)	7° (3,40%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

O Canadá é um dos países com maior consumo energético dentre os países do G20, ocupando a 6ª posição em 1990. No período analisado houve aumento de 25,51% no consumo energético do Canadá, abaixo da média de crescimento do consumo do grupo. Como consequência, houve uma queda de 17,61% do consumo relativo, fazendo com que o país caísse uma posição na participação do consumo do G20 conforme apresentado na Tabela 97.

Tabela 97 - Consumo energético (Canadá)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
Canadá (1990)	251,47	4,13%	6°
Canadá (2000)	302,95	4,20%	6°
Canadá (2010)	315,61	3,40%	7°
Variação (%)	25,51%	-17,61%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

No Canadá, assim como na África, Arábia Saudita e Irã, não houve alterações na área de floresta que pudessem influenciar a absorção de CO₂. Ainda assim, em comparação ao G20, o país teve um pequeno aumento nas absorções do Canadá uma vez que houve uma redução na área de floresta do G20 entre 1990 e 2010. Como consequência do aumento do consumo energético (25,51%), as emissões também aumentaram no período (21,01%). Comparativamente ao G20 as emissões de GEE caíram 11,60% sugerindo que o aumento das emissões do Canadá foram inferiores à media de emissões do grupo. Os dados relativos à absorção e emissão de GEE são apresentados na Tabela 98.

Tabela 98 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (Canadá)

País	Absorção de CO₂ (kt)	Absorção de CO₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Canadá (1990)	316.510,07	14,8096%	581.747,28	2,55%	54,41%
Canadá (2000)	316.510,07	14,9621%	693.996,89	2,74%	45,61%
Canadá (2010)	316.510,07	14,9898%	703.965,54	2,26%	44,96%
Variação (%)	0,00%	1,22%	21,01%	-11,60%	-17,36%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Apesar do grande consumo energético, o país apresenta participação mediana nas emissões de gases de efeito estufa, ocupando entre a 8ª e a 9ª posição na participação de emissões de GEE dentre os países do G20. Dentre os gases de efeito estufa emitidos pelo Canadá, são destaques o dióxido de carbono, que se manteve na 8ª posição dentre os países do grupo, e os outros gases de efeito estufa (HFC, PFC e SF₆) que têm alta participação nas emissões do G20, conforme apresentado pela Tabela 99.

Tabela 99 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Canadá)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	8° (2,72%)	8° (2,82%)	8° (2,30%)
Metano (CH ₄)	12° (1,77%)	9° (2,40%)	10° (2,07%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	11° (2,48%)	12° (2,30%)	13° (1,75%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	4° (5,24%)	6° (4,06%)	5° (3,32%)
Total GEE	9° (2,55%)	8° (2,74%)	9° (2,26%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Com relação ao desempenho, apesar de ser ineficiente em todos os períodos analisados, o Canadá apresentou melhoria de eficiência na análise em períodos isolados (DEA Temporal),

ou seja, melhoria em relação ao desempenho comparado em relação aos demais países do G20 em períodos isolados. Na análise em dados em painel, houve redução da eficiência no período analisado indicando que, quando comparado ao seu próprio desempenho em 1990, o país perdeu eficiência relativa. A ausência de mudanças no uso da terra, juntamente com as discretas mudanças na matriz energética, fez com que o desempenho do país melhorasse de maneira menos acentuada. Os dados relativos ao desempenho temporal e com dados em painel são apresentados na Tabela 100.

Tabela 100 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Canadá)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Canadá (1990)	21,80%	21,80%
Canadá (2000)	20,80%	13,40%
Canadá (2010)	32,00%	11,70%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

De maneira resumida, o desempenho do Canadá pode ser explicado pelas alterações na matriz energética, pelo consumo e pelas mudanças no uso da terra. Em termos absolutos, houve aumento no consumo energético e nas emissões, sendo que o aumento das emissões de gases (21,01%) foi relativamente menor que o aumento do consumo (25,51%). Ao avaliar o consumo energético, o Canadá apresentou uma redução em comparação ao G20, contudo a redução das emissões não ocorreu no mesmo ritmo. Também não houve aumento na área de floresta, o que fez com que a absorção de CO₂ permanecesse praticamente constante no período.

6.6.3 Estados Unidos

Os Estados Unidos, nos anos de 1990 e 2000 foram os maiores consumidores de energia e maiores emissores de GEE, tendo perdido o primeiro posto, tanto em consumo quanto em emissão de gases, para a China. Os dados de 2010 apontam uma redução na participação do consumo e emissões do país no G20, reflexo do crescimento chinês e da alteração na sua matriz energética. Apesar de grande dependência de combustíveis fósseis (média de 88,3% no período), o país ocupa apenas a 13ª posição no consumo deste tipo de fonte energética dentre os países do G20 com pequena redução no consumo desta fonte. Há também um aumento no

consumo de energia nuclear em sua matriz energética. A Tabela 101 apresenta os dados relativos aos combustíveis fósseis, energia nuclear e renováveis.

Tabela 101 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Estados Unidos)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Estados Unidos (1990)	88,89%	6,98%	4,13%
Estados Unidos (2000)	88,75%	7,76%	3,49%
Estados Unidos (2010)	87,26%	8,43%	4,31%
Variação (%)	-1,83%	20,71%	4,32%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ainda com relação aos combustíveis fósseis, os Estados Unidos têm reduzido a participação das fontes de energia mais poluentes (carvão e petróleo), compensando com outras fontes menos poluentes como gás natural, energia nuclear e outras fontes renováveis. Além do carvão e petróleo, outra fonte que também perdeu importância na matriz energética dos Estados Unidos foi a energia hidrelétrica, que caiu no período analisado conforme apresentado na Tabela 102.

Tabela 102 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Estados Unidos)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Estados Unidos (1990)	39,2%	25,1%	24,5%	7,0%	3,4%	0,7%	100%
Estados Unidos (2000)	38,2%	25,9%	24,6%	7,8%	2,7%	0,8%	100%
Estados Unidos (2010)	37,1%	27,1%	23,0%	8,4%	2,6%	1,7%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Quando comparado ao G20, percebe-se que há uma redução na participação relativa de todas as fontes de energia (Tabela 103). Ainda assim, os Estados Unidos continuam sendo o país com maior consumo de petróleo, gás natural, energia nuclear e outros renováveis do G20, o segundo maior consumidor de carvão do grupo (atrás apenas da China) e vêm perdendo participação nas hidrelétricas, sendo o país com maior participação de energia hidrelétrica em 1990 e o quarto em 2010.

A Tabela 103 apresenta os dados da posição relativa dos Estados Unidos e sua participação no consumo do G20.

Tabela 103 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Estados Unidos)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	1° (33,19%)	1° (33,09%)	1° (28,79%)
Gás Natural	1° (38,34%)	1° (36,96%)	1° (30,00%)
Carvão	2° (27,40%)	2° (28,51%)	2° (17,00%)
Nuclear	1° (37,79%)	1° (36,71%)	1° (36,62%)
Hidrelétricas	1° (20,36%)	3° (15,80%)	4° (10,85%)
Renováveis	1° (63,73%)	1° (47,43%)	1° (32,23%)
Consumo Energético	1° (32,30%)	1° (32,06%)	2° (24,58%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com o maior consumo energético em 1990, o país ainda aumentou seu consumo em 15,89% no período analisado, abaixo da média do crescimento de consumo do grupo. Assim, quando comparado com o G20, a participação no consumo relativo dos Estados Unidos no grupo caiu 23,92% entre 1990 e 2010, em grande parte pelo crescimento chinês. Como observado em outros países analisados, a queda no consumo relativo é um importante fator que determina o desempenho do país. Os dados do consumo energético dos Estados Unidos são apresentados na Tabela 104.

Tabela 104 - Consumo energético (Estados Unidos)

País	Consumo Energético (milhões ton óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
Estados Unidos (1990)	1.968,39	32,30%	1°
Estados Unidos (2000)	2.313,71	32,06%	1°
Estados Unidos (2010)	2.281,20	24,58%	2°
Variação (%)	15,89%	-23,92%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

As mudanças no uso da terra nos Estados Unidos permitiram ao país ganho de eficiência. Com a 4ª maior área de floresta dentre os países do G20, os Estados Unidos aumentaram em 2,59% sua área de floresta, fazendo com que houvesse aumento na absorção de dióxido de carbono no país. Considerando que a área de floresta dos países do G20 foi reduzida entre 1990 e 2010, a absorção relativa dos Estados Unidos aumentou 3,84%. Como consequência do aumento do consumo energético, no período analisado houve aumento das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, em relação aos demais países do G20 houve redução da participação norte-americana nas emissões de GEE no grupo conforme apresentado na Tabela 105.

Uma importante comparação é relativa ao consumo e emissões de GEE. Enquanto o consumo energético aumentou 15,89% (Tabela 104), as emissões aumentaram 10,63% (Tabela 105), indicando ganho de eficiência.

Tabela 105 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (Estados Unidos)

País	Absorção de CO ₂ (kt)	Absorção de CO ₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO ₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Estados Unidos (1990)	194.514,05	9,1013%	5.918.582,51	25,96%	3,29%
Estados Unidos (2000)	197.047,75	9,3149%	6.767.265,12	26,69%	2,91%
Estados Unidos (2010)	199.559,79	9,4511%	6.547.785,21	20,99%	3,05%
Variação (%)	2,59%	3,84%	10,63%	-19,18%	-7,26%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Sendo o país com maior consumo energético (entre 1990 e 2000) e o segundo maior consumidor em 2010, o país também tem destaque nas emissões de gases de efeito estufa. O país perdeu a posição de maior emissor de dióxido de carbono para a China em 2010, devido tanto ao crescimento chinês quanto às alterações na matriz energética do país (redução no consumo de fontes mais poluentes e aumento no uso de fontes mais limpas). Outro importante destaque é relacionado ao gás metano, em que o país reduziu a participação nas emissões do G20, ficando na 4ª posição em 2010 (atrás da China, Índia e Rússia). Esta alteração é devida, dentre outros fatores, à redução da participação das hidrelétricas nos Estados Unidos e do aumento relativo dos outros países no uso desta fonte. Com estas alterações, em especial no dióxido de carbono e metano, o país passou a ser o segundo maior emissor de GEE no G20. Os dados da posição relativa e emissões dos Estados Unidos são apresentados na Tabela 106.

Tabela 106 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Estados Unidos)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1° (29,51%)	1° (30,15%)	2° (22,97%)
Metano (CH ₄)	2° (14,80%)	3° (13,26%)	4° (10,40%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	2° (18,13%)	2° (18,38%)	2° (16,13%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	1° (37,18%)	1° (38,60%)	1° (39,0%)
Total GEE	1° (25,96%)	1° (26,69%)	2° (20,99%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Ainda que ineficiente em todo período, a avaliação de desempenho indica que houve melhora na eficiência energética na análise temporal (períodos isolados), mas houve queda de eficiência nos dados em painel. Isso indica que, comparativamente à outros países o país

melhorou sua eficiência, causado pela alteração na matriz energética (em especial redução na participação do consumo de carvão do G20 e aumento de consumo de fontes de energia mais limpas) e nas mudanças no uso da terra. A análise por dados em painel sugere que, em comparação ao seu próprio desempenho em 1990, o país piorou ao longo do tempo. Os dados da análise de eficiência são apresentados na Tabela 107.

Tabela 107 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Estados Unidos)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Estados Unidos (1990)	0,20%	0,20%
Estados Unidos (2000)	0,20%	0,10%
Estados Unidos (2010)	0,40%	0,10%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

De maneira resumida, o desempenho dos Estados Unidos pode ser explicado por vários fatores. Em relação ao G20, há uma redução na participação no consumo e na emissão de gases. A área de floresta teve uma alteração positiva, refletindo na absorção de CO₂. Em valores absolutos, houve um aumento do consumo energético de 15,89% no período enquanto as emissões de GEE aumentaram proporcionalmente menos (10,63%). Como o país era em 1990 o maior consumidor energético e, conseqüentemente o maior emissor de GEE, o país apresentou no ano base o pior *score* de desempenho entre os países do grupo. Assim, ainda que o país tenha se tornado mais eficiente (análise temporal), ainda é um dos piores países avaliados.

6.6.4 Japão

O Japão é um país com alto consumo energético dentre os países do G20, estando atrás dos Estados Unidos, China e Rússia em 1990 e 2000 e perdendo a 4ª posição para a Índia em 2010. Apesar da alta dependência de combustíveis fósseis (consumo médio no período de 82,6%), o país ocupa apenas a 17ª posição no consumo deste tipo de fonte energética e tem como principais recursos o petróleo e carvão, totalizando em todo o período mais de 62,5% de sua matriz energética. Com relação aos combustíveis fósseis, há uma redução no consumo de petróleo e aumento do consumo de carvão e gás natural. Essa combinação nos combustíveis fósseis pode anular os efeitos da redução de emissões no meio ambiente. Também há aumento no consumo de energia nuclear e de outras fontes renováveis. Os dados da participação dos

combustíveis fósseis e outros tipos de combustíveis na matriz energética do Japão são apresentados na Tabela 108.

Tabela 108 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Japão)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Japão (1990)	84,61%	10,20%	5,19%
Japão (2000)	81,64%	13,96%	4,40%
Japão (2010)	81,47%	13,06%	5,47%
Variação (%)	-3,71%	27,97%	5,51%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ao analisar a matriz energética do Japão, é possível observar uma importante redução da participação do petróleo em sua fonte energética, compensada principalmente pelo aumento no consumo do gás natural e do carvão, além do aumento na participação do consumo de energia nuclear e outras fontes renováveis. Tanto a redução do consumo de petróleo quanto o aumento do consumo de gás natural e outras fontes renováveis são redutores de emissões de GEE, contudo o aumento no consumo do carvão pode anular um pouco os efeitos desta possível redução de emissões. Os dados da participação de cada fonte energética no Japão são apresentados na Tabela 109.

Tabela 109 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Japão)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Japão (1990)	57,1%	10,0%	17,5%	10,2%	4,6%	0,6%	100%
Japão (2000)	50,0%	12,6%	19,1%	14,0%	3,6%	0,8%	100%
Japão (2010)	40,3%	16,8%	24,4%	13,1%	4,1%	1,4%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ao analisar o consumo relativo (participação do país no consumo do G20), o país apresentou resultados importantes. Em relação ao G20, houve queda na participação do Japão no consumo de petróleo e carvão (fontes mais poluentes) do grupo, além da queda na participação do país no consumo de energia hidrelétrica e outras fontes renováveis. Ainda que o país tenha tido uma queda no consumo relativo do carvão, o país passou do posto de 6º maior consumidor do G20 para a 4ª posição. No mesmo analisado período houve aumento na participação do Japão no consumo de gás natural (menos poluente dentre os combustíveis fósseis) quando comparado com os demais países do grupo conforme apresentado na Tabela 110.

Tabela 110 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Japão)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	3° (10,66%)	2° (9,70%)	3° (6,93%)
Gás Natural	6° (3,36%)	6° (4,01%)	7° (4,12%)
Carvão	6° (4,31%)	5° (4,95%)	4° (4,01%)
Nuclear	3° (12,18%)	3° (14,79%)	3° (12,60%)
Hidrelétricas	6° (6,01%)	6° (4,64%)	7° (3,75%)
Renováveis	2° (12,18%)	2° (11,50%)	6° (5,94%)
Consumo Energético	4° (7,12%)	4° (7,18%)	5° (5,46%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com grande consumo energético (5° país com maior consumo do G20 em 2010), o Japão teve um crescimento de 16,72% no consumo entre 1990 e 2010. Seu consumo relativo, no entanto, caiu 23,38%, uma vez que em relação ao G20 o aumento do consumo japonês foi inferior à média de aumento do consumo do grupo. Uma importante comparação é feita entre o consumo e as emissões. O país aumentou seu consumo em 16,72% enquanto suas emissões aumentaram em 4,39% (Tabela 112), indicando um aumento de eficiência. Os dados do consumo energético do Japão são apresentados na Tabela 111.

Tabela 111 - Consumo energético (Japão)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
Japão (1990)	434,13	7,12%	4°
Japão (2000)	518,22	7,18%	4°
Japão (2010)	506,72	5,46%	5°
Variação (%)	16,72%	-23,38%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

As emissões de gases de efeito estufa no país aumentaram 4,39%, abaixo da média de crescimento de emissões dos países do G20. Assim, quando comparado ao grupo, as emissões relativas de GEE do Japão reduziram 23,74%. A absorção de dióxido de carbono das florestas teve um pequeno crescimento, reflexo do aumento de área de floresta no país. Como houve redução da área de floresta nos países do G20 entre 1990 e 2010, a absorção relativa de dióxido de carbono feita pelo Japão aumentou 1,33% no período conforme apontado na Tabela 112.

Tabela 112 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (Japão)

País	Absorção de CO ₂ (kt)	Absorção de CO ₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO ₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Japão (1990)	17.547,12	0,8210%	1.226.015,00	5,38%	1,43%
Japão (2000)	17.495,08	0,8270%	1.349.398,26	5,32%	1,30%
Japão (2010)	17.567,52	0,8320%	1.279.869,80	4,10%	1,37%
Variação (%)	0,12%	1,33%	4,39%	-23,74%	-4,10%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Com relação às emissões de GEE, o país é um dos países com maior emissão de gases de efeito estufa do G20, ocupando a 5ª posição no grupo. Merecem destaque no país as emissões de dióxido de carbono e dos outros gases de efeito estufa (HFC, PFC e SF₆), com grande participação nas emissões do G20. O gás metano perdeu importância na participação das emissões do grupo, possivelmente pelo aumento de área de floresta e das alterações na matriz energética (redução da participação de energia hidrelétrica), caindo para a 18ª posição no G20 conforme apresentado na Tabela 113.

Tabela 113 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Japão)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	4° (6,62%)	4° (6,43%)	5° (4,89%)
Metano (CH ₄)	14° (1,56%)	17° (1,14%)	18° (0,80%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	14° (2,10%)	15° (1,80%)	15° (1,37%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	2° (11,40%)	4° (11,21%)	3° (7,88%)
Total GEE	5° (5,38%)	5° (5,32%)	5° (4,10%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

De acordo com os dados da análise de eficiência, o Japão é ineficiente em todos os períodos, com uma tendência de melhora quando comparado a outros países. Essa melhora se dá pela alteração na matriz energética, uma vez que há redução no uso de petróleo e aumento no uso de gás natural (menos poluente). Com relação ao carvão, ainda que o país tenha aumentado o uso em sua matriz energética, quando comparado aos demais países do G20, sua participação no consumo geral do grupo foi reduzida. Na análise por dados em painel, o país apresenta piora no desempenho, indicando que em comparação à 1990 há uma queda de eficiência. Os dados da análise de eficiência do Japão são apresentados na Tabela 114.

