

Impactos ambientais do setor energético¹

As fontes de energia causam impactos ambientais e as emissões de gases de efeito estufa para o ambiente têm sido o foco de preocupação da sociedade, mas outros impactos significativos ocorrem como a liberação de resíduos produzidos durante a geração e uso da energia, as perturbações na região dos empreendimentos, deslocamento populacional e suas implicações econômicas e sociais etc. A Tabela 1 apresenta os problemas ambientais mais relevantes nos dias de hoje. Observando esta tabela notamos que as atividades ligadas à geração e uso de energia praticamente compõem a totalidade das causas dos malefícios ambientais. Vemos que as principais degradações do ambiente como a chuva ácida, a poluição urbana e o aquecimento global estão ligadas aos recursos energéticos.

Energia elétrica é utilizada pelos setores de transporte, construção, industrial, comércio e pelas famílias em suas residências. Emissões e outros impactos ambientais relacionados à energia são subprodutos da conversão, transporte (incluindo extração/refinamento, geração de eletricidade, transporte direto de produtos energéticos em dutos, fios elétricos, navios e do uso final da energia (REIS & CUNHA, 2006; IPCC, 2007). Devido a isto, devemos considerar toda a cadeia produtiva da geração de energia para quantificar os impactos ambientais. Devemos considerar todo o ciclo de vida da fonte de energia, pois os resíduos gerados devem ser reciclados e retornados a uma condição natural adequada, as instalações devem ser desmontadas após sua vida útil, a área ocupada deve ser liberada e disponibilizada para outros fins e os rejeitos devem ser reciclados.

A Tabela 1 também mostra que podemos classificar os impactos ambientais em locais, regionais e globais. A liberação de produtos químicos tóxicos e a poluição do ar tendem a causar impactos locais, nas imediações do agente causador. A má qualidade da água, a chuva ácida e a desertificação geram impactos regionais. Já a diminuição da camada de ozônio e o aquecimento global, cada um de per si, são fenômenos globais.

¹ Esta apostila é baseada na dissertação de mestrado de Marcos Araujo Cesaretti (CESARETTI, 2010).

Vamos estudar como as atividades econômicas ligadas ao setor de energia causam impactos ambientais e como podemos quantificar esses impactos.

Tabela 1 - Problemas ambientais mais relevantes e suas principais causas

Tipo de impacto	Problema ambiental	Principal causa
Local	Poluição urbana do ar	Energia (indústria e transporte)
	Poluição do ar em ambiente fechado	Energia (cozimento)
Regional	Chuva ácida	Energia (queima de combustível fóssil)
	Má qualidade da água doce	Aumento populacional, agricultura, indústria
Global	Aquecimento global / efeito estufa	Energia (emissão de gases na queima de combustível fóssil)
	Diminuição da camada de ozônio	Indústria
	Degradação costeira e marinha	Transporte e energia
	Desmatamento e desertificação	Aumento populacional, agricultura e energia
	Resíduos tóxicos, químicos e perigosos	Indústria e energia (fóssil, nuclear e outras)

Fonte: Goldemberg & Lucon (2008, p.113)

1. Fontes de energia e impactos ambientais

A Figura 1 apresenta a contribuição de cada setor produtivo para a emissão global de gases do efeito estufa (GEE) em 2004. Os setores considerados são de fornecimento de energia, indústria, silvicultura, agricultura, transporte, construção e processamento de rejeitos (lixo e resíduos sólidos urbanos e industriais). O suprimento de energia responde por 25% das emissões. Depois vem a indústria com cerca de 20%. Na sequência vêm a silvicultura, agricultura, transporte, comércio e residências e, por fim, atividades de descarte. O setor energético propriamente dito é o maior emissor mundial de GEE participando com um quarto das emissões, e dentro deste setor, os maiores responsáveis são os combustíveis fósseis.

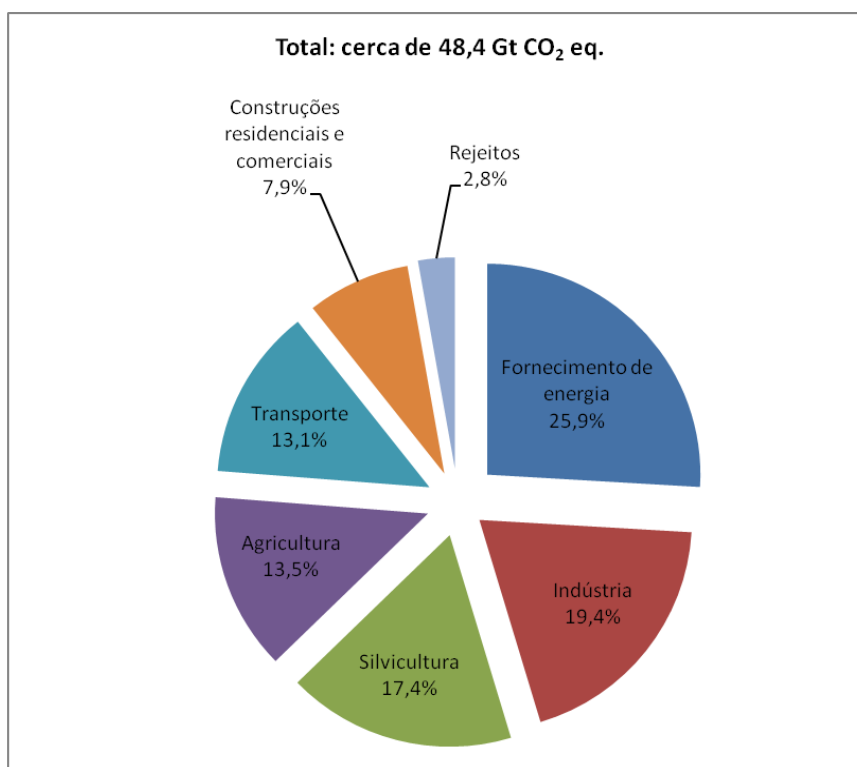


Figura 1 - Emissões de gases causadores de efeito estufa, em 2004, segundo o setor de atividade humana. Fonte: IPCC (2007)

Os impactos ambientais do setor energético se originam das várias etapas dos processos envolvendo energia. A Figura 2 elaborada pelo IPCC (2007) mostra as etapas de processamento entre a conversão das fontes energéticas e o uso final da energia. Todas as fontes primárias de energia passam por etapas semelhantes de prospecção, exploração, extração, refino e são transformadas em formas adequadas para o uso pela sociedade como calor, combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos ou eletricidade. Cada etapa constitui-se em um ou mais elos na sua cadeia produtiva. Há etapas de armazenamento e de distribuição e, finalmente, etapas de uso final para fins de obtenção de frio, calor, combustíveis etc. Os mercados de energia vendem energia para os setores de transporte, construção, industrial, comércio e para as famílias em suas residências.

