

EN-2425

# Energia, meio ambiente e sociedade

## **Impactos ambientais da energia**

João Moreira  
UFABC

# Sumário

- \* Principais impactos ambientais das fontes de energia
- \* Principais critérios de avaliação dos impactos socioambientais
- \* Coeficientes de impacto – coeficiente de impacto da energia e intensidade energética
- \* Exemplos de coeficientes de impactos
- \* Fatalidades em acidentes relacionados a cadeia energética

# Principais impactos ambientais

- \* Emissões de gases do efeito estufa
- \* Liberação de resíduos no meio ambiente durante a geração e uso da energia
- \* Perturbações na região dos empreendimentos energéticos
- \* Deslocamento populacional e suas implicações econômicas e sociais

# Critérios de avaliação

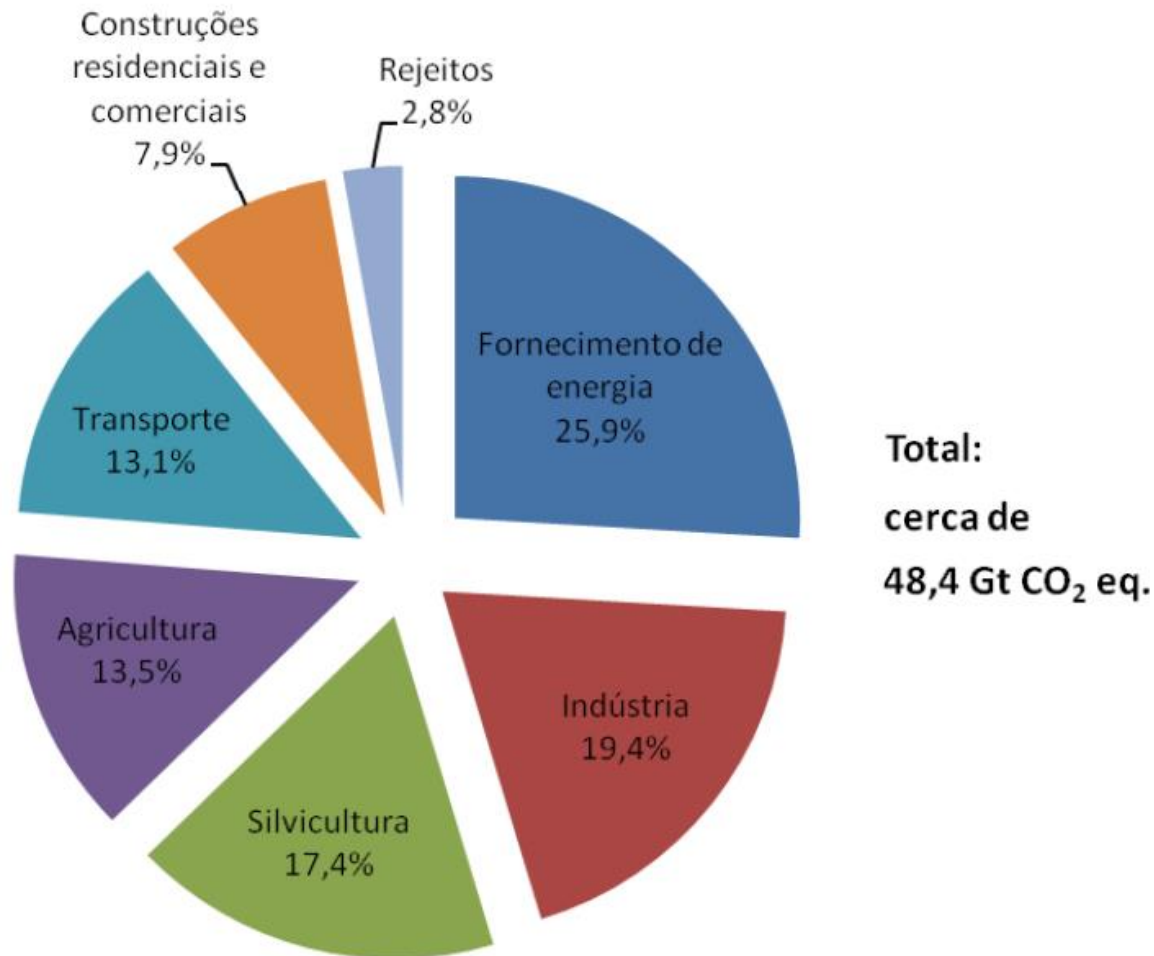
- \* Avaliar toda a cadeia energética
- \* Avaliar todo o ciclo de vida dos empreendimentos
- \* Avaliar o footprint ou pegada ecológica dos empreendimentos
- \* Reciclagem dos resíduos
- \* Impactos globais, regionais e locais