Tabela 114 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Japão)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Japão (1990)	3,50%	3,50%
Japão (2000)	6,30%	2,60%
Japão (2010)	7,80%	2,70%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

De maneira resumida pode-se dizer que o desempenho do Japão é caracterizado pela redução no consumo energético total, relativo ao G20, pelas mudanças no uso da terra e outras modificações na matriz energética. Quando comparado com os países que tiveram grande aumento nos *scores* de eficiência, imagina-se que o desempenho do país não tenha sido melhor devido ao aumento do consumo do carvão em sua matriz energética.

6.6.5 México

Com grande dependência de combustíveis fósseis, em 2010 o México tinha 93,3% de participação destas fontes energéticas em sua matriz, sendo o 6º país com maior dependência de combustíveis fósseis (atrás apenas da Arábia Saudita, Irã, África do Sul, Austrália e Indonésia). Devido às suas grandes reservas naturais (bastante exploradas), o México tem no petróleo sua principal fonte de energia, seguido pelo gás natural. Com menor participação o país ainda faz uso de hidrelétricas e carvão, sendo que as demais fontes têm pequena participação na matriz energética do país. Os dados da participação de combustíveis fósseis e demais tipos de combustíveis são apresentados na Tabela 115.

Tabela 115 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (México)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
México (1990)	93,27%	0,63%	6,10%
México (2000)	92,37%	1,32%	6,32%
México (2010)	93,32%	0,76%	5,92%
Variação (%)	0,04%	22,34%	-2,96%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ao analisar mais detalhadamente a matriz energética nota-se que, com relação aos combustíveis fósseis, houve uma importante redução no consumo de petróleo e aumento no consumo de gás natural (menos poluente), que favorece o processo de redução de emissões de

GEE. Com pequena participação na matriz energética, o carvão teve um aumento na participação da matriz energética enquanto as demais fontes permaneceram praticamente constantes. Os dados da participação de cada fonte na matriz energética do México estão apresentados na Tabela 116.

Tabela 116 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (México)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
México (1990)	66,8%	23,3%	3,2%	0,6%	5,0%	1,1%	100%
México (2000)	62,1%	26,1%	4,2%	1,3%	5,3%	1,0%	100%
México (2010)	50,9%	37,5%	4,9%	0,8%	4,8%	1,1%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Quando comparado ao G20, houve aumento na participação do consumo do grupo de gás natural, enquanto houve redução na participação de outros recursos renováveis. O carvão, ainda que tenha tido maior participação na matriz energética do México, em comparação ao consumo geral do grupo, permaneceu relativamente constante, com um pequeno aumento. No período analisado houve também uma queda acentuada na participação do México no consumo de outras fontes renováveis, passando de 4º país com maior uso deste tipo de fonte em 1990 para a 14ª posição em 2010 conforme apresenta a Tabela 117.

Tabela 117 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (México)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	10° (3,05%)	12° (3,28%)	11° (3,01%)
Gás Natural	10° (1,92%)	10° (2,27%)	11° (3,16%)
Carvão	17° (0,19%)	17° (0,30%)	17° (0,28%)
Nuclear	12° (0,18%)	12° (0,38%)	14° (0,25%)
Hidrelétricas	10° (1,62%)	11° (1,88%)	12° (1,52%)
Renováveis	4° (5,12%)	7° (3,87%)	12° (1,64%)
Consumo Energético	12° (1,75%)	13° (1,96%)	14° (1,87%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com alta dependência de combustíveis fósseis, o país não tem grande consumo energético dentre os países do G20, ocupando a 12ª posição no grupo em 1990. Além do consumo ser relativamente baixo no grupo, o México perdeu posições nos períodos posteriores, ficando com a 14ª posição em 2010. O consumo energético aumentou 63,51% entre 1990 e 2010 enquanto o consumo relativo aumentou 7,34% no período. A Tabela 118 apresenta o consumo energético do México.

Tabela 118 - Consumo energético (México)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
México (1990)	106,37	1,75%	12°
México (2000)	141,29	1,96%	13°
México (2010)	173,94	1,87%	14°
Variação (%)	63,51%	7,34%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Além do consumo e das alterações energéticas, as mudanças no uso da terra no México também influenciaram o desempenho do país. Com a redução na área de floresta no país entre 1990 e 2010, a absorção de dióxido de carbono no país caiu 7,81%. Por outro lado, no período analisado, houve um aumento de 28,98% das emissões de GEE, resultando em uma queda na relação entre absorção e emissão. Como o aumento nas emissões no México foi relativamente menor que no grupo, as emissões relativas do México caíram 5,78% no período conforme apresentado na Tabela 119. Uma comparação relevante deve ser feita entre a variação do consumo energético e o aumento das emissões no período. Enquanto o país aumentou seu consumo em 63,51% (Tabela 118), as emissões aumentaram 28,98% (Tabela 119), sugerindo algum ganho de eficiência.

Tabela 119 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (México)

País	Absorção de CO₂ (kt)	Absorção de CO₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
México (1990)	52.357,27	2,4498%	455.837,51	2,00%	11,49%
México (2000)	49.720,45	2,3504%	532.176,45	2,10%	9,34%
México (2010)	48.268,71	2,2860%	587.924,39	1,88%	8,21%
Variação (%)	-7,81%	-6,69%	28,98%	-5,78%	-28,52%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Com relação aos gases emitidos pelo México, há um importante aumento no consumo relativo do óxido nitroso, do metano e dos outros gases de efeito estufa (HFC, PFC e SF₆), em menor abundância que o dióxido de carbono. As alterações na participação destes gases referem-se ao crescimento do país (aumento da produção industrial), alterações nas áreas de florestas e na matriz energética. A participação no consumo mexicano do principal gás de efeito estufa, dióxido de carbono, teve uma leve redução no período, representando 1,90% do consumo do

G20 em 1990 para 1,78% em 2010. Os dados da posição relativa e participação das emissões são apresentados na Tabela 120.

Tabela 120 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (México)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	12° (1,90%)	11° (2,01%)	12° (1,78%)
Metano (CH ₄)	11° (2,29%)	8° (2,46%)	8° (2,30%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	12° (2,33%)	10° (2,43%)	9° (2,29%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	14° (1,20%)	13° (1,05%)	11° (1,34%)
Total GEE	13° (2,00%)	12° (2,10%)	12° (1,88%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

O país, ineficiente em todo o período analisado, apresenta uma pequena melhoria no desempenho na análise feita em períodos distintos, contudo na análise com dados em painel há redução de eficiência. O desempenho na análise temporal indica que, ainda que o país tenha tido redução de emissões, o aumento do uso de carvão, a redução na participação de fontes renováveis e a redução na área de floresta causaram impacto negativo na eficiência do México. Com relação aos dados em painel, os números indicam que o país apresentou queda de desempenho quando comparado ao próprio desempenho em 1990. Os dados relativos ao desempenho são apresentados na Tabela 121.

Tabela 121 - Eficiência Temporal e com dados em painel (México)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
México (1990)	47,10%	47,10%
México (2000)	47,20%	23,90%
México (2010)	47,50%	17,20%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

De maneira resumida, o desempenho do México pode ser explicado por diversos fatores. Como fator positivo que permitiu ao México ganhos de eficiência, o consumo energético do país cresceu 63,51% enquanto as emissões aumentaram 28,98%. Por outro lado o país reduziu sua área de floresta e, conseqüentemente, sua absorção de CO₂. Além disto, as alterações na matriz energética (aumento do consumo de combustíveis mais poluentes, ainda que relativamente pequeno) reduziram os possíveis ganhos de eficiência do país.

6.7 Países que se tornaram ineficientes (eficiência relativa)

O quinto grupo refere-se aos países que se tornaram ineficientes. Em outras palavras, são países que no ano de 1990 tinham *score* de eficiência de 100% mas que foram reduzindo seu desempenho com o tempo. Os países deste grupo são Brasil, Coreia do Sul e Indonésia.

6.7.1 Brasil

O Brasil é um dos países, dentre o G20, que menos depende dos combustíveis fósseis em sua matriz energética. Em 1990, o Brasil, com 61,20% de combustíveis fósseis em sua matriz, era o país com menor dependência deste tipo de fonte energética no grupo, perdendo a colocação para a França nos anos seguintes, segundo os dados de 2000 e 2010. Por ser beneficiado por uma vasta bacia hidrográfica, o país faz grande uso de energia hidrelétrica, representando de 35,4% a 37,4% de sua matriz no período analisado. O país também ocupa primeiro lugar no consumo de fontes renováveis (hidrelétricas e outras fontes) conforme apresentado na Tabela 122.

Tabela 122 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Brasil)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Brasil (1990)	61,21%	0,40%	38,38%
Brasil (2000)	60,85%	0,74%	38,41%
Brasil (2010)	60,45%	1,28%	38,28%
Variação (%)	-1,25%	215,13%	-0,28%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Considerando que as emissões de GEE estão fortemente relacionadas ao tipo de matriz energética e que o Brasil apresenta baixa dependência de combustíveis fósseis (quando comparado aos demais países analisados) e grande uso de energia hidrelétrica, poder-se-ia assumir que o país seria eficiente em todos os períodos, algo que de fato não ocorre. Quando comparado aos demais países do G20, nota-se que o Brasil apresentou alto desempenho, tanto na análise temporal, quanto na análise com dados em painel, apenas no ano de 1990, tendo caído nos períodos posteriores.

Ao observar a matriz energética do Brasil, nota-se que houve redução no uso de petróleo, carvão e energia hidrelétrica e o aumento no uso de gás natural, energia nuclear e nas fontes

renováveis. Apesar a participação do carvão na matriz energética do país ter sido reduzida, o consumo de carvão no Brasil é um grande problema para as emissões de gases de efeito estufa, uma vez que no Brasil as reservas de carvão são de baixa qualidade (baixo poder calorífico e alto teor de emissões).

Estas alterações na matriz energética, em uma primeira análise, seriam suficientes para melhorar o desempenho do país, contudo ao considerar a redução da área de floresta (e consequente absorção de gases de efeito estufa) e a participação de cada fonte energética em relação aos países do G20, amplia-se o horizonte de análise. Os dados referentes à participação das fontes na matriz energética do Brasil são apresentados na Tabela 123.

Tabela 123 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Brasil)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Brasil (1990)	51,4%	2,2%	7,6%	0,4%	37,4%	0,9%	100%
Brasil (2000)	49,6%	4,6%	6,7%	0,7%	37,1%	1,3%	100%
Brasil (2010)	45,9%	9,4%	5,2%	1,3%	35,4%	2,8%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Apesar da redução da participação do petróleo na matriz energética, o Brasil passou a ser um dos países que mais faz uso do petróleo em sua matriz energética, passando da 8ª posição em 1990 para a 3ª posição em 2010, atrás apenas da Arábia Saudita (com 61,2% de sua matriz energética baseada no petróleo) e do México (com 50,9%). Com o aumento relativo na participação do consumo de petróleo, o país passou a representar 2,76% do consumo de petróleo em 1990 para 4,02% do consumo em 2010.

Ainda que o país tenha aumentado a participação de fontes renováveis em sua matriz energética, quando comparado ao G20, a participação do Brasil neste tipo de fonte caiu. Isso significa que outros países aumentaram proporcionalmente mais seus investimentos em fontes renováveis, fazendo com que o Brasil passasse de 3º maior consumidor deste tipo de fonte em 1990, atrás apenas dos Estados Unidos e Japão (apenas em 1990 e 2000), para o 5º maior consumidor em 2010, atrás dos Estados Unidos, Alemanha, China e Índia. O Japão passou a ocupar o 6º posto em consumo de fontes renováveis em 2010. Os dados da posição relativa e da participação no consumo do G20 são apresentados na Tabela 124.

Tabela 124 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Brasil)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	11° (2,76%)	10° (3,45%)	7° (4,02%)
Gás Natural	18° (0,21%)	19° (0,52%)	18° (1,17%)
Carvão	15° (0,54%)	15° (0,63%)	15° (0,43%)
Nuclear	13° (0,14%)	14° (0,28%)	11° (0,63%)
Hidrelétricas	3° (14,23%)	2° (17,29%)	2° (16,65%)
Renováveis	3° (5,23%)	4° (6,61%)	5° (6,07%)
Consumo Energético	11° (2,05%)	11° (2,57%)	8° (2,77%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

O consumo energético no Brasil cresceu 106,09% no período analisado, passando da 11ª posição para a 8ª posição dentre os países com maior consumo. Como resultado deste crescimento (acima da média do grupo), o consumo do Brasil em relação ao G20 também aumentou, indicando que o consumo brasileiro aumentou de maneira mais intensa que o grupo. O Brasil, juntamente com os demais países que pioraram seu desempenho (Coreia do Sul, Indonésia, China e Índia), apresentou aumento no consumo superior à média do grupo indicando que o aumento no consumo pode ser um dos fatores importantes para queda do desempenho. Os dados do consumo energético do Brasil são apresentados na Tabela 125.

Tabela 125 - Consumo energético (Brasil)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
Brasil (1990)	124,96	2,05%	11°
Brasil (2000)	185,78	2,57%	11°
Brasil (2010)	257,53	2,77%	8°
Variação (%)	106,09%	35,29%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Como consequência do aumento do consumo, houve aumento das emissões de gases de efeito estufa no país, também de maneira mais intensa que no grupo, fazendo com que as emissões relativas aumentassem em 10,65%. Também de maneira negativa houve redução da área de floresta no país, que refletiu em uma absorção menor de dióxido de carbono pelas florestas. O Brasil, segundo país com maior área de floresta dentre os países do G20, foi o terceiro país que mais reduziu sua área de floresta, atrás apenas da Indonésia e Argentina. Os dados da absorção e emissão de CO₂ pelo Brasil são apresentados na Tabela 126.

Tabela 126 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (Brasil)

País	Absorção de CO ₂ (kt)	Absorção de CO ₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO ₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Brasil (1990)	360.323,59	16,8596%	692.709,99	3,04%	52,02%
Brasil (2000)	342.210,85	16,1770%	843.610,91	3,33%	40,57%
Brasil (2010)	325.649,50	15,4227%	1.049.143,76	3,36%	31,04%
Variação (%)	-9,62%	-8,52%	51,45%	10,65%	-40,33%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

O Brasil é um dos países com maior emissão de GEE, passando da 8ª posição em 1990 para a 6ª posição em 2010. Como consequência da redução da área de floresta e do uso intenso da fonte de energia hidrelétrica, o país tem grande participação no grupo nas emissões de gás metano dentre os países do G20. Além do metano, outro gás que merece destaque é o óxido nitroso, que reflete o crescimento do país e sua participação nos processos industriais (estimulado após o período de globalização que coincide com o ano base do trabalho). Os dados relativos à participação do Brasil nas emissões de gases de efeito estufa do G20 são apresentados na Tabela 127.

Tabela 127 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Brasil)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	17° (1,26%)	16° (1,73%)	15° (1,66%)
Metano (CH ₄)	5° (7,45%)	5° (8,21%)	5° (8,79%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	4° (9,06%)	4° (9,43%)	4° (11,01%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	9° (3,39%)	12° (1,12%)	12° (1,18%)
Total GEE	8° (3,04%)	7° (3,33%)	6° (3,36%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Ao analisar o desempenho, houve redução na eficiência do Brasil, tanto na análise temporal, quanto na análise de dados em painel. O *score* da análise temporal revela que o Brasil era considerado relativamente eficiente em 1990, tendo uma queda expressiva entre 2000 e 2010. O *score* dos dados em painel revela que o Brasil era considerado eficiente em 1990 e teve queda nos anos seguintes, indicando que ao considerar seu próprio desempenho, em 1990 o Brasil era relativamente mais eficiente que em 2000 e 2010, conforme apresenta a Tabela 128.

Tabela 128 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Brasil)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Brasil (1990)	100,00%	100,00%
Brasil (2000)	99,90%	39,60%
Brasil (2010)	57,30%	15,90%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

De maneira resumida, o desempenho brasileiro é devido ao consumo, às mudanças no uso da terra e alterações na matriz energética. Nota-se que no caso do Brasil houve um aumento de consumo energético, superior à média do G20, redução da área de floresta, responsável pela absorção de CO₂ e aumento da participação relativa do petróleo e o consumo de carvão de baixa qualidade.

6.7.2 Coreia do Sul

A Coreia do Sul, apesar de ser dependente de combustíveis fósseis (entre 85,10% e 86,5% da matriz energética no período analisado), também faz uso de outras fontes energéticas, com destaque para energia nuclear. A energia hidrelétrica e as outras fontes renováveis são pouco expressivas na composição da matriz energética do país. No período analisado não houve alterações significativas em cada um dos grupos de fontes energéticas, sendo a mais relevante a redução no uso de recursos renováveis, como mostra a Tabela 129.

Tabela 129 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Coreia do Sul)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Coreia do Sul (1990)	85,11%	13,29%	1,60%
Coreia do Sul (2000)	86,49%	13,02%	0,49%
Coreia do Sul (2010)	86,22%	13,20%	0,57%
Varição (%)	1,31%	-0,67%	-64,24%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ao analisar detalhadamente as variações de cada fonte energética do país (Tabela 130), percebe-se que entre 1990 e 2010 há um crescimento na participação de gás natural e carvão, com redução da participação de petróleo e energia hidrelétrica na matriz energética. A energia nuclear e as demais fontes renováveis permanecem relativamente estáveis. A redução da participação do petróleo e o aumento da participação do gás natural são fatores que

promovem redução de emissões no meio ambiente. Por outro lado, o aumento da participação de carvão, juntamente com a baixa participação de outras fontes limpas de energia, compromete a melhoria dos indicadores do país.

Apesar da redução da participação do petróleo em sua matriz energética, a Coreia do Sul continua sendo um dos países mais dependentes desta fonte energética. Em 2010, com 41,22% de participação em sua matriz energética, a Coreia do Sul passou a ser o sexto país que mais utiliza petróleo na composição de sua matriz. Com a redução do petróleo outras fontes fósseis tiveram alterações, sendo que a mais expressiva foi o aumento expressivo do gás natural, fonte menos poluente. Por outro lado, o aumento da participação do carvão (fonte mais poluente dentre os combustíveis fósseis) entre 1990 e 2010 fez com que a Coreia do Sul passasse da 8ª para a 5ª posição dentre os países que mais utilizam este recurso em sua matriz energética, uma vez que o país tem aumentado o consumo de uma fonte energética que tem sido reduzida pela maioria dos países. Os dados da participação de cada fonte na matriz energética da Coreia do Sul são apresentados na Tabela 130.