Emissões e outros impactos ambientais relacionadas à energia são subprodutos da conversão, transporte (incluindo extração/refinamento, geração de eletricidade e transporte direto de produtos energéticos em dutos, fios elétricos, navios etc) e do uso final de energia por diversos setores como o próprio setor de transportes, construção civil, indústria, agricultura, silvicultura etc., conforme mostrados na Figura 2.

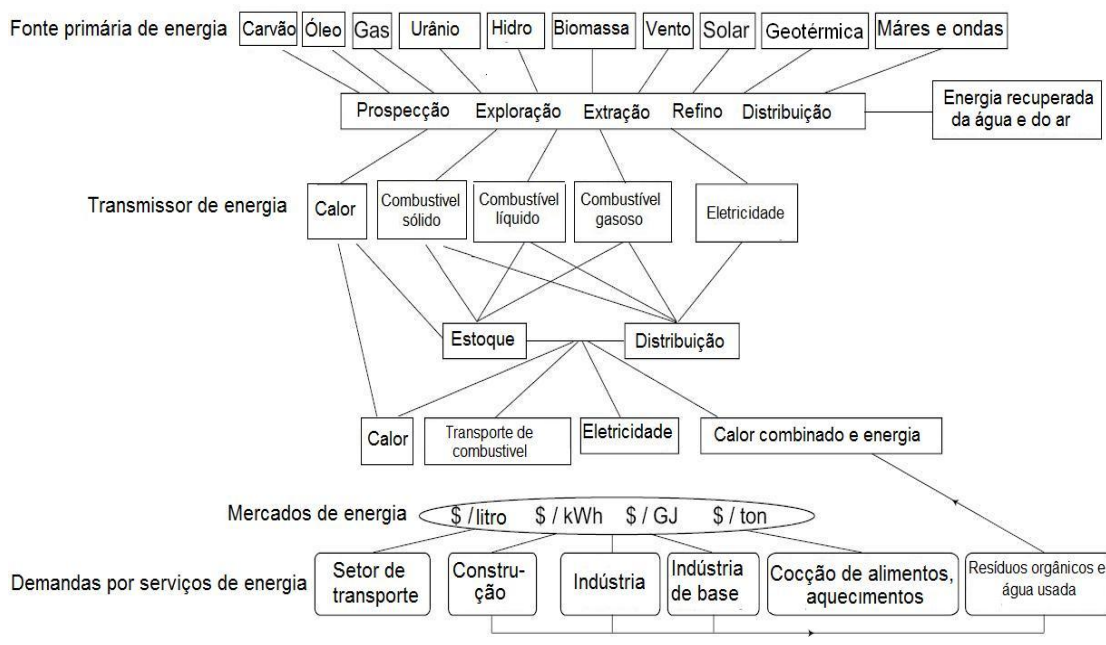


Figura 2 – Interações entre os ciclos de vida das fontes primárias de energia e os usos finais.
Fonte: IPCC (2007).

A avaliação dos impactos ambientais das fontes de energia deve levar em consideração toda a cadeia produtiva dos energéticos e suas características físicas específicas e a densidade energética das fontes de energia (BRASIL, 2007; SCHEER, 2002; CESARETTI, 2010). Scheer (2002) apresenta as cadeias mais comuns de fornecimento de eletricidade por parte das diversas fontes de energia. Dependendo da fonte, as cadeias envolvem mais problemas ambientais (como nas refinarias petrolíferas), complexidades operacionais (como na cadeia nuclear pelos procedimentos sofisticados visando à proteção contra as radiações) e consumo elevado de energia do que em outras. Devemos considerar a eliminação dos resíduos, transporte da energia e sua distribuição e uso, pois os impactos de toda a cadeia energética podem afetar a sociedade como um todo.

A Tabela 2 apresenta o número de elos da cadeia produtiva de várias fontes de energia elétrica. A cadeia global das fontes desde a extração até o consumidor final envolve, no mínimo 10, elos para as fontes fósseis e 14 para nuclear (ou 17 se houver reprocessamento/reciclagem do combustível). No caso da fonte hídrica, após a construção da represa existem, 5 elos na cadeia de produção de energia: captação de água; queda da água represada; rotação da turbina hidráulica; geração de corrente

elétrica; transporte e distribuição. Já as fontes solar e eólica apresentam 3 elos quando utilizadas em geração distribuída e elimina-se a etapa de transporte de energia. Além disso, há as cadeias interiores de transformação energética, as quais podem ser muito complexas e compostas por diversos recursos tecnológicos. Na cadeia interior fóssil, por exemplo, há a transformação do combustível na câmara de combustão para extração de energia térmica. Na sequência, há a transformação termodinâmica geradora de vapor; este gira as turbinas que geram energia mecânica que gera corrente elétrica. O mesmo vale para biomassa. Em relação à nuclear, a diferença está na existência de um reator nuclear com urânio irradiado no lugar da câmara de combustão. Tabela Em princípio, quanto mais curta é uma cadeia de geração de energia de uma fonte energética, menor impacto ambiental tende a causar.

Tabela 2 – Total de elos das diferentes cadeias de geração de energia elétrica.

Cadeia de energia elétrica	n° de elos
Nuclear	17
Petróleo	10
Gás natural	10
Carvão	10
Biomassa	8
Hidrelétrica	5
Eólica	3

Elaborada a partir de: Scheer (2002, p.45,80).

Outro aspecto importante que afeta este tipo de análise é a densidade energética das fontes. Fontes de alta densidade de energia tendem a exigir menores volumes de recursos naturais e a perturbar menos o meio ambiente, seja na extração dos recursos naturais ou na eliminação dos resíduos gerados durante e após a geração de energia.

A Tabela 3 apresenta a densidade energética de algumas fontes de energia em termos de energia por unidade de massa na geração de eletricidade e a massa de combustível requerida anualmente para plantas de 1.000 MWe de diferentes fontes de energia elétrica. Nela, a biomassa bagaço de cana é a fonte cujo combustível tem a menor densidade energética: 0,215 kWh/kg em base seca já considerando os parâmetros

técnicos e as necessidades de calor, trabalho mecânico e energia elétrica da usina (BRASIL, 2007). Dependendo do tipo de resíduo vegetal, é possível obter combustíveis mais densos em termos de energia.

Tabela 3 – Densidade energética e massa de combustível anual requerido para geração elétrica por diferentes plantas de 1.000 MWe de diferentes fontes de energia elétrica.