# Problemas ambientais mais relevantes e suas principais causas

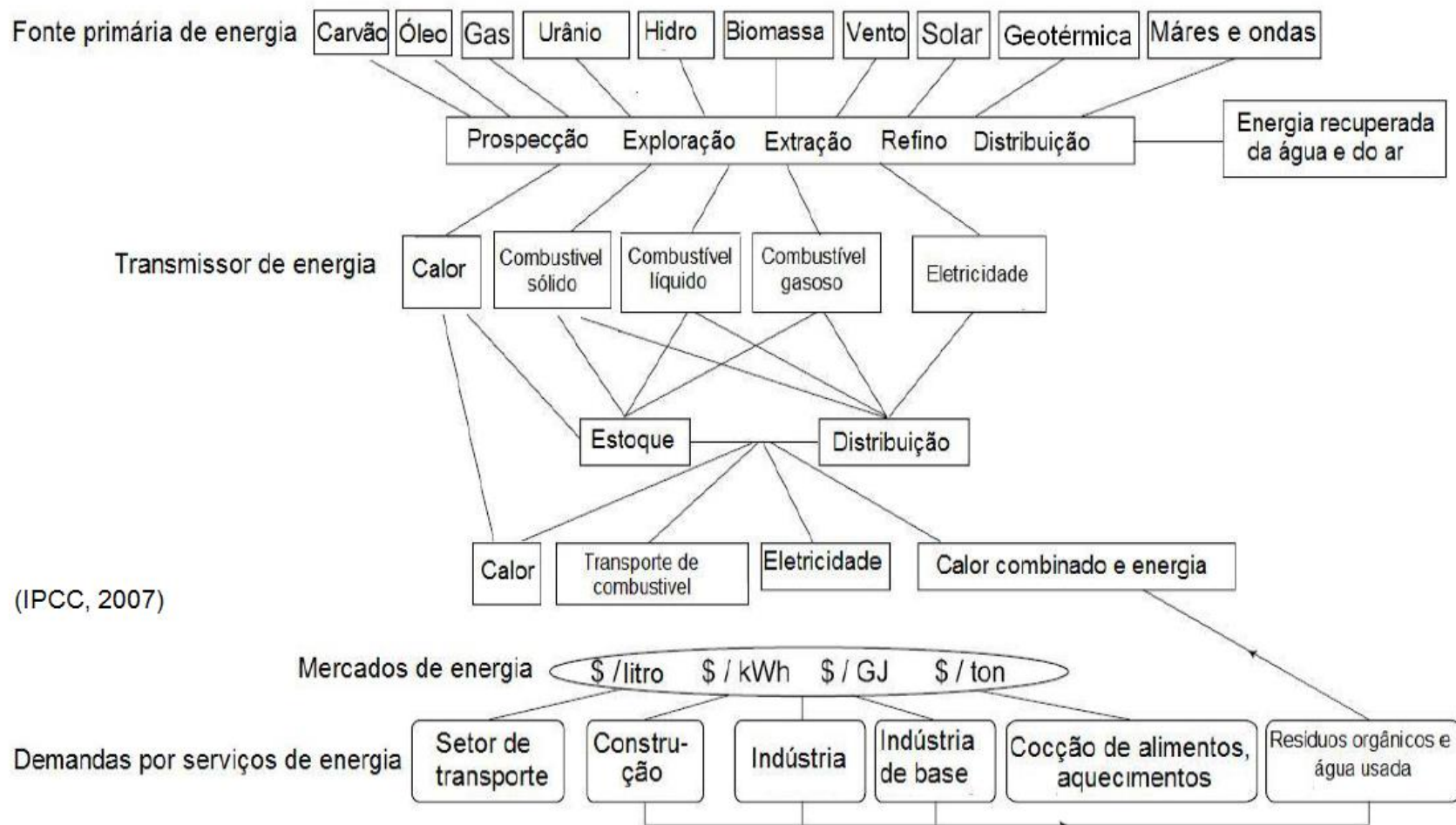
Tipo de impacto	Problema ambiental	Principal causa
Local	Poluição urbana do ar	Energia (indústria e transporte)
	Poluição do ar em ambiente fechado	Energia (cozimento)
Regional	Chuva ácida	Energia (queima de combustível fóssil)
	Má qualidade da água doce	Aumento populacional, agricultura, indústria
Global	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)

