



## Economia de Baixo Carbono

## Relatório Final

## Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Mudanças Climáticas: compreendendo o problema e os desafios existentes.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1. O Aquecimento Global e suas Causas.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2. Os Impactos das Mudanças Climáticas e a Necessidade de Combatê-las .....</b>	<b>16</b>
<b>3. O Desafio do Setor Energético .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1. Alternativas de Mitigação das Emissões do Setor Energético .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2. O Uso mais Eficiente dos Recursos Energéticos .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3. Energias Renováveis .....</b>	<b>41</b>
<b>3.4. Energia Nuclear .....</b>	<b>43</b>
<b>3.5. Captura e Sequestro de Carbono .....</b>	<b>45</b>
<b>3.6. Como efetivamente Mitigar as Emissões do Setor Energético?... ..</b>	<b>47</b>
<b>4. O Setor Energético Brasileiro e as Mudanças Climáticas.....</b>	<b>57</b>
<b>5. Conclusão .....</b>	<b>69</b>
<b>7. Referências .....</b>	<b>71</b>

## 1. Introdução

Por ter dimensão global, as mudanças do clima consistem em uma das maiores ameaças ao desenvolvimento sustentável e, por consequência, representam um dos maiores desafios a serem equacionados ao longo deste século. Enquanto o contínuo processo de transformação da biosfera devido a causas naturais sobre as quais o homem não possui controle<sup>1</sup> ocorre de forma lenta e isto permite a vida sobre a Terra se adaptar a estas alterações, as mudanças climáticas verificadas a partir da segunda metade do Século XX caracterizam-se por uma grande velocidade e seus impactos ao longo das próximas décadas deverão resultar em desequilíbrios na biodiversidade e afetar a exploração de recursos naturais (GOLDEMBERG e LUCON, 2007).

Estes impactos são derivados do expressivo crescimento populacional e, sobretudo, de um amplo e intenso processo de industrialização e urbanização iniciado em meados do Século XVIII com o advento da Revolução Industrial, especialmente nos países hoje dito desenvolvidos. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) em seu quinto relatório enuncia ser possível afirmar que as mudanças climáticas são derivadas da ação antropogênica com 95% de certeza. Observa-se que o aumento da concentração de óxido nitroso está associado basicamente à agricultura enquanto as emissões de metano derivam, não apenas de atividades agrícolas, como também do uso de combustíveis fósseis. No entanto, o principal gás de efeito estufa influenciado pela ação antrópica é o CO<sub>2</sub> e o aumento de sua concentração na atmosfera está diretamente relacionado ao uso em larga escala de combustíveis fósseis, dado que os ganhos de produtividade da economia e de bem estar das pessoas nos últimos 250 anos esteve diretamente associado a uma mudança no paradigma energético onde a adoção de fontes inanimadas viabilizou avanços tecnológicos nas mais diferentes áreas.

---

<sup>1</sup> As estações do ano, terremotos, erupções vulcânicas, furacões, queimadas em florestas são alguns exemplos de fenômenos naturais sobre os quais o homem não tem como intervir.

Desta forma, é compreensível que a produção e o consumo de energia respondam por mais de 60% das emissões mundiais antropogênicas de gases do efeito estufa (UNEP, 2012). Atualmente os insumos fósseis representam mais de 80% da oferta mundial de energia. No setor de transportes, mais de 95% das necessidades energéticas são atendidas por derivados de petróleo. Concomitantemente, quase 70% da geração mundial de eletricidade ocorre em centrais termoelétricas movidas a combustíveis fósseis, sendo o carvão responsável por mais de 40% desta geração (IEA, 2012).

Verifica-se que a precaução é um dos princípios regentes das discussões climáticas. Neste sentido, é imperativo que medidas visando a mitigação das emissões de gases do efeito estufa sejam adotadas o mais breve possível, principalmente porque a postergação da implementação destas medidas torna o processo de estabilização da concentração de gases do efeito estufa com o objetivo de limitar o aquecimento global mais difícil e custoso.

Considerando que o setor energético é o principal emissor de gases do efeito estufa, políticas de redução das emissões destes gases estão diretamente associadas a significativas modificações nos paradigmas de produção e de consumo de energia. Neste sentido, é perceptível que a questão ambiental deve ter caráter prioritário nas políticas energéticas delineadas ao longo deste século. Porém, tais políticas também devem garantir uma expansão da oferta de energia para o atendimento de uma demanda que crescerá a taxas expressivas nas próximas décadas impulsionada pelos países em vias de desenvolvimento, e esta oferta deverá ter o menor custo possível. Portanto, o desafio imposto ao setor energético é de grandes dimensões e alterações nos padrões tecnológicos e comportamentais são requeridas.

O uso mais eficiente dos recursos energéticos é uma condição básica para a mitigação das emissões de gases do efeito estufa por parte do setor

energético. Tratam-se aqui de ganhos de eficiência não restritos a medidas de otimização ao longo da cadeia de suprimento energético. Ações incidentes sobre a demanda de energia também precisam estar contempladas, desde a adoção de dispositivos tecnológicos que permitam um uso final de energia mais eficiente até mudanças comportamentais nos padrões de consumo de energia. Concomitantemente, a efetiva mitigação das emissões de gases do efeito estufa também irá exigir um considerável aumento do uso de fontes não fósseis e o desenvolvimento de tecnologias capazes de utilizar insumos fósseis de forma limpa.

Mais do que viabilidade técnica, são os custos das tecnologias que vem postergando a adoção de efetivas políticas de mitigação das emissões de gases do efeito. Embora a implementação de algumas medidas de eficiência energética seja atrativa economicamente e fontes como a eólica já sejam competitivas em algumas regiões, as alternativas tecnológicas compatíveis com uma economia de baixo carbono costumam a apresentar custos superiores às tecnologias convencionais.

Os custos das tecnologias e do abatimento do carbono variam de acordo com o país pois são função da disponibilidade de recursos e do domínio tecnológico. Como consequência, a adoção das mesmas acaba por alterar a competitividade econômica relativa dos países. Esta dinâmica é especialmente complexa ao se considerar a assimetria entre a situação dos países desenvolvidos e a dos países em vias de desenvolvimento.

As responsabilidades comuns, porém diferenciadas, são um dos princípios básicos das negociações climáticas e tem como base o fato que as mudanças climáticas presentes são derivadas essencialmente de emissões oriundas dos países desenvolvidos. Contudo, os países em vias de desenvolvimento constituem-se atualmente em grandes emissores de gases do efeito estufa devido à necessidade de promoverem desenvolvimento sócio econômico.

Logo, os países desenvolvidos condicionam a promulgação de acordos climáticos a participação dos países em vias de desenvolvimento, ao menos os de maior porte, enquanto estes países enfatizam sua necessidade de desenvolvimento e demandam a transferência de recursos financeiros e tecnológicos que permitam a mitigação de suas emissões.

A implementação do Protocolo de Quioto foi postergada em grande medida justamente pela recusa dos EUA em assumir um compromisso de redução de emissões que não contemplasse países em vias de desenvolvimento. Atualmente a discussão de um acordo climático que suceda o Protocolo de Quioto e, que seja de fato eficaz, também vem esbarrando na resistência dos países desenvolvidos em assinar um tratado que não incluía, ao menos, China, Índia e Brasil.

No caso brasileiro, nota-se uma situação peculiar porque a matriz energética brasileira apresenta expressiva participação de fontes renováveis e, por consequência, reduzida emissão de gases do efeito estufa. Desta forma, nota-se a importância do exame de duas questões:

- i. As mudanças climáticas tornarão o sistema energético brasileiro mais vulnerável, sobretudo na Região Nordeste. Como consequência, medidas de adaptação tendem a ser requeridas nas próximas décadas. Observa-se assim que o impacto das mudanças climáticas é uma variável que deve ser contemplada no planejamento do setor energético brasileiro e impactará a operação futura do sistema elétrico brasileiro;
- ii. Embora as potencialidades naturais brasileiras e o domínio tecnológico permitam que o Brasil mantenha uma matriz energética com baixa emissão de gases do efeito estufa, a redução da emissão destes gases no setor energético brasileiro, sobretudo no setor elétrico, tende a ser difícil e custosa. Explica-se: tais reduções são definidas em relação a um

cenário de referência e este cenário já apresenta emissões reduzidas em comparação às emissões de outros países.

O objetivo central deste relatório é mostrar o quanto a necessidade de mitigar as mudanças climáticas irá impactar o setor energético mundial e como os desafios brasileiros são distintos dos mundiais. Para isso, a primeira parte do relatório é dedicada ao exame da problemática das mudanças climáticas e seus impactos. Espera-se que os argumentos desta seção contribuam para que o leitor tenha a real dimensão da necessidade de mitigar as emissões de gases do efeito estufa. Na sequência, a segunda parte aborda os desafios do setor energético diante a esta necessidade de redução das suas emissões de gases do efeito estufa. Esta parte apresenta diversas tecnologias que precisarão ser disseminadas para que esta mitigação seja possível e como a atuação delas em conjunto poderá resultar em uma expressiva redução das emissões. Por fim, a última parte do relatório examina as peculiaridades do caso brasileiro, onde será necessária a adoção de medidas de adaptação e as dificuldades para a redução das emissões não são desprezíveis.

Em termos metodológicos, destaca-se que este relatório foi elaborado com base em uma extensiva revisão de bibliografia acadêmica e técnica, na qual foram priorizadas as publicações mais recentes. Contudo, optou-se prioritariamente pela utilização nas duas primeiras partes de dados das entidades que podem ser consideradas as maiores autoridades em suas áreas de conhecimento. Neste sentido, a primeira parte do relatório foi baseada no quinto relatório do Painel Intergovernamental da Mudança do Clima publicado em 2013/2014 e a segunda seção trabalhou com estimativas elaboradas pela Agência Internacional de Energia.

## **2. Mudanças Climáticas: compreendendo o problema e os desafios existentes**

As mudanças climáticas em curso e previstas para as próximas décadas possuem impactos diretos sobre a humanidade e sobre os sistemas naturais<sup>2</sup>. Logo, representam uma fonte de sérios riscos. Observa-se assim a necessidade de compreender a dinâmica destes impactos e riscos para identificar as melhores alternativas de mitigação destas mudanças climáticas, assim como, de adaptação aos efeitos que sejam irreversíveis e inevitáveis.

### **2.1. O Aquecimento Global e suas Causas**

Embora o efeito estufa seja um fenômeno natural que propicia uma temperatura compatível com a existência de vida na Terra<sup>3</sup>, é possível identificar a partir de meados do Século XX uma tendência de aquecimento global associado a mudanças climáticas. Esta tendência deriva do aumento da concentração das emissões de gases do efeito estufa na atmosfera, especialmente em função do desequilíbrio do ciclo do carbono.

As mudanças no comportamento do clima verificadas a partir da década de 1950 são incompatíveis com a trajetória climática dos últimos séculos<sup>4</sup>. Em linhas gerais, verifica-se um inequívoco aquecimento do sistema evidenciado

---

<sup>2</sup> Conforme WBG (2014), as mudanças climáticas já estão afetando milhões de pessoas em todo mundo, sobretudo em regiões costeiras. O estudo destaca os riscos relativos à segurança do suprimento de alimentos, água e energia impostos pela mudança do clima.

<sup>3</sup> Para que a temperatura na Terra seja compatível com a existência de vida, é preciso que haja absorção de calor oriundo da radiação térmica. Porém, tal absorção não ocorre por parte dos gases nitrogênio e oxigênio, os quais representam 98% da atmosfera terrestre. Desta forma, nota-se a relevância do vapor d'água, do dióxido de carbono, do metano, do óxido nitroso, do CFC e do HFC na garantia de uma temperatura terrestre média de 15<sup>o</sup> C devido a capacidade destes gases em absorverem parte da radiação solar e, desta forma, aumentar em 30<sup>o</sup> C a temperatura média da Terra (DANTAS, 2008).

<sup>4</sup> É importante destacar que mudanças no clima da Terra, com períodos de resfriamento e outros de aquecimento, não constitui uma novidade. Entretanto, as alterações climáticas anteriores ocorreram em uma escala de tempo infinitamente superior à verificada nos últimos 50 anos, o qual consiste muito provavelmente no período mais quente dos últimos 500 anos.



através do aumento das temperaturas médias da atmosfera e do oceano, assim como, pelo aumento do nível do mar e derretimento generalizado de geleiras e da camada de neve. Além disso, a ocorrência de eventos climáticos extremos, dentre os quais ondas de calor<sup>5</sup>, está se tornando mais frequente. Neste sentido, é bastante representativo que as três últimas décadas foram sucessivamente as décadas mais quentes desde 1850 e os indícios que o período compreendido entre 1983 e 2012 compreendeu a maior temperatura média do Hemisfério Norte nos últimos 1400 anos.

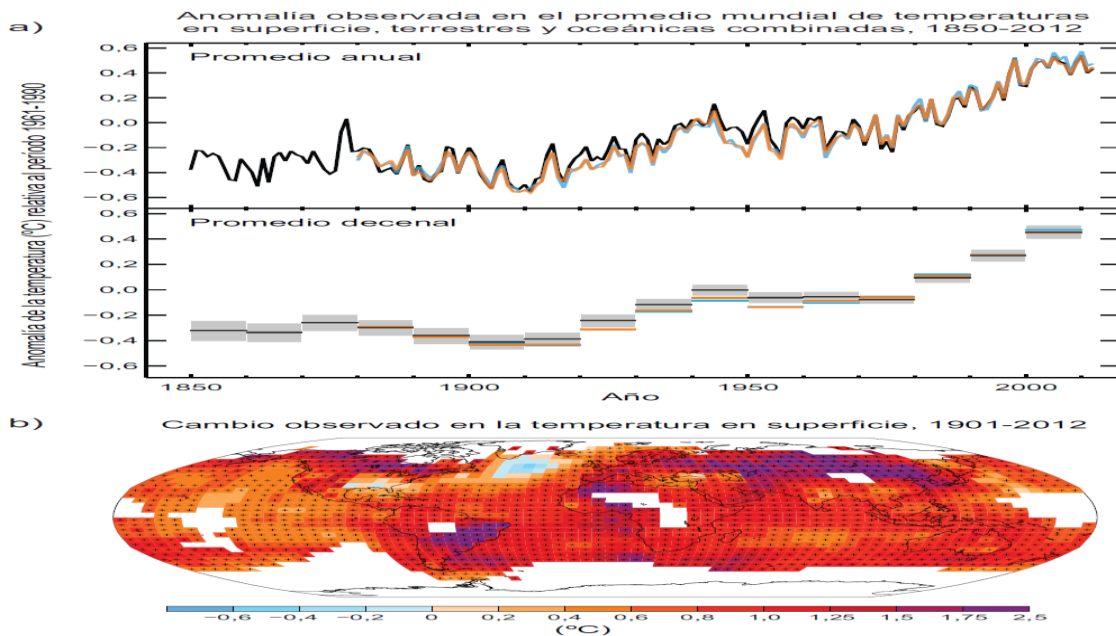
Os registros da evolução da temperatura média da superfície terrestre e do oceano indicam que, entre 1880 e 2012, ocorreu um aumento de 0,86° C. Ao mesmo tempo, desde meados do Século XX, a camada de gelo na Groelândia, na Antártida e no Ártico, assim como, a camada de neve no Hemisfério Norte apresentam contínua redução e o nível do mar passou a subir em um ritmo superior aquele verificado ao longo dos milênios anteriores, tendo sido de 0,19 m tal elevação entre 1901 e 2010<sup>6</sup>. Soma-se a isso a constatação do aumento do número de dias e noites quentes em detrimento a dias e noites frias em todo o mundo, sendo mais frequente a presença de ondas de calor na Europa, na Ásia e na Austrália. No âmbito das precipitações, existem indícios que a frequência e a intensidade das precipitações aumentaram em algumas regiões, como é o caso da América do Norte e da Europa, em contraste com a tendência de algumas regiões propensas a serem secas, as quais estão se tornando ainda mais secas.

---

<sup>5</sup> Como ilustração de ondas de calor extremas, pode-se mencionar os eventos ocorridos na Rússia e na Ásia Central em 2010 e nos EUA em 2012.

<sup>6</sup> É muito provável que o nível do mar tenha se elevado em média 1,7 mm entre 1901 e 2010, sendo este aumento de 2,0 mm entre 1971 e 2010 e de 3,2 mm entre 1993 e 2010. Este aumento do ritmo de elevação do nível do mar é derivado da expansão térmica e do derretimento das geleiras.

**Figura 1 – Variação da Temperatura Terrestre: 1850 - 2010**



Fonte: IPCC (2013).

A compreensão das mudanças climáticas passa pela ciência que o balanço energético da Terra é função de processos naturais e antropogênicos. Apesar da existência de forças radioativas negativas como os aerossóis, o aumento da concentração de gases do efeito estufa influenciáveis pela ação antrópica ao longo dos últimos 250 anos resulta em um expressivo forçamento radioativo positivo e, por consequência, ocasiona o aquecimento global.

No ano de 2011, a concentração na atmosfera de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), de metano (CH<sub>4</sub>) e de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) foram de, respectivamente, 391 ppm, 1803 ppmm e 324 ppmm<sup>7</sup>. Tais valores são, respectivamente, 40%, 150% e 20% superiores aos níveis pré-industriais. É possível afirmar com elevado nível

<sup>7</sup> Destaca-se que ppm significa partes por milhão e ppmm quer dizer partes por bilhão. Ambas as medidas consistem no rácio entre as moléculas de gás e o número total de moléculas do ar seco.

de certeza que a taxa de crescimento da concentração destes gases no Século XX foram as maiores dos últimos 22.000 anos e as concentrações atuais destes gases são as maiores dos últimos 800.000 anos.

O aumento da concentração de óxido nitroso está associado basicamente à agricultura enquanto as emissões de metano derivam, não apenas de atividades agrícolas, como também do uso de combustíveis fósseis. No entanto, o principal gás de efeito estufa influenciado pela ação antrópica é o CO<sub>2</sub> e, apesar de existirem emissões relacionadas à ao uso da terra, o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> está diretamente relacionado ao uso em larga escala de combustíveis fósseis nos últimos 250 anos.

O marco inicial deste período é a Revolução Industrial, que deu início a uma série de transformações que permitiram ganhos de produtividade da economia e de bem estar das pessoas e esteve diretamente associado a uma mudança no paradigma energético onde a adoção de fontes inanimadas<sup>8</sup> viabilizou avanços tecnológicos nas mais diferentes áreas<sup>9</sup>. Em suma, a conjugação de desenvolvimento socioeconômico, especialmente nos países hoje ditos desenvolvidos, com crescimento populacional a partir de uma matriz energética baseada em combustíveis fósseis resultou no crescimento exponencial das emissões de dióxido de carbono oriundas do processo de combustão<sup>10</sup>. É

---

<sup>8</sup> Em um primeiro momento, a substituição de fontes naturais de energia e da tração animal por combustíveis fósseis foi baseada no uso de carvão mineral com o advento da máquina a vapor. Posteriormente, com a Segunda Revolução Industrial também passou a verificar-se a utilização do petróleo em larga escala e o uso de carvão para geração de eletricidade. Mais recentemente, o gás natural passou a ser um insumo muito utilizado para produção de energia elétrica.

<sup>9</sup> De acordo com IEA (2014a), as emissões de CO<sub>2</sub> derivadas da queima de combustíveis fósseis, as quais eram desprezíveis até o advento da Revolução Industrial, totalizaram aproximadamente 32 Gt em 2012.

<sup>10</sup> As emissões cumulativas de CO<sub>2</sub> de origem antrópica entre 1750 e 2011 são da ordem de 555 GtC, das quais 375 GtC estão associadas essencialmente à queima de combustíveis fósseis e, em menor escala, à produção de cimento. Dada a magnitude das emissões advindas da queima de combustível fóssil, sobretudo ao também se considerar as emissões de metano, compreende-se porque a combustão em larga escala de insumos fósseis desequilibrou o ciclo do carbono, o qual anteriormente estava restrito aos processos de reação (fotossíntese e respiração), dissolução (troca de carbono entre a atmosfera e o oceano) e a deposição (ocorre na escala temporal dos milhares de anos e consiste na conversão de carbono solúvel em carbono insolúvel, por exemplo, carvão mineral e petróleo).

possível afirmar que as mudanças climáticas são originárias da ação antropogênica com 95% de certeza.