Fonte de energia elétrica	Densidade energética (kWh/kg)	Massa (t)	Referências
Nuclear	3.500.000	--	IAEA (1997)
(com reprocessamento)	3.500.000	--	Rashad & Hammad (2000, p. 213)
Nuclear	50.000	30	Goldemberg & Lucon (2008, p.192)
(sem reprocessamento)	50.000	30	IAEA (1997)
	50.000	30	Rashad & Hammad (2000, p. 213)
	--	30	PWR: Cochran & Tsoulfanidis (1999, p.4,370)
	--	35	BWR: Cochran & Tsoulfanidis (1999, p.4)
Gás natural	3,48	2.520.102	EPE (2009, p.209,213,216)
Petróleo (óleo diesel)	2,82	3.110.050	EPE (2009, p.209,213,216)
(óleo comb)	4	2.000.000	Goldemberg & Lucon (2008, p.192)
	4	2.000.000	IAEA (1997)
	4	2.000.000	Rashad & Hammad (2000, p. 213)
Carvão	1,53	5.720.543	EPE (2009, p.209,213,216), vegetal
	3	2.700.000	Goldemberg & Lucon (2008, p.192)
	3	2.600.000	IAEA (1997)
	3	2.600.000	Rashad & Hammad (2000, p. 213)
Biomassa (bagaço de cana)	0,215	40.772.093	Brasil (2007f, p.183,190)
	0,340	25.782.352	Brasil (2007f, p.183)
	1,050	8.348.571	Brasil (2007f, p.183)
	1	3.400.000	Goldemberg & Lucon (2008, p.192)
Biomassa (lenha)	1	3.400.000	IAEA (1997)
	1	3.400.000	Rashad & Hammad (2000, p. 213)
Hidrelétrica	0	0	--
Eólica	0	0	--

Observando os dados da Tabela 3, o combustível de menor densidade energética é a biomassa. Em seguida, vêm os combustíveis fósseis com densidades energéticas cerca de 10 vezes mais elevada e, finalmente, a fonte nuclear com densidade energética

milhares de vezes mais elevada. A fonte nuclear requer muito menos matéria-prima da natureza do que as fontes fósseis para gerar a mesma quantidade de energia e contribui para a desmaterialização da geração de energia elétrica.

A Tabela 4 mostra os impactos socioambientais das principais fontes de energia. A lista dos impactos ambientais causados pelas fontes fósseis é grande e bastante discutida envolvendo poluição do ar (impacto local), chuva ácida (impacto regional) e emissão de gases do efeito estufa (impacto global).

Para minorar esses efeitos, a sociedade tem trabalhado para aumentar a eficiência energética no uso dos combustíveis fósseis e para buscar substitutos para estes energéticos que tenham emissão zero ou pelo menos tenham reduzidas emissões de carbono para o meio ambiente (BRASIL, 2007).

2. Principais problemas ambientais causados pelas fontes energéticas

Levando em conta o que já discutimos anteriormente, são feitas a seguir considerações sobre os principais problemas ambientais de cada fonte. As fontes energéticas fósseis causam impactos socioambientais em toda sua cadeia energética. A atividade exploratória do petróleo e gás natural realizada pelo método sísmico gera perturbação acústica na fauna (marinha ou terrestre, dependendo do local onde a atividade é realizada), além de interdição da área onde o estudo é feito. A perfuração e completação de poços (ou ação de equipar poços) e a produção de petróleo e gás requerem infraestrutura de disposição de resíduos, devido ao enorme montante de resíduos sólidos gerados que necessitam de tratamento e disposição final, requerem infraestrutura de transporte terrestre, marítimo e aéreo decorrentes do tráfego de equipamentos, produtos e pessoal. Além disso, a perfuração e completação de poços modificam a qualidade do solo e da água em virtude do descarte de fluido de perfuração e do cascalho.

O refino do petróleo causa vários tipos de emissões, efluentes e resíduos perigosos que, em última análise, comprometem a qualidade do ar e da água em decorrência do lançamento de poluentes nesses meios, além de causar pressão sobre a infraestrutura de disposição de resíduos. Também no refino há apreensão por parte da população devido à possibilidade de acidentes.

Tabela 4 - Impactos socioambientais ocasionados pela geração de energia das principais fontes energéticas.

Fonte de Energia	Impactos
Petróleo Carvão Gás natural	<ul style="list-style-type: none">• Poluição do ar<ul style="list-style-type: none">- Emissão de óxidos de enxofre (SO_x, SO₂)- Emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x)- Emissão de monóxido de carbono (CO)- Emissão de matéria particulada suspensa (metais pesados)- Destruição da camada de ozônio• Aquecimento global via efeito estufa<ul style="list-style-type: none">- Emissão de dióxido de carbono (CO₂)- Emissão de metano (CH₄)• Chuva ácida<ul style="list-style-type: none">- Emissão de SO₂ formando ácido sulfúrico na atmosfera- Emissão de NO_x formando ácido nítrico na atmosfera• Perturbação acústica na fauna (marinha ou terrestre) pela exploração sísmica• Alteração da qualidade do solo e da água• Modificação dos padrões de uso e ocupação do solo• Remanejamento involuntário de comunidades locais para construção de dutos• Geração de apreensão na população local pela possibilidade de acidentes
Hidrelétrica	<ul style="list-style-type: none">• Formação de grandes represas• Realocação das populações• Aquecimento global via efeito estufa<ul style="list-style-type: none">- Emissão de gás metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂)
Nuclear	<ul style="list-style-type: none">• Rejeitos de nível baixo e médio de radioatividade• Rejeitos de nível alto de radioatividade que requerem armazenamento por milhares de anos• Desativação das instalações nucleares após término da vida útil
Biomassa	<ul style="list-style-type: none">• Poluição do ar<ul style="list-style-type: none">- Emissão de monóxido de carbono (CO)- Emissão de matéria particulada• Emissão de CO₂• Uso intensivo do solo e da água• Diminuição da biodiversidade
Eólica	<ul style="list-style-type: none">• Ruído causado pelos aerogeradores• Colisão de pássaros• Impacto visual• Certa limitação do uso do espaço ocupado

Fontes: (BRASIL, 2007; Carajilescof e Moreira, 2008 e Reis & Cunha, 2006)

Os impactos das atividades relacionadas à produção de energia a partir dos derivados de petróleo, como o gás natural, dependem da composição do combustível a ser queimado, do processo de queima ou remoção pós-combustão e das condições de dispersão dos poluentes (altura da chaminé, relevo e condições meteorológicas) (BRASIL, 2007).