# Emissões de gases do efeito estufa em 2004 (IPCC, 2007)



# Interação entre as etapas da cadeia produtiva e ciclo de vida da energia



# Elos da cadeia de geração de energia elétrica

Quanto mais elos na cadeia produtiva da energia mais impactos são esperados.

Cadeia de energia elétrica	nº 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).



# Densidade de energia e massa requerida para gerar 1000 MWe por meio de urânio

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)

# Densidade de energia e massa requerida para gerar 1000 MWe por fontes fósseis

Fonte de energia elétrica	Densidade energética (kWh/kg)	Massa (t)	Referências
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)

# Densidade de energia e massa requerida para gerar 1000 MWe por biomassa

Fonte de energia elétrica	Densidade energética (kWh/kg)	Massa (t)	Referências
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)

# Principais impactos das fontes fósseis

- Poluição do ar
  - Emissão de óxidos de enxofre (SOx, SO<sub>2</sub>)
  - Emissão de óxidos de nitrogênio (NOx)
  - Emissão de monóxido de carbono (CO)
  - Emissão de matéria particulada suspensa (metais pesados)
  - Destruição da camada de ozônio
- Aquecimento global via efeito estufa
  - Emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
  - Emissão de metano (CH<sub>4</sub>)
- Chuva ácida
  - Emissão de SO<sub>2</sub> formando ácido sulfúrico na atmosfera
  - Emissão de NOx 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

Carvão  
Petróleo  
Gás natural

# Principais impactos das hidrelétrica, nuclear, biomassa e eólica

## Hidrelétrica

- Formação de grandes represas
- Realocação das populações
- Aquecimento global via efeito estufa
  - Emissão de gás metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )

## Nuclear

- 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

- Poluição do ar
  - Emissão de monóxido de carbono ( $\text{CO}$ )
  - Emissão de matéria particulada
- Emissão de  $\text{CO}_2$
- Uso intensivo do solo e da água
- Diminuição da biodiversidade

## Eólica

- Ruído causado pelos aerogeradores
- Colisão de pássaros
- Impacto visual
- Certa limitação do uso do espaço ocupado

# Coeficiente de impacto ambiental

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

$$S_i = \sigma_i Y$$

onde  $\sigma_i$  é o coeficiente de produção do fator causador do dano ambiental do tipo  $i$  causado pelo produto  $Y$  produzido pela sociedade

# Coeficiente de impacto ambiental

- \* Se o produto for a geração de energia os danos podem ser:
  - \* Emissão de CO<sub>2</sub>
  - \* Resíduos nucleares
  - \* Áreas alagadas
  - \* Poluição do ar
  - \* Ruído
- \* O índice  $i$  representa os vários impactos decorrente do produto gerado para a economia

$$S_i = \sigma_i Y$$

# Definição do coeficiente de impacto

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

$$\sigma_i = \frac{\Delta S_i}{\Delta Y}$$

onde  $\Delta S_i$  é a quantidade do  $i$ ésimo fator de impacto ambiental gerado durante uma produção  $\Delta Y$  do produto da economia.

$$\sigma_i = \frac{\Delta S_i}{\Delta Y} = \frac{\Delta S_i}{\Delta E} \frac{\Delta E}{\Delta Y}$$

onde  $\Delta E$  é a energia elétrica gerada ou consumida pela economia ou sociedade para produzir  $\Delta Y$ .