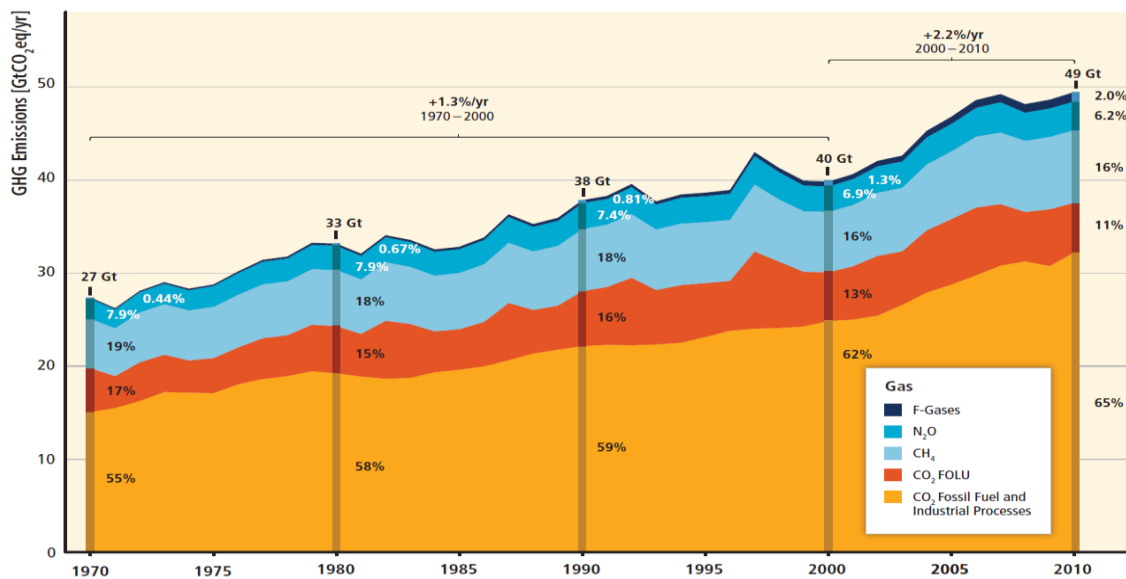
Apesar das evidências relativas às mudanças climáticas originárias do aumento da emissão de gases do efeito estufa por influência antropogênica, nota-se um aumento das emissões ao longo das últimas décadas. É ainda mais relevante o aumento da taxa deste crescimento na última década em uma clara demonstração da ineficácia das políticas de mitigação de emissões de gases do efeito estufa adotadas no período. Em contraste com o aumento anual médio das emissões de 0,4 GtCO<sub>2eq</sub> verificado no período entre 1970 e 2000, entre 2000 e 2010 este crescimento anual médio foi da ordem de 1,0 GtCO<sub>2eq</sub><sup>11</sup>. Desta forma, embora a crise econômica mundial de 2007/2008 tenha reduzido momentaneamente estas emissões antropogênicas, as mesmas totalizaram o expressivo montante de 49 GtCO<sub>2eq</sub> em 2010<sup>12</sup>. A Figura 2 ilustra a evolução das emissões antropogênicas de gases do efeito estufa com as respectivas participações de cada gás no total das emissões.

## **Figura 2 – Evolução das Emissões Antropogênicas de Gases do Efeito Estufa**

---

<sup>11</sup> No caso específico do CO<sub>2</sub>, é bastante ilustrativo a constatação que metade das emissões cumulativas entre 1750 e 2010 ocorreram nos últimos 40 anos.

<sup>12</sup> Deste total, o CO<sub>2</sub> respondeu por 76%, o metano por 16%, N<sub>2</sub>O por 6,2%, estando os 2% restantes associados à emissão de gases fluorados.



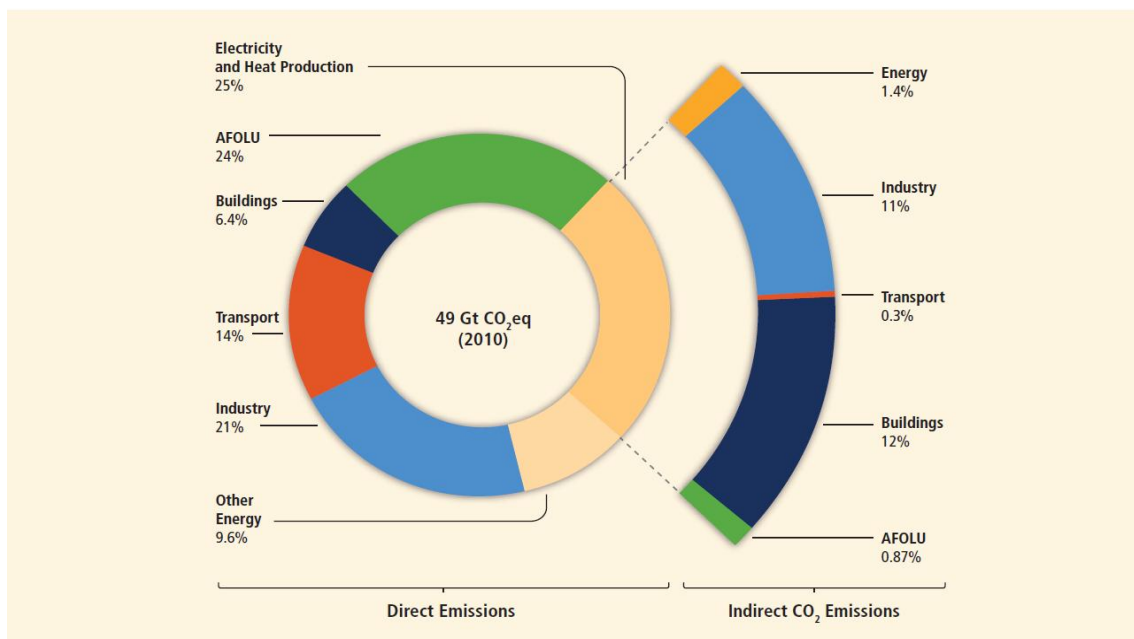
Fonte: IPCC (2014b).

Em nível setorial, nota-se que desde 2000, excetuando-se as emissões associadas ao uso da terra, as emissões vêm crescendo em todos os setores, sendo a produção de energia responsável por 47% do aumento das emissões entre 2000 e 2010<sup>13</sup>. O exame das emissões de 2010 indica que 35% das emissões foram derivadas da produção de energia, 24% do uso da terra<sup>14</sup>, 21% tiveram origem na indústria, 14% no setor de transportes e 6% nos edifícios. A Figura 3 apresenta a segmentação setorial dos 49 GtCO<sub>2eq</sub> emitidos em 2010. A mesma figura apresenta a divisão das emissões derivadas da produção de eletricidade e calor de acordo com os setores consumidores desta energia produzida, ou seja, as emissões setoriais indiretas.

**Figura 3 – Participação dos Setores Econômicos nas Emissões de 2010**

<sup>13</sup> O setor industrial, de transportes e de edifícios responderam, respectivamente, por 30%, 11% e 3% deste crescimento.

<sup>14</sup> Emissões inerentes ao desmatamento e práticas agrícolas (manejo do solo e de nutrientes e agricultura).

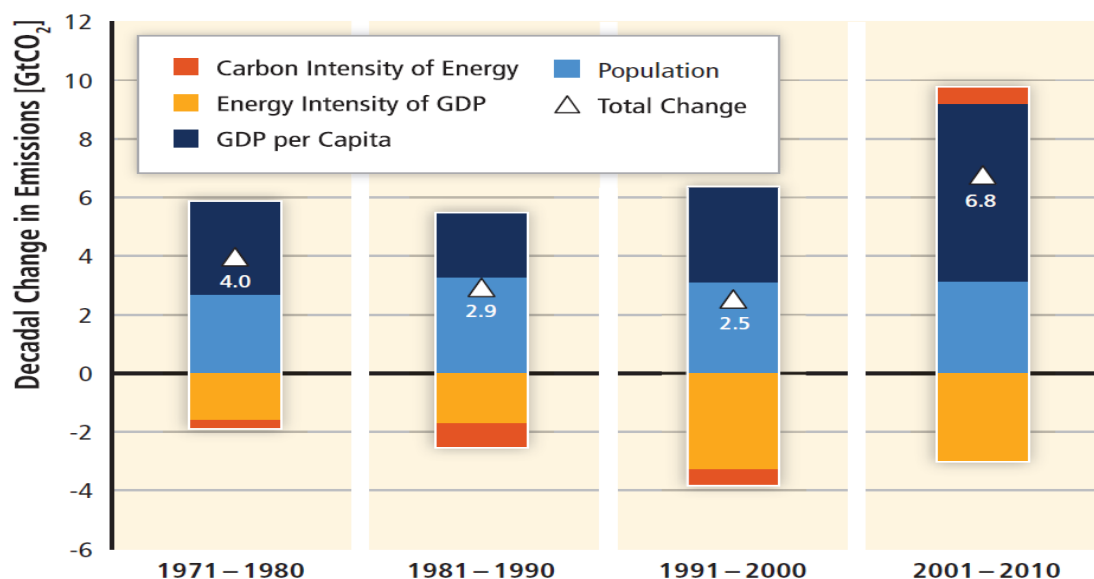


Fonte: IPCC (2014b).

Dada a predominância do CO<sub>2</sub> oriundo da queima de combustíveis fósseis nas emissões, é preciso mapear o comportamento dos impulsionadores destas emissões. Em linhas gerais, os determinantes das emissões são o tamanho da população, o nível de atividade econômica, o paradigma tecnológico e os combustíveis utilizados. Na última década, enquanto a contribuição do crescimento populacional para o aumento das emissões manteve-se semelhante à verificada nas décadas anteriores, o contributo do crescimento econômico no aumento das emissões aumentou e, desta forma, mais que compensou os ganhos de eficiência energética derivados de aprimoramentos tecnológicos. Concomitantemente, o maior uso do carvão nos últimos anos, especialmente na China e na Índia, contribui para aumentar as emissões na medida em que é um insumo mais carbono intensivo<sup>15</sup>. A Figura 4 ilustra com clareza como o crescimento do nível de renda foi o fator determinante para o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> devido à queima de combustíveis fósseis.

<sup>15</sup> Como ilustração IEA (2014a) afirma que o carvão respondeu por 29% da oferta primária de energia em 2012. Porém, sua participação nas emissões globais de CO<sub>2</sub> foi de 44%.

**Figura 4 – Determinantes da Variação da Emissão de CO<sub>2</sub> da Queima de Combustível Fóssil**



Fonte: IPCC (2014b).

Neste contexto, é notória a necessidade da adoção de políticas e medidas de mitigação das emissões de gases do efeito estufa mais rígidas que àquelas que vêm sendo implementadas. Caso contrário, supondo que não existirão grandes transformações nos paradigmas tecnológico e energético vigentes, a conjugação do crescimento populacional com o crescimento econômico projetado para as próximas décadas, sobretudo nos países em vias de desenvolvimento, fará com que as emissões de gases do efeito estufa permaneçam crescendo<sup>16</sup>. Como consequência, ocorreriam mudanças em todo o sistema climático (aumento de temperaturas, elevação do nível do mar, derretimento de geleiras e diminuição da camada de neve, maior frequência de eventos extremos, etc). Neste sentido, as estimativas indicam que temperatura média da Terra em 2100 seria entre 3,7°C e 4,8° C superior ao nível da temperatura na era pré-industrial<sup>17</sup>.

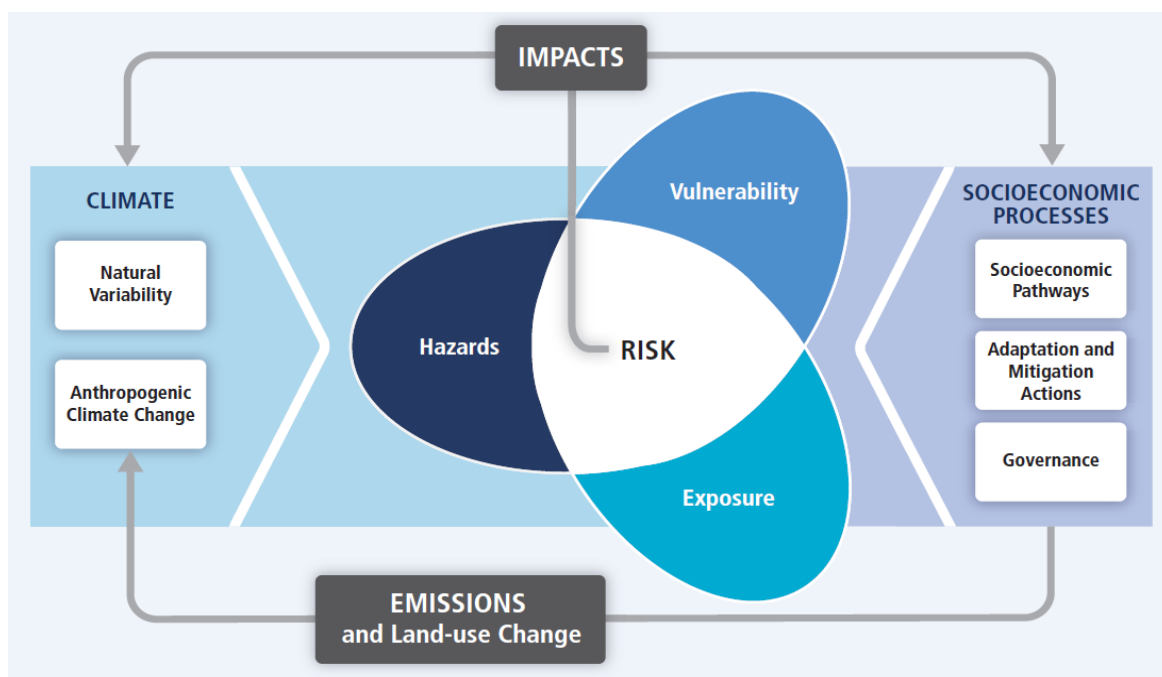
<sup>16</sup> A concentração de CO<sub>2eq</sub> na atmosfera atingiria um patamar superior a 450 ppm antes de 2030 e até 2100 esta concentração estaria situada entre 750 ppm e 1300 ppm.

<sup>17</sup> Estes são os valores medianos. Ao se considerar a incerteza climática, o intervalo seria entre 2,5° C e 7,5° C.

## 2.2. Os Impactos das Mudanças Climáticas e a Necessidade de Combatê-las

Embora o clima apresente uma variabilidade natural, o exposto na subseção 1.1 explicita a influência antropogênica nas mudanças climáticas atualmente verificadas e projetadas para este século. A questão relevante é que tais alterações impõem riscos e causam impactos sobre os sistemas naturais e sobre a esfera sócio-econômica. Logo, a adoção de medidas de mitigação e adaptação se farão necessárias. Em suma, existe uma lógica circular, a qual está ilustrada na Figura 5.

**Figura 5 – A Lógica dos Impactos das Mudanças Climáticas**



Fonte: IPCC (2014a).

Nos últimos anos, já são perceptíveis os impactos das mudanças climáticas nos sistemas naturais. Por sua vez, no que se refere ao âmbito sócio econômico, embora alguns impactos possam ser atribuídos à mudança do



clima, ainda não é possível identificar com clareza esta relação porque é preciso considerar a atuação de outras forças nestes impactos. Entretanto, mais relevante que os impactos já verificados é a constatação que as mudanças climáticas prospectadas para as próximas décadas irão potencializar os riscos atuais e criar novos riscos e impactos para os sistemas naturais e sócio-econômicos.

Em muitas regiões, verificam-se os efeitos das mudanças no regime pluvial e do derretimento da camada de neve e das geleiras sobre a disponibilidade e a qualidade da água. Ao longo das próximas décadas, prospecta-se que um crescente contingente populacional sofrerá com escassez de água. Este será um problema corrente nos países situados em regiões subtropicais em função da redução, tanto das águas superficiais, como das águas subterrâneas<sup>18</sup>. Concomitantemente, em regiões secas será cada vez mais frequente a ocorrência de períodos de seca intensa. Logo, é possível vislumbrar uma maior competição pelo uso da água entre regiões e/ou setores. Além da disponibilidade da água, as mudanças climáticas terão efeitos sobre a qualidade do recurso e isso fará com que os tratamentos convencionais não sejam suficientes para tornar esta água potável<sup>19</sup>.

Concomitantemente, mesmo que o número de espécies extintas em função das mudanças climáticas ainda seja restrito, é possível identificar os efeitos da mudança do clima sobre os padrões locais e sazonais das atividades de diversas espécies, incluindo mudanças em rotas migratórias. Contudo, a magnitude das mudanças climáticas projetadas para as próximas décadas permite afirmar que muitas espécies não irão conseguir se adaptar rapidamente às novas condições naturais dos seus respectivos habitats. Desta

---

<sup>18</sup> Nos países localizados em altas latitudes, a disponibilidade de água tende a aumentar.

<sup>19</sup> A deterioração da qualidade da água deriva desde o crescimento de sedimentos, nutrientes e poluentes, especialmente durante períodos de seca, até a interrupção da operação das estações de tratamento em momentos de inundação.

forma, deverá ocorrer uma redução da abundância ou, no limite, a extinção de muitas espécies<sup>20</sup>.

Em realidade, o problema é ainda mais amplo que a extinção de algumas espécies animais pois seu escopo são os impactos associados a degradação dos ecossistemas como um todo, incluindo a perda de biodiversidade, a já mencionada deterioração da qualidade da água, redução do estoque de carbono florestal e restrições às atividades econômicas. No caso dos ecossistemas terrestres e de água doce, as mudanças do clima prospectadas para as próximas décadas impõem um enorme risco de impactos irreversíveis na estrutura, composição e função dos mesmos<sup>21</sup>. Por sua vez, sistemas costeiros e/ou regiões de baixa altitude estarão cada vez mais expostas às inundações, erosões e, no limite, a submergirem devido à elevação do nível do mar. Já nos sistemas marítimos, os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade de peixes irá afetar a atividade pesqueira. Porém, o impacto de maior dimensão refere-se aos danos sobre o ecossistema marítimo, especialmente a fauna, derivado da acidificação dos oceanos.

No que se refere à produção agrícola é fácil estabelecer uma relação com as mudanças climáticas, dado que a produtividade está diretamente relacionada às condições ambientais, sendo a disponibilidade de água também uma variável relevante. Verifica-se que os efeitos negativos são predominantes, sobretudo os cultivos de trigo e de milho vêm sendo afetados em diversas regiões. Em contrapartida, os efeitos sobre a produtividade das culturas de soja e de arroz são pequenos até o momento, sendo que no caso do arroz prospecta-se impactos negativos ao longo das próximas décadas. De todo modo, estes impactos sobre as culturas agrícolas consistem em uma ameaça à segurança da oferta de alimentos em bases competitivas de custos, sobretudo

---

<sup>20</sup> Esta tendência é acentuada pela exploração excessiva de certas espécies, poluição e maior contato com predadores em um contexto onde algumas espécies tendem a modificar rotas migratórias.

<sup>21</sup> O aumento das temperaturas e das secas irá tornar as árvores mais perecíveis e, por consequência, aumentar à taxa de mortalidade das mesmas. A Floresta Amazônica é um grande exemplo dos impactos que as alterações climáticas podem ter sobre os ecossistemas.

em um contexto de aumento da demanda por alimentos. Por exemplo, em anos recentes foram verificados momentos nos quais os preços dos cereais e dos alimentos aumentaram de forma acelerada em resposta à ocorrência de eventos climáticos extremos.