A composição do carvão na forma de minério é fator desencadeante de diversos impactos. Geralmente o carvão compõe-se de matéria orgânica sólida fossilizada de origem vegetal. Sua qualidade varia segundo o tipo e estágio dos componentes orgânicos e é determinada pela quantidade de carbono existente. A atividade de mineração do carvão produz grande parte dos mais importantes impactos socioambientais de toda sua cadeia energética. Ela impacta os recursos ambientais e sociais dos sítios onde se localizam as jazidas, como os impactos na paisagem, na flora e fauna e na morfologia do solo. A drenagem da mina pode provocar impacto nos corpos hídricos naturais se não houver direcionamento e tratamento adequado das águas sulfurosas efluentes. Tal qual acontece com o petróleo e gás, os impactos decorrentes da produção de energia a partir do carvão mineral dependem da composição do combustível a ser queimado, do processo de queima ou remoção pós-combustão e das condições de dispersão dos poluentes (altura da chaminé, relevo e condições climáticas) (BRASIL, 2007).

As hidrelétricas não emitem gases ou resíduos poluidores durante sua operação, porém geralmente requerem a construção de grandes represas. As áreas inundadas por vezes produzem impactos na fauna, flora, no clima local e no regional. Os reservatórios deslocam populações e também emitem gás metano (CH_4) que possui um potencial de aquecimento global 23 vezes maior que o carbono (GOLDEMBERG & LUCON, 2008; IPCC, 2001).

O impacto mais significativo da energia nuclear são os resíduos radioativos que ela produz, contudo há preocupações das pessoas com os acidentes nucleares e a proliferação de material nuclear sensível (ALVIM et al., 2007). Em condições normais, os resíduos radioativos gerados são acondicionados em tambores e depositados na planta. Os rejeitos radioativos de alto nível são levados para instalações especiais onde devem ficar estocados por milhares de anos ou centenas de anos se reciclados (CARAJILESCOV & MOREIRA, 2008). Assim, as preocupações em relação a esses rejeitos situam-se em garantir que permaneçam acondicionados adequadamente por

longos períodos de tempo. Ao final da vida útil das usinas os materiais da central se constituirão em rejeitos de baixa e média atividade, devendo ser armazenados por um período de 30 a 40 anos (CARAJILESCOV & MOREIRA, 2008).

A biomassa é uma fonte renovável quando é manipulada apropriadamente. Os impactos desta fonte são inferiores ao das fontes fósseis. O impacto ambiental é local e regional, todavia não contribui para o aquecimento global devido ao balanço de massa do ciclo de carbono. Caso a biomassa não seja produzida e utilizada de modo sustentável, com esquemas de manejo e com políticas adequadas, pode ocasionar a ocupação contínua de grandes extensões de terra para a prática da monocultura energética. Isto pode inibir outras atividades agrícolas importantes, como a produção de alimentos, e pode eliminar alguma vegetação nativa principal, prejudicando o habitat natural de espécies selvagens e contribuindo para a redução da biodiversidade (BRASIL, 2007).

Um dos mais importantes benefícios que a energia eólica pode oferecer ao meio ambiente é sua não emissão de poluentes durante sua operação. Porém, um impacto ambiental relevante da geração eólica é o ruído oriundo das turbinas eólicas em movimento giratório para gerar energia elétrica. O ruído tem procedência mecânica e aerodinâmica. O mecânico vem principalmente da caixa de engrenagens (responsável pela alta rotação do gerador na turbina) e da junção da torre com o alojamento do rotor. O ruído aerodinâmico é influenciado diretamente pela velocidade do vento incidente sobre a turbina eólica. Outros impactos ambientais importantes da geração elétrica das turbinas eólicas são aqueles sobre a fauna, causando acidentes envolvendo pássaros que se chocam contra as pás em movimento e também a alteração da paisagem (BRASIL, 2007).

3. Quantificação dos impactos ambientais

A energia é um componente fundamental para a qualidade de vida do homem, é um insumo com grande nível de penetração no âmbito das atividades produtivas e também têm forte interação com o meio ambiente ocasionando diversos tipos de impactos. Em princípio, qualquer atividade produtiva gera algum tipo de degradação ambiental. Se Y é o produto gerado pela economia de uma sociedade, podemos escrever

que a taxa de produção de um dado fator causador de degradação ambiental (S_i) devido a este produto seja dada por

$$S_i = \sigma_i Y \quad (1)$$

onde σ_i é o coeficiente de produção do fator causador do dano ambiental do tipo i causado pelo produto Y produzido pela sociedade (LENZEN, 2008). Se o produto em questão é a geração de energia, a Tabela 4 mostra que os fatores causadores de danos podem ser a emissão de CO_2 , resíduos nucleares, áreas alagadas, ruído, poluição do ar etc. Na Eq. 1 o índice i representa os diversos tipos de fatores causadores de danos ambientais decorrentes do produto da economia.

O coeficiente σ_i depende do processo produtivo utilizado e, no caso de geração de energia elétrica, da fonte de energia e da tecnologia utilizada (CURRAN et al., 2005; WEISSER, 2007; LENZEN, 2008; REIS & CUNHA, 2006). Diferentes tecnologias apresentam diferentes coeficientes de produção de fatores causadores de impacto ambiental por unidade de produto. Por exemplo, as fontes de energia solar, eólica, nuclear e biomassa emitem menos CO_2 (um fator causador de aquecimento global) que as fontes fósseis e, portanto, apresentam σ_c menores (o índice c indica CO_2). Se houver uma mudança na tecnologia ou na fonte utilizada para geração de energia elétrica, é possível baixar o impacto ambiental S_i sem diminuir a quantidade de produto (energia elétrica). Por sua vez, é possível aumentar a produção de eletricidade e diminuir o impacto ambiental S_i se forem empregadas fontes de energia e tecnologia com um coeficiente reduzido de intensidade de emissão de CO_2 .

O coeficiente de intensidade do fator causador de impacto ambiental (i) pode ser definido como

$$\sigma_i = \frac{\Delta S_i}{\Delta Y} \quad (2)$$

onde ΔS_i é a quantidade do i ésimo fator de impacto ambiental gerado durante uma produção ΔY do produto da economia. Para facilitar a quantificação do impacto ambiental do setor energético, podemos escrever a Eq. 2 como

$$\sigma_i = \frac{\Delta S_i}{\Delta Y} = \frac{\Delta S_i}{\Delta E} \frac{\Delta E}{\Delta Y} \quad (3)$$

onde ΔE é a energia elétrica gerada ou consumida pela economia ou sociedade para produzir ΔY . O primeiro termo, $\frac{\Delta S_i}{\Delta E}$, pode ser definido como o coeficiente de produção do fator i para se gerar ou consumir uma quantidade ΔE de energia, σ_{iE} ,

$$\sigma_{iE} = \frac{\Delta S_i}{\Delta E} \quad (4)$$

O segundo termo está relacionado à intensidade energética, I_E , definida pela razão $\frac{E}{Y}$, que fornece certa quantidade de energia para que uma dada economia consiga gerar uma dada quantidade de produto.