# Coeficiente de impacto

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  $\Delta E$  de energia,  $\sigma_{iE}$ ,

$$\sigma_{iE} = \frac{\Delta S_i}{\Delta E}$$

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.

$$I_E = \frac{E}{Y}$$

# Coeficiente de impacto

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,  $\gamma_{EY}$ , definida como

$$I_E = \frac{E}{Y}$$

$$\gamma_{EY} = \frac{\frac{dE}{E}}{\frac{dY}{Y}},$$

podemos reescrever a Eq. 3 como

$$\sigma_i = \sigma_{iE} I_E \gamma_{EY}.$$

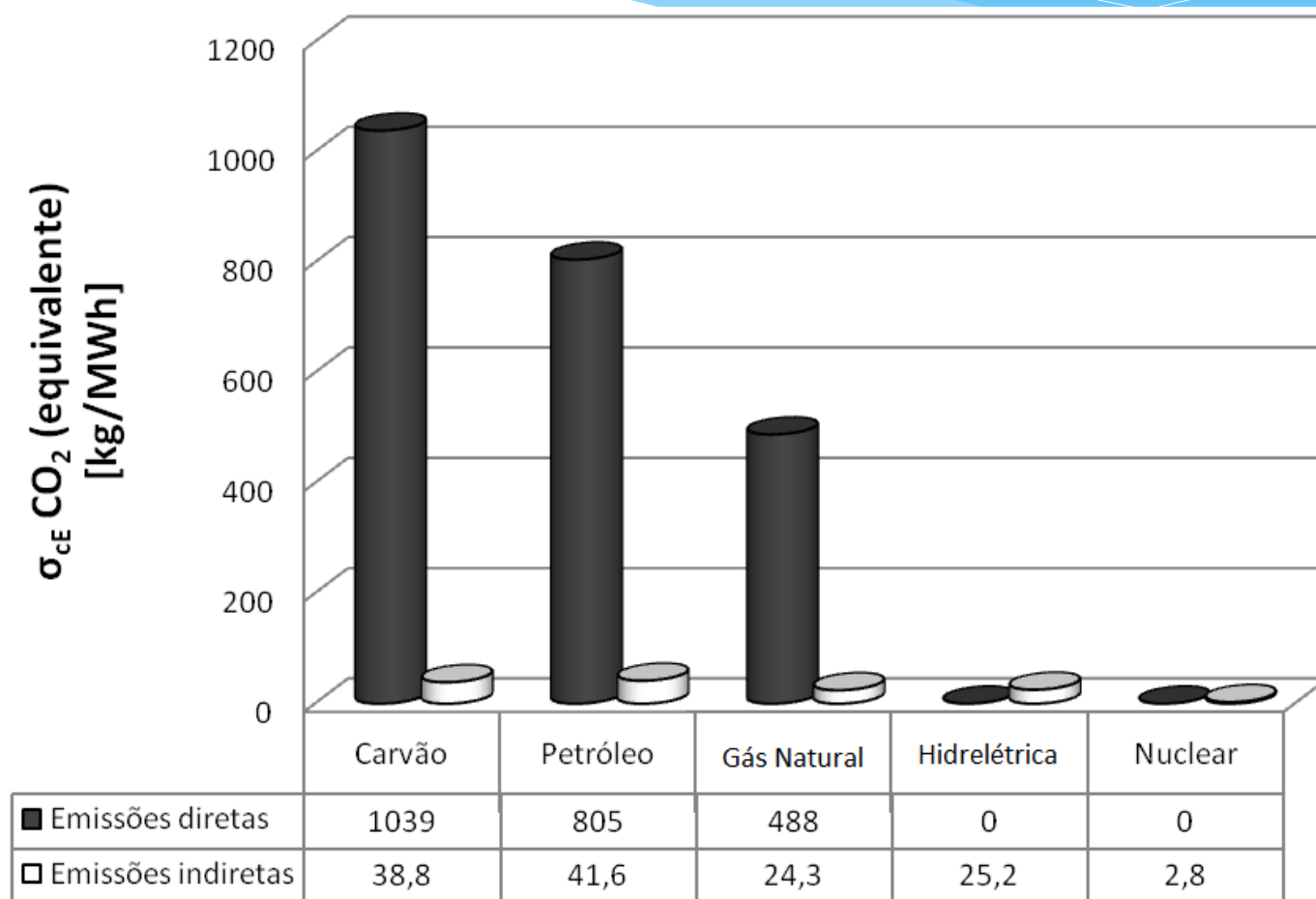
# Como baixar o coeficiente de impacto, $\sigma_i$ ?