Apesar da mensuração da relação entre mudanças climáticas e impactos sobre a sociedade e sobre as atividades econômicas ser complexa, algumas inferências devem ser realizadas com vistas a examinar os riscos e impactos que os sistemas sócio-econômicos estão expostos. Neste sentido, é essencial ter a ciência que tais riscos são potencializados em países pobres onde a falta de infraestrutura adequada associada à ineficiência no suprimento de serviços básicos os tornam mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas. O corolário desta maior vulnerabilidade reflete-se nas maiores consequências sobre as áreas urbanas, especialmente para populações carentes que moram em residências com condições precárias, no caso da ocorrência de eventos como ondas de calor, forte precipitação e, como consequência, inundações e/ou deslizamentos de encostas, secas severas e escassez de água<sup>22</sup>. Ao mesmo tempo, os impactos sobre a produção agrícola mencionados no parágrafo anterior tendem a ter a uma maior relevância nos países pobres, dada a maior importância da renda rural e a utilização de técnicas agrícolas mais precárias nos mesmos.

No âmbito da saúde humana, ainda não existem elementos suficientes que permitam afirmar a existência de uma relação mais efetiva entre problemas de saúde e mudanças climáticas. Porém, ao longo das próximas décadas os problemas de saúde deverão ser exacerbados em função das mudanças climáticas, especialmente nos países pobres. Por exemplo, mudanças de temperaturas e no regime de chuvas locais irão aumentar a frequência de doenças transmitidas pela água e propagar vetores de doenças. Além disso, é

---

<sup>22</sup> Os deslizamentos de terra, derivados de chuvas intensas, em 2011 no Estado do Rio de Janeiro é um nítido exemplo de como eventos climáticos extremos podem ser especialmente nocivos para os segmentos carentes da população.

possível vislumbrar um aumento do número de ferimentos (e mesmo mortes) ocasionados por ondas de calor e incêndios e problemas de nutrição em função da redução da produtividade agrícola e da atividade pesqueira.

É importante destacar que as restrições na disponibilidade de recursos derivadas das mudanças climáticas irão potencializar o risco de conflitos e guerras civis, sobretudo em situações de pobreza e/ou crises econômicas. No caso específico de regiões insulares e de regiões costeiras, a elevação do nível do mar representa um grave risco para a infraestrutura destas localidades e, no limite, para a própria integridade física destes territórios.

Cabe ressaltar, que embora o setor energético esteja no cerne das origens das mudanças climáticas, o mesmo também será afetado por elas. De um lado, prospecta-se a redução da demanda por aquecimento em nível residencial e comercial enquanto a demanda por refrigeração tende a aumentar. Por outro lado, as mudanças climáticas irão impactar a disponibilidade das diferentes fontes energéticas, especialmente no caso das fontes renováveis, as quais possuem sua oferta diretamente relacionada às condições climáticas.

Dado que o nível de atividade econômica é determinado por variáveis como tamanho da população, padrões de consumo, renda per-capita, tecnologias disponíveis, preços relativos e regulação, não é tarefa simples mensurar o impacto das mudanças climáticas no crescimento econômico ao longo deste século. De todo modo, estimativas indicam uma perda de até 2% da renda mundial caso ocorra um aquecimento de 2<sup>o</sup>. C, sendo que estas perdas deverão variar muito de acordo com o país. O principal corolário deste menor nível de atividade econômica será uma maior dificuldade em combater a pobreza e erradicar a fome em nível mundial.

É preciso ressaltar que a dimensão e a irreversibilidade de todos estes impactos serão proporcionais ao nível de aquecimento global que venha a

ocorrer nas próximas décadas<sup>23</sup>. Logo, compreende-se o caráter imperativo da adoção de efetivas medidas de redução das emissões de gases do efeito estufa com o objetivo de mitigar as mudanças climáticas.

Explica-se: para cada valor de aumento da temperatura média global, existe uma determinada concentração de gases do efeito estufa na atmosfera, a qual é denominado *CO<sub>2</sub> budget emissions*. Caso o objetivo seja limitar o aquecimento global em 2° C, é importante ter a ciência que as emissões antropogênicas de gases do efeito estufa já realizadas representam uma enorme parte deste orçamento. Desta forma, é preciso monitorar o ritmo em que será “gasto” a parte remanescente do orçamento até que a neutralidade em carbono seja atingida, ou seja, o momento em que as emissões sejam equivalentes ao montante de gases sequestrados da atmosfera<sup>24</sup>.

Ressalta-se que, quanto mais rápido for “gasto” este orçamento remanescente, maior será a necessidade de posteriormente existirem emissões negativas que compensem a ultrapassagem do limite orçamentário. Em tese, estas emissões negativas irão advir de reflorestamento e de plantas de produção de bioenergia com captura de carbono<sup>25</sup>. No entanto, destaca-se que existem muitas incertezas sobre como estas alternativas poderão serem utilizadas em larga

---

<sup>23</sup> As ondas de calor serão tão mais intensas e frequentes quanto maior for o aquecimento global. O mesmo ocorrerá em termos de mudanças no regime de chuvas (redução da pluviometria em algumas regiões e aumento em outras) e de disponibilidade de água potável.

<sup>24</sup> Conforme UNEP (2014), ao se descontar os demais gases do efeito estufa, o orçamento de CO<sub>2</sub> para limitar o aquecimento global em 2° C é de 2900 GtCO<sub>2</sub>. Dado que já foram emitidos mais de 1900 GtCO<sub>2</sub>, é imperativa uma drástica redução das emissões o mais breve possível. O estudo destaca a necessidade das emissões totais de gases do efeito estufa totalizarem 42 GtCO<sub>2e</sub> e 22 GtCO<sub>2e</sub> em 2050. Tais valores representam reduções em relação as emissões verificadas em 2010 de, respectivamente, 14% e 55%. Neste caso, a neutralidade em carbono do CO<sub>2</sub> seria atingido entre 2055 e 2070 enquanto que a neutralidade do total das emissões seria atingido entre 2080 e 2100. Porém, como já fora relatado, tais emissões estão aumentando. Em 2012, as emissões totais foram em torno de 45% maiores que aquelas verificadas em 1990 e totalizaram 54 GtCO<sub>2e</sub>. Em um cenário *business as usual*, estas emissões atingiriam o montante de 68 GtCO<sub>2e</sub> em 2030 e de 87 GtCO<sub>2e</sub> em 2050. Mesmo considerando as medidas e políticas de mitigação das mudanças climáticas já implementadas e/ou promulgadas, as emissões em 2030 estariam situadas entre 56 e 59 GtCO<sub>2e</sub>. Logo, é perceptível o gap existente entre as emissões projetadas e o nível necessário para limitar o aquecimento global em 2° C.

<sup>25</sup> Ver subseção 2.1.4.

escala de forma eficiente. Soma-se a isso o aumento da incerteza em relação ao comportamento do clima no cenário em que o orçamento de gases do efeito estufa seja ultrapassado. Observa-se assim que a postergação de políticas e medidas que efetivamente possibilitem a descarbonização da economia irá potencializar os riscos das mudanças climáticas. Não obstante a maior dificuldade em limitar o aquecimento global em 2° C, tal postergação também aumentará o custo de mitigação das emissões porque no curto prazo a infraestrutura permanecerá sendo expandida baseada em insumos fósseis e no médio prazo maiores esforços de mitigação serão necessários, os quais exigirão a utilização de todas as tecnologias de baixo carbono disponíveis.

Contudo, é preciso enfatizar que o aquecimento global de 2° C em relação aos níveis pré-industriais já resulta em consideráveis impactos, dentre os quais, ameaça à dinâmica de sistemas que não podem ser substituídos, extinção de diversas espécies e o comprometimento da segurança alimentar em algumas regiões<sup>26</sup>. Considerando que grande parte das emissões cumulativas de gases do efeito estufa emitidos desde a Revolução Industrial permanecerão na atmosfera, a ocorrência de mudanças climáticas é um processo irreversível. Desta forma, a adoção de medidas de adaptação apresenta-se como uma necessidade<sup>27</sup>.

A sociedade se adaptar a mudanças climáticas não consiste exatamente em uma novidade. Porém, dada a dimensão e a velocidade das mudanças em curso, é preciso que os governos definam diretrizes que incitem os setores público e privado a tomarem decisões com vistas a implementar medidas de adaptação de forma imediata. Neste sentido, compreende-se a necessidade que o planejamento e programas implementados em nível local e/ou regional contemplem a adoção de medidas de adaptação. Em muitos casos, este

---

<sup>26</sup> No caso brasileiro, prospecta-se que a produtividade da soja pode ser reduzida em 70% em algumas regiões e a de milho em até 60% até 2050. Concomitantemente, destaca-se que o potencial de pesca tende a ser reduzido (WBG, 2014).

<sup>27</sup> Conforme LEMIEUX *et al.* (2014), o processo de adaptação consiste na tomada de ações e decisões com o objetivo de mitigar danos das mudanças climáticas ou que possibilitem o aproveitamento de novas oportunidades.

processo pode ocorrer a partir de ajustes incrementais em programas e práticas já existentes, como por exemplo, melhorias nos sistemas de gerenciamento do suprimento de água.

Verifica-se que atualmente diversas regiões já estão considerando planos de adaptação às mudanças climáticas em suas políticas. Na Europa, diversos países apresentam programas de proteção ambiental e planejamento do uso da terra, aprimoram sistemas de gerenciamento de risco de desastres e planejam de forma integrada medidas de adaptação para as zonas costeiras e para o uso da água. Por sua vez, em algumas regiões da Ásia, o processo de adaptação está diretamente associado a gestão integrada dos recursos hídricos e agroflorestais com o reflorestamento de manguezais no litoral, enquanto que nos EUA medidas de adaptação estando sendo tomadas com vistas a proteger a infraestrutura<sup>28</sup>. Mesmos países em vias de desenvolvimento já começam a adotar medidas de mitigação. Na América Latina, especial atenção tem sido concedida à busca de resistência por parte das culturas agrícolas e para isso têm sido realizados investimentos na melhoria das previsões climáticas e na gestão adequada dos recursos hídricos. Já na África, os planos contemplam desde medidas básicas de saúde pública até ajustes tecnológicos e implementação de sistemas de monitoramento de risco de desastres<sup>29</sup>.

Muitas das medidas de adaptação são possíveis apenas em função da disponibilidade de tecnologias e de sistemas de gestão de informações

---

<sup>28</sup> A partir da constatação que os impactos das mudanças climáticas não estão restritos aos sistemas naturais e que as cidades são especialmente vulneráveis (VOSKAKMP e VEN, 2014), CHAPPIN e LEI (2014) ressaltam a necessidade da adoção de medidas de adaptação relativas a infraestruturas que compõem o sistema tecno-social contemporâneo. No perímetro urbano, a construção de “espaços verdes” (parques, telhados e paredes verdes) consiste em uma importante ferramenta de adaptação às mudanças climáticas na medida em que permitem, por exemplo, maior controle das afluições, promoção de conforto térmico derivado do aumento do sombreamento proporcionado pela vegetação e a possibilidade de cultivo agrícola para consumo próprio. Como estes espaços ocorrerão em conjunto com infraestruturas convencionais, trata-se de uma de conceito híbrido comumente denominado como infraestrutura verde (DEMUZERE *et al.*, 2014; LWASA *et al.*, 2014).

<sup>29</sup> É importante ressaltar que as medidas de adaptação que estão sendo implementadas ainda estão aquém daquelas que seriam necessárias e isso ocorre mesmo nos países desenvolvidos (EKSTROM e MOSER, 2014).

adequados. Contudo, é preciso ressaltar que diversas medidas são de ordem gerencial e/ou dependem da mudança de comportamento da sociedade. Por exemplo, os riscos impostos pelas possibilidades de inundações e de incêndios podem ser controlados através de sistemas tecnológicos e de dispositivos de alerta. Porém, a diversificação das atividades econômicas e a adequada dispersão da população no território são medidas estruturalmente ainda mais relevantes. Outra ilustração refere-se à questão da disponibilidade de água: a adaptação passa por novas técnicas de uso (redução do uso de água na irrigação agrícola, reaproveitamento, etc). Porém, também será preciso uma mudança do comportamento da sociedade com vistas a eliminar desperdícios. Um outro exemplo a ser citado é o das culturas agrícolas onde a biotecnologia será fundamental no desenvolvimento de novas variedades genéticas a serem conjugadas com novas práticas agrícolas, mas formas alternativas de compensar à nutrição humana e animal precisarão ser examinadas e, no limite, prospecta-se até mesmo o exame de práticas tradicionais indígenas.

As medidas de adaptação requeridas devem apresentar características compatíveis com as peculiaridades locais para que possam efetivamente reduzir riscos e vulnerabilidades. Tal compatibilidade não está restrita a questões físicas e técnicas, devendo também considerar variáveis sócio-econômicas e estarem alinhadas com as diretrizes da promoção do desenvolvimento sustentável. Neste contexto, é notório que a adoção de medidas que garantam a nutrição adequada das pessoas e investimentos em saneamento básico assumem especial relevância nos países em vias de desenvolvimento.

A resposta à mudança do clima requer a conjugação da mitigação das emissões com adaptação aos impactos que sejam irreversíveis. Explica-se: quanto maior o nível do aquecimento global, maior a quantidade e a gravidade de impactos sobre os quais não será possível adotar-se medidas de adaptação. Não obstante, a mitigação das mudanças climáticas possibilita que



as adaptações necessárias possam ser implementadas de forma mais lenta e menos custosa<sup>30</sup>.

A efetiva resposta à mudança climática não é uma iniciativa de caráter local ou mesmo regional. Existe a necessidade de um acordo global. Neste sentido, foi promulgada a Convenção do Clima que é um tratado internacional que visa estabilizar a concentração de gases do efeito estufa em um nível que não cause mudanças climáticas que comprometam a dinâmica dos sistemas naturais e sócio-econômicos. Porém, as negociações para implementação de um acordo climático são extremamente complexas, dado que os países possuem graus de desenvolvimento socioeconômico com grandes diferenças e, ao mesmo tempo, as contribuições históricas nas emissões de gases do efeito estufa são distintas. Logo, nota-se uma certa resistência dos países em vias de desenvolvimento em assumirem compromissos climáticos pois enxergam os custos de implementação destes acordos como um entrave ao desenvolvimento e costumam requerer a transferência de recursos tecnológicos e financeiros por parte dos países ricos para que possam adotar medidas de mitigação das emissões e se adaptarem às mudanças climáticas. Em contrapartida, países desenvolvidos, especialmente os EUA, com base nas emissões correntes<sup>31</sup>, argumentam ser imperativo estabelecer compromissos que também contemplem os países em vias de desenvolvimento.

A Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas estabeleceu a Conferências das Partes como seu órgão superior e o exame das reuniões realizadas anualmente ilustra com clareza a dificuldade inerente ao estabelecimento de um acordo climático eficaz. Embora o princípio das responsabilidades comuns, porém diferenciadas, seja uma das diretrizes básicas das negociações climáticas, o fato do Protocolo de Quioto ter estabelecido compromisso de reduções apenas para os países do Anexo I

---

<sup>30</sup> Esta visão de mitigação e adaptação como estratégias complementares é contrastante com a dicotomia por vezes propagada.

<sup>31</sup> No escopo do setor energético, os países em vias de desenvolvimento responderam por 55% das emissões globais no ano de 2012 (IEA, 2014a).

(países desenvolvidos e economias do leste europeu) tornou sua entrada em vigor bastante difícil, especialmente devido à resistência dos EUA em referendá-lo<sup>32</sup>. Atualmente nota-se a dificuldade na implementação de um acordo que suceda o Protocolo de Quioto. De todo modo, considerando a contundência e amplitude que o novo acordo climático precisa ter, é imperativo que haja a participação dos EUA e de países em vias de desenvolvimento, ao menos os de maior porte como China, Índia e Brasil.

Neste contexto, é importante ressaltar a importância que pode vir a assumir o estabelecimento de acordos em nível setorial. Tais acordos teriam o intuito de estabelecer normas com vistas a definir padrões tecnológicos compatíveis com uma economia de baixo carbono. Esse tipo de estratégia obrigaria os agentes privados a terem um efetivo engajamento na busca por soluções sustentáveis e minimizaria o conflito inerente aos interesses distintos dos países, vide que grande parte destes agentes estão presentes em diversos países.

A implementação de acordos setoriais e a promulgação de acordos climáticos globais não devem ser vistos como estratégias concorrentes e/ou excludentes. Em realidade, tratam-se de políticas complementares porque o estabelecimento de normas em nível setorial pode contribuir para que as metas estabelecidas nos acordos climáticos sejam efetivamente atingidas. Tal assertiva tem como base o fato que os acordos climáticos por vezes são falhos nos mecanismos que possibilitem efetivamente ocorrer a redução das emissões de gases do efeito estufa. Isto ocorre em função da carência de um maior detalhamento de como esta mitigação irá ocorrer e da preocupação dos países em adotarem medidas que comprometam a competitividade de suas

---

<sup>32</sup> O Protocolo de Quioto estabeleceu que os países do Anexo B (países do Anexo I com compromissos de redução das emissões de gases do efeito estufa devem reduzir suas emissões de GEE em 5,2% entre 2008 e 2012 em relação às emissões de 1990. Porém, para o Protocolo de Quioto entrar em vigor seria necessário ser ratificado por países que fossem responsáveis por pelo menos 55% das emissões. Dado que os EUA respondiam por aproximadamente 1/3 as emissões de dos países do Anexo B, sua oposição ao protocolo colocou em risco a viabilidade do mesmo. Somente em novembro de 2004 com a assinatura da Rússia que o protocolo tornou-se uma realidade.

respectivas economias. Logo, é compreensível a importância que os acordos setoriais tendem a ter para que os acordos climáticos sejam efetivos.

### 3. O Desafio do Setor Energético

O exposto na Seção 1 deste relatório deixa explícito o caráter imperativo da mitigação das emissões antrópicas de gases do efeito estufa. Dada a variedade de tecnologias disponíveis e comportamentos passíveis de serem adotados, é possível a construção de diversos cenários de mitigação. Neste contexto, é essencial a identificação dos cenários que possibilitem a estabilização da concentração de gases do efeito estufa em níveis que permitam a adaptação dos sistemas terrestres sem maiores danos às suas respectivas dinâmicas. Mais do que identificar estes cenários, o relevante é examinar suas diretrizes tecnológicas e comportamentais e as medidas necessárias para viabilizá-los.

Diante à necessidade de se limitar o aquecimento global neste século em 2° C em relação à temperatura média global da era pré-industrial, é preciso ações com vistas a estabilizar até 2100 a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera em 450 ppm CO<sub>2eq</sub> pois caso esta concentração atinja o patamar superior a 500 ppm CO<sub>2eq</sub> a probabilidade de limitar o aquecimento global em 2° C diminui bastante, sendo este objetivo muito improvável de ser atingido caso esta concentração seja superior a 650 ppm CO<sub>2eq</sub> em 2100. Para que a concentração de 450 seja atingida ao final deste século, será preciso uma redução entre 40 e 70% das emissões em 2050 em relação às emissões de 2010 e emissões próximas a zero em 2100. Logo, é perceptível o tamanho do desafio.

Mesmo que a concentração de gases do efeito estufa se estabilize em 450 ppm CO<sub>2eq</sub> em 2100, é provável que ao longo deste século esta concentração ultrapasse este valor, sobretudo ao se considerar que as emissões projetadas no curto prazo não são compatíveis com uma trajetória de efetiva mitigação

das emissões<sup>33</sup>. Desta forma, nota-se que pode existir a necessidade de sequestrar carbono para que se chegue ao fim deste século com a concentração de gases do efeito estufa desejada. Ao mesmo tempo, quanto mais moroso e postergado for o processo de mitigação das emissões, maior será a dificuldade de executá-lo de forma eficaz pois os desafios técnicos irão se potencializar.