Tabela 130 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Coreia do Sul)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Coreia do Sul (1990)	55,0%	3,0%	27,1%	13,3%	1,6%	0,0%	100%
Coreia do Sul (2000)	54,8%	9,0%	22,7%	13,0%	0,5%	0,0%	100%
Coreia do Sul (2010)	41,2%	15,2%	29,8%	13,2%	0,3%	0,2%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ao comparar o consumo da Coreia do Sul com os demais países do G20, nota-se que a participação relativa de todos os combustíveis fósseis aumentou, além da energia nuclear. O destaque negativo é relacionado às fontes energéticas limpas, sendo que houve redução na participação da energia hidrelétrica e oscilação nas outras fontes renováveis. Com isto, a Coreia do Sul passou da 15ª para a 9ª posição entre os países que mais consomem petróleo no G20; da 19ª para a 15ª posição entre os países que mais consomem gás natural e da 11ª para a 8ª posição dentre os países que mais consomem carvão no G20.

A energia nuclear também passou a ser representativa, pois a Coreia do Sul passou a ser o 5º país que mais consome este tipo de energia. Em contrapartida, o país perdeu uma posição na energia hidrelétrica, ocupando a 17ª posição em 2010, afrente apenas do Reino Unido, África do Sul e Arábia Saudita. Com 0,52% na participação do consumo de outras fontes renováveis

dentre os países do G20, a Coreia do Sul passou a ser o 15º país a fazer uso deste recurso energético, estando afrente da Argentina, Rússia, África do Sul, Irã e Arábia Saudita. Os dados da posição relativa e participação no consumo do G20 são apresentados na Tabela 131.

Tabela 131 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Coreia do Sul)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	15° (2,13%)	7° (3,88%)	9° (3,57%)
Gás Natural	19° (0,21%)	17° (1,05%)	15° (1,88%)
Carvão	11° (1,38%)	9° (2,16%)	8° (2,46%)
Nuclear	8° (3,29%)	6° (5,04%)	5° (6,41%)
Hidrelétricas	16° (0,44%)	17° (0,23%)	17° (0,15%)
Renováveis	18° (0,00%)	17° (0,07%)	15° (0,52%)
Consumo Energético	13° (1,48%)	10° (2,62%)	9° (2,74%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com uma crescente participação no consumo energético, o país passou a ocupar a 9ª colocação dentre os países do G20. O crescimento do consumo no período foi de 182,80%, muito acima da média do crescimento dos países do grupo, fazendo com que o consumo relativo do país (participação do consumo do país no G20) aumentasse 85,65% conforme apresenta a Tabela 132.

Tabela 132 - Consumo energético (Coreia do Sul)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
Coreia do Sul (1990)	90,04	1,48%	13°
Coreia do Sul (2000)	189,42	2,62%	10°
Coreia do Sul (2010)	254,64	2,74%	9°
Variação (%)	182,80%	85,65%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Como consequência do aumento no consumo, houve também aumento nas emissões de gases de efeito estufa, em que o país passou da 16ª posição nas emissões do G20 em 1990 para a 11ª posição em 2010, com importante destaque para as emissões de dióxido de carbono. Além do aumento nas emissões, houve queda na área de floresta do país (redução de 2,32%), que refletiu em uma menor absorção de gases de efeito estufa pelo país. Quando comparados o consumo com as emissões de GEE observa-se que o aumento no consumo (182,80% - Tabela

132) foi superior ao aumento das emissões de GEE (Tabela 133). Os demais dados da absorção e emissão de GEE são apresentados na Tabela 133.

Tabela 133 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (Coreia do Sul)

País	Absorção de CO ₂ (kt)	Absorção de CO ₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO ₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Coreia do Sul (1990)	5.043,58	0,2360%	294.229,71	1,29%	1,71%
Coreia do Sul (2000)	4.978,65	0,2354%	511.031,32	2,02%	0,97%
Coreia do Sul (2010)	4.926,39	0,2333%	618.704,23	1,98%	0,80%
Variação (%)	-2,32%	-1,13%	110,28%	53,62%	-53,55%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

O aumento nas emissões da Coreia do Sul fez com que o país se tornasse o 11º maior emissor de gases de efeito estufa do G20. Um importante destaque é relativo ao crescimento das emissões de dióxido de carbono, o gás de efeito estufa mais abundante. Esse aumento se deu pelo aumento do uso de carvão em sua matriz energética e pelo aumento relativo na participação do consumo de petróleo e carvão em relação ao G20. Outra contribuição importante foram as mudanças no uso da terra (desmatamento) que contribuiu nas emissões de GEE. Os gases metano e óxido nitroso são pouco representativos nas emissões do grupo. Os dados da posição relativa e participação da Coreia do Sul nas emissões de GEE são apresentados na Tabela 134.

Tabela 134 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Coreia do Sul)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	14° (1,49%)	10° (2,36%)	7° (2,41%)
Metano (CH ₄)	19° (0,73%)	20° (0,74%)	20° (0,63%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	19° (0,57%)	19° (1,01%)	19° (0,78%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	10° (2,48%)	7° (3,25%)	14° 1 (1,0%)
Total GEE	16° (1,29%)	15° (2,02%)	11° (1,98%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Com relação ao desempenho, a Coreia do Sul obteve os *scores* máximos, tanto na análise temporal quanto na análise por dados em painel no ano de 1990. Com baixo consumo relativo em 1990 a Coreia do Sul figurou entre os países com maior eficiência no ano base. A Coreia do Sul apresentou bom desempenho nos anos 1990 e 2000 (análise temporal), sendo que em 1990 a Coreia do Sul tinha um baixo consumo relativo de combustíveis fósseis, além de fazer uso de outras fontes de energia, como a energia nuclear. Com isso a Coreia do Sul ocupava,

em 1990, a 16ª posição entre os países dependentes de combustíveis fósseis, o que justifica o seu desempenho. O bom desempenho no ano de 2000 pode ser justificado pela alteração da matriz energética daquele ano, com forte redução do uso de carvão e aumento do uso de gás natural. O desempenho, contudo, não se manteve em 2010, devido alterações na matriz energética e pelas mudanças no uso da terra. Os dados da análise de eficiência da Coreia do Sul são apresentados na Tabela 135.

Tabela 135 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Coreia do Sul)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Coreia do Sul (1990)	100,00%	100,00%
Coreia do Sul (2000)	100,00%	39,40%
Coreia do Sul (2010)	54,50%	18,70%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

Os dados da análise temporal indicam que a Coreia do Sul piorou eficiência ao longo do tempo, causada pelas alterações na matriz energética, mudanças no uso da terra e aumento do consumo. O país também apresentou queda em relação ao seu próprio desempenho quando comparado com o ano base (análise com dados em painel), indicando corroborando com a ideia de redução dos padrões de consumo para os níveis de 1990, proposta pela ONU. Desta forma, os fatores que influenciaram para a redução no desempenho da Coreia do Sul foram o aumento na participação do consumo de combustíveis fósseis em relação aos países do G20, em especial petróleo e carvão; a baixa participação de fontes de energia limpa e renováveis; o aumento do consumo relativo (dentro os países do G20) e a pequena absorção de GEE pelas florestas (pouco representativas).

6.7.3 Indonésia

A Indonésia é um dos países com maior dependência de combustíveis fósseis, com participação de 97,06% em sua matriz energética no ano de 1990 e participação de 95,91% no ano de 2010. Dos combustíveis fósseis, o petróleo é o mais utilizado, seguido do gás natural e do carvão. Além destes recursos, o país ainda faz uso de energia hidrelétrica e de outras fontes renováveis conforme apresentado na Tabela 136.

Tabela 136 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Indonésia)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Indonésia (1990)	97,06%	0,00%	2,94%
Indonésia (2000)	96,60%	0,00%	3,40%
Indonésia (2010)	95,91%	0,00%	4,09%
Variação (%)	-1,19%	-64,74%	39,45%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ainda que a participação do petróleo tenha sido reduzida na matriz energética (de 60,5% em 1990 para 43,8% em 2010), a Indonésia é fortemente dependente desta fonte, tendo ocupado em 2010 a 4ª posição dentre os países do G20 que mais utilizam o petróleo em sua matriz energética, atrás apenas da Arábia Saudita, México e Brasil. O carvão também teve um aumento significativo, passando de 7,5% na composição da matriz em 1990 para 27,7% em 2010. Com isso, dentre os países do G20, a Indonésia passou a ser o 7º país que mais usa carvão em sua matriz energética (enquanto era apenas o 16º colocado em 1990). O gás natural, fonte energética fóssil que menos polui, teve sua participação reduzida na matriz energética do país. Estas alterações na matriz energética da Indonésia (redução do gás e aumento do uso do carvão) estimulam o aumento de emissão de gases de efeito estufa.

As fontes energéticas limpas, com pequena participação na matriz energética, tiveram pouca variação, sendo que nas hidrelétricas houve oscilação enquanto nos recursos renováveis houve um aumento no período. Os dados relativos à participação de cada fonte na matriz energética da Indonésia são apresentados na Tabela 137.

Tabela 137 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (Indonésia)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Indonésia (1990)	60,5%	29,0%	7,5%	0,0%	2,4%	0,5%	100%
Indonésia (2000)	55,7%	27,0%	13,9%	0,0%	2,3%	1,1%	100%
Indonésia (2010)	43,8%	24,4%	27,7%	0,0%	2,7%	1,4%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Ao analisar o consumo de cada fonte em relação ao G20, observa-se que houve um aumento do consumo relativo de todas as fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis. Considerando que houve redução na matriz energética do petróleo e do gás natural, infere-se que a alteração de outros países (redução do uso do petróleo e gás natural) foi mais expressiva em outros países do que na Indonésia. Com relação à energia limpa, em relação ao G20,

houve um aumento na participação da Indonésia no consumo de energia hidrelétrica enquanto houve oscilação nas fontes de energia renováveis. Uma importante observação é relativa à participação do carvão em relação aos demais países do G20. A Indonésia era o 16º maior consumidor de carvão em 1990 dentre os países do G20 e passou a ser o 10º maior consumidor. Considerando que o carvão é a fonte energética que mais polui, este aumento significativo tem reflexos importantes nas emissões de GEE. Os dados da posição relativa e participação da Indonésia no consumo do G20 são apresentados na Tabela 138.

Tabela 138 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (Indonésia)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	17º (1,36%)	16º (2,07%)	16º (2,21%)
Gás Natural	13º (1,18%)	13º (1,65%)	16º (1,76%)
Carvão	16º (0,22%)	14º (0,69%)	10º (1,34%)
Nuclear	17º (0,00%)	17º (0,00%)	17º (0,00%)
Hidrelétricas	17º (0,39%)	15º (0,57%)	14º (0,72%)
Renováveis	9º (1,13%)	8º (2,96%)	11º (1,77%)
Consumo Energético	18º (,86%)	18º (1,37%)	16º (1,60%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com pequeno consumo relativo o país, que ocupava a 18ª posição no consumo dentre os países do G20 em 1990, teve um crescimento de 183,62% no consumo, passando a ocupar a 16ª posição em 2010. Como o aumento no consumo do país foi maior que a média dos países, o consumo relativo da Indonésia também cresceu (86,19%) no período conforme apresentado na Tabela 139.

Tabela 139 - Consumo energético (Indonésia)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
Indonésia (1990)	52,44	0,86%	18º
Indonésia (2000)	99,13	1,37%	18º
Indonésia (2010)	148,73	1,60%	16º
Variação (%)	183,62%	86,19%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Como consequência do aumento do consumo energético (183,62%), houve um aumento na emissão de gases de efeito estufa (84,08%) do país e, também, aumento no consumo relativo aos países do G20 (34,48%). Outro fator importante para redução da eficiência da Indonésia foram as mudanças no uso da terra, com a redução de 20,34% da área de floresta da área,

culminando em uma redução na absorção de dióxido de carbono pelas florestas. A Indonésia, dentre os países do G20, foi o país que teve a maior redução da área de floresta do grupo. Com o aumento das emissões e a redução da área de floresta, a relação entre absorção e emissão foi reduzida no período. Os dados da absorção e emissão de GEE são apresentados na Tabela 140.

Tabela 140 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (Indonésia)

País	Absorção de CO ₂ (kt)	Absorção de CO ₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO ₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Indonésia (1990)	93.049,38	4,3538%	392.446,03	1,72%	23,71%
Indonésia (2000)	78.028,98	3,6886%	522.915,05	2,06%	14,92%
Indonésia (2010)	74.122,39	3,5104%	722.426,19	2,32%	10,26%
Variação (%)	-20,34%	-19,37%	84,08%	34,48%	-56,73%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Com relação aos gases de efeito estufa, o país tem destaque para o dióxido de carbono, metano e óxido nitroso. O dióxido de carbono emitido pela Indonésia teve sua participação aumentada, devido principalmente às alterações na matriz energética (aumento do consumo do carvão) e da redução da área de floresta. Com grande população (4ª maior do mundo), e economia baseada no setor industrial, o país tem grande emissão do gás metano (relacionado à rizicultura) e do óxido nitroso (relacionado aos processos industriais). Os dados relativos às emissões de gases de efeito estufa são apresentados na Tabela 141.

Tabela 141 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (Indonésia)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	18° (0,90%)	18° (1,39%)	13° (1,76%)
Metano (CH ₄)	6° (3,55%)	6° (4,02%)	6° (4,34%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	6° (5,17%)	6° (5,10%)	5° (4,84%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	19° (0,69%)	19° (0,22%)	19° (0,14%)
Total GEE	15° (1,72%)	13° (2,06%)	8° (2,32%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

A análise de desempenho do país indica que houve redução da eficiência entre 1990 e 2010, sendo que em 1990 o país foi considerado eficiente (eficiência relativa) tanto na análise dos dados em painel quanto a análise temporal. Em ambas as análises, em 1990 parte-se de um *score* 100%, o que indica eficiência, fazendo com que o país servisse de benchmark no consumo energético e emissão de gases de efeito estufa. A redução do *score* da análise

temporal indica que, relativamente aos outros países, a Indonésia se tornou ineficiente, enquanto a redução do *score* da análise dos dados em painel indica que, em relação ao seu desempenho de 1990, houve redução da sua própria eficiência (eficiência relativa).

A queda no desempenho do país é resultado das alterações na matriz energética, em especial o aumento do consumo de carvão e a redução do consumo de gás natural. Além disso, o aumento do consumo relativo ao G20 de todas as fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis também influenciou negativamente para a eficiência do país.

Outro fator importante a considerar é o aumento do consumo energético no país em relação aos países do G20. Com o consumo relativo de 0,86% em 1990, a Indonésia era o 3º país com menor consumo no G20, estando atrás apenas da Turquia e da Argentina. O baixo consumo em 1990 é um fator importante para que o *score* de eficiência fosse de 100%. Finalmente, outro fator relevante foi a redução da área de floresta e consequente redução na absorção de CO₂ pelo país. Os dados relativos à eficiência da Indonésia são apresentados na Tabela 142.

Tabela 142 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Indonésia)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Indonésia (1990)	100,00%	100,00%
Indonésia (2000)	88,90%	53,10%
Indonésia (2010)	74,30%	34,50%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

A eficiência relativa no ano de 1990 (*score* de 100%) é resultado do baixo consumo em relação ao G20; da participação reduzida, naquele ano, de combustíveis fósseis altamente poluentes (carvão); do uso de energia limpa (hidrelétrica) em sua matriz energética e da absorção CO₂ feita pelas florestas. Nos anos posteriores, além da alteração da matriz energética (aumento o consumo de carvão e demais fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis), houve o aumento do consumo, redução da participação relativa na área de floresta e aumento relativo do consumo, o que explica a queda no desempenho do país.

6.8 Países sempre ineficientes (com tendência de queda na eficiência relativa)

Por fim, dois países que sempre foram ineficientes pioraram seu desempenho, tanto na análise temporal quanto na análise com dados em painel. Os países que fazem parte deste grupo são a China e a Índia.

6.8.1 China

A China é o país com maior consumo energético do G20. Em 1990 o país ocupava a 3ª posição em consumo, contudo com um crescimento de 251,81% entre 1990 e 2010, a China passou a Rússia em 2000 e, no ano de 2010, já era o maior consumidor do G20. Como consequência, a China também passou a ser o país com maior emissão de gases de efeito estufa.

Com forte dependência de combustíveis fósseis (média de 93,9% em sua matriz energética), a principal fonte energética chinesa é o carvão, seguido do petróleo e, com participação menor, o gás natural. Uma importante observação quanto à matriz energética é o que o país tem reduzido o uso de combustíveis fósseis e aumentado a participação de recursos renováveis, em especial a energia hidrelétrica. Além destas fontes, o país ainda faz uso de energia nuclear, com pequena participação em sua matriz energética. Os dados da participação dos tipos de combustíveis na China são apresentados na Tabela 143.

Tabela 143 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (China)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
China (1990)	95,68%	0,00%	4,32%
China (2000)	94,41%	0,39%	5,21%
China (2010)	91,69%	0,72%	7,59%
Variação (%)	-4,17%	-	75,95%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Apesar da redução da participação do carvão em sua matriz energética, devido seu crescimento no período (251,81%), a China foi responsável por mais da metade do consumo desta fonte energética no ano de 2010. Com maior destaque, foi observado o aumento do uso do gás natural e das hidrelétricas na matriz energética do país. Os outros recursos renováveis a

energia nuclear, com pequena participação na matriz, também apresentaram crescimento conforme apresentado na Tabela 144.

Tabela 144 - Participação de cada fonte em sua matriz energética (China)

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
China (1990)	17,0%	2,1%	76,6%	0,0%	4,3%	0,0%	100%
China (2000)	22,9%	2,2%	69,3%	0,4%	5,1%	0,1%	100%
China (2010)	18,7%	4,1%	68,9%	0,7%	7,0%	0,6%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Quando comparado ao G20, os dados indicam uma situação preocupante, pois há um aumento relativo no uso do carvão (fonte energética mais poluente), petróleo e gás natural, fazendo com que a China se tornasse o 2º maior consumidor de petróleo do G20 (com 14,87% na participação do consumo), o 4º maior consumidor de gás natural (com 4,66% na participação do consumo) e o maior consumidor de carvão (com 52,24% na participação do consumo).