$$I_E = \frac{E}{Y}. \quad (5)$$

Essa razão pode ser expressa para certo ano como sendo, por exemplo, quilowatt-hora por reais de produto interno bruto. Utilizando o conceito de elasticidade eletricidade-produto, γ_{EY} , definida como

$$\gamma_{EY} = \frac{\frac{dE}{E}}{\frac{dY}{Y}}, \quad (6)$$

podemos reescrever a Eq. 3 como

$$\sigma_i = \sigma_{iE} I_E \gamma_{EY}. \quad (7)$$

Portanto, para baixar σ_i é necessário baixar σ_{iE} , I_E e γ_{EY} . Baixar o coeficiente (σ_{iE}) de intensidade de produção do fator causador de impacto ambiental devido à produção de energia significa fazer investimentos na economia optando por fontes de energia que emitam menores quantidades do fator gerador do impacto i . Baixar a intensidade energética (I_E) e a elasticidade energia-produto da economia significa rever

procedimentos e condutas dos vários agentes da sociedade, consumidores e empreendedores, e fazer investimentos na economia que requeiram menos energia para produzir bens e serviços. Tendo-se em vista o desenvolvimento sustentável, faz-se necessário promover investimentos para baixar σ_{IE} e I_E ou γ_{EY} .

A Figura 3 mostra a intensidade energética no mundo e no Brasil. Está ocorrendo melhoria no uso da energia no mundo e que no Brasil há indicações de melhoria a partir 1999?! O valor atual está em torno de 4 kWh por dólar de PIB produzido no país.

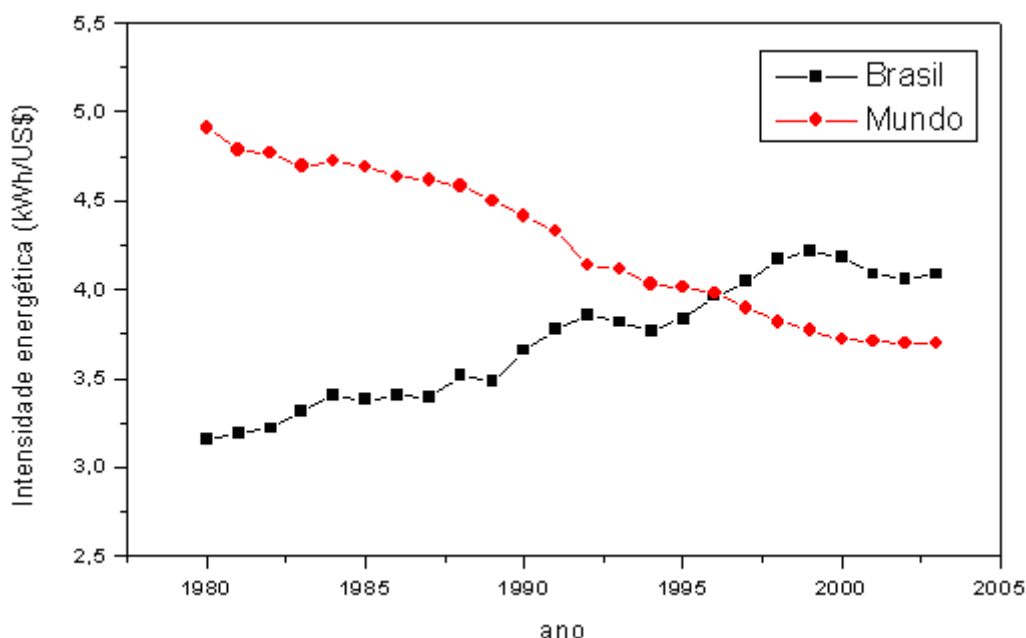


Figura 3 – Intensidade energética do Brasil e do Mundo (EIA, 2010)

Muitas vezes é possível quantificar o coeficiente de produção de impacto ambiental, mas em alguns casos não. Uma maneira de avaliar o coeficiente de produção de impacto nesta situação é quantificar o fator causador ou uma consequência específica do impacto ambiental. Por exemplo, o aquecimento global é de difícil quantificação, pois vários fatores atuam sobre o processo e há muitas incertezas envolvidas. Podemos, entretanto, quantificar fatores causadores importantes de aquecimento global como a emissão de CO_2 , o CH_4 e outros gases ou quantificar a emissão equivalente de C

levando em consideração o potencial de aquecimento global de cada gás. Fazendo isso, podemos então assumir que o aquecimento global seja proporcional às emissões de gases do efeito estufa. A Tabela 5 relaciona alguns impactos ambientais relacionados à geração de energia elétrica buscando abranger questões ambientais e sociais importantes e os respectivos coeficientes de produção de impacto. Alguns são avaliados diretamente e outros indiretamente como o aquecimento global, doenças e segurança e risco de acidentes que são avaliados por outras variáveis correlacionadas.

Tabela 5 – Alguns impactos selecionados para avaliação de fontes de energia

Impacto considerado	Coefficiente (σ_{IE}) de impacto
1. aquecimento global	1. emissão de CO ₂ equivalente (kg CO ₂ eq/MWh)
2. área imobilizada (área x tempo)	2. área imobilizada (m ² .ano/MWh)
3. consumo de matéria-prima e desmaterialização da geração elétrica	3. massa de material fortemente perturbador do meio ambiente usado como insumo energético (kg/MWh)
4. uso de água	4. consumo de água (m ³ /MWh)
5. radiação, poluentes e saúde humana	5. morbidade humana (morbidade/MWh)
6. segurança e riscos de acidentes	6. fatalidade em acidentes (número de mortes)

As Figuras 4 a 10 apresentam valores de coeficientes de produção de impacto de diversas fontes de energia elétrica. Para quantificar os respectivos coeficientes de impacto o autor levou em consideração toda a cadeia produtiva de cada fonte de energia, todo o ciclo de vida no processo de geração de eletricidade e a disponibilidade de dados na literatura (CESARETTI, 2010). A dispersão dos dados existentes na literatura leva uma incerteza na estimativa dos coeficientes de impacto. As figuras apresentam também uma barra mostrando os valores possíveis de serem obtidos de acordo com dados encontrados na literatura (CESARETTI, 2010).

A Figura 4 mostra o coeficiente de produção do fator CO₂ causador do impacto ambiental aquecimento global, σ_{CE} [kg CO₂/MWh]. As emissões foram estimadas por cientistas da Coreia do Sul ligados à área química, biológica e ambiental considerando emissões diretas e indiretas. As emissões diretas são oriundas da geração elétrica propriamente dita e as indiretas são provenientes do processo upstream (extração do

material bruto, transporte e processamento do material em combustível) (LEE at al., 2004).