Em bases estritamente econômicas, ou seja, considerando o *business as usual*, as emissões de gases do efeito tendem a crescer em todos os setores, exceto no âmbito do uso da terra onde prospecta-se um declínio das emissões em função da redução do desmatamento e intensificação de medidas de reflorestamento<sup>34</sup>.

Observa-se que a adoção de políticas de mitigação possui um custo associado, o qual está diretamente relacionado às tecnologias utilizadas e ao ritmo de implementação destas políticas. Em um contexto no qual todos os países adotem medidas de mitigação e exista ampla disponibilidade de tecnologias, tal custo pode representar uma redução em torno de 11% do consumo até 2100<sup>35</sup>. Concomitantemente, é preciso ressaltar que o custo dos esforços de mitigação tende a variar de acordo com as características de cada país. Cria-se, portanto, um elemento perturbador da competitividade relativa das economias e tal fato pode ser apontado como um importante entrave nas negociações climáticas mundiais<sup>36</sup>.

---

<sup>33</sup> Segundo UNEP (2012), em um cenário *business-as-usual* as emissões globais seriam de 58 Gt CO<sub>2eq</sub> em 2020. Mesmo em um cenário em que medidas contundentes sejam adotadas, as emissões aumentariam para 52 Gt CO<sub>2eq</sub> em 2020.

<sup>34</sup> Estimativas indicam que as emissões associadas ao uso da terra em 2050 podem ser metade daquelas registradas em 2010. Porém, é preciso ressaltar que existe um razoável grau de incerteza na mensuração das emissões deste setor.

<sup>35</sup> Esta redução do consumo poderia atingir 4% em 2030 e 6% em 2050. Dado que o crescimento anual médio do consumo projetado até 2100 está compreendido entre 1,6 e 3%, estes valores representam uma redução de até 0,14% do crescimento anual médio.

<sup>36</sup> Estas diferenças de custos justificam a criação de mercados de emissões ou de créditos de carbono que possibilitem a equalização do custo marginal de mitigação.

Dado que o setor energético é o principal emissor de gases do efeito estufa, políticas de redução das emissões de gases do efeito estufa estão diretamente associadas a significativas modificações nas diretrizes da produção e do consumo de energia. Logo, é notório que a questão ambiental deve ter caráter prioritário nas políticas energéticas delineadas ao longo deste século. Porém, tais políticas também devem garantir uma expansão da oferta de energia para o atendimento de uma demanda que crescerá a taxas expressivas nas próximas décadas impulsionada pelos países em vias de desenvolvimento, e esta oferta deverá ter o menor custo possível.

Portanto, o desafio imposto ao setor energético é de grandes dimensões e alterações nos padrões tecnológicos e comportamentais são requeridas. O objetivo desta seção é justamente apresentar as alternativas passíveis de serem implementadas e como as mesmas podem contribuir para a mitigação das emissões.

### **3.1. Alternativas de Mitigação das Emissões do Setor Energético**

Atualmente, os insumos fósseis representam mais de 80% da oferta mundial de energia. No setor de transportes, mais de 95% das necessidades energéticas são atendidas por derivados de petróleo. Concomitantemente, quase 70% da geração mundial de eletricidade ocorre em centrais termoelétricas movidas a combustíveis, sendo o carvão responsável por mais de 40% desta geração (IEA, 2012). A Tabela 1 mostra que, na primeira década deste século, a predominância fóssil da matriz energética mundial manteve-se inalterada.

**Tabela 1:**

#### **Evolução da Demanda por Recursos Energéticos Primários: 2000 – 2010 (Mtep)**

	2000	2010
Carvão	2378	3474
Óleo	3659	4113

Gás Natural	2073	2740
Nuclear	676	719
Hidroeletricidade	226	295
Bioenergia	1027	1277
Outras Renováveis	60	112
Total	10097	12730
Participação de Fontes Fósseis na Oferta de Energia	80%	81%

Fonte: IEA (2012).

Esta predominância de fontes fósseis é responsável pelo fato de 69% das emissões antropogênicas de gases do efeito estufa em 2010 serem derivadas da produção e do uso de energia (IEA, 2014a). Considerando que a demanda mundial por energia deverá crescer 35% ao longo dos próximos 20 anos impulsionada pelo crescimento do consumo nos países em vias de desenvolvimento, é perceptível que, caso sejam mantidos os padrões tecnológicos e de consumo atuais, as emissões do setor energético irão percorrer uma trajetória incompatível com a necessidade de mitigação das mudanças climáticas.

Desta forma, é imperativa a adoção de novas tecnologias, o uso de recursos alternativos e mudanças nos padrões comportamentais, destacando que não tratam-se de estratégias concorrentes e sim complementares<sup>37</sup>. A seguir será examinada a importância e a contribuição que práticas de eficiência energética, fontes alternativas e renováveis, captura e sequestro de carbono e a energia nuclear poderão ter na mitigação das emissões de gases do efeito estufa.

---

<sup>37</sup> O exame do setor industrial evidencia a necessidade da adoção de estratégias conjuntas. Em linhas gerais, notam-se ganhos de eficiência energética ao longo das últimas décadas. Porém, a efetiva redução das emissões deste setor requer um menor uso de combustíveis fósseis, adoção da tecnologia de captura de carbono e um uso mais eficiente e o reaproveitamento dos recursos materiais.

### **3.2. O Uso mais Eficiente dos Recursos Energéticos**

Historicamente o planejamento do setor energético tinha como foco o exame da expansão da oferta para o atendimento de uma demanda suspostamente dada. Mais recentemente, passou a ter importância o conceito de planejamento energético integrado, no qual considera-se que a demanda também pode ser gerenciada. Por trás deste conceito, está a noção de que é a demanda por serviços energéticos (trabalho, deslocamento, climatização) que deve ser atendida e não a demanda por energia em si. Por exemplo, a substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas compactas fluorescentes é um típico caso de medida promotora de eficiência energética na medida em que atende a uma determinada demanda por iluminação com um menor consumo de energia. Logo, é facilmente perceptível que o atendimento da demanda por serviços energéticos com o menor consumo possível de recursos energéticos deve ser visto como algo desejável.

Este uso mais eficiente dos recursos energéticos é totalmente condizente com a mitigação das emissões de gases do efeito estufa na medida em que representa uma redução na demanda primária de energia e, ao mesmo tempo, consiste em uma estratégia promotora de segurança energética<sup>38</sup>. Tratam-se aqui de ganhos de eficiência não restritos a medidas de otimização ao longo da cadeia de suprimento energético. Ações incidentes sobre a demanda de energia também precisam estar contempladas, desde a adoção de dispositivos tecnológicos que permitam um uso final de energia mais eficiente até mudanças comportamentais nos padrões de consumo de energia<sup>39</sup>.

---

38 Medidas de eficiência energética também minimizam outros impactos ambientais, dentre os quais, poluição local. Além disso, representam a redução dos dispendios com importação de energia por parte de países dependentes e, por consequência, melhora a balança de pagamentos dos mesmos.

39 Quando tratam-se de mudanças comportamentais, é comum o uso do termo “conservação de energia”.



Portanto, não chega a ser surpreendente que um considerável número de países estejam concedendo papel estratégico a eficiência energética em suas respectivas políticas energéticas. No âmbito da União Europeia, existe diretiva estabelecendo como meta ganhos de eficiência de 20% até 2020 em relação ao cenário *business as usual*. Por sua vez, o Japão, não obstante em tradicionalmente deter liderança na promoção de eficiência energética, lançou em 2012 um programa que visa reduzir em 10% a sua demanda de eletricidade prospectada para 2030. Mesmo os maiores emissores de poluentes do mundo passaram a contemplar o aumento da eficiência no uso dos recursos energéticos em suas políticas. Enquanto os EUA apresentam especial atenção ao estabelecimento de rigorosas normas referentes aos padrões de consumo de energia, a China tem estabelecido ambiciosas metas e projeta uma redução de 16% da sua intensidade energética já em 2015<sup>40</sup>.

A partir das medidas que estão sendo adotadas, prospecta-se uma redução anual média da intensidade energética mundial de 2,4% entre 2010 e 2035. Para efeito de comparação, entre 1980 e 2010 este valor foi de 1%<sup>41</sup>. Desta forma, compreende-se porque a eficiência energética é apontada como uma das principais estratégias para mitigação das emissões de gases do efeito estufa ao longo dos próximos 20 anos.

Além de ser uma das formas mais custo-efetivas para redução da emissão de gases do efeito estufa, a promoção de eficiência energética assume especial importância no curto prazo por dotar o setor energético de alguma dose de flexibilidade no que se refere às trajetórias tecnológicas a serem adotadas. Explica-se: a redução da demanda por energia diminui a necessidade de

---

40 As metas chinesas contemplam políticas de incentivo a setores de maior valor agregado com vistas a tornar sua estrutura econômica menos intensiva em energia.

41 É preciso ressaltar que a evolução da intensidade energética não é derivada apenas de ganhos de eficiência inerentes a aprimoramentos tecnológicos. É preciso também considerar mudanças na estrutura da economia. Neste sentido, cabe destacar que, se entre 1980 e 2000 a intensidade energética teve um ritmo anual médio de redução de 1,2%, este ritmo foi de apenas 0,5% entre 2000 e 2010 em função do forte crescimento da economia asiática baseado em indústrias energo-intensivas e uma oferta de energia com ampla participação de carvão.

investimentos em infraestruturas de produção e distribuição de energia fóssil, por consequência, o efeito *lock in*<sup>42</sup> é mitigado.

Dado que a oferta de energia é a principal fonte emissora de gases do efeito estufa, o exame das possibilidades de ganhos de eficiência energética deve começar pela identificação das alternativas de aprimoramentos das técnicas de extração, conversão e distribuição de energia até os consumidores finais. Ao se constatar que o nível de eficiência da cadeia energética ainda é relativamente limitado, nota-se que o potencial para ganhos de eficiência energético não pode ser ignorado.

Em termos de extração e produção de combustíveis fósseis, é possível afirmar que a dificuldade de mitigar as emissões de gases do efeito estufa será crescente. Explica-se: mesmo considerando a disseminação de técnicas mais eficientes ao longo dos próximos anos, os processos tendem a exigir cada vez mais energia e apresentarem crescentes emissões fugitivas. Como ilustração, a produção de petróleo não convencional (petróleo de xisto ou de areia betuminosa) exige montantes de energia superiores à produção de petróleos dito convencionais e apresentam maiores emissões fugitivas derivadas da queima e da ventilação dos processos<sup>43</sup>.

Desta forma, ganha relevância a possibilidade de substituição de combustíveis. Adicionalmente, o desenvolvimento da técnica de fraturamento hidráulico associado à perfuração horizontal de poços assume grande importância por possibilitar uma diversificação da oferta de gás natural através da exploração do gás de xisto e, como consequência, possibilitar a substituição de plantas a carvão por plantas a gás natural. Considerando que o conteúdo de carbono do

---

<sup>42</sup> Por se tratar de infraestruturas capital intensivas com longo prazo de maturação dos investimentos, o efeito *lock in* faz com que o sistema sócio-econômico tenda a ficar aprisionado em uma estrutura/trajetória intensiva em carbono e torna mais custosa a mitigação das emissões.

<sup>43</sup> Ganhos de eficiência podem ocorrer no transporte de óleo bruto através de um maior e mais eficiente uso da rede de oleodutos, especialmente se forem utilizados aditivos com o objetivo de melhorar a fluidez do óleo e bombas eficientes.

gás natural é menor que o do carvão e térmicas a gás estão aptas a operarem com maiores níveis de eficiência, a tendência é de redução das emissões. Este processo já vem ocorrendo nos EUA, onde a produção de *shale gas* se disseminou nos últimos anos<sup>44</sup>.

Para que este ganho de eficiência efetivamente se verifique no setor elétrico, é essencial que plantas de ciclo combinado sejam priorizadas<sup>45</sup>. Na mesma linha, o interesse crescente por sistemas de cogeração<sup>46</sup>, os quais permitem atender duas necessidades energéticas a partir de um mesmo insumo energético e por isso apresentam expressivos níveis de eficiência, reforça a relevância da adoção de tecnologias mais eficientes.

De todo modo, o exame das perspectivas do uso do carvão em bases mais eficientes se torna imperativo pelo fato de que a geração em termoelétricas movidas a carvão responderem por mais de 40% da oferta mundial de energia elétrica e também por haver abundância de reservas remanescentes deste combustível. Neste sentido, é bastante relevante a constatação que a maior parte da queima de carvão em centrais termoelétricas ainda ocorra em condições subcríticas com eficiência média de 33% enquanto que a combustão em condições super ou ultracríticas possibilita a operação com eficiências de 46%.

O transporte de energia elétrica é outro nicho no qual podem existir ganhos de eficiência, especialmente nos países em vias de desenvolvimento onde as

---

<sup>44</sup> É possível afirmar que esta redução pode atingir algo como 50% das emissões, tendo como base de comparação o paradigma tecnológico atual das plantas de geração a carvão. Cabe destacar, que estas estimativas já consideram as emissões fugitivas de metano, as quais dependem das práticas de detecção e controle ao longo da produção e do transporte do gás e costumam variar entre 1 e 5% do gas produzido.

<sup>45</sup> Em uma usina termoelétrica de ciclo aberto, o calor rejeitado pela turbina a gás é liberado para a atmosfera que atua fechando o ciclo. Este arranjo tecnológico tem eficiência inferior a 40%. Em contrapartida, em usinas ciclo combinado o calor do exaustor é recuperado em uma caldeira e é utilizado como fluido de trabalho em uma turbina a vapor. Termoelétricas com ciclo combinado podem atingir eficiências da ordem de 55%.

<sup>46</sup> A média da eficiência global dos sistemas de co-geração em operação em vigor é de 62%, mas novas plantas já são capazes de atingir eficiências em torno de 85%.

perdas técnicas das redes de transmissão e distribuição chegam a atingir 20% da energia elétrica produzida (em contraste com a perda média de 6,5% nos países da OCDE). Com base na realidade europeia, na qual estima-se que 25% das perdas totais e 40% das perdas dos sistemas de distribuição estão associadas aos transformadores utilizados, nota-se a pertinência da adoção de transformadores mais eficientes. De todo modo, grande parte destas perdas ocorrem nos cabos e linhas, as quais são inversamente proporcionais a voltagem e isso explica porque as perdas são menores nos sistemas de transmissão. Com vistas a reduzir estas perdas, a opção por sistemas de transmissão em corrente contínua consiste em uma interessante alternativa, especialmente quando o parque gerador encontra-se distante do centro de carga. Por sua vez, a disseminação da geração distribuída é um elemento indutor da redução das perdas<sup>47</sup>.

Em termos de medidas de efficientização da demanda por energia, as mesmas devem começar por aquelas que eliminem desperdícios no consumo. Em seguida, é pertinente que se opte por equipamentos e/ou processos mais eficientes no momento em que se faça necessário a realização de um investimento. No limite, tais investimentos devem ser realizados mesmo no caso em que o equipamento em operação ainda não esteja chegado ao fim da vida útil e nem esteja amortizado.

No setor de edifícios, dado que o mesmo responde por 32% do consumo final de energia e prospecta-se um expressivo crescimento deste consumo ao longo deste século em função do acesso por parte de um grande contingente populacional a condições de habitação adequadas nos países em vias de desenvolvimento, é essencial a adoção de medidas que reduzam o consumo de energia neste setor. Em nível residencial nota-se a relevância da adoção de revestimentos que propiciem um melhor isolamento térmico dos ambientes e, por consequência, reduzam os dispêndios energéticos com climatização e da

---

47 Na medida em que a geração distribuída (especialmente micro-geração) assuma uma escala expressiva em relação à carga, a injeção de montantes expressivos na rede tende a fazer com que as perdas voltem a crescer.

implementação de soluções arquitetônicas que reduzam a necessidade de iluminação artificial. Ao mesmo tempo, é vital a utilização de equipamentos e de tecnologias mais eficientes. Neste sentido, a substituição de caldeiras por bombas de calor para aquecimento de ambientes e de água é uma medida especialmente relevante, sobretudo em países frios<sup>48</sup>. Para os edifícios comerciais, além das medidas aptas de serem adotadas em âmbito residencial, destaca-se a possibilidade da instalação de plantas de cogeração.

Concomitantemente, o crescimento da economia mundial faz com que a expansão da atividade industrial resulte na perspectiva de um aumento superior a 40% no consumo energético do setor industrial, o qual responde atualmente por 28% do consumo final de energia. Desta forma, é imperativa a busca por um uso mais eficiente dos recursos energéticos. No âmbito dos países desenvolvidos, embora tecnologias eficientes já sejam utilizadas, existem oportunidades inerentes à substituição de instalações antigas e ineficientes. Já nos países em vias de desenvolvimento, as unidades industriais de atividades energo-intensivas instaladas em anos recentes caracterizam-se por terem grande escala e adotarem tecnologias eficientes. Em contrapartida, as instalações antigas apresentam patamares de eficiência muito baixos e a substituição das instalações a otimização dos sistemas passa a ter grande relevância.

As possibilidades de ganhos de eficiência variam de acordo com o setor industrial. No caso da indústria de ferro e aço, dado que 70% da produção ocorre em altos fornos, é essencial a redução do consumo de energia nestes equipamentos<sup>49</sup>. Por sua vez, a diversidade da indústria química torna difícil a identificação de uma tecnologia a ser priorizada. De todo modo, observa-se a

---

<sup>48</sup> Estimativas indicam que a redução no consumo de energia para aquecimento de ambientes e de água poderá responder por mais 50% da energia economia economizada nos próximos 20 anos em edifícios residenciais.

<sup>49</sup> Esta redução ocorre através da utilização de turbinas de recuperação, aumento da injeção de carvão pulverizado e substituição de turbinas a vapor por turbinas a gás de ciclo combinado. Cabe destacar que usinas que utilizam fornos elétricos podem apresentar eficiências maiores, entretanto, esta tecnologia só é aplicável em plantas de maior escala.

importância da recuperação e uso do calor rejeitado, cogeração, maior seletividade na escolha dos catalisadores e busca de uma maior integração entre processos petroquímicos e de refino. Na produção de cimento, o tipo de forno utilizado é um elemento chave na eficiência energética do processo. Já na indústria de papel e celulose destaca-se a importância do aproveitamento dos resíduos da produção como insumo energético. Não obstante, é preciso considerar os potenciais ganhos de eficiência em setores industriais que não são energo-intensivos. Tal potencial está, em boa medida, associados a aprimoramentos nos sistemas elétricos onde os motores elétricos são utilizados para ventilação, bombeamento, compressão de ar e acionamentos mecânicos<sup>50</sup>.

No âmbito do setor de transportes, o fato do mesmo responder por 23% das emissões de gases do efeito estufa derivadas do setor energético e as projeções indicarem um expressivo aumento da demanda energética deste setor torna imperativa a busca por soluções tecnológicas que possibilitem uma redução do consumo de energia.

O modal de transporte rodoviário responde por 75% da demanda energética do setor de transportes, sendo a frota de veículos leves responsável por 45% de todo o consumo de energia do setor. Concomitantemente, é neste modal onde encontra-se o maior potencial para ganhos de eficiência derivados de medidas como redução do tamanho do motor e do peso dos veículos, melhoria na aerodinâmica e no sistema de transmissão dos veículos e, sobretudo, a hibridização dos veículos permitiria ganhos de eficiência superiores a 50% no caso de veículos leves e de até 40% no caso ônibus e caminhões<sup>51</sup>. É

---

<sup>50</sup> Dado que os setores energo-intensivos tiveram razoáveis ganhos de eficiência nos últimos tempos, verifica-se que outras indústrias são um nicho muito importante para a adoção de medidas de eficiência energética. Apesar das indústrias que não são intensiva em energia representarem 49% do consumo final de energia no setor industrial, as mesmas responderão por mais da metade dos ganhos de eficiência energética até 2035 (IEA, 2012).