Sendo o maior consumidor mundial, o país teve um aumento relativo considerável no uso de hidrelétricas e fontes renováveis, tornando-se o país com maior participação no uso de hidrelétricas, responsável pelo consumo de 29,8% desta fonte dentre os países do G20, e o país com o 3º maior uso de outras fontes renováveis de energia, estando atrás apenas dos Estados Unidos e Alemanha. A posição relativa e os dados da participação das fontes energéticas da China no consumo do G20 são apresentados na Tabela 145.

Tabela 145 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 (China)

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	5º (4,85%)	3º (8,39%)	2º (14,87%)
Gás Natural	15º (1,07%)	15º (1,36%)	4º (4,66%)
Carvão	1º (28,89%)	1º (34,03%)	1º (52,24%)
Nuclear	16º (0,00%)	9º (0,77%)	8º (3,19%)
Hidrelétricas	5º (8,72%)	4º (12,63%)	1º (29,82%)
Renováveis	20º (0,00%)	11º (1,92%)	3º (11,69%)
Consumo Energético	3º (10,91%)	2º (13,58%)	1º (25,19%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com o maior consumo energético do G20, em 2010 o consumo energético da China representava 25,19% do consumo total do G20, pouco a frente dos Estados Unidos (24,58%). Juntos os dois países consomem quase metade dos recursos energéticos do G20 (49,77%).

Como resultado do alto consumo e do crescimento acima da média do grupo, o consumo relativo da China também aumentou no período conforme demonstra a Tabela 146.

Tabela 146 - Consumo energético (China)

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
China (1990)	664,57	10,91%	3°
China (2000)	980,28	13,58%	2°
China (2010)	2.337,98	25,19%	1°
Variação (%)	251,81%	130,95%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Como consequência do alto consumo energético e seu crescimento, as emissões de gases de efeito estufa também aumentaram no período. A China, que ocupava a 2ª posição nos anos de 1990 e 2000, passou a ser o país com maior emissão de gases de efeito estufa em entre 2000 e 2010 (com 30,87% de participação nas emissões do G20 no último período analisado). Por outro lado, a China foi o país que mais aumentou sua área de floresta, aumentando também a absorção de dióxido de carbono pelas florestas. Os dados relativos à absorção e emissões de GEE da China são apresentados na Tabela 147.

Tabela 147 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE (China)

País	Absorção de CO₂ (kt)	Absorção de CO₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
China (1990)	79.529,99	3,7212%	3.808.430,52	16,71%	2,09%
China (2000)	89.581,23	4,2347%	4.897.853,37	19,32%	1,83%
China (2010)	104.693,64	4,9583%	9.632.307,60	30,87%	1,09%
Variação (%)	31,64%	33,24%	152,92%	84,77%	-47,95%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Como maior emissora de gases de efeito estufa, a China passou a chamar atenção quanto aos tipos de gases que ela emite. Em 2010 a China se tornou a maior responsável pela emissão do dióxido de carbono (com 30,88%) das emissões do grupo, causadas pelas alterações na matriz energética, em especial pelo aumento relativo no uso do carvão e do petróleo. O país manteve a primeira posição na emissão de metano (causado principalmente pelo crescimento e participação das hidrelétricas no país) e óxido nitroso (pelo crescimento das atividades e processos industriais do país), aumentando sua participação no grupo. Com relação aos outros

gases de efeito estufa (HFC, PFC e SF₆), o país tornou-se o segundo maior emissor do grupo destes gases conforme apresentado na Tabela 148.

Tabela 148 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 (China)

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	2° (14,88%)	2° (17,97%)	1° (30,88%)
Metano (CH ₄)	1° (23,70%)	1° (24,99%)	1° (32,56%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	1° (18,51%)	1° (22,08%)	1° (29,19%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	6° (4,98%)	2° (12,67%)	2° (24,79%)
Total GEE	2° (16,71%)	2° (19,32%)	1° (30,87%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Uma importante consideração é com relação à mudança no uso das terras na China, que teve no período aumento na área de floresta e consequente absorção de CO₂. Apesar da redução do uso de carvão e aumento de fontes menos poluentes, quando comparado à outros países, a China se tornou o maior consumidor de fontes altamente poluentes, o que pode anular ganhos como o aumento de áreas de floresta e aumento na absorção.

Ao analisar números absolutos, a China teve 251,81% de aumento no consumo energético enquanto as emissões de gases aumentaram 152,92%. No entanto, ainda que as emissões de gases tenham aumentado em uma proporção inferior que o consumo em relação ao G20, a China tornou-se o maior emissor de GEE em 2010. Em outras palavras, ainda que o consumo tenha crescido de maneira mais acentuada do que as emissões, as alterações na matriz energética e o aumento relativo das emissões fizeram com que o país apresentasse piora em relação ao G20.

Com relação ao desempenho, a China sempre foi ineficiente, tanto na análise de dados em períodos isolados (DEA Temporal) quando dados em painel. Com um alto consumo energético inicial e significativas emissões de gases estufa o país foi considerado, em 1990, ineficiente. Ainda assim o *score* de eficiência da China no ano base era superior aos países Índia, Alemanha, Japão, Rússia e Estados Unidos. Com o aumento no consumo, em especial nos combustíveis mais poluentes, o país piorou seu desempenho nos anos seguintes, tanto na análise temporal quando na análise com dados em painel. Os dados do desempenho são apresentados na Tabela 149.

Tabela 149 - Eficiência Temporal e com dados em painel (China)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
China (1990)	11,20%	11,20%
China (2000)	2,60%	0,60%
China (2010)	0,50%	0,10%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

De maneira resumida, os fatores que explicam o desempenho da China são o aumento no consumo energético, tornando-se o maior consumidor do grupo e o uso de combustíveis fósseis poluentes (maior consumidor de carvão e quarto maior consumidor de petróleo). Ainda que relevantes as alterações no uso da terra não foram suficientes para compensar os outros fatores que afetam o desempenho.

6.8.2 Índia

A Índia é um país com forte dependência de combustíveis fósseis (acima de 90% em todo período), além de ser um dos países do G20 com maior consumo energético. Enquanto alguns países reduziram a participação de combustíveis fósseis em sua matriz, na Índia houve o contrário, um aumento de 1,89% entre 1990 e 2010, fazendo com que o país passasse da 11ª posição em 1990 dentre os países que mais consomem combustíveis fósseis do G20 para a 7ª posição em 2010. O uso de energia nuclear no país é relativamente pequeno e a participação de recursos renováveis apresentou queda no período conforme apresentado na Tabela 150.

Tabela 150 - Participação de combustíveis fósseis na matriz energética (Índia)

Fonte	Fósseis	Nuclear	Renováveis
Índia (1990)	90,88%	0,80%	8,32%
Índia (2000)	92,65%	1,21%	6,14%
Índia (2010)	92,60%	1,02%	6,38%
Variação (%)	1,89%	27,51%	-23,33%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Com relação aos combustíveis fósseis, a Índia tem grande dependência de carvão em sua matriz energética, com média de uso no período de 50,97% desta fonte. Entre os anos de 1990 e 2010 houve oscilação na participação do carvão na matriz energética do país, com pequena queda em 2010 quando comparado a 1990.

O petróleo, componente importante na matriz energética do país, representando a segunda maior fonte energética do país, teve oscilação na participação da matriz do país, com tendência a queda também, enquanto o gás natural teve sua participação aumentada. Com base nos dados da matriz energética nota-se uma redução da participação de hidrelétricas em sua matriz, caindo de 8,3% em 1990 para 4,9% em 2010. As demais fontes energéticas, energia nuclear e outras fontes renováveis, têm baixa participação na matriz energética do país.

Com o crescimento do país a partir de 1990, o país passa da 9ª posição em consumo energético dentre os países do G20 para 4ª posição em 2010, ficando atrás apenas da China, Estados Unidos e Rússia. Desta forma, tanto o aumento do consumo quanto a alta participação do carvão na matriz energética da Índia comprometem seu desempenho. Os dados da participação de cada fonte na matriz energética da Índia são apresentados na Tabela 151.

Tabela 151 - Participação de cada fonte em sua matriz energética Índia

País	Petróleo	Gás	Carvão	Nuclear	Hidrelétrica	Renováveis	Total
Índia (1990)	32,1%	6,0%	52,8%	0,8%	8,3%	0,0%	100%
Índia (2000)	35,9%	8,0%	48,8%	1,2%	5,9%	0,3%	100%
Índia (2010)	30,4%	10,9%	51,3%	1,0%	4,9%	1,5%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Em relação ao G20, a Índia apresenta um aumento relativo no consumo de combustíveis fósseis. Considerando que a participação de petróleo e carvão se manteve estável em sua matriz energética, o aumento da participação relativa indica que, enquanto a Índia manteve seu padrão de consumo energético, outros países reduziram o consumo de fontes mais poluentes (derivadas de combustíveis fósseis). No período houve aumento na participação relativa de gás natural, fazendo com que a Índia subisse da 16ª para a 12ª posição dentre os países do G20 que mais consomem este tipo de fonte energética (menos poluente) e também aumento na participação de outras fontes renováveis, fazendo que a Índia ficasse atrás apenas dos Estados Unidos, Alemanha e China no uso deste tipo de recurso energético. Os dados da posição relativa e participação da Índia no consumo do G20 são apresentados na Tabela 152.

Tabela 152 - Posição relativa e participação no consumo total do G20 Índia

Fonte	1990	2000	2010
Petróleo	12° (2,49%)	6° (3,97%)	4° (5,28%)
Gás Natural	16° (0,84%)	14° (1,46%)	12° (2,70%)
Carvão	5° (5,41%)	3° (7,23%)	3° (8,52%)
Nuclear	11° (0,40%)	10° (0,73%)	10° (1,00%)
Hidrelétricas	7° (4,57%)	7° (4,37%)	6° (4,57%)
Renováveis	14° (0,07%)	10° (1,99%)	4° (6,29%)
Consumo Energético	9° (2,97%)	7° (4,10%)	4° (5,51%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

O consumo energético do país aumentou 183,08% entre 1990 e 2010 (Tabela 153), fazendo com que o país se tornasse o 4° maior consumidor dentre os países do G20, atrás apenas da China, Estados Unidos e Rússia. Com um crescimento do consumo maior do que a média dos países do G20, a Índia teve aumento em seu consumo relativo (85,83%) no período conforme apresentado na Tabela 153.

Tabela 153 - Consumo energético Índia

País	Consumo Energético (milhões ton. óleo equiv.)	Consumo relativo (% G20)	Ranking Consumo G20
Índia (1990)	180,73	2,97%	9°
Índia (2000)	295,84	4,10%	7°
Índia (2010)	511,60	5,51%	4°
Variação (%)	183,08%	85,83%	

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da BP (2013)

Como consequência do aumento no consumo, as emissões de gases de efeito estufa também aumentaram no país, que passou a ser o 3° maior emissor de GEE do G20. Entre 1990 e 2010 as emissões aumentaram 82,41%, acima da média do grupo, fazendo com que o aumento relativo das emissões fosse de 33,26%. Por outro lado, houve aumento na área de floresta do país, fazendo com que a absorção de dióxido de carbono aumentasse em relação a 1990. Considerando que houve, no G20, redução na área total de floresta de todos os países, a absorção relativa foi de 8,33% conforme apresentado na Tabela 154.

Tabela 154 - Absorção de CO₂ e Emissão de GEE Índia

País	Absorção de CO ₂ (kt)	Absorção de CO ₂ (% G20)	Emissão de GEE (kt CO ₂)	Emissão de GEE (% G20)	Absorção / Emissão
Índia (1990)	48.509,15	2,2698%	1.373.242,37	6,02%	3,53%
Índia (2000)	49.609,99	2,3452%	1.961.267,30	7,74%	2,53%
Índia (2010)	51.919,41	2,4589%	2.504.939,51	8,03%	2,07%
Variação (%)	7,03%	8,33%	82,41%	33,26%	-41,32%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

A Índia, ao tornar-se a 3ª maior emissora de GEE do G20, também recebeu atenção quanto aos gases de efeito estufa liberados na atmosfera. As principais alterações ocorreram no dióxido de carbono, em que o país tornou-se o 3º maior emissor no grupo (causado pelas alterações na matriz energética), no gás metano (em que o país tornou-se o 2º maior emissor) e no óxido nitroso, causado pelo crescimento industrial no país. Os dados da posição relativa e participação nas emissões da Índia são apresentados na Tabela 155.

Tabela 155 - Posição relativa e participação nas emissões de GEE do G20 Índia

GEE	1990	2000	2010
Dióxido de Carbono (CO ₂)	6º (4,18%)	5º (6,26%)	3º (6,96%)
Metano (CH ₄)	4º (11,97%)	2º (13,45%)	2º (12,32%)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	3º (9,27%)	3º (11,22%)	3º (12,42%)
Outros (HFC, PFC, SF ₆)	7º (3,86%)	8º (3,02%)	7º (2,62%)
Total GEE	4º (6,02%)	4º (7,74%)	3º (8,03%)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados do World Bank

Com relação ao consumo energético, houve um aumento de consumo relativo do país, juntamente com um aumento de emissões de gases de efeito estufa. A área de floresta também teve aumento, refletindo no aumento de absorção de CO₂. Observa-se também no país o aumento no consumo relativo de carvão e petróleo, fontes altamente poluentes.

Ao analisar o desempenho, nota-se que a Índia apresentou-se ineficiente em todos os períodos analisados, tanto com dados em períodos isolados (DEA Temporal) quando na análise de dados em painel. Isso significa que a Índia, além de ser ineficiente quando comparada aos outros países do G20 em todos os períodos analisados isoladamente, também apresentou piora de desempenho quando comparada a ela mesma com base no ano de 1990. Os dados da análise de eficiência da Índia são apresentados na Tabela 156.

Tabela 156 - Eficiência Temporal e com dados em painel (Índia)

País	DEA (Temporal)	DEA (Painel)
Índia (1990)	11,00%	11,00%
Índia (2000)	6,30%	2,60%
Índia (2010)	5,00%	1,40%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos relatórios do software DEA Frontier

De maneira resumida o desempenho da Índia é resultado do aumento relativo no uso de combustíveis fósseis poluentes (carvão e petróleo) e do aumento do consumo energético do país. As mudanças no uso da terra, apesar de servirem para mitigar os efeitos das emissões de gases estufa não foram suficientes para reduzir as emissões.

A seguir são apresentadas as principais constatações sobre a evolução dos indicadores de desempenho.

6.9 Síntese da Análise de Eficiência

A síntese da análise de eficiência envolve a análise do quadro de matriz energética (Quadro 19), quadro resumo do consumo, absorção, emissões a análise envoltória (Quadro 20), quadro resumo da eficiência dos países (Quadro 21) e mapa dos *scores* dos países (Figura 46 e Figura 47).

6.9.1 Quadro Matriz Energética

O quadro resumo da matriz energética apresenta os países que melhoraram (▲), pioraram (▼) ou mantiveram constante (—) seu consumo das fontes energéticas em relação à própria matriz energética e em relação aos demais países do G20.

	Petróleo		Gás		Carvão		Nuclear		Hidrelétrica		Renováveis	
País	Matriz	G20	Matriz	G20	Matriz	G20	Matriz	G20	Matriz	G20	Matriz	G20
África do Sul	▼	▼	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▼	▼	▲	▲
Alemanha	▲	▲	▲	▼	▲	▲	▼	▼	▲	▼	▲	▲
Arábia Saudita	▲	▼	▲	▲	—	—	—	—	—	—	—	—
Argentina	▲	▼	▲	▲	▲	▲	▼	▼	▲	▲	▲	▲
Austrália	▲	▼	▲	▼	▼	▲	—	—	▼	▼	▲	▲
Brasil	▲	▼	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▼	▲	▲	▲
Canadá	▼	▼	▲	▼	▲	▲	▼	▼	▼	▼	▲	▼
China	▼	▼	▲	▲	▲	▼	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Coreia do Sul	▲	▼	▲	▲	▼	▼	▼	▲	▼	▼	▲	▲
Estados Unidos	▲	▲	▲	▼	▲	▲	▲	▼	▼	▼	▲	▼
França	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▼	▲	▼	▲	▲
Índia	▲	▼	▲	▲	▲	▼	▲	▲	▼	▲	▲	▲
Indonésia	▲	▼	▼	▲	▼	▼	—	—	▲	▲	▲	▲
Irã	▲	▼	▲	▲	▲	▲	—	—	▼	▼	▲	▲
Itália	▲	▲	▲	▲	▲	▲	—	—	▲	▼	▲	▲
Japão	▲	▲	▲	▲	▼	▲	▲	▲	▼	▼	▲	▼
México	▲	▲	▲	▲	▼	▼	▲	▲	▼	▼	▲	▼
Reino Unido	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▼	▼	▼	▼	▲	▲
Rússia	▲	▲	▲	▼	▲	▲	▲	▼	▲	▼	▲	▲
Turquia	▲	▼	▲	▲	▲	▼	—	—	▼	▲	▲	▲

Quadro 19 - Quadro resumo do desempenho das matrizes energéticas

Fonte: Autor

Os dados do Quadro 19 apresentam um resumo das principais alterações nas matrizes energéticas dos países. Alguns destaques mais evidentes nesta análise são apresentados a seguir.

Com relação às matrizes energéticas, notou-se que a grande maioria reduziu a participação do petróleo na matriz energética e aumentou a participação do gás natural e de outras fontes renováveis. Dos países 17 países que reduziram a participação no consumo em sua própria matriz energética, 9 deles aumentaram seu consumo relativo (quando comparado com o G20), ou seja, reduziram a participação em sua própria matriz mas aumentaram a participação no consumo do volume consumido no grupo (outros países passaram a consumir relativamente menos). Com o gás natural, o número foi mais expressivo: 19 países aumentaram a participação do consumo desta fonte em sua própria matriz energética. No caso do carvão, apenas 5 países aumentaram a participação desta fonte na própria matriz energética, comprometendo o desempenho do país.

Com relação à energia nuclear, não houve consenso. Alguns países aumentaram a participação desta fonte em sua matriz energética (África do Sul, Brasil, China, Estados Unidos, França, Índia, Japão e México) enquanto outros países (Argentina, Canadá, Coreia do Sul e Reino Unido) reduziram a participação. Os demais países não fazem uso desta tecnologia como fonte energética.