Do ponto de vista de emissão direta de gases, o carvão é o maior emissor e o gás natural emite cerca da metade deste. O petróleo e seus derivados emitem uma quantidade intermediária de gases poluentes. O gás natural é considerado entre as fontes fósseis a mais limpa por emitir menos gases (diretamente) e outros resíduos poluentes. As emissões gasosas desta fonte e de seus particulados são responsáveis pela chuva ácida, doenças respiratórias e pelo efeito estufa. Este, causando o aquecimento da Terra, pode gerar alterações climáticas com enormes consequências socioambientais para o planeta. Portanto, pelas informações dessa figura pode-se afirmar que as fontes energéticas fósseis são as maiores emissoras de CO₂. Pelas emissões diretas a hídrica tem poucas emissões, mas apresenta consideráveis emissões indiretas de GEE. A Figura 5 apresenta os coeficiente de impacto completos.

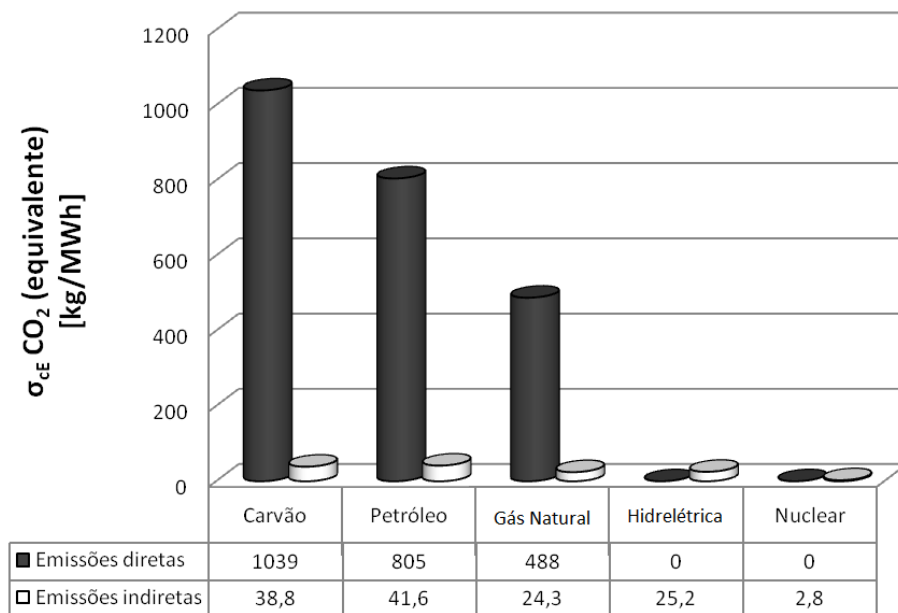


Figura 4 – Coeficiente de intensidade de emissões diretas e indiretas de CO₂ equivalente por fonte de energia, σ_{cE} . Fonte: LEE at al. (2004, p.91,96).

As Figuras 6 a 9 apresentam coeficientes de impacto para área ocupada, consumo de matéria prima utilizada ou desmaterialização da geração de energia elétrica, consumo de água e morbidade.

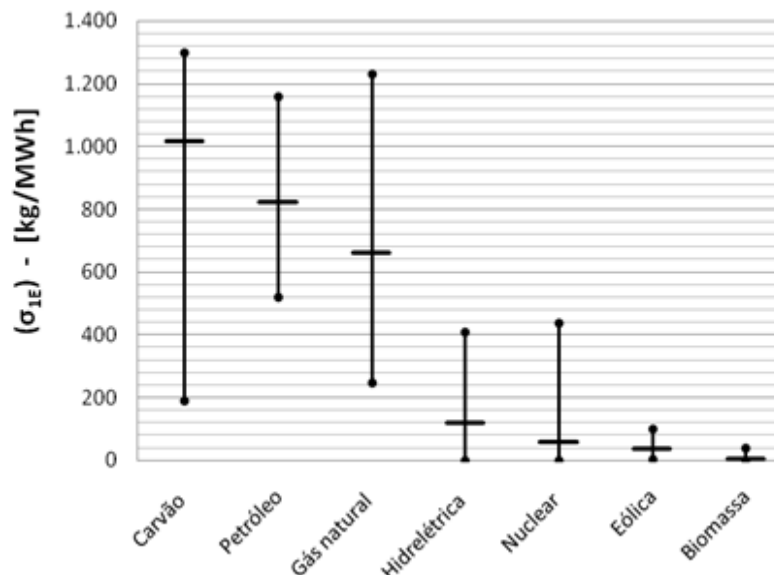


Figura 5 – Coeficiente de impacto de emissão de gases do efeito estufa para várias fontes de energia elétrica (CESARETTI, 2010)

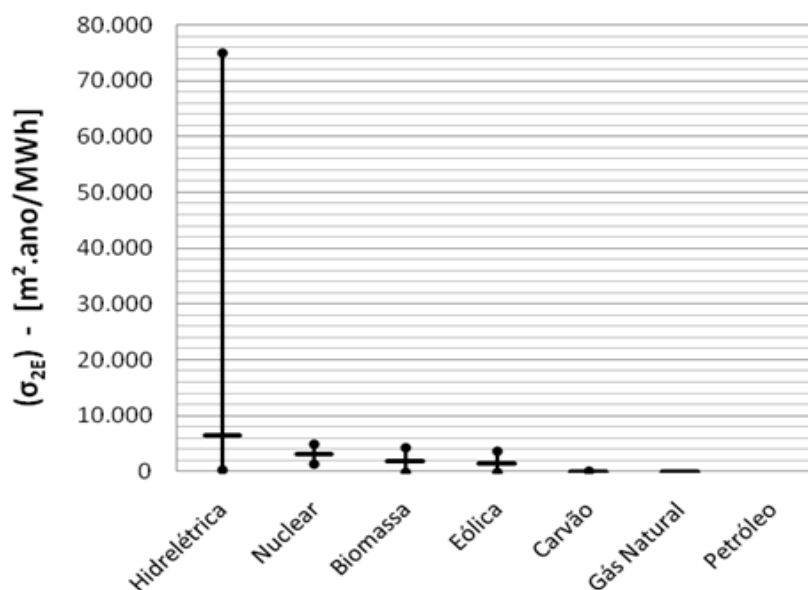


Figura 6 – Coeficiente de impacto de área ocupada para várias fontes de energia elétrica (CESARETTI, 2010)