<sup>51</sup> Dado que os benefícios da hibridização ocorrem essencialmente em situações de *stop-and-go*, ônibus e caminhões de carga que trafegam em estradas na maior parte do tempo acabam por não apresentar grandes ganhos de eficiência.

importante destacar que a hibridização dos veículos faz parte de um processo de mudanças nos sistemas de propulsão dos veículos com vistas a obter maiores níveis de eficiência, sendo os veículos aptos a serem abastecidos pela rede elétrica o ápice deste processo<sup>52</sup>.

No caso do transporte ferroviário, a otimização da operação e a substituição de trens antigos, especialmente com adoção de sistemas híbridos também consiste em um mecanismo de ganhos de eficiência<sup>53</sup>, assim como, a eletrificação das linhas é um elemento relevante para redução das emissões de gases do efeito estufa do transporte ferroviário<sup>54</sup>. Por sua vez, embora a redução do consumo energético no transporte aéreo não seja uma tarefa simples, em tese existe um potencial de redução deste consumo que chega a 50%. Para isso, é vital que ocorram melhorias nos sistemas de propulsão dos aviões<sup>55</sup>. Cabe mencionar que, mesmo aeronaves existentes podem apresentar ganhos de eficiência derivados de melhorias e adaptações nas turbinas do avião e de estruturas secundárias<sup>56</sup>. Já o transporte marítimo pode apresentar ganhos de eficiência, não apenas através de aprimoramentos em seus sistemas de propulsão<sup>57</sup>, como também por melhorias nas embarcações.

---

<sup>52</sup> O motor elétrico é capaz de operar com eficiências da ordem de 90%. Mesmo considerando a eficiência típica da geração termoeletrica inferior em torno de 40%, é perceptível a maior eficiência destes veículos em comparação com os tradicionais veículos de combustão interna. Porém, é importante enfatizar que a eficácia destes veículos em mitigar emissões de gases do efeito estufa depende da composição da matriz elétrica.

<sup>54</sup> No longo prazo, não pode ser descartada a possibilidade do uso de células combustíveis em regiões onde houver carência de infraestrutura elétrica.

<sup>55</sup> No caso de aeronaves de pequeno porte, é preciso considerar a possibilidade de utilização de motores elétricos para vôos de curta duração.

<sup>56</sup> Estima-se um ganho de eficiência entre 7 e 13% para aeronaves em operação.

<sup>57</sup> Motores a diesel deverão permanecer como o paradigma tecnológico vigente devido a sua confiabilidade e aos baixos custos. Mesmo que ocorram inovações nos sistemas de propulsão, estes devem ter caráter incremental. Nota-se que a adoção de sistemas puramente elétricos é improvável devido à autonomia destes sistemas serem incompatíveis com as distâncias tipicamente percorridas por navios enquanto que a possível adoção de células combustíveis possui o elevado custo como um grande obstáculo. De todo modo, isso não impede da implementação de medidas como o aproveitamento da energia solar para o suprimento de equipamentos auxiliares.

Uma considerável parte das medidas de promoção de eficiência energética estão associadas ao atendimento eletrificado de demandas que anteriormente eram supridas a partir de outras fontes energéticas. A crescente inserção de veículos elétricos na frota e a adoção de acionamentos elétricos em substituição aos acionamentos mecânicos na indústria são exemplos típicos desta tendência. Em conjunto com a necessidade de atender demandas sociais que estão diretamente relacionadas ao uso de eletricidade, este ganho de importância relativa da energia elétrica é responsável pela prospecção que, enquanto a demanda por energia deverá crescer aproximadamente 35% ao longo dos próximos 20 anos, a demanda por energia elétrica irá crescer 73% até 2035<sup>58</sup>.

Além de mudanças técnicas, medidas de ordem gerencial e nas atitudes comportamentais são fundamentais para limitar o crescimento da demanda por energia. Neste sentido, é preciso considerar, tanto as iniciativas capazes de reduzir a demanda por serviços energéticos como aquelas que buscam atender a demanda por estes serviços priorizando as soluções mais eficientes.

No escopo da redução da demanda por serviços energéticos, existem medidas desejáveis e de fácil implementação, como a disseminação de práticas como *home working* e reuniões por teleconferências, desenvolvimento de ciclovias e incentivos à realização de deslocamentos a pé, aceitação de um menor nível de conforto térmico, até estratégias mais complexas como o uso mais consciente de bens materiais e a realização de um desenvolvimento sócio econômico que priorize setores de maior valor agregado.

Concomitantemente, existem medidas de ordem gerencial que propiciam que a demanda por serviços energéticos seja atendida com um menor consumo de energia. Por exemplo, é imperativo que sejam adotadas políticas que priorizem o transporte público em detrimento ao privado, assim como, a substituição do

---

<sup>58</sup> Dados de IEA (2012).



modal rodoviário pelo ferroviário sempre que possível. Além disso, é pertinente que haja uma melhor coordenação do tráfego urbano<sup>59</sup> e incentivos a práticas como o *car pooling*. Em um nível mais micro, é relevante a constatação que parte dos possíveis ganhos de eficiência na aviação, na navegação e do setor ferroviário estão associados a otimização da operação. No setor industrial, também é notória a importância da otimização de processos, a qual ao ser conjugada com medidas que propiciem um melhor gerenciamento dos recursos, contribui para redução do consumo de energia.

Embora algumas das medidas/políticas mencionadas sejam passíveis de implementação a partir de decisões técnicas e administrativas, grande parte destas possibilidades exigem mudanças comportamentais e culturais. Por exemplo, não basta a realização de investimento na melhoria dos transportes públicos e, até mesmo, incentivos para sua utilização. É preciso que a sociedade passe a valorizar menos os veículos particulares e enxergue benefícios em um maior uso do transporte público. Mesmo dentro da opção de utilização de veículos próprios, a escolha do modelo do veículo e a forma de dirigir também estão diretamente relacionados a aspectos comportamentais e culturais. Talvez o exemplo mais contundente da mudança de paradigma comportamental seja a pré-disposição a se conviver com o menor nível de conforto térmico. A grande dificuldade na exploração deste potencial é que mudanças comportamentais e culturais ocorrem em um ritmo bastante lento. Logo, compreende-se porque muitas das estimativas de ganhos de eficiência energética foquem apenas na esfera tecnológica.

### **3.3. Energias Renováveis<sup>60</sup>**

A efetiva mitigação das emissões de gases do efeito estufa passa por um expressivo aumento da participação de fontes renováveis na oferta mundial de

---

<sup>59</sup> Dentre as medidas necessárias para melhoria do tráfego urbano, cita-se a otimização dos semáforos e a criação de faixas exclusivas para meios de transporte mais eficientes, especialmente onibus.

<sup>60</sup> Os dados apresentados nesta subseção foram compilados de REN21 (2014).

energia. Contudo, embora seja comum tratar-se energia fontes renováveis como um conjunto homogêneo, as tecnologias e suas aplicações apresentam estágios de desenvolvimento e desafios a serem equacionados absolutamente distintos.

Neste sentido, nota-se que os principais avanços estão ocorrendo no setor elétrico. Não obstante tradicionalmente a geração hídrica responder por razoável parte da geração elétrica mundial, em anos recentes verifica-se um exponencial crescimento da capacidade de geração eólica. Mais recentemente, também passou a ser verificado um expressivo aumento do parque gerador fotovoltaico mundial. Como ilustração, ao fim de 2013 a potência instalada mundial de energia eólica e de solar fotovoltaica eram de, respectivamente, 318 e 139 GW. Estes investimentos foram impulsionados por políticas de incentivos motivadas justamente pela necessidade de reduzir os impactos ambientais oriundos da geração de energia elétrica. Ao mesmo tempo, no caso da energia solar fotovoltaica, os investimentos estão ocorrendo em grande medida nas próprias unidades consumidoras na modalidade de micro-geração. Desta forma, a emergência de redes inteligentes vem assumindo especial importância para a otimização da operação de um sistema em que os fluxos bidirecionais de energia serão crescentes.

Porém, a expansão da geração a partir de usinas eólicas e de centrais fotovoltaicas deve ser vista com ressalvas em termos de garantia da segurança do suprimento, especialmente da ponta do sistema, devido ao caráter intermitente destas fontes. Observa-se assim a pertinência da adoção de medidas com vistas a equilibrar o balanço de carga, como é o caso do gerenciamento da demanda e o desenvolvimento de técnicas de estocagem de energia. Tais medidas reduzem a necessidade de investimentos em plantas dotadas de flexibilidade operativa. Contudo, apesar destes investimentos comumente estarem associados a plantas termoelétricas, não deve ser descartada a construção de plantas de concentradores solares para a geração de eletricidade, tecnologia esta que possui uma capacidade instalada no

mundo de apenas de 3,4 GW. Explica-se: esta tecnologia permite estocar energia na forma de vapor e, desta forma, apresenta uma intermitência menor que a verificada em plantas fotovoltaicas e de energia eólica.

Dentre as fontes renováveis de energia, a biomassa é a única apta a prover energia nas formas sólida, líquida ou gasosa. Logo, é uma fonte de energia renovável compatível de ser utilizada em diferentes aplicações. No setor elétrico, alguns países já utilizam a biomassa como insumo em centrais térmicas, sendo de 85 GW a potência atualmente instalada no mundo. Em paralelo, pode ser utilizada para o atendimento de demandas térmicas a partir de sua combustão. Contudo, é no setor de transportes que o uso da biomassa pode assumir papel estratégico devido à possibilidade da produção de combustíveis líquidos aptos de serem utilizados em veículos com motor de combustão interna. A produção mundial de biocombustíveis de 108 bilhões de litros em 2013 fez com que os mesmos atendessem 3,4% da demanda por combustíveis líquidos no setor de transportes no período.

No entanto, a produção de biocombustíveis convencionais em uma escala compatível com a demanda do setor de transportes é conflitante com a produção de alimentos. Adicionalmente, a eficácia na redução das emissões de gases do efeito estufa de muitos destes biocombustíveis é bastante questionável. Desta forma, o desenvolvimento de biocombustíveis produzidos a partir de matéria lignocelulósica é essencial para o uso em larga escala de biocombustíveis, pois os mesmos podem ser produzidos a partir de resíduos agrícolas e florestais ou por culturas energéticas em terras não apropriadas ao cultivo de alimentos. Além disso, estes biocombustíveis são bastante eficazes na redução das emissões de gases do efeito estufa.

### **3.4. Energia Nuclear**

Ao longo das últimas décadas foram realizados investimentos em centrais nucleares e atualmente as mesmas respondem por aproximadamente 12% da geração mundial de energia elétrica a partir de uma capacidade instalada de 393 GW. Trata-se de uma fonte de energia apta a operar na base do sistema elétrico de forma confiável e com emissões desprezíveis de gases do efeito estufa. Logo, em um contexto onde a demanda por energia elétrica irá crescer a taxas expressivas e a necessidade de mitigar as emissões de gases do efeito estufa é imperativa, a priori seria possível afirmar que a energia nuclear tenderia a ter grande relevância ao longo das próximas décadas.

Contudo, observa-se que ao longo dos últimos 20 anos a energia nuclear vem perdendo participação na geração elétrica mundial<sup>61</sup> e existe grande incerteza sobre a realização de novos investimentos<sup>62</sup>, especialmente após o acidente nuclear de Fukushima em 2011<sup>63</sup>. Em síntese, a resistência a esta fonte de energia deriva do risco de um acidente nuclear e do tratamento concedido ao rejeito nuclear. Desta forma, é compreensível porque o acidente japonês trouxe à tona novamente questionamentos à energia nuclear e a decisão de desligar centrais nucleares e/ou não construir novas centrais por parte de muitos países. Porém, muitos países já estão revendo posições de reduzir e, no limite, de cessarem seus programas de energia nuclear.

Observa-se assim que não existem elementos consistentes o suficiente para se descartar investimentos em centrais nucleares como parte integrante da

---

<sup>61</sup> Como ilustração, IPCC (2014b) afirma que em 1993 a participação da energia nuclear na matriz elétrica mundial era de 17%.

<sup>62</sup> Apesar de 72 reatores nucleares estarem em construção ao fim de 2013 (IEA, 2014), é preciso ressaltar que a construção de usinas nucleares é um processo demorado. Mesmo a elaboração do projeto é um processo moroso devido à complexidade envolvida. Desta forma, embora o fato de 10 projetos terem iniciado construção em 2013 seja um indício que o interesse por energia nuclear esteja forte, permanece uma considerável incerteza sobre a construção de novas centrais pois as que estão sendo construídas atualmente foram fruto de uma decisão de investimento anterior ao acidente nuclear de Fukushima.

<sup>63</sup> Em momentos posteriores a ocorrência de acidente em uma usina nuclear é comum que haja uma oposição generalizada à energia nuclear. Isso já havia ocorrido na ocasião do acidente na usina nuclear de Three Mile Sland em 1979 nos EUA e do acidente na usina de Chernobyl na Ucrânia em 1986. Porém, é preciso enfatizar que os acidentes tiveram razões distintas e é preciso considerar as características tecnológicas e os critérios de segurança adotados para que seja possível fazer uma análise consistente dos acidentes nucleares.

promoção de uma economia de baixo carbono. No entanto, para que efetivamente ocorra a produção de montantes relevantes de energia nuclear é preciso aprimoramento nos dispositivos de segurança e já identificam-se medidas nesta direção através do desenvolvimento de novas versões dos reatores LWR (reatores de terceira geração), as quais apresentam maior nível de eficiência e configurações que diminuem a probabilidade e minimizam os impactos de um acidente<sup>64</sup>. Concomitantemente, a questão dos resíduos nucleares precisa ser melhor equacionada. Neste âmbito, o reprocessamento do combustível, não apenas reduz a demanda por urânio, como também diminui a quantidade de resíduos a ser despejada em alguma localidade. De todo modo, persiste a necessidade de disponibilizar meios de armazenar resíduos de forma segura e, neste sentido, a construção de instalações geológicas de armazenamento apresenta grande importância.

### **3.5. Captura e Sequestro de Carbono**

Mesmo em um cenário em que fontes renováveis e nuclear tenham participação relevante na oferta mundial de energia, as fontes fósseis continuarão respondendo por uma parcela expressiva da matriz energética mundial. Neste sentido, é relevante a realização de esforços na tecnologia de captura e sequestro de carbono. Mais especificamente, dada a predominância do carvão na geração elétrica mundial e a existência de abundantes reservas de carvão em diferentes regiões do mundo, o desenvolvimento da queima de carvão sem a emissão de CO<sub>2</sub> assume grande importância. Porém, apesar dos equipamentos necessários para tecnologia CCS já serem utilizados no setor de exploração e produção de óleo e gás e na indústria petroquímica, ainda não existem plantas de geração de energia elétrica com larga escala que utilizem esta tecnologia, sendo os projetos em operação relacionados a captura em processos industriais emissores de CO<sub>2</sub> com alto nível de pureza.

---

<sup>64</sup> Estes reatores apresentam sistemas adicionais de emergência e uma maior capacidade de refrigeração com vistas a mitigar os danos de um eventual acidente.

Em linhas gerais, a técnica CCS consiste na captura do CO<sub>2</sub> emitido por fontes estacionárias, o qual é transportado e injetado na forma comprimida em localidades com estruturas geológicas adequadas em profundidade superior a 800 metros. Todo este processo deve ser acompanhado de procedimentos de medição, monitoramento e verificação com vistas a assegurar a segurança do processo e a eficácia do mesmo, ou seja, garantir que existe este sequestro é efetivo e não há fuga de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

No curto prazo, é razoável supor que esta tecnologia permanecerá restrita aos segmentos industriais que produzam CO<sub>2</sub> com elevado nível de pureza ou que o utilizem para produzirem um bem com maior valor agregado. Contudo, no médio/longo prazo vislumbra-se que sistemas CCS sejam difundidos na geração de energia elétrica, especialmente centrais térmicas que utilizam carvão como combustível. Existem indícios que esta tecnologia é mais eficiente quando a captura ocorre pré-queima. Neste sentido, a tecnologia IGCC assume especial relevância na geração de energia elétrica a partir do carvão. Ao gaseificarem o carvão, não apenas é possível a obtenção de maiores níveis de eficiência por poder operar em ciclo combinado, como também torna-se mais fácil a captura do carbono que ocorre pré-combustão.

Por fim, cabe destacar a importância que a captura do carbono emitido por biocombustíveis ou pela geração de eletricidade a partir de biomassa pode vir a ter. Considerando que o balanço das emissões de gases do efeito estufa da bioenergia tenda a ser zero porque as mesmas são compensadas pelo sequestro de CO<sub>2</sub> no processo de crescimento e desenvolvimento da biomassa, a captura do CO<sub>2</sub> emitido possibilita que obtenha-se emissões negativas, ou seja, que haja uma redução do montante de CO<sub>2</sub> concentrado na atmosfera. Esta combinação de bioenergia com CCS (BECCS) precisa ser considerada como parte integrante das políticas de mitigação das mudanças climáticas, especialmente em cenários onde a concentração de gases do efeito estufa na atmosfera ultrapasse o limite desejável e depois seja preciso reduzi-la.

### 3.6. Como efetivamente Mitigar as Emissões do Setor Energético?

Os esforços para mitigação das emissões de gases do efeito estufa por parte do setor de energia não vêm sendo exitosos. Nota-se que as emissões continuam crescendo e, mesmo considerando os acordos e medidas de redução já promulgados, prospecta-se que tais emissões atingiriam o montante de 37 Gt de CO<sub>2</sub> em 2035<sup>65</sup>. A consequência desta trajetória é que existiria uma probabilidade de apenas 6% de limitar o aumento da temperatura média global neste século em 2° C em relação aos níveis pré-industriais e de 50% que este aumento esteja limitado a 3,6° C pois a concentração de gases do efeito estufa seria da ordem de 660 Gt de CO<sub>2eq</sub>.

Logo, é perceptível a necessidade da adoção de políticas de mitigação mais efetivas que possibilitem concentrar as emissões de CO<sub>2eq</sub> na atmosfera em 450 ppm e, desta forma, que haja uma probabilidade de 45% de limitar em até 2° C o aumento da temperatura global. De acordo com a Agência Internacional de Energia, isso ocorreria em um cenário em que as emissões atingiriam seu pico de 32,4 Gt em 2020 e na sequência passariam a ser decrescentes, totalizando 22,1 Gt em 2035. É perceptível o tamanho do desafio, especialmente ao considerar-se que o efeito *lock-in* faz com que mais de 80% destas emissões derivam da infraestrutura energética já em operação. Neste sentido, compreende-se o caráter urgente da adoção de medidas mitigadoras pois o passar do tempo torna a mitigação cada vez mais difícil e custosa.

Dado que o desenvolvimento sócio-econômico não pode cessar, especialmente diante à necessidade de melhorar as condições de vida das populações

---

<sup>65</sup> Na ausência destas medidas, as emissões totalizariam 44,2 Gt e a concentração de CO<sub>2eq</sub> se estabilizaria em 950 ppm. Neste caso, existe uma probabilidade de 50% do aumento da temperatura global ser superior a 5,3° C.

residentes nos países em vias de desenvolvimento, é essencial desassociar o crescimento econômico do aumento da demanda por energia<sup>66</sup>. Observa-se o caráter imperativo do uso mais eficiente dos recursos energéticos com vistas a reduzir a intensidade energética da economia mundial, sendo essencial a verificação da já mencionada redução média anual da intensidade energética de 2,4% ao longo dos próximos 20 anos<sup>67</sup>. Desta forma, o crescimento da demanda por recursos primários de energia até 2035 seria de apenas 16% e totalizaria 14,8 bilhões de toneladas equivalente de petróleo.

Portanto, é possível afirmar que ganhos de eficiência energética consistem no principal mecanismo de mitigação das emissões de gases do efeito estufa, especialmente no curto prazo<sup>68</sup>. Estima-se que, nos próximos 5 anos, aproximadamente 75% da redução das emissões seriam oriundas de medidas de eficiência energética. Mesmo em um horizonte de 20 anos, a eficiência energética responderia por mais de 40% das emissões mitigadas. Estes ganhos contemplam a adoção de técnicas de conversão de energia mais eficientes, mas estão associados essencialmente a um consumo final de energia mais racional, sobretudo em termos do consumo de eletricidade em função do uso de equipamentos e sistemas de iluminação e de climatização mais eficientes<sup>69</sup>.