O consumo de fonte de energia hidrelétrica na maioria dos países foi reduzido, indicando que a maioria dos países aumentou investimentos em outros recursos (como por exemplo, gás natural). Com relação aos outros recursos renováveis todos os países (com exceção da Arábia Saudita) aumentaram sua participação na própria matriz energética, contudo por ter participação relativamente pequena na composição da matriz, as alterações na eficiência dos países ainda são limitadas.

A seguir são apresentados os dados sobre consumo, absorção, emissões e eficiência.

6.9.2 Quadro Consumo, Absorção, Emissões e Análise Envoltória

O quadro resumo a seguir apresenta os países que melhoraram (▲), pioraram (▼) ou mantiveram constante (—) seu consumo, absorção, emissões e desempenho e, também seu desempenho comparado aos demais países do G20.

País	Consumo		Absorção		Emissões		DEA	
	País	G20	País	G20	País	G20	Temporal	Painel
África do Sul	▼	▲	—	▲	▼	▲	—	▼
Alemanha	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Arábia Saudita	▼	▼	—	▲	▼	▼	—	▼
Argentina	▼	▼	▼	▼	▼	▲	—	▼
Austrália	▼	▲	▼	▼	▼	▲	▲	▼
Brasil	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
Canadá	▼	▲	—	▲	▼	▲	▲	▼
China	▼	▼	▲	▲	▼	▼	▼	▼
Coreia do Sul	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
Estados Unidos	▼	▲	▲	▲	▼	▲	▲	▼
França	▼	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▼
Índia	▼	▼	▲	▲	▼	▼	▼	▼
Indonésia	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
Irã	▼	▼	—	▲	▼	▼	—	▼
Itália	▼	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Japão	▼	▲	▲	▲	▼	▲	▲	▼
México	▼	▼	▼	▼	▼	▲	▲	▼
Reino Unido	▼	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Rússia	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Turquia	▼	▼	▲	▲	▼	▼	—	▼

Quadro 20 - Quadro resumo do consumo, absorção, emissões e desempenho

Fonte: Autor

O Quadro 20 apresenta dados do consumo, absorção, emissões e desempenho (DEA). Com relação ao consumo, apenas a Alemanha e a Rússia tiveram redução no consumo energético e, juntamente com a Itália e Reino Unido tiveram melhoras no desempenho temporal e em painel.

Com base neste quadro pode-se observar que apenas dois países (Alemanha e Rússia) reduziram o consumo energético, devido a alterações na matriz energética e aumento da área de floresta. No caso da Rússia, a redução no consumo energético pode estar ligada ao período que corresponde ao primeiro decênio analisado (1991-2000), em que o país acabara de ter sido desmembrado da antiga União Soviética (URSS) e estava em processo de reorganização política, econômica e produtiva.

Com relação às mudanças no uso da terra houve redução da área total de floresta no grupo analisado. Assim, os países que aumentaram (ou mantiveram inalterada) sua área de floresta, melhoraram o desempenho em relação ao G20. Outra observação quanto às mudanças no uso da terra é que nenhum país com redução na área de floresta melhorou seu desempenho ao longo do tempo.

As características dos grupos analisados, incluindo as justificativas de seus desempenhos são apresentadas no Quadro 21.

Categoria	Países	Características
Sempre eficientes	África do Sul Arábia Saudita Turquia Argentina	São países com baixo consumo em 1990 (15ª, 16ª, 19ª e 20ª posição respectivamente) e baixas emissões (14ª, 18ª, 20ª e 19ª posição respectivamente). Todos os países deste grupo aumentaram a participação de gás natural e outros recursos renováveis na matriz e em maior intensidade que o grupo (consumo relativo), com exceção da Arábia Saudita que não faz uso de carvão e outros recursos renováveis. Todos os países deste grupo reduziram o consumo do carvão, sendo que apenas a Turquia não melhorou o consumo em relação ao G20.
Países que se tornaram eficientes	Austrália Irã	Os países deste grupo aumentaram em sua matriz energética o consumo de combustíveis menos poluentes (gás natural e outros renováveis), além de reduzir o consumo de petróleo. Quanto ao carvão, apenas o Irã reduziu o consumo em sua matriz energética, mas os dois países tiveram redução no consumo relativo ao G20. Apesar do uso na Austrália, carvão utilizado no país é de alta qualidade (maior poder calorífico com menor emissão de GEE)
Países ineficientes com melhora na eficiência na análise temporal e na análise com dados em painel	Alemanha Itália Reino Unido Rússia	Os países deste grupo, que melhoraram eficiência temporal, e com dados em painel, tiveram como características a redução no consumo de fontes mais poluentes (carvão e petróleo) em sua matriz energética e aumento no consumo de fontes menos poluentes (gás natural e outros renováveis). Dentre estes países apenas o Reino Unido não melhorou o consumo de energia hidrelétrica (menos poluente). Como diferencial, este grupo também reduziu o consumo relativo ao G20 (sendo que a Alemanha e Rússia reduziram seu consumo energético) e aumentaram a área de floresta (mudança no uso da terra) e absorção. Desta forma, nestes países houve redução nas emissões quando comparadas à 1990.

Países ineficientes com melhora apenas na eficiência temporal	França Canadá, Estados Unidos Japão México	Este grupo apresenta algumas características comuns, dentre elas o aumento no consumo de gás natural e de recursos renováveis em sua matriz energética (fatores positivos) e o aumento consumo energético de cada país (fator negativo). Em todos os países a participação do consumo relativo de energia hidrelétrica piorou em relação ao grupo. Com exceção do México, nos demais países deste grupo o aumento do consumo de carvão foi menor que o aumento médio do grupo, fazendo com que o consumo relativo de carvão nestes países fosse reduzido.
Países que se tornaram ineficientes	Brasil Coreia do Sul Indonésia	Em 1990 os países deste grupo tiveram <i>score</i> de eficiência de 100% por razões diferenciadas. A Indonésia tinha baixo consumo relativo (ocupando a 18ª posição no consumo do G20), a Coreia do Sul tinha baixa dependência de combustíveis fósseis (sendo que o país era o 16ª maior dependente dentre os 20 países) e o Brasil era o país com menor dependência de combustíveis fósseis e com a maior participação em recursos renováveis (hidrelétricas e outras fontes renováveis). As razões para que eles países perdessem eficiência ao longo do tempo foram o aumento no consumo energético, superior à média do G20, e a redução da área de floresta. Em todos os países houve aumento de outros recursos renováveis em sua matriz energética (com pequena participação na matriz) e redução do consumo de petróleo. O Brasil tornou-se o 8º país com maior consumo energético e o 6º em emissões de GEE, a Coreia do Sul aumentou a dependência de combustíveis fósseis e passou a ser o 9º país em consumo e o 11º em emissões e a Indonésia foi o país que mais reduziu a área de floresta.
Países ineficientes com queda na eficiência	China e Índia	A China e Índia, os dois países mais populosos do mundo, tinham grandes emissões de GEE em 1990 (2ª e 4ª maiores emissões respectivamente). Com alto consumo energético no ano base, os países ainda aumentaram o consumo de maneira mais acentuada que outros países do G20. O aumento no consumo de gás natural, outros recursos renováveis, energia nuclear e também aumento na área de floresta não foram suficientes para evitar queda na eficiência. Outra característica é que, ainda que os países tenham reduzido a participação do carvão em sua matriz energética, em comparação ao G20 houve aumento relativo no consumo.

Quadro 21 - Quadro resumo da eficiência dos países

Com base neste quadro pode-se observar os principais fatores responsáveis pelo desempenho dos países, o que permite agrupá-los por desempenho. As demais observações sobre o desempenho são feitas nas considerações finais.

6.9.3 Variações nos *scores* de eficiência entre 1990 e 2010

Na subseção 6.2 foram apresentados os *scores* de eficiência de dois modelos, sendo um deles (utilizado neste trabalho) considerando no *output*, além das GEE, o coeficiente de mudança no uso da terra e o outro, considerando apenas a emissão de gases de efeito estufa.

Como forma de comparação para que fossem plotados os dados referentes à análise temporal e com dados em painel, foi calculada a variação entre os *scores* entre 1990 (ano base) e 2010 (última medição) dos dois modelos. Os resultados são apresentados na Tabela 157.

Tabela 157 - Variação nos scores entre 1990 e 2010 (nos modelos com e sem C_{mut})

Países	Variação 1990-2010 (com C_{mut})		Variação 1990-2010 (sem C_{mut})	
	$\Delta\%$ Temporal	$\Delta\%$ Painei	$\Delta\%$ Temporal	$\Delta\%$ Painei
África do Sul	0,0%	-34,1%	0,0%	-34,1%
Alemanha	298,3%	48,3%	286,9%	47,5%
Arábia Saudita	0,0%	-50,4%	0,0%	-50,4%
Argentina	0,0%	-26,5%	0,0%	-25,0%
Austrália	79,2%	-19,2%	97,6%	-17,8%
Brasil	-42,7%	-84,1%	-16,2%	-76,6%
Canadá	46,8%	-46,3%	74,8%	-34,6%
China	-95,5%	-99,1%	-94,5%	-99,1%
Coreia do Sul	-45,5%	-81,3%	-45,2%	-81,3%
Estados Unidos	100,0%	-50,0%	100,0%	-50,0%
França	200,0%	-2,9%	199,4%	-1,1%
Índia	-54,5%	-87,3%	-52,3%	-87,2%
Indonésia	-25,7%	-65,5%	-17,0%	-62,8%
Irã	0,0%	-61,1%	0,0%	-61,1%
Itália	127,7%	7,6%	123,9%	7,2%
Japão	122,9%	-22,9%	122,2%	-22,2%
México	0,8%	-63,5%	6,2%	-60,0%
Reino Unido	395,3%	57,4%	391,3%	57,0%
Rússia	794,7%	31,6%	664,3%	14,3%
Turquia	0,0%	-43,1%	0,0%	-42,6%

Fonte: Elaborado pelo autor, com base nos relatórios do software DEA Frontier

Com base nos dados desta tabela foram criados dois gráficos, com a representação dos modelos apresentados anteriormente. Assim, na Figura 44 estão plotados os dados do modelo deste trabalho, considerando no *output* a influência da mudança no uso da terra enquanto na Figura 45 estão plotados os dados do modelo que considera apenas a emissão de GEE no *output*.

A Figura 46 apresenta os países segundo as variações no *score* temporal (eixo X) e no *score* com dados em painel (eixo Y) no modelo que considera as mudanças no uso da terra. Nota-se que há a formação de grupos em função do desempenho, com segmentação próxima à que foi apresentada neste trabalho. Há o grupo dos países com melhora no desempenho, tanto quando comparado a outros países quanto quando comparado ao seu próprio desempenho ao longo do tempo,

representado pelos países Rússia, Reino Unido, Alemanha e Itália. A França se aproxima do grupo, com tendência de melhora de desempenho.

Os grupos que estão localizados sobre o eixo Y, são os países que mantiveram seu desempenho em 100% (sem variação na análise temporal), contudo todos eles perderam eficiência ao longo do tempo. Há ainda o grupo de países que melhorou seu desempenho em relação à outros países do grupo, mas com queda da eficiência ao longo do tempo (Estados Unidos, Canadá, Japão e México). Por fim, observa-se no terceiro um grupo com baixo desempenho, com países que perderam desempenho quando comparado a outros países e perderam eficiência ao longo do tempo.

Figura 46 - Mapa dos scores dos países (com mudanças no uso da terra)

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 47 são apresentados os países segundo o modelo que considera apenas as emissões de GEE no *output*. As variações no *score* temporal são plotadas no eixo X enquanto as variações no *score* com dados em painel são plotadas no eixo Y. Observa-se na figura que os países ocupam praticamente as mesmas posições, com pequenas alterações entre os países Brasil e Coreia do Sul, Canadá e Turquia e Irã e México. Decorre-se desta comparação que a inserção do coeficiente de mudança no uso da terra não altera substancialmente o desempenho dos países (uma vez que as emissões relativas de GEE pelas florestas são pequenas quando comparadas à outras fontes de carbono), contudo é preponderante para melhorar o desempenho do país ao longo do tempo.

Figura 47 - Mapa dos scores dos países (sem coeficiente de mudanças no uso da terra)

Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir são apresentadas as considerações finais do trabalho.

7 Discussão

Este trabalho buscou esclarecer quais os efeitos das alterações nas matrizes energéticas e das mudanças no uso da terra na redução de emissão de gases de efeito estufa. Assim, com base no problema de pesquisa³⁰ e nos procedimentos metodológicos³¹ adotados, foi feita a análise de desempenho dos países que compõem o G20 entre 1990 e 2010, considerando as mudanças energéticas dos países, juntamente com as alterações na área de floresta. Com isso buscou-se analisar quais mudanças e configurações permitiam minimizar a emissão dos gases de efeito estufa produzidos pelos países.

Quanto ao consumo de combustíveis fósseis, foram observados apenas alguns pontos em comum para todos os países, como o aumento da participação do gás na matriz energética (com exceção da Indonésia). Da mesma forma, a maioria dos países reduziu o consumo de petróleo e de carvão, alterando assim as características das emissões de GEE. Alguns países, no entanto, priorizaram seus recursos em fontes mais poluentes como o caso da África do Sul, Canadá e China (que aumentaram o consumo de petróleo), da Indonésia (que reduziu o consumo de gás natural em sua matriz energética) e a Austrália, Coreia do Sul, Indonésia, Japão e México (que aumentaram o consumo de carvão em seus países).

Um destaque encontrado na análise aponta que todos os países que aumentaram a participação relativa no consumo de carvão ou de petróleo pioraram o desempenho ao longo do tempo (análise com dados em painel), sendo que os países que aumentaram a participação relativa no consumo de ambas as fontes também pioraram o desempenho em relação aos demais países (análise temporal). Esse resultado corrobora os estudos de Spadaro, Langlois e Hamilton (2000) e ABEN (2008) que apontam que o uso de carvão e petróleo são os principais responsáveis pelas emissões de GEEs, utilizado como *output* nesta tese.

Com relação ao gás natural, não houve consenso, pois alguns países que reduziram a participação no consumo de gás natural tiveram melhores desempenhos em função da combinação de outros fatores (petróleo, carvão, consumo e alterações na área de floresta). Dos países que aumentaram a participação da energia nuclear em sua matriz energética, apenas três países pioraram seu desempenho, sendo que dois deles (China e Índia, os dois países mais populosos do mundo e com

³⁰ De que maneira as alterações na matriz energética e as variações na área de floresta (florestamento, reflorestamento ou desmatamento) podem garantir o mesmo padrão de produção para os países, com menor emissão de gases de efeito estufa?

³¹ Pesquisa explicativa com uso do método quantitativo DEA para análise de eficiência.

maior participação no consumo e emissões) tiveram seu desempenho reduzido devido ao aumento de consumo ao longo do tempo enquanto o terceiro país, o Brasil, teve seu desempenho comprometido pelo desmatamento.

Com relação às hidrelétricas e outras fontes renováveis também não se pode tirar conclusões precisas, uma vez que a alteração no uso de hidrelétricas gerou resultados diversos no desempenho dos países, devido à combinação de outros fatores (outras fontes, consumo e mudanças no uso da terra) e, no caso de outras fontes renováveis, não se pode inferir relação devido o fato de que todos os países aumentaram a participação do consumo destas fontes em sua matriz energética.

Com relação às mudanças no uso da terra, todos os países que reduziram a área de floresta (Argentina, Austrália, Brasil, Coreia do Sul, Indonésia e México) tiveram perda de eficiência na análise de desempenho com dados em painel, indicando que tinham desempenho melhor no ano base (1990), o que reforça as considerações de Marengo (2006) e Höhne *et al.* (2007) que sugerem que as atividades relacionadas ao uso da terra e florestas podem ser usadas como forma de reduzir as emissões de GEE e que o desmatamento reduz a capacidade de absorção das florestas além de eliminar gases para atmosfera (no caso de queimadas).

Dos países que reduziram a área de floresta apenas a Austrália e o México melhoraram seu desempenho na análise temporal. Na Austrália o diferencial foi que o país teve redução na participação do consumo de carvão em relação ao G20, além de reduzir a participação de petróleo e aumentar a participação de gás natural em sua matriz energética enquanto no caso do México o país reduziu o consumo relativo de petróleo e aumentou o consumo de gás natural e energia nuclear. Dos países que pioraram seu desempenho, a Coreia do Sul e a Indonésia aumentaram o consumo de carvão em sua matriz energética enquanto o Brasil, juntamente com a Coreia do Sul, reduziu sua participação no consumo de hidrelétricas.

Nos países onde não houve mudança no uso da terra, não houve aumento de eficiência com dados em painel, sugerindo que o aumento na área de floresta pode ser um fator importante para que o país melhore seu desempenho em relação a ele mesmo no ano base. Com relação aos países que aumentaram sua área de floresta, os países são divididos em dois grupos: (1) grupo dos países que melhoraram seu desempenho em relação aos demais países do G20 (análise temporal) e os países que pioraram seu desempenho em relação ao grupo.

Dos países que melhoraram seu desempenho na análise temporal (Alemanha, Estados Unidos, França, Itália, Japão, Reino Unido e Rússia) apenas os Estados Unidos, França e Japão não melhoraram seu desempenho em relação ao próprio desempenho em 1990 (análise com dados em painel). Nestes três países o aumento do consumo energético foi um dos fatores responsáveis pelo desempenho inferior, sendo que no Japão, além do aumento do consumo energético também houve aumento da participação do carvão em sua matriz energética. No caso dos Estados Unidos, além do aumento do consumo (em um país já com alto consumo em 1990) houve redução na participação de hidrelétricas e queda na participação do consumo relativo de gás natural do G20 (ambos menos poluentes). No caso da França, o consumo energético foi a principal causa para o desempenho do país que teve apenas uma pequena perda de desempenho na análise com dados em painel.

Os países que pioraram seu desempenho (China e Índia) alteraram sua matriz energética para o consumo de fontes menos poluentes (aumento do consumo do gás natural, fontes renováveis e energia nuclear além da redução do uso do carvão) e aumentaram a área de floresta. O baixo desempenho, no entanto, é resultado do alto consumo energético (desde 1990) e da participação dos países no consumo de combustíveis fósseis poluentes no grupo (aumento no consumo relativo de carvão e petróleo).

Com relação ao consumo, com exceção da Rússia no decênio 1991-2000, todos os países tiveram crescimento econômico positivo, sugerindo aumento do consumo e consequente aumento da produção, do emprego e da renda. Desta forma, em maior ou menor grau, entre 1990 e 2010 houve crescimento econômico nos países analisados. Conforme discutido anteriormente, o crescimento econômico gera aumento no consumo e nas emissões de GEE.