- \* Baixar o coeficiente  $\sigma_{iE}$  de intensidade de produção de impacto significa
  - \* Optar por investimentos que gerem menores quantidades de fatores de impacto no ambiente e sociedade
- \* Baixar a intensidade energética e a elasticidade energia-produto significa
  - \* Rever procedimentos e condutas dos vários agentes da sociedade para que se utilize menos energia para produzir bens e serviços

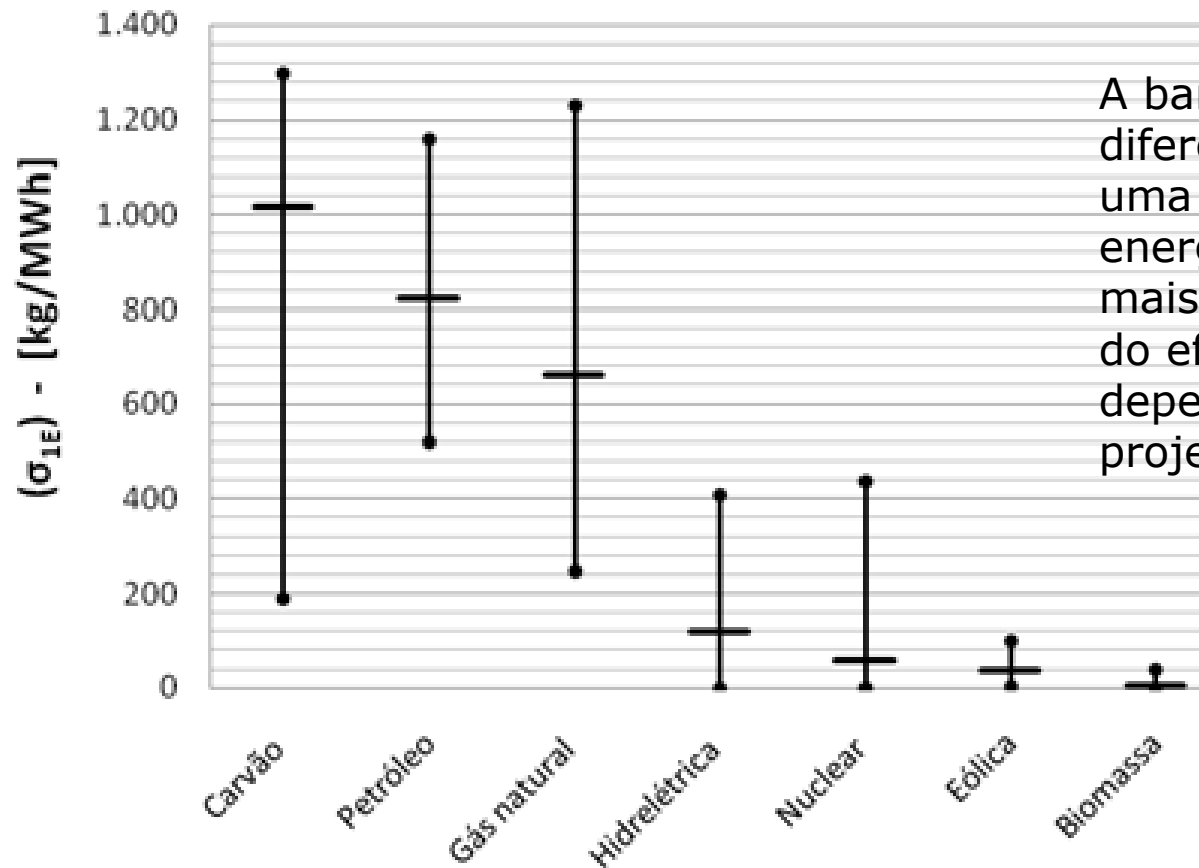
# Alguns impactos da energia e respectivos coeficientes