---

<sup>66</sup> Como já fora relatado, mudanças comportamentais também assumem relevância no uso mais eficiente de energia. Contudo, o foco analítico aqui são essencialmente medidas de eficiência energética de ordem técnica.

<sup>67</sup> Para efeito de dimensionamento do tamanho deste desafio, ao longo dos últimos 10 anos, a redução anual média foi de 0,5%. Não obstante ganhos de eficiência energética propriamente ditos, vislumbra-se alterações na estrutura da economia com aumento da participação de setores menos intensivos no consumo de energia.

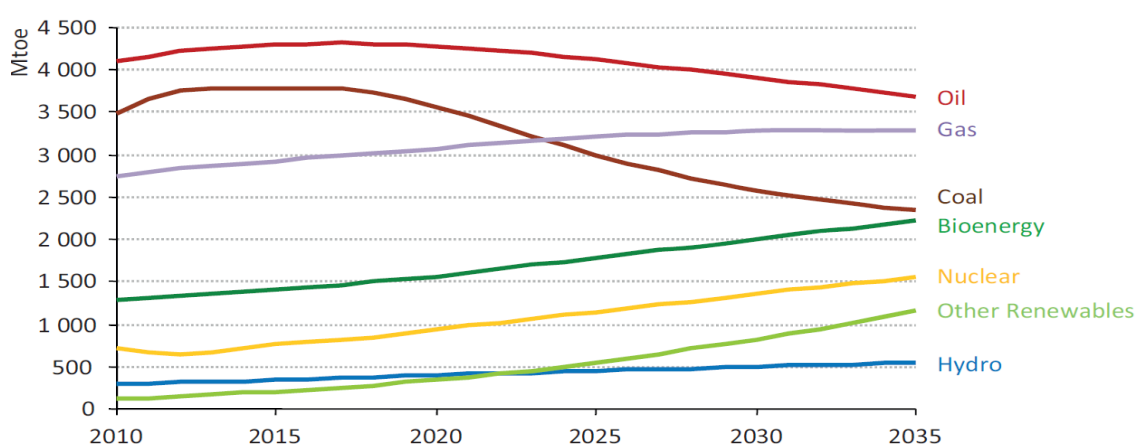
<sup>68</sup> O aproveitamento das oportunidades de melhoria de eficiência disponíveis é muito importante para minimizar os impactos do efeito *lock-in*, vide que a redução do consumo de energia reduz a necessidade de investimentos em geração e distribuição de energia.

<sup>69</sup> No escopo das demais formas de energia, destaca-se que metade dos ganhos possíveis encontram-se no setor industrial em função de ainda existirem dispositivos e infraestruturas velhas e ineficientes. Por sua vez, no setor de transportes as medidas surtem efeito apenas no médio/longo prazo pois existe um *lag* temporal entre a penetração no mercado de uma técnica mais eficiente e sua disseminação pela frota devido ao seu ritmo de renovação ser comumente superior a 10 anos. Não obstante, mais da metade da redução das emissões projetadas no setor de transporte advém de melhorias nos padrões de consumo de combustível. Ao considerarmos veículos híbridos e veículos elétricos, estima-se que 69% da redução de 1,9 Gt CO<sub>2</sub> no setor de transportes estão associadas a um uso mais eficiente dos recursos energéticos.



Contudo, para que efetivamente as emissões do setor energético percorram uma trajetória compatível com a concentração dos gases do efeito estufa na atmosfera de 450 ppm CO<sub>2eq</sub> será preciso uma redução da participação dos insumos fósseis na matriz energética mundial. Neste sentido, a participação dos combustíveis fósseis deverá ser de 63% em 2035 em contraste com a participação de 82% em 2011<sup>70</sup>. A contrapartida desta descarbonização da matriz energética mundial seria um expressivo aumento da participação das fontes não fósseis, sobretudo renováveis, na oferta mundial de energia. Tal participação não deverá estar restrita à geração de eletricidade. Também deve ser considerado o uso de fontes renováveis no atendimento de demandas térmicas em edifícios, na indústria e no setor de transportes através da produção em larga escala de biocombustíveis. A Figura 6 ilustra a evolução prospectada para os insumos energéticos no cenário em que ocorre uma efetiva mitigação das emissões de gases do efeito estufa.

**Figura 6 – Evolução das Fontes de Energia: 2010 - 2035**



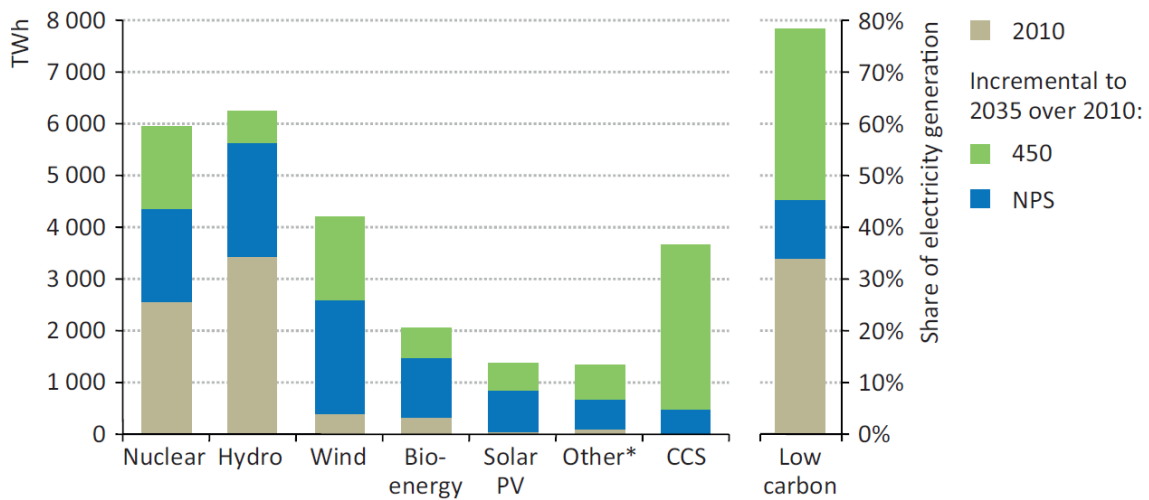
Fonte: IEA (2012).

<sup>70</sup> O consumo de petróleo em 2035 seria 10% inferior ao consumo verificado em 2010 enquanto que o consumo do carvão seria aproximadamente 30% inferior aos níveis atuais. Em contrapartida, o consumo de gás natural, combustível fóssil menos intensivo em carbono, deverá apresentar um aumento em torno de 20% no período.

Em função da maior disponibilidade natural e de técnicas para utilização de fontes com baixa emissão de gases do efeito estufa, é no setor elétrico onde tende a ocorrer a mudança mais drástica na composição da oferta de energia. Se atualmente tais fontes, essencialmente hidroeletricidade e energia nuclear, representam algo em torno de um terço da geração mundial de eletricidade, em 2035 esta participação seria de 80%. Dos 31.750 TWh a serem produzidos, 24.900TWh viriam destas fontes, sendo este montante 3,6 vezes maior que a produção em 2010. No âmbito das fontes renováveis, além do aumento da produção hidroelétrica, prospecta-se expressivo aumento na produção de energia eólica e, em menor escala, de energia solar fotovoltaica e bioeletricidade. Ao mesmo tempo, estima-se um crescimento mais robusto da geração nuclear, a qual representaria 19% da geração elétrica mundial, impulsionado por construção de novas centrais na China. No entanto, esta expressiva participação de geração de eletricidade com baixa emissão de carbono só será possível com robustos investimentos em centrais termoelétricas com CCS.

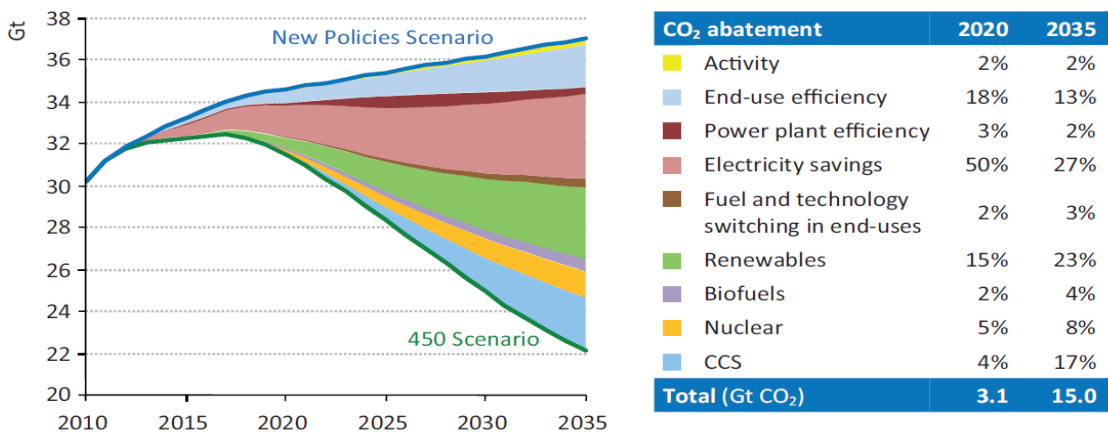
A Figura 7 apresenta a evolução da geração de energia elétrica a partir de fontes com baixa de emissão em carbono verificada em 2010 com aquela prospectada para 2035 no cenário em que sejam meramente adotadas medidas e políticas já promulgadas e no cenário em que ocorram mudanças na matriz elétrica mundial compatíveis com a efetiva mitigação da emissão de gases do efeito estufa. É perceptível que a maior diferença entre estes dois cenários advém da maior utilização de plantas termoelétricas com CCS no cenário 450 ppm. Logo, fica explícita a importância desta tecnologia na medida que permite o uso de recursos fósseis, especialmente carvão, de forma limpa.

**Figura 7 - Geração de Energia Elétrica a partir de Fontes Limpas: 2010 -  
2035**



Portanto, a efetiva mitigação das emissões de gases do efeito estufa irá necessariamente contemplar a conjugação de diversas tecnologias. A Figura 8 apresenta a contribuição de cada uma das medidas/tecnologias no curto e no médio prazo. Fica evidente a preponderância dos ganhos de eficiência energética para que tal mitigação ocorra.

**Figura 8 – Evolução das Emissões Anuais de Gases do Efeito Estufa**



Fonte: IEA (2012).

Estas mudanças no paradigma da produção e uso de energia resultará em impactos positivos em esferas que transcendem a questão das mudanças climáticas. Alguns destes benefícios são inerentes ao próprio sistema energético, mas outros são de ordem ambiental ou econômica.

Sob a ótica meramente energética, vislumbra-se uma redução da vulnerabilidade dos sistemas energéticos em função da diversificação da matriz<sup>71</sup> e, no caso de países fortemente dependentes da importação de insumos energéticos, como é o caso dos países membros da União Europeia, o uso intenso de fontes renováveis de energia resulta em uma menor necessidade de importação de insumos energéticos e isso acaba por tornar mais seguro o suprimento energético.

A redução da importação de insumos energéticos está diretamente associada à descarbonização da matriz energética mundial. Considerando que os dispêndios com importação de combustíveis fósseis possuem considerável impacto sobre o balanço de pagamentos<sup>72</sup> destes países e a volatilidade do preço do petróleo possui impactos macroeconômicos nocivos<sup>73</sup>, o menor uso de combustíveis fósseis é benéfico para a economia, especialmente no caso dos países importadores<sup>74</sup>.

Ao mesmo tempo, nota-se que a disseminação de fontes renováveis possibilita garantir o acesso à energia elétrica em condições competitivas à população residente em localidades rurais remotas<sup>75</sup>. Explica-se: energia eólica, energia solar e bioenergia podem ser aplicadas em menor escala e consistem em fontes de geração distribuída. Logo, podem consistir em uma alternativa menos custosa para o atendimento de regiões remotas que a expansão da rede. Este acesso à energia elétrica é indutor do desenvolvimento rural na medida em que

---

<sup>71</sup> No âmbito da geração de energia elétrica, a intermitência de fontes renováveis como eólica e solar seria atenuada pelos investimentos em centrais de geração térmicas controláveis.

<sup>72</sup> A importação dos cinco maiores importadores de combustíveis fósseis (União Europeia, EUA, Japão, China e Índia) totalizaram aproximadamente US\$ 1,4 trilhões em 2011 (IEA, 2012).

<sup>73</sup> A volatilidade do preço do petróleo possui impactos sobre o consumo, investimento e produção industrial. Por consequência, acaba impactando o nível de emprego e a taxa de inflação.

<sup>74</sup> Em contraste com o cenário em que meramente ocorre a adoção de medidas de mitigação das emissões já promulgadas e os gastos com importação de combustíveis fósseis seriam da ordem de US\$ 2 trilhões em 2035, no cenário em que ocorre uma efetiva mitigação tais gastos seriam da ordem de US\$ 1,2 trilhões (IEA, 2012).

<sup>75</sup> Estima-se que 1,5 bilhões de pessoas ainda não possuem acesso à energia elétrica.

permite o aumento da renda local e, sobretudo, possibilita a melhoria dos padrões de vida por criar as condições necessárias para o saneamento básico, saúde e educação.

Não obstante, a redução do consumo de combustíveis fósseis também irá diminuir de forma significativa a emissão de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e material particulado<sup>76</sup>. Como estes poluentes locais deterioram a qualidade do ar e, conseqüentemente, aumentam o número de doenças respiratórias, é perceptível que o menor uso de combustíveis fósseis é benéfico em termos de qualidade e expectativa de vida e redução de gastos com saúde pública.

Apesar do caráter imperativo da mitigação das mudanças climáticas e dos benefícios correlatos à adoção de um sistema energético mais sustentável, existem obstáculos à implementação de medidas e à realização de investimentos que possibilitem esta transformação do setor energético.

Em termos de medidas de eficiência energética, mesmo considerando que a eliminação de desperdícios e a adoção de equipamentos mais eficientes em substituição a equipamentos que chegaram ao fim de sua vida útil possam ser implementadas de modo imediato, existe dificuldade em se efetivamente implementar políticas de incentivo à eficiência energética devido ao seu caráter disperso<sup>77</sup>, a dificuldade de mensurar seus ganhos<sup>78</sup>, a diferença entre o custo da oferta e o custo da demanda<sup>79</sup> e a lógica empresarial do setor energético<sup>80</sup>.

---

<sup>76</sup> Em comparação com um cenário de referência, o cenário em que existe uma efetiva redução das emissões de gases do efeito estufa reduzirá as emissões de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> em aproximadamente 25% e de material particulado em 7%.

<sup>77</sup> Esta dispersão aumenta os custos de transação.

<sup>78</sup> Enquanto a expansão da oferta é um dado, a energia economizada com medidas de eficiência energética é uma estimativa.

<sup>79</sup> Empresas de grande porte conseguem captar recursos financeiros em condições mais atrativas.

<sup>80</sup> Historicamente as receitas do setor de energia estão associadas à venda de energia e não ao atendimento do serviço energético. Esta lógica não induz a adoção de políticas de eficiência energética por parte das empresas.

Na esfera técnica, apesar de tecnologias como a energia eólica já serem maduras e confiáveis, é preciso ressaltar que algumas tecnologias ainda carecem de maior desenvolvimento. Observa-se assim que as mesmas apresentam o risco de não apresentarem em escala comercial o mesmo desempenho que é verificado em escala piloto<sup>81</sup>. Este risco inerente ao *scale up* é muito relevante no caso de plantas CCS e para unidades de produção de biocombustíveis a partir de matéria lignocelulósica.

De todo modo, o maior empecilho para a mudança do paradigma tecnológico no setor de energia são os custos mais elevados destas tecnologias/soluções em relação às alternativas convencionais. Desta forma, nota-se que o abatimento das emissões de carbono no setor energético possui um custo, o qual em alguns casos pode ser bastante elevado. Como cada tecnologia e/ou medida apresenta um potencial de redução das emissões de gases do efeito estufa, o custo a ser considerado é o custo abatimento e não o custo absoluto de cada opção<sup>82</sup>.

Estima-se que a realização deste cenário de efetiva mitigação das emissões de gases do efeito estufa teria um custo de investimento adicional em relação ao cenário de referência de US\$ 16 trilhões até 2035<sup>83</sup>. Porém, é preciso ressaltar que a economia de combustível inerente ao uso mais eficiente dos recursos energéticos tende mais do que compensar este investimento adicional. A

---

<sup>81</sup> A questão não é meramente a viabilidade técnica da tecnologia quando aplicada em escala industrial. É preciso considerar qual a produtividade obtida e o custo incorrido.

<sup>82</sup> Devem ser consideradas todas as emissões inerentes ao ciclo de vida da tecnologia. O exame baseado no custo do abatimento pode resultar na escolha de tecnologias mais caras, mas que maior mitigação das emissões mais que compense este maior custo.

<sup>83</sup> O setor de transportes seria responsável por US\$ 6,3 trilhões deste montante enquanto que o de edificações demandaria US\$ 4,4 trilhões. Por sua vez, o setor elétrico precisaria de investimentos adicionais de US\$ 3,2. Já a indústria requereria US\$ 1,5 trilhões, sendo o saldo remanescente associado a produção de biocombustíveis.

grande questão é a disponibilidade de capital para a realização de um investimento tão vultoso<sup>84</sup>.

Portanto, é notório os desafios inerentes à mudança do paradigma de produção e uso de energia e é pouco provável que tal mudança ocorra sem a intervenção do poder público, a qual varia desde o estabelecimento de normas, até incentivos a pesquisa e desenvolvimento e criação de nichos de mercado. Neste sentido, já observam-se iniciativas como programas de certificações mandatórias dos padrões de consumo energético das edificações na União Europeia e o programa de etiquetagem dos eletrodomésticos no Brasil. Ao mesmo tempo, não apenas existem vultosos investimentos em pesquisa e desenvolvimento em tecnologias como CCS e biocombustíveis avançados, como também certames de contratação específicos para contratação de energia elétrica produzida a partir de fontes renováveis ou a concessão de tarifas prêmio para a mesma.

Porém, é preciso que as políticas implementadas tenham caráter estrutural. Observa-se assim o caráter essencial da redução dos subsídios concedidos aos combustíveis fósseis<sup>85</sup> com vistas a dar maior competitividade às fontes renováveis. Além disso, não obstante o estabelecimento de rígidos acordos setoriais que contemplem diretrizes tecnológicas compatíveis com a economia de baixo carbono, é pertinente que exista a criação de mercados de carbono que pratiquem preços que reflitam os reais danos do carbono e, desta forma, tornem as tecnologias e soluções de mitigação mais competitivas. Concomitantemente, tais mercados, ao permitirem o cumprimento de metas de emissão a partir da comercialização de créditos de carbono/permissões de

---

<sup>84</sup> Com vistas a dimensionar o tamanho do desafio, o valor do investimento requerido equivale ao PIB corrente dos EUA.

<sup>85</sup> Estimativas indicam que os subsídios aos combustíveis fósseis em todo mundo são da ordem de US\$ 600 bilhões por ano (UNEP, 2014).

emissão, possibilitam que haja a equalização do custo marginal de abatimento das emissões<sup>86</sup>.

---

<sup>86</sup> Desta forma, mercados de carbono podem atenuar o latente conflito entre os atores que possuem diferentes custos de redução das emissões e, por consequência, apresentam impactos econômicos distintos ao promoverem a economia de baixo carbono.



#### 4. O Setor Energético Brasileiro e as Mudanças Climáticas

Em contraste com a realidade mundial, o Brasil apresenta um setor energético com expressiva participação de fontes renováveis, a qual foi de 41% em 2013 enquanto no mundo esta participação é da ordem de 13%. A Figura 9 ilustra com clareza o quanto a oferta brasileira de energia possui uma configuração peculiar.