Dentre os países analisados, dois países que reduziram o consumo energético, sendo que a Rússia pode ter reduzido seu consumo, em parte, pela redução do crescimento na primeira década (1991-2000) enquanto a Alemanha teve crescimento econômico em todo período, com redução no consumo energético por alterações na matriz energética e mudanças no uso da terra. Os dois países, Alemanha e Rússia, melhoraram seu desempenho tanto na análise temporal quanto na análise com dados em painel devido às alterações nos próprios países.

Os países que aumentaram sua produção, de maneira mais acentuada que os demais países do G20, pioraram seu desempenho em relação ao próprio desempenho de 1990 (análise com dados em painel) e, na maioria dos casos, pioraram seu desempenho em relação aos demais países do grupo

(análise temporal). Alguns países, no entanto, que também aumentaram o consumo energético, conseguiram melhorar seu desempenho em relação a outros países do grupo (análise temporal). Nestes países, o aumento do consumo foi compensado pelas alterações positivas em quase todos os outros indicadores da matriz energética (redução do petróleo e carvão e aumento no consumo de fontes renováveis).

Assim, as alterações na matriz energética, em especial na redução do consumo de combustíveis fósseis carvão e petróleo ou na substituição destas fontes por gás natural (combustível fóssil menos poluente) permitem melhores desempenhos na emissão de gases de efeito estufa, em especial quando comparado a outros países (análise temporal). As alterações na matriz energética das outras fontes (energia nuclear, hidrelétrica e outras fontes renováveis) permitem ganhos de eficiência em caso de alterações combinadas na matriz dos países. Romeiro (2010) ainda aponta que, baseado no princípio de precaução, do ponto de vista da redução de risco, o ideal seria mudar imediatamente a matriz energética dos países, de modo a eliminar as emissões de gases de efeito estufa. Esta decisão em condições de incerteza, baseada em precaução, teria um alto custo político e econômico para os países envolvidos.

As mudanças no uso da terra, ainda que não alterem de maneira substancial o desempenho comparado dos países, permitem que os países melhorem o desempenho ao longo do tempo (análise com dados em painel). Isto significa que, caso um país queira melhorar seu desempenho em relação à um ano base (como proposto pela ONU), é necessário que os países direcionem seus esforços para o florestamento ou reflorestamento. Neste sentido Borges (2011, p. 99) destaca que, dentre as propostas que têm sido discutidas para estímulos de proteção da área de florestas, florestamento e reflorestamento, uma delas sugere que uma proporção dos fundos gerados através do REDD deveria ser distribuída a países com grande cobertura florestal e tenham baixos índices de desmatamento, baseado no argumento que “se estes países não forem recompensados por proteger seus estoques atuais haverá um incentivo perverso para derrubar suas florestas em troca de empreendimentos mais lucrativos”.

Outra constatação foi que os países que reduziram sua área de floresta (desmatamento) pioraram seu desempenho ao longo do tempo, potencializando as emissões de GEE, tanto pelas queimadas e liberação direta de CO₂ no meio ambiente quanto pela redução de sequestro e absorção pelo meio ambiente (MARENGO, 2006, HÖHNE ET AL., 2007).

8 Conclusão

Alguns países reduziram o consumo energético mesmo com crescimento econômico, sugerindo que existem alternativas para redução nas emissões, como o uso de tecnologias mais modernas. Com tecnologias mais novas os países tendem a emitir menos poluentes ao meio ambiente no processo de geração de energia. Países mais desenvolvidos têm alterado seu processo de produção neste sentido enquanto países em desenvolvimento o fazem mais tardiamente.

O uso de tecnologias mais limpas (baseadas em energia eólica, solar, movimento das marés e outras fontes) pode permitir importante redução nas emissões, mas conforme discutido neste trabalho, com um custo altíssimo e dependente de fortes investimentos e incentivos dos governos, conforme apresentado por EIA (2013).

O aquecimento global é um fato com possíveis consequências desastrosas para os países e passível de ser parcialmente corrigido. Para isto é preciso uma maior conscientização dos países para que as decisões sejam tomadas em benefício comum (internacional) ao invés de benefícios particulares (domésticos), o que inclui maior envolvimento e participação dos governos nas negociações ambientais e no financiamento de projetos mais limpos.

Como sugestões para trabalhos futuros, uma vez que foi observado que as alterações nas matrizes energéticas podem reduzir as emissões de GEE, o estudo dos custos das alterações das matrizes energéticas é pertinente. Desta forma, um estudo neste âmbito amplia esta tese, quantificando os esforços financeiros necessários para a redução nas emissões de gases de efeito estufa. Outras abordagens poderiam ser feitas considerando um número maior de países e possíveis outras restrições (como o tamanho das reservas energéticas de cada país e recursos disponíveis para investimento em novas matrizes energéticas). Por fim, outra sugestão é a realização de previsões a partir dos resultados obtidos para 2020, por meio de Simulação de Monte Carlo ou regressão.

Referencial Bibliográfico

ABEN **Análise comparativa das alternativas energéticas quanto às emissões diretas e indiretas de CO₂**. Associação Brasileira de Energia Nuclear, 2008. Disponível em: http://www.zonaeletrica.com.br/downloads/20080410_ibama_3.pdf, Acesso em 14/08/2012

ABNT **Associação Brasileira de Normas e Técnicas**. NBR 6023: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002

ABRANCHES, S. **Copenhague: antes e depois**. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2010

AIEA Nuclear Power Reactors in the World. International Atomic Energy Agency (IAEA), United Nations, 2012

ALHO, C. **The importance of biodiversity to human health: An ecological Perspective**. Estudos Avançados, v. 26, n. 74, 2012, pp. 151-164

ALMEIDA, M. **Infraestrutura produtiva: uma sistematização dos métodos, técnicas e modelos para análise de desempenho**. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), 2007

ALMEIDA, P. **Fronteira de produção e eficiência técnica da agropecuária brasileira em 2006**. Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Economia Aplicada da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP), 2012

ALVIM, C. F.; EIDELMAN, F.; MAFRA, O.; FERREIRA, O. **Nuclear energy over a 30-year scenario**. Estudos Avançados. [online]. 2007, vol.21, n.59, pp. 197-220

AMACHER, G.; KOSKELA, E.; OLLIKAINEN, M. **Environmental quality competition and eco-labeling**. Journal of Environmental Economics and Management, n. 47, 2004, pp. 284-306

ANDRADE, R.O.B.; TACHIZAWA, T.; CARVALHO, A.B. **Gestão Ambiental: Enfoque Estratégico Aplicado ao Desenvolvimento Sustentável**. São Paulo: MAKRON Books, 2002, 232p

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). 3ª Edição, Brasília: Aneel, 2008

ANGULO MEZA L.; MELLO, J. C. C. B. S.; GOMES, E. G; FERNANDES, A. J. S. **Seleção de variáveis em DEA aplicada a uma análise do mercado de energia elétrica**. Investigação Operacional, v. 27, n. 1, 2007, pp. 21-36

AVKIRAN, N.; PARKER, B. **Pushing the DEA research envelope**. Socio-Economic Planning Sciences, n. 44, 2010, pp. 1-7

AZAMBUJA, A. **Análise de eficiência na gestão do transporte urbano por ônibus em municípios brasileiros**. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, 2002

BACCINI, A.; GOETZ, S. J.; WALKER, W. S.; LAPORTE, N. T.; SUN, M.; SULLA-MENASHE, D.; HACKLER, J.; BECK, P. S. A.; DUBAYAH, R.; FRIEDL, M. A.; SAMANTA, S.; HOUGHTON, R. A. **Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps**. Nature Climate Change v.2, Mar, 2012

- BAIARDI, D; MENEGATTI, M. **Pigouvian tax, abatement policies and uncertainty on the environment.** Journal of Economics, Springer, v. 103, n. 3, 2011, pp. 221-251
- BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. **Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis.** Management Science, v. 30, n. 9, sep, 1984
- BARBIERI, J. C. **Desenvolvimento e meio ambiente: as estratégias de mudanças da agenda 21.** Petrópolis: Vozes, 1997, 156p
- BARRO, R; REDLICK, C. **Macroeconomic Effects from Government Purchases and Taxes.** The Quarterly Journal of Economics, 2011, pp. 51-102
- BEHRENFELD, M. J., O'MALLEY, R.T., SIEGEL, D. A., MCCLAIN, C. R., SARMIENTO, J. L., FELDMAN, G. C., MILLIGAN, A. J., FALKOWSKI, P. J., LETELIER, R. M., BOSS, E. S. **Climate-driven trends in contemporary ocean productivity.** Nature, Vol 444, dec, 2006
- BEHROUZNI, A.; SABERI, M.; AZADEH, A.; ASADZADEH, S.; PAZHOHESHFAR, P. **An adaptive network based fuzzy inference system-fuzzy data envelopment analysis for gas consumption forecasting and analysis: the case of South America.** In: International conference on intelligent and advanced systems, ICIAS 2010; 2010
- BELLONI, A. **Uma Metodologia de Avaliação da Eficiência Produtiva de Universidades Federais Brasileiras.** Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, 2000
- BERMANN, C. **Energia do Brasil. Para que? Para quem? Crise e alternativa pra um país sustentável.** São Paulo: Livraria da Física, 2001
- BI, G.; LIANG, L.; WU, J. **Radial and Non-Radial DEA Models Undesirable Outputs: An Application to OECD Countries.** Robotics and CIM, n.2, v.2, 2010, pp. 133-145
- BIAN, Y., YANG, F. **Resource and environment efficiency analysis of provinces in China: A DEA approach based on Shannon's entropy.** Energy Policy, n. 38, 2010, pp. 1909–1917
- BIAN, Y.; HE, P.; XU, H. **Estimation of potential energy saving and carbon dioxide emission reduction in China based on an extended non-radial DEA approach.** Energy Policy, v. 63, 2013, pp. 962–971
- BLEDA, M.; VALENTE, M. **Graded eco-labels: A demand-oriented approach to reduce pollution.** Technological Forecasting & Social Change, n. 76, 2009, pp. 512-524
- BORGES, L. **Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação – REDD: desafios e oportunidades para o Brasil no contexto das mudanças climáticas.** Dissertação de Mestrado submetida ao Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília (UNB), 2011
- BOSETTI, V.; BUCHNER, B. **Data Envelopment Analysis of different climate policy scenarios.** Ecological Economics, n. 68, 2009, pp. 1340–1354
- BP **Statistical Review of World Energy.** Grupo BP, 2008. Disponível em http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/downloads/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_review_2008.pdf

BP **Statistical Review of World Energy**. Grupo BP, 2013. Disponível em http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/statistical_review_of_world_energy_2013.pdf, Acesso em 09/01/2014

BP **Statistical Review of World Energy**. Grupo BP, Jun, 2012 Disponível em http://www.bp.com/assets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2011/STAGING/local_assets/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2012.pdf, Acesso em 16/09/2012

BRASIL. **Manual de ajuda para o controle das substâncias que destroem a camada de ozônio - SDOs**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, IBAMA/MMA/GTZ, 2009

BRESSER-PEREIRA, L. C. **A crise financeira global e depois: um novo capitalismo?** Novos Estudos – CEBRAP, n.86, 2010, pp. 51-72

BRESSER-PEREIRA, L. C. **A taxa de câmbio no centro da teoria do desenvolvimento**. Estudos Avançados, v. 26, n.75, 2012, pp. 7-28

BRONZATTI, F. L.; IAROZINSKI NETO, A. Matrizes energéticas no Brasil: Cenário 2010–2030. **XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, p. 13-16, 2008.

BUTCHART, S.; WALPOLE, M.; COLLEN, B.; STRIEN, A.; SCHARLEMANN, J.; ALMOND, R.; BAILLIE, J.; BOMHARD, B.; BROWN, C.; BRUNO, J.; CARPENTER, K.; CARR, G.; CHANSON, J.; CHENERY, A.; CSIRKE, J.; DAVIDSON, N.; DENTENER, F.; FOSTER, M.; GALLI, A.; GALLOWAY, J.; GENOVESI, P.; GREGORY, R.; HOCKINGS, M.; KAPOV, V.; LAMARQUE, J.; LEVERINGTON, F.; LOH, J.; MCGEOCH, M.; MCRAE, L.; MINASYAN, A.; MORCILLO, M.; OLDFIELD, T.; PAULY, D.; QUADER, S.; REVENGA, C.; SAUER, J.; SKOLNIK, B.; SPEAR, D.; STANWELL-SMITH, D.; STUART, S.; SYMES, A.; TIERNEY, M.; TYRRELL, T.; VIÉ, J.; WATSON, R.; **Global Biodiversity: Indicators of Recent Declines**. Science, v. 328, 2010, pp. 1164-1166

CAMPELLO, C. A. G. B. **Eficiência Municipal: um estudo no Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003

CARLUCCI, F. V. **Aplicação da Análise Envolvória de Dados (DEA) para avaliação do impacto das variáveis tamanho e localização na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar na produção de açúcar e etanol no Brasil**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Administração de Organizações da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo (FEARP-USP), 2012

CARSON, R. **Silent Spring**. Mariner Books, 2002 (publicado originalmente pela Editora Houghton Mifflin, 1962)

ÇELEN, A. **Efficiency and productivity (TFP) of the Turkish electricity distribution companies: An application of two-stage (DEA&Tobit) analysis**. Energy Policy, n. 63, 2013, pp. 300-310

CENAMO, M. C. **Mudanças Climáticas, o Protocolo de Quioto e mercado de carbono**. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), ESALQ USP. Piracicaba: 2004

- CHARNES, A.; COOPER, W. W.; LEWIN, A.; SEIFORD, L. **Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Applications**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1997
- CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. **Measuring the efficiency of decision making units**. European Journal of Operational Research, v. 2, n. 6, 1978, pp. 429-444
- CHARNES, A.; COOPER, W. W.; SEIFORD, L.; STUTZ, J. **A multiplicative model for efficiency analysis**. Socio-Economic Planning Sciences, v. 16, n. 5, 1982, pp. 223-224
- CHARNES, A.; COOPER, W.W.; GOLANY, B.; SEIFORD, L.M.; STUTZ, J. **Foundations of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions**. Journal of Econometrics, v. 30, p. 91-107, 1985.
- CHIEN, T.; HU, J. **Renewable energy and macroeconomic efficiency of OECD and non-OECD economies**. Energy Policy, n. 35, 2007, pp. 3606-3615
- CHIU, Y.; WU, M. **Environmental Efficiency Evaluation in China: Application of 'Undesirable' Data Envelopment Analysis**. Polish Journal of Environment Studies, v. 19, n. 6, 2010, pp. 1159-1169
- CHOI, Y.; ZHANG, N.; CHEN, S.; LUO, C. **Quantitative Ecological Risk Analysis by Evaluating China's Eco-Efficiency and Its Determinants**. Human and Ecological Risk Assessment, v. 19, 2013, pp. 1324-1337
- CIA **The World Factbook 2011**. Washington, DC: Central Intelligence Agency, 2011
- CIA. **The World Factbook 2013**. Washington, DC: Central Intelligence Agency. 2013, Disponível em <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>, Acesso em 28/01/2013
- CLARK, W. C. **Carbon Dioxide Review**. Oxford University Press, New York, 1982
- COELI, T. **A Data Envelopment Analysis (Computer) Program**. CEPA Working Paper 96, 2008
- COELLI, T.; RAO, D. S. P.; O'DONNELL, C. J.; BATTESE, G. E. **An introduction to efficiency and productivity analysis**. London: Kluwer Academic Publishers. 1997. 275p.
- COLI, M.; NISSI, E.; RAPPOSELLI, A. **Monitoring environmental efficiency: An application to Italian provinces**. Environmental Modelling & Software, n. 26, 2011, pp. 38-43
- COLIN, E. C. **Pesquisa Operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas**. Rio de Janeiro: LTC, 2007
- COOPER, W.; LI, S.; SEIFORD, L.; TONE, K.; THRALL, R. ZHU, J. **Sensitivity and Stability Analysis in DEA: Some Recent Developments**. Journal of Productivity Analysis, v. 15, n.3, 2001, pp. 217-246
- COOPER, W.; SEIFORD, L.; TONE, K., **Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software**. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2007 (originalmente publicado em 2000)
- CORADESQUI, S.; SANTOS, P. R. D. **Análise de viabilidade econômica da produção de shale gas: um estudo de caso em Fayetteville**. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2013

CORREA, L. B. C. G. A. **Comércio e Meio Ambiente**. in Comércio e Meio Ambiente, Brasília, IRBr/FUNAG/Centro de Estudos Estratégicos, 1998, p11-30

CORTE, A.; SANQUETTA, C. R.; KIRCHNER, F. F.; ROSOT, N. C. **Os projetos de redução de emissões do desmatamento e da degradação florestal (REDD)**. FLORESTA, Curitiba, PR, v. 42, n. 1, jan./mar. 2012, pp. 177 – 188

COSTA, A.; OLIVEIRA, L.; LINS, M.; SILVA, A.; ARAUJO, M.; PEREIRA JR, A.; ROSA, L. **Sustainability analysis of biodiesel production: A review on different resources in Brazil**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n. 27, 2013, pp. 407-412

CRISTOBAL, J. **A multi criteria data envelopment analysis model to evaluate the efficiency of the Renewable Energy technologies**. Renewable Energy, n. 36, 2011, pp. 2742-2746

DAWSON, T. JACKSON, S. T.; HOUSE, J.; PRENTICE, I. C.; MACE, G. M. **Beyond Predictions: Biodiversity Conservation in a Changing Climate**. Science, v. 332, 2011, pp. 53-58

DE PRINS, D.; SIMAR, L.; TULKENS, H. **Measuring Labor Efficiency in Post Offices. The Performance of Public Enterprises: Concepts and Measurements**. M. Marchand, P. Pestieau, and H. Tulkens, Eds., Amsterdam: North Holland, 1984, pp. 243–268

EIA. **Levelized Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2013**. Report of the US Energy Information Administration (EIA) of the U.S. Department of Energy (DOE), 2013

EMROUZNEJADA, A.; PARKERB, B.; TAVARES, G. **Evaluation of research in efficiency and productivity: A survey and analysis of the first 30 years of scholarly literature in DEA**. Socio-Economic Planning Sciences, n. 42, 2008, pp. 151–157

EPE. Empresa de Pesquisa Energética, 2007. Disponível em www.epe.gov.br

FANG, C.; HU, J.; LOU, T. **Environment-adjusted total-factor energy efficiency of Taiwan's service sectors**. Energy Policy, n. 63, 2013, pp. 1160-1168