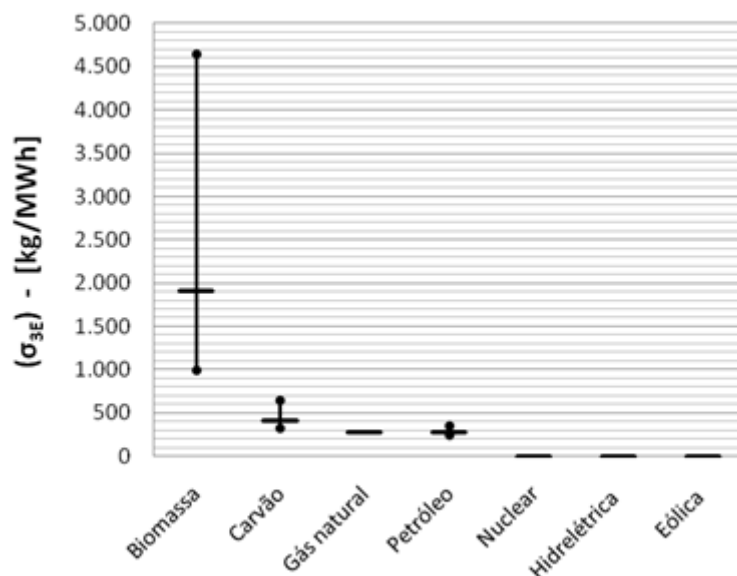


Figura 7 – Coeficiente de impacto de consumo de matéria prima de grande impacto ambiental (desmaterialização) para várias fontes de energia elétrica (CESARETTI, 2010)

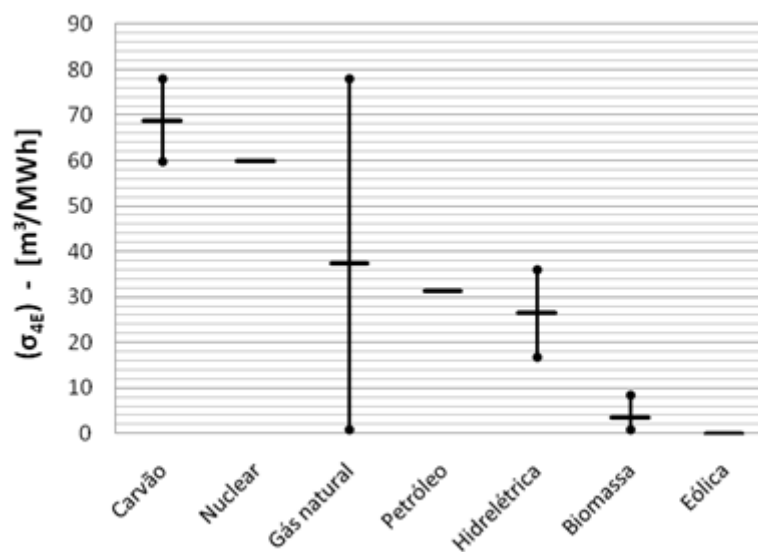


Figura 8 – Coeficiente de impacto de consumo de água para várias fontes de energia elétrica (CESARETTI, 2010)

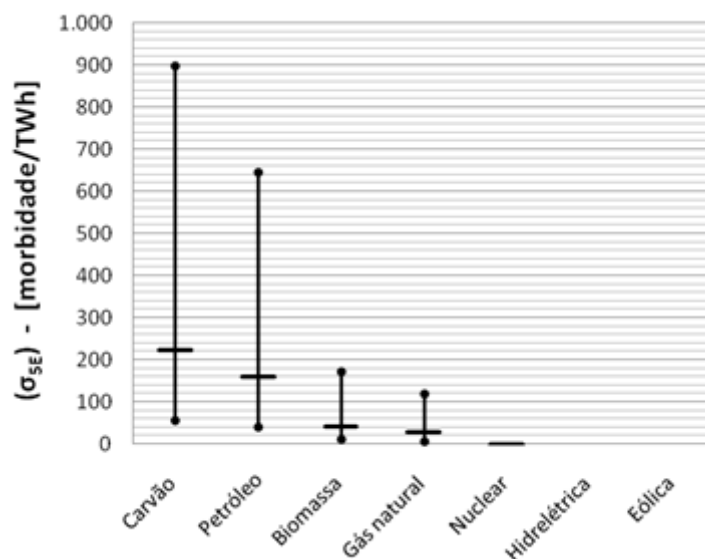


Figura 9 – Coeficiente de impacto de morbilidade (doenças devido a poluição, radiação, etc) para várias fontes de energia elétrica (CESARETTI, 2010)

A questão da área ocupada mostrada na Figura 6 é importante considerar também o tempo de ocupação. As usinas hidrelétricas no Brasil ocupam grandes áreas para os seus reservatórios e as usinas térmicas ocupam pouca área ao longo da vida útil desses empreendimentos (40 a 100 anos). As usinas nucleares também ocupam pouca área para a geração de eletricidade, porém imobilizam uma área pequena por muito tempo para esperar o decaimento radioativo de seus resíduos (de centenas a milhares de anos). Devido a isto, as usinas nucleares têm um fator de impacto de área ocupada similar as usinas de biomassa e eólica.

A Figura 7 apresenta um coeficiente de consumo de matéria prima quantificado em termos de massa por unidade de energia gerada. Este impacto busca quantificar a perturbação no meio ambiente causada pela geração de energia devido ao movimento e processamento de recursos naturais. Quanto mais massa é processada, maior tende a ser o impacto ambiental e para diminuí-lo devemos buscar desmaterializar a geração de energia elétrica (VEIGA, 2006). As fontes hidrelétrica e eólica requerem grandes massas de água e ar para gerar energia, contudo praticamente não alteram esses insumos e os retornam em condições adequadas para o meio ambiente. Desta forma, seu coeficiente de consumo de matéria prima são considerados nulos. A fonte nuclear,

devido ter uma densidade energética muito elevada, requer pouquíssima massa para gerar energia e também tem um coeficiente de impacto diminuto. As fontes fósseis têm um impacto maior e a fonte biomassa, devido a baixa densidade energética, tem um coeficiente de impacto elevado. Para desmaterializar a geração de energia devemos migrar para as fontes eólica, hidrelétrica e nuclear.

As fontes térmicas (fósseis e nuclear) consomem muita água para resfriamento no ciclo térmico. A água que passa nas turbinas das hidrelétricas não é considerada como consumida porque retorna ao meio ambiente em condições adequadas. As hidrelétricas consomem grande quantidade de água durante a construção da usina devido a grande quantidade de concreto utilizada na barragem. Em princípio, biomassa requer grandes quantidades de água para irrigação da plantação, contudo as usinas a biomassa, no Brasil, consomem pouca água devido ao processo de co-geração. A cana de açúcar é plantada para produzir essencialmente açúcar e etanol e a geração de eletricidade via biomassa é um processo secundário. Caso se plante biomassa para unicamente gerar eletricidade o consumo de água seria elevado.