Figura 9 – Oferta Interna de Energia no Brasil em 2013<sup>87</sup>



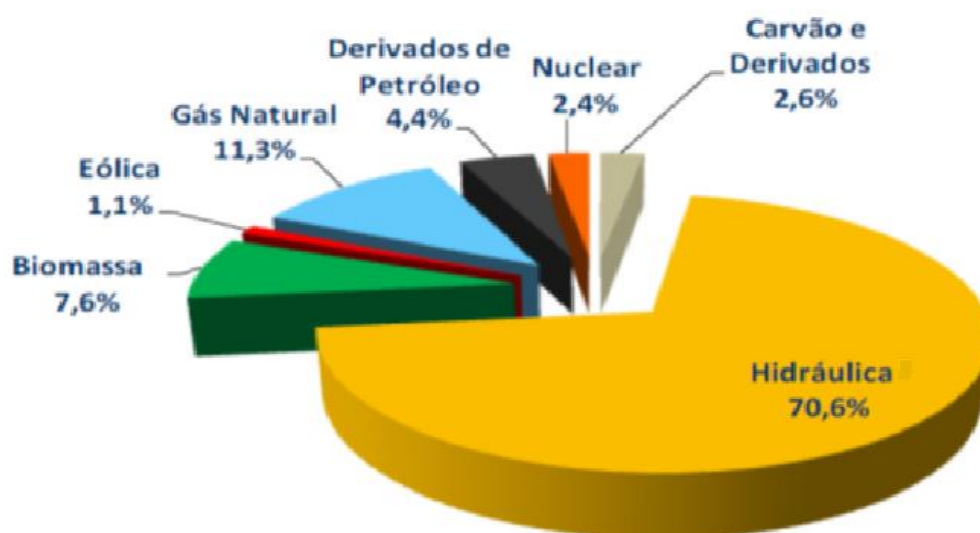
Fonte: MME e EPE (2014).

Fica nítida a importância da produção de etanol em larga escala e da predominância da geração hídrica no setor elétrico para o caráter “limpo” da oferta de energia brasileira. No caso específico do setor elétrico, a impossibilidade da construção de novos reservatórios de acumulação, dado que a carga continua a crescer, resulta em uma tendência de perda de

<sup>87</sup> A oferta interna brasileira de energia totalizou 296,2 Mtep, sendo o consumo final de 260 Mtep.

participação da hidroeletricidade na matriz elétrica e aumento da geração termoelétrica a partir de combustíveis fósseis. Esta tendência já ficou evidenciada no ano de 2013 em função das condições hidrológicas desfavoráveis e apresenta-se de forma ainda mais grave em 2014<sup>88</sup>. Contudo, mesmo sendo improvável que a geração hidroelétrica volte a responder por aproximadamente 90% da oferta, ainda assim é relevante o fato das fontes renováveis de energia elétrica responderem por 79,3% dos 609,9 TWh produzidos em um ano de hidrologia difícil como o de 2013, conforme pode ser visto na Figura 10.

**Figura 10 – Matriz Elétrica Brasileira em 2013**



Fonte: MME e EPE (2014).

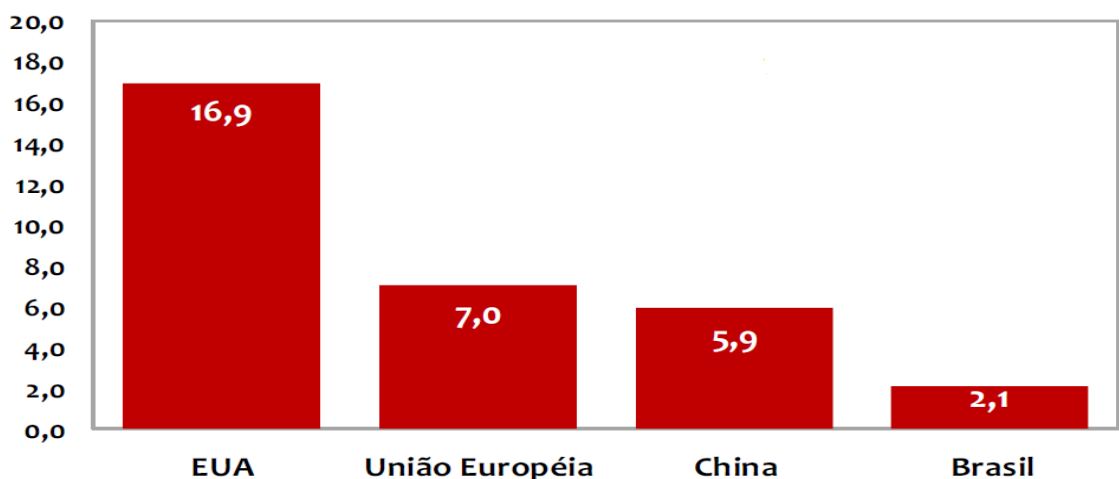
Logo, é compreensível porque as emissões de gases do efeito estufa derivadas da produção e uso de energia são relativamente baixas no Brasil, vide o montante de 459 Mt CO<sub>2eq</sub> registrado em 2013. A Figura 10 é bastante

---

<sup>88</sup> O corolário do aumento da geração termoelétrica é um maior nível de emissão de CO<sub>2</sub>. No entanto, ao se comparar os 115 kg CO<sub>2</sub>/MWh emitidos pelo setor elétrico brasileiro em 2013 com as emissões da China, dos EUA e da União Europeia de, respectivamente, 764, 503 e 406 kg CO<sub>2</sub>/ MWh nota-se o quanto as emissões brasileiras permanecem relativamente baixas.

ilustrativa do quanto a matriz energética brasileira apresenta uma reduzida intensidade em carbono.

**Figura 11 – Emissões de CO<sub>2</sub> do Setor de Energia per capita em 2011 (tCO<sub>2</sub>/habitante)**



Fonte: MME e EPE (2014).

No entanto, deve ser ressaltado que o Brasil é um país em vias de desenvolvimento e com um nível de consumo de energia ainda baixo quando comparado aos países hoje dito desenvolvidos. Desta forma, o desenvolvimento sócio-econômico brasileiro resultará em relevantes acréscimos na demanda por energia, mesmo que este desenvolvimento priorize setores de maior valor agregado e sejam adotadas robustas medidas de eficiência energética<sup>89</sup>.

É possível afirmar que as fontes renováveis permanecerão tendo uma participação expressiva na matriz energética brasileira ao longo das próximas décadas. Tal assertiva tem como base, não somente as potencialidades

---

<sup>89</sup> De acordo com EPE (2014), o consumo final de energia na década de 2030 seria da ordem de 500 Mtep.

naturais brasileiras, como as próprias diretrizes da política energética. Por exemplo, a exploração do potencial hídrico remanescente possui caráter prioritário na expansão do setor elétrico brasileiro e vislumbra-se que todos os aproveitamentos hídricos relevantes serão explorados até 2030. Ao mesmo tempo, dado o potencial eólico superior a 300 GW, nos últimos anos iniciou-se um ciclo de maciços investimentos em usinas eólicas que tende a permanecer nos próximos anos. Trajetória semelhante deve ser percorrida pela energia solar. Por sua vez, apesar da produção de etanol no Brasil estar estagnada nos últimos anos, é possível afirmar que trata-se de uma crise conjuntural que no médio prazo deve ser superada devido à grande produtividade da indústria canavieira brasileira<sup>90</sup>.

Conforme SCHAEFFER *et al.* (2012a), os sistemas energéticos tendem a ser vulneráveis às mudanças climáticas, sobretudo aqueles que utilizam fontes renováveis de energia em larga escala. Por exemplo, mudanças no ciclo hidrológico ao interferirem nas precipitações irão alterar o potencial de geração hidroelétrica. Ao mesmo tempo, considerando que a disponibilidade e a confiabilidade da energia eólica são função das condições meteorológicas e climáticas, prospecta-se que a geração eólica será afetada pela redistribuição espacial e pela mudança na velocidade dos ventos. Mesmo o potencial de energia solar é impactado pois mudanças na umidade do ar acabam por influenciar na nebulosidade. Concomitantemente, alterações de temperatura, pluviometria e nível de CO<sub>2</sub>, ao afetarem a produtividade das culturas agrícolas, deverão impactar a produção de biocombustíveis. Neste sentido, é perceptível que a análise da relação entre as mudanças climáticas e o setor energético brasileiro precisa contemplar os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade de energia.

---

<sup>90</sup> O setor de cana de açúcar foi especialmente afetado pela crise econômica internacional porque encontrava-se muito alavancado. Soma-se a isso safras ruins, necessidade de capital para renovar os canaviais, política de preços aplicada a gasolina que tirou competitividade do etanol e a maior atratividade econômica para produção de açúcar em alguns momentos. Porém, no médio prazo é plausível supor que o setor passará por um novo ciclo expansivo. EPE (2014) estima em 60 bilhões de litros a produção de etanol convencional e algo em torno de 4 bilhões de litros produzidos a partir de matéria lignocelulósica.

Segundo LUCENA *et al.* (2009), a partir das projeções climáticas do IPCC é possível examinar o comportamento das vazões médias das principais bacias hidrográficas brasileiras neste século. Os autores estimam que a vazão anual média das bacias pode sofrer um decréscimo de até 10,8%, sendo de 26,4% e de 15,8% as possíveis reduções, respectivamente, nas bacias do São Francisco e do Tocantins-Araguaia. Contudo, os efeitos da redução das vazões sobre a geração hidroelétrica devem ser atenuados pela presença de reservatórios de acumulação nas usinas do Centro-Sul do país<sup>91</sup>. Em suma, prospecta-se uma redução de até 2% na geração hídrica brasileira em função das mudanças climáticas<sup>92</sup> e merece atenção o fato que esta redução pode ser de 7,7% na Bacia do São Francisco.

Por sua vez, no escopo da energia eólica, LUCENA *et al.* (2010a) afirmam que as mudanças climáticas não irão impactar a disponibilidade da geração eólica no Brasil. Em realidade, as condições para geração de energia eólica deverão ficar melhores, sobretudo na Região Nordeste<sup>93</sup>. Porém, os autores ressaltam o cuidado que deve haver na interpretação dos resultados em função das incertezas relativas ao modelo climático e aos supostos adotados.

No âmbito dos biocombustíveis, COPPE (2008) analisa o impacto da variação de temperatura sobre a produtividade de etanol e de biodiesel no Brasil. Os resultados do estudo indicam que o aumento da temperatura não irá impactar a produção brasileira de etanol. Explica-se: desde que haja umidade no solo<sup>94</sup>, temperaturas elevadas não são um obstáculo ao cultivo da cana de açúcar e as projeções indicam que as principais áreas produtoras permanecerão com

---

<sup>91</sup> Embora a previsão seja de uma pequena redução das aflúencias na Bacia do Paraná, a perspectiva de maiores vazões no início da estação chuvosa é bastante relevante pois permitirá um maior acúmulo de água nos reservatórios de acumulação das usinas existentes e, desta forma, uma maior regularização da oferta de hidroelétrica. Em contrapartida, a impossibilidade de construção de novos reservatórios de acumulação limita as possibilidades da adaptação a períodos secos mais severos ocorrer através do gerenciamento dos reservatórios.

<sup>92</sup> A redução da energia firme do sistema pode atingir o valor de 3,15%.

<sup>93</sup> O aumento da velocidade dos ventos nas áreas costeiras das regiões Norte e Nordeste tornarão atrativa a exploração do potencial *offshore*.

<sup>94</sup> Na ausência de chuvas, esta irrigação pode ocorrer de maneira artificial.

temperaturas compatíveis com a cultura da cana de açúcar<sup>95</sup>. Em contraste com a realidade do etanol, a produção de biodiesel tende a ser negativamente afetada, sobretudo na Região Nordeste<sup>96</sup> onde às condições climáticas (aumento da temperatura) tendem a se tornarem inadequadas ao cultivo de plantas oleaginosas como soja e mamona<sup>97</sup>. Em parte, este impacto será atenuado pela possibilidade de aumento da produção na Região Sul em função do aumento de sua temperatura média, entretanto, as condições climáticas da Região Sul não serão compatíveis com o cultivo de algumas espécies de plantas oleaginosas.

Observa-se que os principais impactos negativos estão concentrados na Região Nordeste. No caso do setor elétrico, mesmo considerando o aumento do potencial de geração eólica, é preciso reter atenção pois a energia eólica é uma fonte não controlável de energia. Logo, a conjugação da redução da geração hídrica com o aumento de geração não controlável resultará em dificuldades crescentes para o atendimento da ponta do sistema e de suprir a energia demandada em anos de hidrologia críticas. Embora o reforço da interligação com os subsistemas Sudeste/Centro Oeste e Sul e construção de usinas híbridas eólica/solar sejam importantes medidas de adaptação, investimentos em centrais térmicas com geração controlável parece ser imprescindível com vistas a garantir a segurança do suprimento em meio aos impactos causados pelas mudanças climáticas. Já os impactos sobre a produção de biodiesel também são nocivos em termos sociais porque o programa do biodiesel brasileiro tem a geração de renda rural como um dos seus objetivos. Dentre possíveis medidas de adaptação, destaca-se o desenvolvimento de variedade geneticamente adaptadas às novas condições climáticas.

---

<sup>95</sup> Os resultados deste estudo precisa ser visto com ressalvas pois uma análise mais completa precisaria considerar o comportamento do regime pluvial e da concentração de CO<sub>2</sub>.

<sup>96</sup> A Região Centro Oeste também será negativamente afetada.

<sup>97</sup> Por ter sua produção concentrada na Região Nordeste, a mamona será a cultura agrícola mais afetada devido à perspectiva de aumento da temperatura e da seca nesta região. No limite, não existiria nenhuma área apta ao seu cultivo. Por outro lado, o dende e o girassol não serão afetados de forma negativa.

Apesar da expressiva participação de participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira, é pouco razoável supor que o Brasil não terá que assumir compromisso de redução de emissões de gases do efeito estufa, vide o tamanho da economia brasileira e o fato do desmatamento colocar o país como um dos maiores emissores de gases do efeito do mundo<sup>98</sup>. Neste sentido, em 2009 foi promulgada a Lei 12.187/09 que rege as diretrizes da Política Nacional sobre Mudança do Clima e estabelece uma redução das emissões de gases do efeito estufa entre 36,1 e 38,9% em relação a um cenário de referência construído para 2020.

Embora seja notório que a mitigação brasileira está em boa medida associada ao combate do desmatamento, é pertinente trabalhar com a hipótese que o setor energético também precisará fazer um esforço mitigatório, sobretudo em um contexto em que o uso de combustíveis fósseis deverá se tornar mais intenso. Neste sentido, cabe fazer algumas ponderações.

Em primeiro lugar, é importante enfatizar que, exceto em um cenário em que haja políticas de incentivos ao uso de combustíveis fósseis, o aumento da disponibilidade de óleo e gás derivado das reservas do pré sal por si só não ocasionará aumento na demanda por derivados do petróleo nem no consumo de gás natural. Tal aumento está associado a própria lógica do *status quo* do sistema tecno-econômico vigente.

No setor de transportes, dado o efeito *lock in* e o truncamento tecnológico inerentes a predominância do modal rodoviário, no horizonte temporal dos próximos 20 anos irá ser mantida a relação entre desenvolvimento sócio econômico e o crescimento da demanda por derivados de petróleo. Como ilustração, EPE (2014) estima que a demanda por gasolina nos próximos 20

---

<sup>98</sup> No ano de 2010, estima-se que as emissões brasileiras de gases do efeito estufa foram de 1,246 GtCO<sub>2</sub>eq, sendo a mudança e uso da terra (incluindo atividade agropecuária) responsável por 57% destas emissões (MCTI *et al.*, 2013).

anos sofrerá um acréscimo de aproximadamente 28%<sup>99</sup> enquanto que a demanda por óleo diesel cresceria impressionantes 82% no mesmo período<sup>100</sup>.

Por sua vez, no setor elétrico, a já referida redução da capacidade de regularização da oferta hidroelétrica torna imperativa a realização de investimentos em centrais termoeletricas devido à necessidade de diversificação o parque gerador, a qual deve contemplar a contratação de plantas com geração controlável. Embora não se possa descartar a possibilidade de investimentos em centrais nucleares, a mesma é uma decisão de caráter eminentemente político e, ao mesmo tempo, não é razoável supor que a geração nuclear responderá pela totalidade da geração térmica requerida. Concomitantemente, apesar da reconhecida importância da bioeletricidade do setor de cana de açúcar na complementação do parque hídrico, sua função sistêmica apresenta limitações devido ao caráter sazonal desta energia. Logo, nota-se o caráter essencial de investimentos em centrais térmicas movidas a combustíveis fósseis.

A questão a ser discutida é qual fonte e tecnologia deve ser priorizada. Observa-se que tal seleção não deverá considerar apenas a função no sistema do projeto a ser contratado e seu custo de geração. A mitigação dos gases do efeito estufa também será uma variável a ser considerada. Neste sentido, a modelagem do sistema elétrico brasileiro realizada por NOGUEIRA *et al.* (2014) indica que na ausência de diretrizes limitadoras de emissões, a expansão termoelétrica ocorreria basicamente através de plantas a biomassa e de centrais a carvão. Em contrapartida, no caso de políticas de mitigação, as quais reflitam-se no preço do carbono, resultariam em uma priorização de plantas ciclo combinado movidas a gás natural. Os autores relatam que no cenário em que o preço do carbono atinja patamares elevados, a adoção da

---

<sup>99</sup> Crescimento projetado para a demanda por gasolina A que totalizaria algo em torno de 50 bilhões de litros por volta de 2035. A gasolina C (gasolina A + etanol anidro) que é vendida nos postos de abastecimento teria uma demanda de 65 bilhões de litros.

<sup>100</sup> Além do setor de transportes, o óleo diesel é amplamente utilizado no setor industrial e estimativas indicam que a demanda por óleo diesel também crescerá neste setor.



técnica CCS assumiria grande importância e existira a construção de plantas IGCC.

As potencialidades naturais brasileiras associadas à competitividade das fontes renováveis induzem a priori a crença que o Brasil possui condições de mitigar emissões no setor energético sem maiores dificuldades e que o fato do país assumir acordos climáticos possa ser uma oportunidade de ganho de competitividade para a economia. De fato, o Brasil apresenta condições de ter uma matriz energética com reduzida emissão de gases do efeito estufa. Entretanto, a matriz brasileira detém esta característica independentemente da existência de um acordo climático e sim pela disponibilidade e competitividade das fontes renováveis no Brasil, vide os preços pelos quais a hidroeletricidade e a energia são contratados nos leilões de energia. Dado que as reduções de emissões possivelmente serão estimadas sobre um cenário de referência e, no caso brasileiro e as emissões neste cenário já são baixas, o potencial para mitigar as emissões é limitado e o custo tende a ser elevado.

Especificamente no setor elétrico, mesmo com a perspectiva de um uso mais intenso de usinas termoelétricas, a predominância das fontes renováveis faz com que as emissões brasileiras permaneçam bastante aquém da média mundial. Desta forma, não é possível identificar grandes oportunidades de redução das emissões, sendo bastante custosas as opções existentes. Neste sentido, ROCHEDO e SZKLO (2012) estimam um custo de abatimento em centrais termoelétricas movidas a carvão com CCS superior a US\$ 100 por tCO<sub>2</sub> enquanto SCHAEFFER et al. (2012) calculam um custo de abatimento da ordem de US\$ 500 por tCO<sub>2</sub> para plantas de energia solar no Estado do Rio de Janeiro. Mesmo medidas de eficiência energética no setor elétrico apresentam de mitigação elevado. Conforme JANUZZI et al. (2010), o custo de abatimento através de eficiência energética variaria entre US\$ 160 e 2800 por tCO<sub>2</sub>.