Impacto considerado	Coeficiente ( $\sigma_{iE}$ ) de impacto
1. aquecimento global	1. emissão de CO <sub>2</sub> equivalente (kg CO <sub>2</sub> eq/MWh)
2. área imobilizada (área x tempo)	2. área imobilizada (m <sup>2</sup> .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 <sup>3</sup> /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)

# Coeficiente de impacto de emissões diretas e indiretas de CO<sub>2</sub>

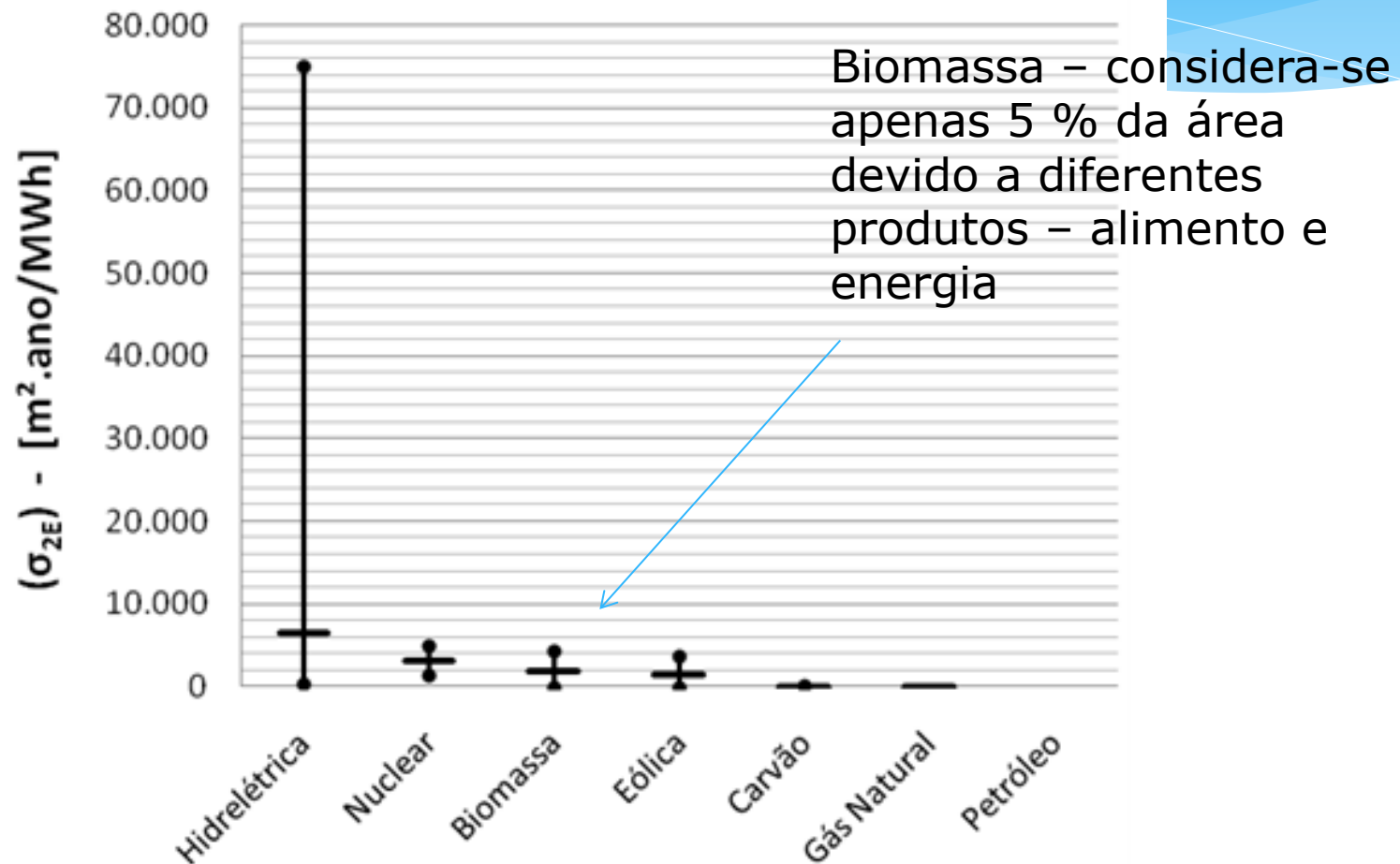