A Figura 9 apresenta o coeficiente de impacto de morbidade devido a geração de eletricidade em condições de geração normal por diferentes fontes de energia, isto é, número de doentes por unidade de energia elétrica gerada. O principal vetor causador de doenças é o respiratório e as fontes fósseis são as principais causas de morbidade para a população. Mesmo em condições normais de operação, com todos os sistemas de engenharia de segurança em funcionamento essas usinas emitem gases nocivos à saúde humana.

As usinas nucleares, eólica e hidrelétrica apresentam coeficientes de impacto desprezíveis. Em uma usina nuclear a emissão de radiação pode causar doenças importantes, contudo, em operação normal, com todos os sistemas de engenharia de segurança em funcionamento, a radiação é contida no interior da usina. As populações vizinhas às usinas nucleares apresentam baixíssima morbidade, assim como de usinas hidrelétricas e eólicas.

O caso de acidentes é abordado na Tabela 6 e Figura 10. Nesta condição, um acidente ou incidente operacional ocorre, os sistemas de engenharia projetados para proteger não funcionam e a população pode sofrer consequências indesejadas. A tabela

e a figura apresentam o número de fatalidades (mortes) que ocorreram em acidentes nas várias fontes de energia registrados na literatura científica e mídia (CESARETTI, 2010).

Tabela 6 – Coeficiente de impacto de fatalidades para várias fontes de energia elétrica levando em consideração os acidentes de Shimantan (hidrelétrica) e Chernobyl (nuclear) (CESARETTI, 2010)

Fonte de energia elétrica	(σ_{6E-1}) [fatalidades]
Hidrelétrica	171.216
Carvão	5.099
Nuclear	4.100
Petróleo	3.330
Gás Natural	737
Biomassa	--
Eólica	--

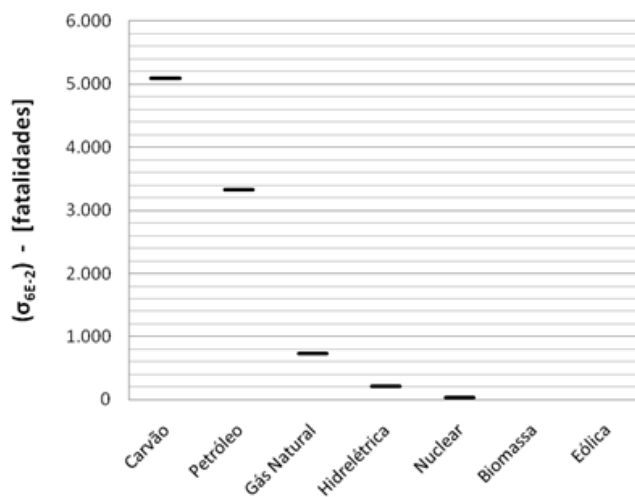


Figura 10 – Coeficiente de impacto de fatalidade devido a acidentes na geração de energia elétrica desconsiderando os acidentes de Shimantan e Chernobyl (CESARETTI, 2010)

A Tabela 6 apresenta todos os dados de fatalidades registrados, inclusive aquelas ocasionadas nos acidentes de Shimantan, uma hidrelétrica na China, e de Chernobyl, uma usina nuclear na antiga União Soviética. Acidentes da proporção de Shimantan e

Chernobyl ocorreram uma única vez no setor de geração hidrelétrica e no setor nuclear. Em Shimantan morreram mais de 150.000 pessoas após a quebra da barragem e destruiu várias cidades. As mortes ocorreram devido a inundação e devido as doenças causadas na região após a inundação. Em Chernobyl, morreram cerca de 4000 pessoas, 31 durante o acidente e o restante de doenças após o evento.

As fontes fósseis petróleo e carvão apresentam milhares de fatalidades causadas por muitos acidentes de pequenas proporções e a geração a gás apresenta cerca de 700 fatalidades. As fontes biomassa e eólica não apresentam dados na literatura sobre fatalidades que permitam uma avaliação do coeficiente de impacto, contudo podem ser considerados pequenos (CESARETTI, 2010). Desconsiderando os acidentes de Shimantan e Chernobyl, as fontes de energia hidrelétrica e nuclear apresentam coeficiente de fatalidade inferior a todas as fontes fósseis, conforme mostra a Figura 10.

Referências

- ALVIM, Carlos Feu; EIDELMAN, Frida; MAFRA, Olga; FERREIRA, Omar Campos. Energia nuclear em um cenário de trinta anos. Estudos Avançados 21 (59), 2007.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia, colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2030. Vols. 1-9. MME / EPE, Brasília, 2007.
- CARAJILESCOV, Pedro & MOREIRA, João Manoel Losada. Aspectos técnicos, econômicos e sociais do uso pacífico da energia nuclear. Cienc. Cult. vol. 60, n. 3; 2008.
- CESARETTI, Marcos Araujo. Análise comparative entre fontes de geração elétrica segundo critérios socioambientais e econômicos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do ABC. Santo André, SP, 2010.
- CURRAN, Mary Ann; MANN, Margaret; NORRIS, Gregory. The international workshop on electricity data for life cycle inventories. Journal of Cleaner Production 13, 853-862; 2005.
- EIA - Energy Information Administration. EIA International Data: 2008. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/emeu/international/contents.html>>. Acessado em: 19 fev 2010.
- GOLDEMBERG, José & LUCON, Oswaldo. Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento. 3.a ed. Ed. USP, São Paulo, 2008.
- IPCC. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (Eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

- IPCC. Technical Summary of the Working Group I, Synthesis Report. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.
- LEE, Kun-Mo; LEE, Sang-Yong; HUR, Tak. Life cycle inventory analysis for electricity in Korea. *Energy* 29, p.87–101; 2004.
- LENZEN, Manfred. Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. *Energy Conversion and Management* 49, 2178–2199; 2008.
- REIS, Lineu Belico dos & CUNHA, Eldis Camargo Neves. *Energia Elétrica e Sustentabilidade: Aspectos tecnológicos, socioambientais e legais*. Ed. Manole Ltda., São Paulo, 2006.
- SCHEER, Hermann. *Economia Solar Global. Estratégia para a modernidade ecológica*. CRESEB-CEPEL, Rio de Janeiro; 2002.
- VEIGA, José Eli. *Desenvolvimento Sustentável, o desafio do século XXI*. Ed. Garamond, Rio de Janeiro, 2006.
- WEISSER, Daniel. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy* 32, 1543–1559; 2007.