BORBA *et al.* (2012) destacam que o custo de abatimento das emissões no setor elétrico brasileiro situam-se em um patamar muito acima daquele verificado em outros países, nos quais existem alternativas de mitigação com

um custo inferior a US\$ 30 por tCO<sub>2</sub>, sendo este o caso dos países membros da União Europeia. Desta forma, os autores enfatizam que o potencial de mitigação brasileiro estaria em grande medida associado à indústria de petróleo e ao consumo final nos setores industrial e de transportes<sup>101</sup>. O estudo aponta para oportunidades de mitigação com custos entre US\$ - 40 e 92 por tCO<sub>2</sub> na indústria de petróleo, entre US\$ - 402 e - 11 por tCO<sub>2</sub> no setor industrial e entre US\$ - 120 e 360 no setor de transportes. Nota-se que estes segmentos apresentam opções de abatimento com custos negativos, as quais deveriam ser imediatamente implementadas, especialmente no setor industrial<sup>102</sup>. O trabalho conclui que é possível reduzir as emissões inerentes ao consumo e uso de energia no Brasil prospectadas para 2030 em até 27%<sup>103</sup>, sendo os setores industrial e de transportes responsáveis por 85% desta redução. Contudo, os autores enfatizam a impossibilidade da realização de uma redução em termos absolutos das emissões correntes.

Observa-se assim a cautela que o setor energético brasileiro, especialmente o setor elétrico, deve ter em relação a acordos climáticos que venham ser assumidos pelo Brasil. Trata-se de uma situação paradoxal pois a dificuldade brasileira advém justamente do fato de já deter uma matriz com baixa emissão de gases do efeito estufa. Idealmente para o Brasil, os acordos deveriam ser focados em indicadores que levem em consideração a intensidade das emissões, como a quantidade de gases emitidas por unidade de energia

---

<sup>101</sup> Na indústria de petróleo existem medidas a serem adotadas no segmento *upstream*, por exemplo instalação de unidades de recuperação de calor e redução da prática do *gas flaring* nas plataformas *offshore*; ganhos de eficiência no *dowstream* derivados de uma melhor integração dos processos, da adoção de sistemas de controles avançados e de melhores equipamentos (queimadores, bombas, compressores) e pré queima do ar; já no segmento petroquímico o uso de caldeiras mais eficientes e inovações no processo são essenciais para a redução das emissões. Por sua vez, no setor de transportes as medidas vão desde a melhoria dos motores convencionais até melhorias na infraestrutura de transporte. Já no setor industrial a redução das emissões estaria associada a implementação de práticas de eficiência energética, maior uso de combustíveis renováveis e reaproveitamento dos recursos.

<sup>102</sup> Todas as medidas de mitigação identificadas no setor industrial apresentam custos negativos, sendo que medidas de eficiência energética podem assumir valores muito expressivos. Por exemplo, melhorias na recuperação de calor e de vapor podem assumir custos negativos da ordem de US\$ 400 por tCO<sub>2</sub>.

<sup>103</sup> Isso significa uma redução de 226,1 milhões toneladas de CO<sub>2eq</sub> em relação às emissões de 827 milhões de toneladas de CO<sub>2eq</sub> no cenário de referência para 2030. O setor industrial responderia por 59,4% destas reduções enquanto que o setor de transportes e a indústria representariam, respectivamente, 24,6% e 8,3% da redução. O setor elétrico contribuiria com apenas 3,8% da redução.

produzida/utilizada. Considerando que a negociação climática não vem se processando nestas bases, a questão passa por estabelecer metas compatíveis com as emissões previstas no cenário de referência com vistas a não se estabelecer restrições excessivas.

Porém, é preciso considerar que as metas de redução de emissões referem-se ao total das emissões do país. Considerando que a trajetória das emissões totais brasileiras é nitidamente decrescente e, supondo que as políticas de combate ao desmatamento permitirão a manutenção desta tendência, vislumbra-se a possibilidade da redução das emissões não exigirem um expressivo e custoso esforço por parte do setor energético. Em especial, a situação tende a ser favorável caso a redução tenha um ano histórico base como referência, como foi o caso do Protocolo de Quioto, porque nos últimos anos as emissões relativas ao desmatamento já sofreram uma drástica redução<sup>104</sup>.

No âmbito das empresas de energia brasileiras, a partir da constatação que a busca crescente por sustentabilidade deverá ser vista como um dado imposto pelas normas regulatórias e pela crescente pressão da sociedade, a questão passa a ser identificar as oportunidades de negócios a serem exploradas e os riscos inerentes ao novo ambiente comercial.

Em termos de investimentos em fontes renováveis e alternativas, verifica-se um mercado muito pulverizado e extremamente competitivo. Logo, é preciso indagar se este nível de competitividade e, por consequência, as margens reduzidas serão sustentáveis no médio/longo prazo. Por sua vez, as medidas de eficiência energética precisam ser vistas com ressalvas por serem em muitos casos conflituosas com a lógica comercial e diretrizes regulatórias vigentes no setor. Desta forma, alterações no arcabouço regulatório assumem

---

<sup>104</sup> Segundo MCTI *et al.* (2013), as emissões inerentes ao desmatamento foram reduzidas em 76% entre 2005 e 2010.

grande relevância com vistas a possibilitar a adoção de modelos de negócios que incitem investimentos em eficiência energética<sup>105</sup>.

---

<sup>105</sup> Ver relatório de Tendências Regulatórias.

## 5. Conclusão

Os riscos e impactos impostos pelas mudanças climáticas exigem que medidas de adaptação conjugadas com medidas de mitigação com vistas a minimizar as consequências do aquecimento global sejam adotadas. No âmbito da mitigação das emissões, vide que o setor energético é responsável por mais de 60% das emissões mundiais, é necessária uma drástica mudança nos padrões de produção e uso de energia.

A transformação do setor energético está diretamente relacionada ao uso mais eficiente dos recursos energéticos. Concomitantemente, é preciso promover a descarbonização da matriz através do uso mais intenso de fontes renováveis, investimentos em centrais nucleares e em plantas termoelétricas dotadas de sistemas CCS.

Entretanto, verifica-se que as políticas e medidas de mitigação adotadas até o momento não foram capazes de reduzir as emissões globais de gases do efeito estufa, que mantiveram uma trajetória ascendente. Apesar de persistirem questões e riscos técnicos associados a algumas tecnologias, o grande entrave à mudança do paradigma tecnológico continua a ser o custo de grande parte das soluções mitigadoras. Mesmo considerando que o retorno econômico em muitos casos é positivo, os dispêndios de investimento são bastante elevados.

Como o custo destas tecnologias/soluções variam em função da disponibilidade dos recursos naturais e do domínio tecnológico, a adoção delas acaba por impactar a competitividade relativa das economias e isso é um dos maiores entraves ao estabelecimento de acordos climáticos em nível mundial. De todo modo, após um longo período de negociação, tudo indica que o acordo climático que irá suceder o Protocolo de Quioto irá contemplar, não apenas os EUA, como países em vias de desenvolvimento que são grandes emissores de gases do efeito, como é o caso da China, da Índia e do Brasil. Porém, para que

haja uma efetiva mitigação dos gases de efeito estufa, é muito importante que também existam o estabelecimento de acordos setoriais que definam diretrizes tecnológicas compatíveis com a economia de baixo carbono e o eficaz funcionamento de mercados de carbono.

O caso brasileiro é peculiar. A expressiva participação de fontes renováveis em sua oferta de energia resulta em uma reduzida emissão de gases do efeito estufa. Porém, esta participação torna o seu sistema mais vulnerável aos impactos das mudanças climáticas, especialmente na Região Nordeste. Observa-se assim que o planejamento do setor energético deverá considerar esta vulnerabilidade com vistas a serem adotadas medidas de adaptação, assim como, as empresas deverão considerá-la como uma variável de risco em suas análises de investimento. Em paralelo, prospecta-se que a redução das emissões no setor energético brasileiro tende a ser difícil e custosa porque em um cenário de referência que não considere a necessidade de mitigação as emissões brasileiras já são reduzidas. Trata-se uma situação paradoxal pois o Brasil deveria se posicionar como um líder na questão climática, vide que suas potencialidades permitem que mantenha uma ampla participação de fontes limpas em sua matriz energética em bases competitivas de custos.

## 7. Referências

- AMPONSAH, Nana Yaw. *et al. Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (2014): 461–475.
- BARRETT, Sam. *Subnational Climate Justice? Adaptation Finance Distribution and Climate Vulnerability*. *World Development* Vol. 58 (2014): 130–142.
- BHAVE, Ajay Gajanan. *et al. A combined bottom-up and top-down approach for assessment of climate change adaptation options*. *Journal of Hydrology* 518 (2014): 150–161.
- BOETERS, Stefan; KOORNNEEF, Joris. *Supply of renewable energy sources and the cost of EU climate policy*. *Energy Economics* 33 (2011): 1024–1034.
- BORBA, Bruno S.M.C.; LUCENA, André F.P.; RATHMANN, Régis; COSTA, Isabella V.L.; NOGUEIRA, Larissa P.P.; ROCHEDO, Pedro R.R; BRANCO, David A.C.; JÚNIOR, Maurício F.H.; SZKLO, Alexandre; SCHAEFFER, Roberto. *Energy- related climate change mitigation in Brazil: Potential, abatement costs and associated policies*. *Energy Policy* 49 (2012): 430 – 441.
- CARBO, Michiel C. *et al. Bio Energy with CCS (BECCS): Large potential for BioSNG at low CO2 avoidance cost*. *Energy Procedia* 4 (2011): 2950–2954.
- CHAPPIN, Emile J. L.; LEI, Telli Van Der. *Adaptation of interconnected infrastructures to climate change: A socio-technical systems perspective*. *Utilities Policy* 31 (2014): 10-17.
- COPPE. *Mudanças climáticas e segurança energética no Brasil*. UFRJ, 2008.
- CORNER, Adam. *et al. Nuclear power, climate change and energy security: Exploring British public attitudes*. *Energy Policy* 39 (2011): 4823–4833.
- CSEREKLYEI, Zsuzsanna. *Measuring the impact of nuclear accidents on energy policy*. *Ecological Economics* 99 (2014): 121–129.
- DANTAS, Guilherme de Azevedo. *O Impacto dos Créditos de Carbono na Rentabilidade da Co-Geração Sucroalcooleira Brasileira*. Dissertação de Mestrado. ISEG/Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2008.

- DEMUZERE, M. et al. *Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure*. Journal of Environmental Management 146 (2014): 107-115.
- DE VISSER, Erika. et al. *PlantaCap: a Ligno-cellulose Bio-ethanol Plant with CCS*. Energy Procedia 4 (2011): 2941–2949.
- DOWD, Anne-Maree. et al. *Investigating the link between knowledge and perception of CO2 and CCS: An international study*. International Journal of Greenhouse Gas Control 28 (2014): 79–87.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. *Demanda de Energia 2050*. Série Estudos da Demanda de Energia. Nota Técnica DEA 13/14. Rio de Janeiro, 2014.
- EKSTROM, Julia A; MOSER, Susanne C.. *Identifying and overcoming barriers in urban climate adaptation: Case study findings from the San Francisco Bay Area, California, USA*. Urban Climate 9 (2014): 54–74.
- GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. *Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento*. Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.
- GRAPE, Sophie. et al. *New perspectives on nuclear power—Generation IV nuclear energy systems to strengthen nuclear non-proliferation and support nuclear disarmament*. Energy Policy 73 (2014): 815–819.
- HAYASHI, Masatsugu; HUGHES, Larry. *The Fukushima nuclear accident and its effect on global energy security*. Energy Policy 59 (2013): 102–111.
- HERTEL, Thomas; LOBELL, David B.. *Agricultural adaptation to climate change in rich and poor countries: Current modeling practice and potential for empirical contributions*. Energy Economics (2014).
- HOFFMANN, Bettina Suzanne. *O Ciclo Combinado com Gaseificação Integrada e a Captura de CO2: uma solução para mitigar as emissões de CO2 em termoelétricas a carvão em larga escala no curto prazo?* Dissertação de Mestrado. PPE/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2010.



HOOFF, T. Van. et al. *On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for residential buildings*. Building and Environment 82 (2014): 300-316.

IEA, International Energy Agency. *CO2 Emissions from Fuel Combustion*. IEA. Paris, 2014a.

IEA, International Energy Agency. *Energy Technology Perspectives 2014*. IEA. Paris, 2014b.

IEA, International Energy Agency. *Global EV Outlook - Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020*. IEA. Paris, 2013.

IEA, International Energy Agency. *World Energy Outlook 2012*. IEA. Paris, 2012.

IPCC, Painel Intergovernamental sobre a Mudança do Clima. *Câmbio Climático 2013 – Bases Físicas – Resumen para responsables de políticas, Resumen técnico y Preguntas frecuentes*. Quinto Relatório de Avaliação do Grupo de Trabalho I do IPCC. Genebra, 2013a.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Working Group II. Genebra, 2014a.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Working Group III. Genebra, 2014b.

JACKSON, Andrew L.R.. *Renewable energy vs. biodiversity: Policy conflicts and the future of nature conservation*. Global Environmental Change 21 (2011): 1195–1208.

JANKO, Ferenc. et al. *Reviewing the climate change reviewers: Exploring controversy through report references and citations*. Geoforum 56 (2014): 17–34.

JANUZZI, G.M.; GOMES, R.DM.; MELO, C.A. *Energy Efficiency*. IN: Synthesis Report Energy 2010 – Brazil Low-carbon Country Case Study. World Bank, Sustainable Development Department of Latin America and Caribbean Region.

JIMENEZ, Gonzalo; FLORES, Jose Miguel. *Reducing the CO<sub>2</sub> emissions and the energy dependence of a large city area with zero-emission vehicles and nuclear energy*. Progress in Nuclear Energy (2014): 1-8.

KIM, Younghwan. et al. *Effect of the Fukushima nuclear disaster on global public acceptance of nuclear energy*. Energy Policy 61(2013): 822–828.

KOELBL, B.S. et al. *Uncertainty in the deployment of Carbon Capture and Storage (CCS): A sensitivity analysis to techno-economic parameter uncertainty*. International Journal of Greenhouse Gas Control 27 (2014): 81–102.

LAUDE, Audrey; JONEN, Christian. *Biomass and CCS: The influence of technical change*. Energy Policy 60 (2013): 916–924.

LEMIEUX, Christopher J. et al. *From science to policy: The making of a watershedscale climate change adaptation strategy*. Environmental Science & Policy 42 (2014): 123 – 137.

LENZEN, Manfred. *Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review*. Energy Conversion and Management 49 (2008): 2178–2199.

LUCENA, André Frossard Pereira, SZKLO, Alexandre Salem, SCHAEFFER, Roberto, DUTRA, Ricardo Marques. *The vulnerability of wind power to climate change in Brazil*. Renewable Energy 35 (2010a): 904-912.

LUCENA, Andre Frossard P. et al. *Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system*. Global Environmental Change 20 (2010b): 342–350.

LUCENA, Andre Frossard P. et al. *The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil*. Energy Policy 37 (2009): 879–889.

LWASA, Shuaib. et al. *Urban and peri-urban agriculture and forestry: Transcending poverty alleviation to climate change mitigation and adaptation*. Urban Climate 7 (2014): 92–106.

MAJOURD, Mohammad M.; ASSADI, Mohsen. *Techno-economic assessment of fossil fuel power plants with CO<sub>2</sub> capture e Results of EU H2-IGCC Project*. International Journal of Hydrogen Energy (2014): 1-14.

- MATHEWS, Alexander P.. *Renewable energy technologies: panacea for world energy security and climate change?* Procedia Computer Science 32 (2014): 731–737.
- MAZZETTI, Marit J. et al. *NORDICCS CCS Roadmap*. Energy Procedia 51 (2014): 1– 13.
- MCTI, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação; SEPED, Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento; CGMC, Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima. *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. Brasília, 2013.
- MERSCHMANN, Paulo R. de C. et al. *Modeling water use demands for thermoelectric power plants with CCS in selected Brazilian water basins*. International Journal of Greenhouse Gas Control 13 (2013): 87–101.
- MING, Zeng. et al. *CCS technology development in China: Status, problems and countermeasures—Based on SWOT analysis*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 39 (2014): 604–616.
- MME, Ministério de Minas e Energia; EPE, Empresa de Pesquisa Energética. *Balço Energético 2014 (ano base 2013) – Relatório Síntese*. 2014.
- NJOROGE, J.M.. *An enhanced framework for regional tourism sustainable adaptation to climate change*. Tourism Management Perspectives 12 (2014): 23–30.
- NOGUEIRA, Larissa Pinheiro P. et al. *Will thermal power plants with CCS play a role in Brazil's future electric power generation?* International Journal of Greenhouse Gas Control 24 (2014): 115–123.
- OBERLACK, Christoph; EISENACK, Klaus. *Alleviating barriers to urban climate change adaptation through international cooperation*. Global Environmental Change 24 (2014): 349–362.
- PICKARD, S. et al. *Bio-CCS: Co-firing of established greenfield and novel, brownfield biomass resources under air, oxygen-enriched air and oxy-fuel conditions*. Energy Procedia 37 (2013): 6062– 6069.

POINSSOT, Ch. et al. *Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between closed and open fuel cycles*. Energy 69 (2014): 199-211.

REN21, RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21<sup>st</sup> CENTURY. *Renewables 2014 – Global Status Report*. REN21. Paris, 2014.

RICCI, Olivia; SELOSSE, Sandrine. *Global and regional potential for bioelectricity with carbon capture and storage*. Energy Policy 52 (2013): 689–698.

ROCHEDO, Pedro R.; SZKLO, Alexandre S. *Minimum Work of Separation and Learning Curves for Carbon Capture based on Chemical Absorption*. In: the 7th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems—SDEWES Conference. Ohrid, 2012.

SEIGO, Selma L'Orange. et al. *Public perception of carbon capture and storage (CCS): A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 38 (2014): 848–863.

SCHAEFFER, Roberto. Et al. *Energy sector vulnerability to climate change: A review*. Energy 38 (2012a): 1-12.

SCHAEFFER, Roberto; SZKLO, Alexandre; RATHAMANN, Régis. *Impactos da Adoção de Metas de Redução de Emissão de Gases de Efeito Estufa sobre Setores Energo Intensivos do Estado do Rio de Janeiro*. Alternativas e Custos de Mitigação. Executive Report. COPPE/PPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2012b.

TAYLOR, Andrea L. et al. *Public perception of climate risk and adaptation in the UK: a review of the literature*. Climate Risk Management (2014).

TOKIMATSU, Koji. et al. *Costs and performance of an oxygen-blown IGCC plant with CCS on a first-of-a-kind basis in Japan*. International Journal of Greenhouse Gas Control 27 (2014): 203–220.

TROLDBORG, Mads. et al. *Assessing the sustainability of renewable energy Technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 39 (2014): 1173–1184.

UNEP, United Nations Environment Programme, 2014. The Emissions Gap Report 2014 – A UNEP Synthesis Report. Nairobi.

UNEP, United Nations Environment Programme, 2012. The Emissions Gap Report 2012 – A UNEP Synthesis Report. Nairobi.

VALLE, Alessandra D.; FURLAN, Claudia. *Diffusion of nuclear energy in some developing countries*. Technological Forecasting & Social Change 81 (2014): 143–153.

VOSKAMP, I.M.; VAN DE VEM, F.H.M.. *Planning support system for climate adaptation: Composing effective sets of blue-green measures to reduce urban vulnerability to extreme weather events*. Building and Environment (2014): 1-9.

WACHSMUTH, J. et al. *How will renewable power generation be affected by climate change? The case of a Metropolitan Region in Northwest Germany*. Energy 58 (2013): 192-201.

WBG, World Bank Group. *4<sup>o</sup> Turn Down the Heat – Confronting the New Climate Normal*. WBG. Washington DC, 2014.

WOHLGEMUTH, Norbert. *The relevance of renewable energy technologies for climate change mitigation*. World Renewable Energy Congress VI (WREC2000).

YU, Xiao; QU, Hang. *The role of China's renewable power against climate change during the 12th Five-Year and until 2020*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 22 (2013): 401–409.