FANG, K.; HONG, X.; LI, S.; SONG, M.; ZHANG, J. **Choosing competitive industries in manufacturing of China under low-carbon economy. A Three-stage DEA analysis**. International Journal of Climate Change Strategies and Management, v. 5, n.4, 2013, pp. 431-444

FAO The **G77 and China. Rome Chapter**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013. Disponível em <http://www.fao.org/g77/g77-home/historical-background/en/>, Acesso em 08-09-2013

FAO. **Global Forest Resources Assessment 2010: Main Report**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010

FARRELL, M. J. **The Measurement of Productive Efficiency**. Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General), v. 120, n. 3, 1957, pp.253-290

FERENCZY, M. **O potencial do REDD como instrumento de materialização do princípio do desenvolvimento sustentável**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Direito Econômico e Socioambiental da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2012

- FEROZ, E.; RAAB, R. L.; ULLEBERG, G. T.; ALSHARIF, K. **Global warming and environmental production efficiency ranking of the Kyoto Protocol nations**. Journal of Environmental Management, n. 90, 2009, pp. 1178-1183
- FERREIRA, C. M. C.; GOMES, A. P. **Introdução à Análise Envoltória de Dados: Teoria, Modelos e Aplicações**. Viçosa: Editora UFV, 2012
- FRIEDMAN, B. **As Consequências Morais do Crescimento Econômico**. Editora: Record, 2009
- GARMAN, C.; JOHNSON, R. **Petróleo: O Brasil no contexto de um panorama global em transformação**. In GIAMBIAGI, F.; LUCAS, L. P. **Petróleo: Reforma e contrarreforma do setor petrolífero brasileiro**. Fabio Giambiagi e Luiz Paulo Vellozo Lucas (org.), Rio de Janeiro: Elsevier, 2013
- GIBBS, H. K.; BROWN, S.; NILES, J.O.; FOLEY, J. A. **Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: Making REDD a reality**. Environmental Research Letters, n2, 2007
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª Edição, São Paulo: Atlas, 2009
- GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 5ª Edição, São Paulo: Atlas, 2006
- GOLANY, B.; ROLL, Y. **An application procedure for DEA**. Omega International Journal of Management Science, v. 17, n. 3, 1989, pp. 237-1250
- GOMES, E.G.; SOARES DE MELLO, J.C.C.B.; BIONDI NETO, L. **Avaliação de eficiência por Análise de Envoltória de Dados: conceitos, aplicações à agricultura e integração com Sistemas de Informação Geográfica**. Eliane Gonçalves Gomes. – Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2003
- GORTE, R. W. **Carbon Sequestration in Forests**. Congressional Research Service, 2009
- GOTO, M.; OTSUKA, A.; SUEYOSHI, T. **DEA (Data Envelopment Analysis) assessment of operational and environmental efficiencies on Japanese regional industries**. Energy, 2014, pp. 1-15
- GRAINGER, A.; BOUCHER, D. H.; FRUMHOFF, P. C.; LAURANCE, W. F.; LOVEJOY, T.; MCNEELY, J.; NIEKISCH, M.; RAVEN, P.; SODHI, N. S.; VENTER, O.; PIMM, S. L.. **Biodiversity and REDD at Copenhagen**. Current Biology, v. 19, n. 21, 2009
- GREMAUD, A. ET AL. **Manual de Economia**. Organizadores: PINHO, D. B.; VASCONCELOS, M. A. S., 4ª Edição, São Paulo, Saraiva, 2003
- GRID ARENDAL. **Carbon management in natural ecosystems**. Centre collaborating with the United Nations Environment Programme (UNEP), 2013, Disponível em <http://www.grida.no/publications/rr/natural-fix/page/3725.aspx>
- HENDRICK, E. **Forests and the UNFCCC process - an overview**. In: Hendrick, E. and Black, K.G. (eds). **Forests, Carbon and Climate Change - Local and International Perspectives**. Dublin: COFORD, 2008
- HIDALGO, F. D.; NAIDU, S.; NICTER, S.; RICHARDSON, N. **Economic Determinants of Land Invasions**. The Review of Economics and Statistics, Aug., n. 92, v. 3, 2010, 505–523

- HILLIER, F.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. São Paulo, McGraw-Hill, 2006
- HINRICHS, R.; KLEINBACH, M.; REIS, L. B. **Energia e Meio Ambiente**. Tradução da 4ª Edição norte-americana, São Paulo: Cengage Learning, 2012
- HÖHNE, N.; WARTMANN, S.; HEROLD, A.; FREIBAUER, A. **The rules for land use, land use change and forestry under the Kyoto Protocol – lessons learned for the future climate negotiations**. *Environmental Science & Policy*, v. 10, 2007, p. 353-369.
- HOOPER, D.; ADAIR, E.; CARDINALE, B.; BYRNES, J.; HUNGATE, B.; MATULICH, K.; GONZALEZ, A.; DUFFY, J.; GAMFELDT, L.; O'CONNOR, M.. **A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change**. *Nature*, v. 486, n. 7401, 2012, pp. 105-108
- HSIANG, S. M., BURKE, M.; MIGUEL, E. **Quantifying the Influence of Climate on Human Conflict**. *Science*, n. 341, 2013
- HU, J.; LIO, M.; YE, F., LIN, C. **Environment-adjusted regional energy efficiency in Taiwan**. *Applied Energy*, n. 88, 2011, pp. 2893-2899
- IEA **Coal Information, 2009 Edition. Documentation for Beyond 2020 Files**. International Energy Agency, 2009
- IPCC **A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Land Use, Land Use Change and Forestry**. United Nations, 2000
- IPCC **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. IPCC AR5 Final Report, 2013
- IPCC **Climate Change: The IPCC 1990 and 1992 Assessments**. First Assessment Report Overview and Policymaker Summaries and 1992 IPCC Supplement, 1990, 178 pp
- IPCC. **Climate Change 1995: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. IPCC, Geneva, Switzerland, 1995, 63 pp.
- IPCC. **Climate Change 2001: Synthesis Report**. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 2001. 398 pp.
- IPCC. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 2007, 104 pp.
- IPCC. **Guidelines for national greenhouse gas inventories. Agriculture, forestry and other land use**, United Nations, v. 4, 2006 (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>)
- ISHIGURO, Y. **A energia nuclear para o Brasil**. São Paulo: Makron Books, 2002
- JUBRAN, A. J. **Modelo de análise de eficiência na administração pública: estudo aplicado às prefeituras brasileiras usando a análise envoltória de dados**. Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006

KASSAI, S. **Utilização da Análise por Envoltória de Dados (DEA) na Análise de Demonstrações Contábeis**. Tese apresentada ao Departamento de Contabilidade e Atuária da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo, 2002

KEELING, C. D.; BACASTOW, R. B.; BAINBRIDGE, A. E.; EKDAHL, C. A.; GUENTHER, P. R.; WATERMAN, L.S. **Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii**. Tellus, vol. 28, 1976, pp. 538-551

KNIGHT, F. **The Economic Organization**. Chicago: University of Chicago, 1933 (original de 1933, republicado em 1951 como Knight, F. H. The Economic Organization: with an Article, "Notes on Cost and Utility". New York: A. M. Kelley, 1951)

KOOPMANS, T. **An analysis of production as an efficient combination on activities**. In KOOPMANS, T. (Ed) Activity Analysis of Production and Allocation. New York: Wiley – Cowles Commission for Research in Economics, 1951

KRUGMAN, P. **Crises Monetárias**. National Bureau of Economic Research, Makron Books, 2001

KRUGMAN, P. **The Return of Depression Economics and the Crisis of 2008**. Penguin Books, London, 2008

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Metodologia Científica**. 4ª Edição, São Paulo, Atlas, 2004

LEE, W. **Benchmarking the energy efficiency of government buildings with data envelopment analysis**. Energy and Buildings, n. 40, 2008, pp. 891-895

LEITE, A. D. **Eficiência e desperdício da energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013

LIMA, M. S. O. **O gás natural como alternativa energética para a indústria têxtil: vantagem competitiva ou estratégia de sobrevivência?** Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, EESC-USP, 2007

LINDSETH, G. **The Cities for Climate Protection Campaign (CCPC) and the Framing of Local Climate Policy**. Local Environment, v. 9, n. 4, Aug, 2004, pp. 325-336

LIU, J. S, LU, L. Y. Y, LU, WM, LIN, B. J. Y. **A survey of DEA applications**. Omega 41, 2013a, pp. 893-902

LIU, J. S, LU, L. Y. Y, LU, WM, LIN, B. J. Y. **Data envelopment analysis 1978-2010: A citation-based literature survey**. Omega n. 41, 2013b, pp. 3-15

LOSTER, M. **Total Primary Energy Supply From Sunlight**, 2006. Disponível em http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/ , Acesso em

LOZANO, S.; GUTIERREZ, E. **Non-parametric frontier approach to modelling the relationships among population, GDP, energy consumption and CO2 emissions**. Ecological Economics, n. 66, 2008, pp. 687-699

LUBOWSKI, R.; PLANTINGA, A.; STAVINS, R. **Land-use change and carbon sinks: Econometric estimation of the carbon sequestration supply function**. Journal of Environmental Economics and Management, n. 51, 2006, pp.135-152

- MACHADO, A. C. **O que o pré-sal traz de novo para o país no sistema internacional.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia Política Internacional do Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2013
- MACHADO, P. **Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global.** Química Nova, v. 28, n. 2, 2005, pp. 329-334
- MAGNOLI, D.; ARAÚJO, R. **Geografia: paisagem e território: geografia geral e do Brasil.** 3 ed. ref. São Paulo: Ed. Moderna, 2001. 432 p.
- MALMQUIST, S. **Index numbers and indifference curves.** Trabajos de Estadística, v. 4, n. 1, 1953, pp. 209-242
- MALTHUS, T. **An Essay on the Principle of Population.** Printed for J. Johnson, 1798
- MANAGI, S.; KANEKO, S. **Environmental performance and returns to pollution abatement in China.** Ecological Economics, n. 68, 2009, pp.1643-1651
- MANKIW, N. G. **Principles of Economics.** 4th Edition, Cengage Learning, 2005
- MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI .** Ministério do Meio Ambiente, Brasília: MMA, 2006
- MARENGO, J. **Água e mudanças climáticas.** Estudos Avançados, v. 22, n. 63, 2008
- MARIANO, E. B. **Sistematização e comparação de técnicas, modelos e perspectivas não-paramétricas de análise de eficiência produtiva.** Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, EESC USP, São Carlos, 2008
- MATHIAS, M. C. **A formação da indústria global de gás natural: definição, condicionantes e desafios.** Tese de Doutorado em Engenharia apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2008
- MAY, P. H. **Economia do meio ambiente: teoria e prática.** Peter H. May (Organizador). 2^a Edição, Rio de Janeiro: Elsevier, 2010
- MEADOWS, D.; MEADOWS, D.; RANDERS, J.; BEHRENS III, W. **The Limits to growth: A report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind.** New York: Universe Books, 1972
- MELLO, J. C.; ANGULO MEZA, L.; GOMES, E.; BIONDI NETO, L. **Curso de Análise Envoltória de Dados.** XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Gramado (RS), 2005
- MELLO, J. C.; GOMES, E.; BIONDI NETO, L.; LINS, M. **Suavização da Fronteira DEA: o Caso BCC Tridimensional.** Associação Portuguesa de Investigação Operacional, n. 24, 2004, pp. 89-107
- MILIOS, J.; SOTIROPOULOS, D. **Crisis of Greece or crisis of the euro? A view from the European 'periphery'.** Journal of Balkan and Near Eastern Studies, v.12, n. 3, 2010

MMA. **Convenção da Diversidade Biológica**. Ministério do Meio Ambiente, 2013a, Disponível em <http://www.mma.gov.br/biodiversidade/convencao-da-diversidade-biologica>, Acesso em 18/09/2013

MMA. **Efeito Estufa e Aquecimento Global**. Ministério do Meio Ambiente, 2013b, Disponível em <http://www.mma.gov.br/clima/ciencia-da-mudanca-do-clima/efeito-estufa-e-aquecimento-global>, Acesso em 28/12/2013

MMA. **Impactos sobre a Biodiversidade**. Ministério do Meio Ambiente, 2013c. Disponível em <http://www.mma.gov.br/biodiversidade/biodiversidade-global/impactos>. Acesso em 14/11/2013

MOREIRA, D. A. **Pesquisa Operacional: Curso Introductório**. 2ª Edição, São Paulo, Cengage Learning, 2010

MRE. **Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável: Relatório da Delegação do Brasil**. Brasília, Fundação Alexandre de Gusmão (FUNAG), Ministério das Relações Exteriores, 2004

NASA **GISS Surface Temperature Analysis**. Goddard Institute for Space Studies. National Aeronautics and Space Administration, 2013. Disponível em http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3/, Acesso em 14/01/2013

NASA **Surface meteorology and Solar Energy: Methodology**. National Aeronautics and Space Administration 2006 Disponível em https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/documents/SSE_Methodology.pdf

NASCIMENTO, E. **Trajatória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico**. Estudos Avançados, vol.26, n.74, 2012, pp. 51-64

NEVES, M. J. **A participação internacional das organizações não governamentais por meio de redes sociais: A rede brasileira de integração dos povos**. Dissertação de Mestrado apresentada à Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2007

NIEDERAUER, C. A. P. **Avaliação dos bolsistas de Produtividade em Pesquisa da Engenharia da Produção utilizando Data Envelopment Analysis**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: UFSC, 1998

NIEDERAUER, C. A. P. **Ethos: um modelo para medir a produtividade relativa de pesquisadores baseado na análise por envoltória de dados**. Tese de Doutorado. Apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, UFSC, 2002.

NOOA. **National Oceanic & Atmospheric Administration** - Agência de Monitoramento Global de emissões atmosféricas.2013. Disponível em http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#mlo_full, Acesso em 22/12/2013

OCDE. **Uranium 2009: Resources, Production and Demand**. A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency, 2010

OLSON, D.; DINERSTEIN, E.; WIKRAMANAYAKE, E; BURGESS, N.; POWELL, G.; UNDERWOOD, E.; D'AMICO, J.; ITOUA, I.; STRAND, H.; MORRISON, J.; LOUCKS, C.; ALLNUTT, T.; RICKETTS, T.; KURA, Y.; LAMOREUX, J.; WETTENGEL, W.; HEDAO, P.; KASSEM, K. **Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth**. BioScience, n. 51 (11), 2001, pp. 933-938

PARKER, C., MITCHELL, A., TRIVEDI, M., MARDAS, N., **The Little REDD+ Book**. Global Canopy Programme, 2009 Disponível em https://unfccc.int/files/methods/redd/submissions/application/pdf/redd_20091201_gcp.pdf

PBMC **Primeiro Relatório de Avaliação Nacional**. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, volume especial, 2013.

PHELPS, J. ET AL. **The Philippine National Redd-Plus Strategy**. Jacob Phelps Organizer. The Philippines REDD-plus Strategy Team, 2010 Disponível em http://www.unredd.net/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=4191&Itemid=53

PIMENTEL, J. C. **Eficiência Tributária: um estudo do desempenho das regiões fiscais da Receita Federal do Brasil na arrecadação de imposto de renda entre 1995 e 2006**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Administração de Organizações da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo (FEARP-USP), 2009

PINTO JR.; H. Q; ALMEIDA, E. F.; BOMTEMPO, J. V.; IOOTTY, M.; BICALHO, R. G. **Economia da Energia: fundamentos econômicos, evolução histórica e organização industrial**. Helder Queiroz Pinto Junior (Organizador), Rio de Janeiro: Elsevier, 2007

QUENTAL, N.; LOURENÇO, J.; SILVA, F. **Sustainable Development Policy: Goals, Targets and Political Cycles**. Sustainable Development, n. 19, 2011, pp. 15-29

RAMANATHAN, R. **A multi-factor efficiency perspective to the relationships among world GDP, energy consumption and carbon dioxide emissions**. Technological Forecasting & Social Change, n. 73, 2006, pp. 483-494

REAMS, M.; CLINTON, K.; LAM, N. **Achievement of Climate Planning Objectives among U.S. Member Cities of the International Council for Local Environmental Initiatives (ICLEI)**. Low Carbon Economy, v. 3, n. 4, 2012, pp. 137-143

REZAEI, M.; MOINI, A.; MAKUI, A. **Operational and non-operational performance evaluation of thermal power plants in Iran: A game theory approach**. Energy, n. 38, 2012, pp. 96-103

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa Social: Métodos e Técnicas**. São Paulo: Atlas, 2007

ROMEIRO, A. R. **Economia ou economia política da sustentabilidade**. In MAY, P. H. **Economia do meio ambiente: teoria e prática**. Peter H. May (Organizador). 2ª Edição, Rio de Janeiro: Elsevier, 2010

ROSA, A. H.; FRACETO, L. F; MOSCHINI-CARLOS, V. **Meio Ambiente e Sustentabilidade**. Porto Alegre: Bookman, 2012

RUIZ-PEINADO, R.; DEL RIO, M.; MONTERO, G. **New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species**. Forest Systems, v. 20, n. 1, 2011

SAATCHI, S.; HARRIS, N.; BROWN, S.; LEFSKY, M.; MITCHARD, E.; SALAS, W.; ZUTTA, B.; BUERMANN, W.; LEWIS, S.; HAGEN, S.; PETROVA, S.; WHITE, L.; SILMAN, M.; MOREL, A. **Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents**. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America –

PNAS, 2011. Disponível em: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1019576108 . Acesso em: 11 jun. 2011.

SACHS, I. **Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente**. São Paulo: Studio Nobel/FUNDAP, 1993, 103 p.

SALGADO JUNIOR, A. P.; BONACIM, C. A. G.; PACAGNELLA JUNIOR, A. **Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliação de eficiência de usinas de açúcar e álcool da região nordeste do estado de São Paulo**. Organizações Rurais & Agroindustriais, Lavras, v.11, n.3, 2009, pp. 494-513

SANTOS, E. M.; ZAMALLOA, G. C.; VILLANUEVA, L. D.; FAGÁ, M. T. **Gás natural: estratégias para uma energia nova no Brasil**. Coordenação Edmilson Moutinho Santos, São Paulo: Annablume, 2002

SARAFIDIS, V. **An Assessment of Comparative Efficiency Measurement Techniques**. London: European Economics, 2002, Disponível em <http://www.europe-economics.com/download/eeeff.pdf>

SARTI, F.; HIRATUKA, C. **Desenvolvimento industrial no Brasil: oportunidades e desafios futuros** . Texto para Discussão. IE/UNICAMP, n. 187, jan, 2011.

SCHAEFFER, R. K. **Understanding Globalization: The Social Consequences of Political, Economic, and Environmental Change**. Rowman & Littlefield Publishers Inc., 2003

SCHEWEINFURTH, S. **An Introduction to Coal Quality**. Chapter C of The National Coal Resource Assessment Overview. US Geological Survey, 2009

SEIFFERT, M. E. B. **Mercado de Carbono e Protocolo de Quioto: Oportunidades de negócio na busca da sustentabilidade**. 2ª Edição, São Paulo: Atlas, 2013

SEN, A.; STERN, N.; STIGLITZ, J. **Development strategies: the roles of the state and the private sector**. Proceedings of the World Bank Annual Conference on Development Economics, 1990

SENRA, L.; NANJI, L.; ANGULO MEZA, L. **Revisão dos métodos totais de seleção de variáveis em DEA**. XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Pesquisa Operacional e o Desenvolvimento Sustentável, 2005

SENRA, L.; NANJI, L.; SOARES DE MELLO, J. C.; ANGULO MEZA, L. **Estudo sobre métodos de seleção de variáveis em DEA**. Pesquisa Operacional, v.27, n.2, 2007, p.191-207

SHAKOURI, H.; NABAE, M.; ALIAKBARISANI, S. **A quantitative discussion on the assessment of power supply technologies: DEA (data envelopment analysis) and SAW (simple additive weighting) as complementary methods for the “Grammar”**. Energy, n. 64, 2014, pp. 640-647

SHEPHARD, R. **Theory of cost and production functions**. Princeton University Press, 1970 (original de 1953)

SILVA, C. E.L. **A crise e a nova configuração do poder nas relações internacionais**. Revista USP, São Paulo, n. 85, mar/mai, 2010, p. 30-39

SILVEIRA, M.; JULIO, A. **Os investimentos em transportes do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) e o efeito multiplicador brasileiro a partir do governo Lula da Silva.** Journal of Transport Literature, v.7, n. 4, 2013, pp. 199-224

SIMON, H.; DANTZIG, G.; HOGARTH, R.; PIOTT, C.; RAIFFA, H.; SCHELLING, T.; SHEPSLE, K.; THALER, R.; TVERSKY, A.; WINTER, S. **Decision Making and Problem Solving.** Report of the Research Briefing Panel on Decision Making and Problem Solving by the National Academy of Sciences. Published by National Academy Press, Washington, DC, 1986

SONG, M.; GUAN, Y. **The environmental efficiency of Wanjiang demonstration area: A Bayesian estimation approach.** Ecological Indicators, n. 36, 2014, pp. 59- 67

SOUZA, N. J. **Desenvolvimento Econômico.** 5ª Edição, São Paulo: Editora Atlas, 2005

SÖZEN, A.; ALP, I. **Comparison of Turkey's performance of greenhouse gas emissions and local/regional pollutants with EU countries.** Energy Policy, n. 37, 2009, pp. 5007-5018

SÖZEN, A.; ALP, I; ÖZDEMİR, A. **Assessment of operational and environmental performance of the thermal power plants in Turkey by using data envelopment analysis.** Energy Policy, n.38, 2010, pp. 6194-6203

SPADARO, J.; LANGLOIS, L.; HAMILTON, B. **Assessing the Difference: Greenhouse Gas Emissions of Electricity Generating Chains.** IAEA Bulletin, vl. 42, n. 2, 2000

STERN, N. **Stern Review: The Economics of Climate Change.** London: HM Treasury, 2006
Disponível em www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/ , Acesso em 15/09/2013

STIGLITZ, J. **Capital Market Liberalization, Economic Growth, and Instability.** World Development, v. 28, n. 6, 2000, pp. 1075-1086

STIGLITZ, J. **Economic Growth Revisited.** Industrial and Corporate Change, n.3, v.1, 1994 pp. 65-110

STIGLITZ, J. SEN, A.; FITOUSSI, JP. **The Measurement of Economic Performance and Social Progress Revisited.** Report by the Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress, 2009

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. **DEA approach for unified efficiency measurement: Assessment of Japanese fossil fuel power generation.** Energy Economics, n. 33, 2011, pp. 292-303

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. **DEA radial measurement for environmental assessment and planning: Desirable procedures to evaluate fossil fuel power plants.** Energy Policy, n. 41, 2012d, pp. 422-432

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. **DEA radial measurement for environmental assessment: A comparative study between Japanese chemical and pharmaceutical firms.** Applied Energy, n.115, 2014, pp. 502-513

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. **Returns to scale and damages to scale under natural and managerial disposability: Strategy, efficiency and competitiveness of petroleum firms.** Energy Economics, n. 34, 2012c, pp. 645-662

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. **Returns to Scale and Damages to Scale with Strong Complementary Slackness Conditions in DEA Assessment: Japanese Corporate Effort on Environment Protection.** Energy Economics, n. 34, 2012b, pp. 1422-1434

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. **Returns to Scale, Damages to Scale, Marginal Rate of Transformation and Rate of Substitution in DEA Environmental Assessment.** Energy Economics, n. 34, 2012a, pp. 905-917

SUEYOSHI, T.; GOTO, M.; SUGIYAMA, M. **DEA window analysis for environmental assessment in a dynamic time shift: Performance assessment of U.S. coal-fired power plants.** Energy Economics, n. 40, 2013, pp. 845-857

SUTTON, W. T. **Network migration strategies: evaluating performance with extensions of data envelopment analysis.** PhD Thesis, University of Michigan, 2010

THANASSOULIS, E. **Introduction to the theory and application of data envelopment analysis: a foundation text with integrated software;** Kluwer Academic Publishers, 2001

THE WIND POWER. **The Wind Power Database**, 2013 Disponível em <http://www.thewindpower.net/index.php>, Acesso em 11/09/2013

THONING, K.W.; TANS, P.P.; KOMHYR, W.D. **Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974-1985**, J. Geophys. Research, vol. 94, 1989, pp. 8549-8565

TORESAN, L. **Sustentabilidade e desempenho produtivo na agricultura: uma abordagem multidimensional aplicada a empresas agrícolas.** Tese apresentada no Programa de Pós Graduação em Engenharia da Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 1998. Disponível em <http://www.eps.ufsc.br/teses98/toresan/>

UN A ONU e o meio ambiente. Site institucional das Nações Unidas, 2012a, Disponível em <http://www.onu.org.br/a-onu-em-acao/a-onu-e-o-meio-ambiente/>, Acesso em 27/10/2012

UN **From Stockholm to Kyoto: A Brief History of Climate Change.** The Magazine of the United Nations, v. 44, n. 2, jun, 2007, Disponível em <http://unchronicle.un.org/article/stockholm-kyoto-brief-history-climate-change/>

UN **Our Common Future.** Report of the World Commission on Environment and Development, United Nations, 1987

UN **Report of the United Nations Conference on Environment and Development.** United Nations Conference on Environment and Development, 1992

UN. **Convention on Biological Diversity.** Resolution adopted by the General Assembly on 20 December 2010, United Nations, 2010. Disponível em http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/65/161 Acesso em 10/10/2013

UN. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.** United Nations, 1998

UN. **The Future We Want.** United Nations Conference on Sustainable Development, 19 June 2012, 2012b

UN. **UN launches Decade on Biodiversity to stem loss of ecosystems.** United Nations, 2011
Disponível em
<http://www.un.org/apps/news/story.asp?NewsID=40766&Cr=Biodiversity&Cr1=#.UuK3hhBTu9I>
Acesso em 08/10/2013

UN. **United Nations Charter.** United Nations. Signed 26 June 1945, 1945

UN. **Unites Nations Statistics Division.** United Nations, 2013a, Disponível em
<http://unstats.un.org/unsd/snaama/dnltransfer.asp?fID=2>, Acesso em 14/11/2013

UNEP. **Annual Report 2011.** United Nations Environment Programme, 2012

UNEP. **Stockholm Declaration: Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment.** United Nations Environment Programme, 1972

UNEP. **The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer.** United Nations Environment Programme, 2000

UNFCCC. **Copenhagen Accord.** United Nations Framework Convention on Climate Change, United Nations, 2009, Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/107.pdf>

UNFCCC. **Kyoto Protocol base year data.** United Nations Framework Convention on Climate Change, 2014, Disponível em
http://unfccc.int/ghg_data/kp_data_unfccc/base_year_data/items/4354.php, Acesso em 18/01/2014

UNFCCC. **United Nations Framework Convention on Climate Change.** United Nations, Rio de Janeiro, Brasil, 1992

UNFCCC. **United Nations Framework Convention on Climate Change.** United Nations, Warsaw, 2013, Disponível em
https://unfccc.int/meetings/warsaw_nov_2013/meeting/7649/php/view/reports.php, Acesso em 29/12/2013

UNPD **A world of development experience.** United Nations Development Programme, 2014
Disponível em http://www.undp.org/content/undp/en/home/operations/about_us/

VEIGA, J. E. **A desgovernança mundial da sustentabilidade.** São Paulo: Editora 34, 2013

VEIGA, J. E. **Desenvolvimento Sustentável: O desafio do século XXI.** Rio de Janeiro, Garamond, 2005

VILELA, D. L. **Utilização do método Análise Envoltório de Dados Para Avaliação do Desempenho Econômico de Cooperativas de Crédito.** Dissertação (Mestrado) da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004

VIOLA, E.; FRANCHINI, M.; RIBEIRO, T. L. **Sistema Internacional de Hegemonia Conseradora: Governança Global e Democracia na Era da Crise Climática.** São Paulo: Annablume; Brasília: Universidade de Brasília – Instituto de Relações Internacionais, 2013

WMO **WMO in brief.** World Meteorological Organization, 2014. Disponível em
http://www.wmo.int/pages/about/index_en.html

WORLD BANK Estimating the Opportunity Costs and Implementation Costs of REDD+. World Bank Institute, 2012, disponível em <http://wbi.worldbank.org/wbi/Data/wbi/wbicms/files/drupal-acquia/wbi/OppCostsREDD+manual.pdf>

WORLD BANK. World Bank Open Data. The World Bank, 2013. Disponível em <http://data.worldbank.org/>, Acesso em 18/01/2013

WRI Global Direct Normal Solar Radiation. World Resources Institute, 2014 Disponível em <http://www.wri.org/resource/global-direct-normal-solar-radiation>, Acesso em 19/01/2014

XU. J. China's new forests aren't as green as they seem. Nature, v.477, n. 371, 2011

YANG, H.; POLLITT, M. Incorporating both undesirable outputs and uncontrollable variables into DEA: The performance of Chinese coal-fired power plants. European Journal of Operational Research, n. 197, 2009, pp. 1095-1105

YANG, H.; POLLITT, M. The necessity of distinguishing weak and strong disposability among undesirable outputs in DEA: Environmental performance of Chinese coal-fired power plants. Energy Policy, n. 38, 2010, pp. 4440-4444

ZADEK, S. Beyond climate finance: from accountability to productivity in addressing the climate challenge. Climate Policy, v. 11, n. 3, 2011, pp. 1058-1068

ZHOU, P.; ANG, B. Linear programming models for measuring economy-wide energy efficiency performance. Energy Policy, n. 36, 2008, pp. 2911- 2916

ZHOU, P.; ANG, B.; POH, K. A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies. European Journal of Operational Research, n. 189, 2008, pp. 1-18

Apêndice

Base de dados utilizada

Dados utilizados para a análise de viabilidade no ano de 1990

Tabela 158 - *Inputs e Outputs* - Dados de 1990 do G20

País (1990)	Petróleo	Gás Natural	Carvão	Energia Nuclear	Hidrelétricas	Outros Renováveis	1/(GEE - C _{mut})
África do Sul	16,59	0,24	67,32	2,01	0,23	0,00	2,47
Alemanha	127,28	53,93	129,58	34,51	3,93	0,34	0,83
Arábia Saudita	54,15	30,17	0,00	0,00	0,00	0,00	3,92
Argentina	19,67	18,26	0,96	1,65	4,11	0,02	4,30
Austrália	32,32	15,21	36,48	0,00	3,34	0,17	2,41
Brasil	64,21	2,75	9,53	0,51	46,78	1,18	3,01
Canadá	79,81	60,25	27,14	16,40	66,93	0,95	3,77
China	112,86	13,73	509,30	0,00	28,68	0,00	0,27
Coreia do Sul	49,53	2,72	24,39	11,97	1,44	0,00	3,46
Estados Unidos	772,50	493,99	483,14	137,40	66,94	14,43	0,17
França	89,40	26,40	19,75	71,08	12,18	0,40	1,84
Índia	57,94	10,84	95,46	1,45	15,02	0,02	0,75
Indonésia	31,72	15,23	3,95	0,00	1,28	0,26	3,34
Irã	49,95	20,43	1,07	0,00	1,45	0,00	3,48
Itália	93,62	39,09	14,08	0,00	7,16	0,77	1,99
Japão	248,10	43,27	75,96	44,29	19,76	2,76	0,83
México	71,01	24,78	3,44	0,67	5,33	1,16	2,48
Reino Unido	82,88	47,18	64,95	14,88	1,16	0,14	1,34
Rússia	251,73	366,84	180,64	26,77	37,75	0,01	0,44
Turquia	22,04	3,04	15,92	0,00	5,24	0,02	4,65

Dados utilizados para a análise de viabilidade no ano de 2000

Tabela 159 - *Inputs e Outputs* - Dados de 2000 do G20

País (2000)	Petróleo	Gás Natural	Carvão	Energia Nuclear	Hidrelétricas	Outros Renováveis	1/(GEE - C_{mut})
África do Sul	21,99	1,06	74,74	3,10	0,31	0,07	2,23
Alemanha	129,78	71,52	84,89	38,39	5,63	2,79	1,03
Arábia Saudita	73,04	44,83	0,00	0,00	0,00	0,00	2,89
Argentina	20,29	29,89	0,78	1,40	7,72	0,17	3,82
Austrália	38,12	18,48	46,70	0,00	3,57	0,24	2,07
Brasil	92,06	8,49	12,51	1,37	68,89	2,47	1,99
Canadá	90,09	83,43	30,30	16,36	80,75	2,03	2,65
China	224,22	22,05	679,17	3,79	50,34	0,72	0,21
Coreia do Sul	103,76	17,03	43,03	24,66	0,91	0,03	1,98
Estados Unidos	884,13	600,35	568,99	179,57	62,99	17,68	0,15
França	94,94	35,26	14,39	93,96	15,34	0,69	1,99
Índia	106,15	23,72	144,24	3,57	17,42	0,74	0,52
Indonésia	55,25	26,77	13,74	0,00	2,27	1,10	2,25
Irã	65,38	56,60	1,07	0,00	0,86	0,00	2,10
Itália	93,53	58,37	12,18	0,00	10,00	1,63	1,89
Japão	259,15	65,06	98,87	72,35	18,50	4,29	0,75
México	87,76	36,85	5,90	1,86	7,48	1,44	2,07
Reino Unido	78,57	87,17	36,73	19,25	1,15	1,09	1,49
Rússia	122,92	324,33	105,21	29,53	37,41	0,02	0,76
Turquia	30,74	13,11	22,45	0,00	6,99	0,07	3,32

Dados utilizados para a análise de viabilidade no ano de 2010

Tabela 160 - *Inputs e Outputs* - Dados de 2010 do G20

País (2010)	Petróleo	Gás Natural	Carvão	Energia Nuclear	Hidrelétricas	Outros Renováveis	1/(GEE - C_{mut})
África do Sul	26,15	3,53	89,99	3,05	0,29	0,08	2,31
Alemanha	115,38	74,97	76,62	31,81	4,75	18,87	1,13
Arábia Saudita	123,53	78,89	0,00	0,00	0,00	0,00	1,94
Argentina	26,00	38,96	0,98	1,59	9,19	0,53	3,44
Austrália	43,75	23,14	51,57	0,00	2,85	1,91	1,95
Brasil	118,27	24,12	13,28	3,29	91,25	7,33	1,38
Canadá	101,29	85,54	25,00	20,30	79,41	4,07	2,58
China	437,75	96,25	1.609,74	16,72	163,42	14,11	0,10
Coreia do Sul	104,96	38,71	75,90	33,62	0,83	0,62	1,63
Estados Unidos	847,43	619,27	523,92	192,21	59,47	38,90	0,16
França	84,46	42,70	11,27	96,92	14,31	3,43	2,05
Índia	155,39	55,69	262,66	5,22	25,05	7,59	0,41
Indonésia	65,18	36,26	41,21	0,00	3,95	2,14	1,54
Irã	88,28	130,12	0,87	0,00	2,16	0,04	1,54
Itália	73,07	68,46	14,29	0,00	11,57	5,85	2,15
Japão	204,06	85,06	123,71	66,15	20,57	7,17	0,79
México	88,53	65,25	8,53	1,33	8,31	1,98	1,85
Reino Unido	73,50	89,31	31,02	14,06	0,82	5,03	1,71
Rússia	134,29	372,73	90,23	38,56	38,10	0,12	0,72
Turquia	31,79	35,10	30,86	0,00	11,72	0,91	2,64

Anexos

Biomass

Os biomas são expressos pela cor em destaque nos mapas.

Floresta Tropical

Figura 48 - Regiões no mundo com florestas tropicais

Fonte: Adaptado de Olson *et al.* (2001 *apud* GRID ARENDAL, 2013)

Floresta Temperada

Figura 49 - Regiões no mundo com florestas temperadas

Fonte: Adaptado de Olson *et al.* (2001 *apud* GRID ARENDAL, 2013)

Floresta Boreal (Taiga)

Figura 50 - Regiões no mundo com floresta boreal

Fonte: Adaptado de Olson *et al.* (2001 *apud* GRID ARENDAL, 2013)

Savanas (Cerrado)

Figura 51 - Regiões no mundo com Cerrado (Savana)

Fonte: Adaptado de Olson *et al.* (2001 *apud* GRID ARENDAL, 2013)

Campos Temperados

Figura 52 - Regiões no mundo com campos temperados

Fonte: Adaptado de Olson *et al.* (2001 *apud* GRID ARENDAL, 2013)

Desertos e Semidesertos

Figura 53 - Regiões no mundo com desertos e semidesertos

Fonte: Adaptado de Olson *et al.* (2001 *apud* GRID ARENDAL, 2013)

Tundra

Figura 54 - Regiões no mundo com Tundra

Fonte: Adaptado de Olson *et al.* (2001 *apud* GRID ARENDAL, 2013)