# Coeficientes de impacto de emissões de gases de efeito estufa para várias formas de energia

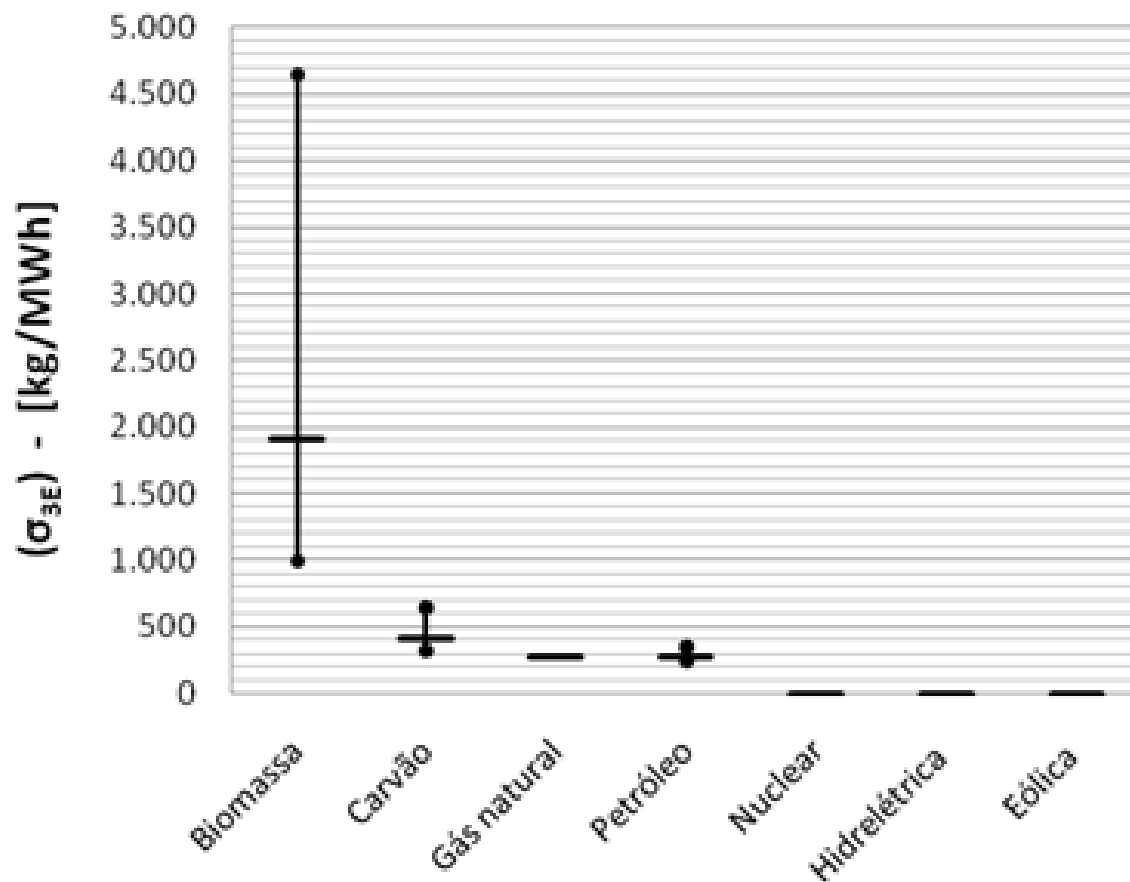


A barra significa que diferentes projetos de uma dada fonte de energia pode emitir mais ou menos gases do efeito estufa dependendo de seu projeto

# Coeficiente de impacto de área ocupada ao longo do tempo para várias energias

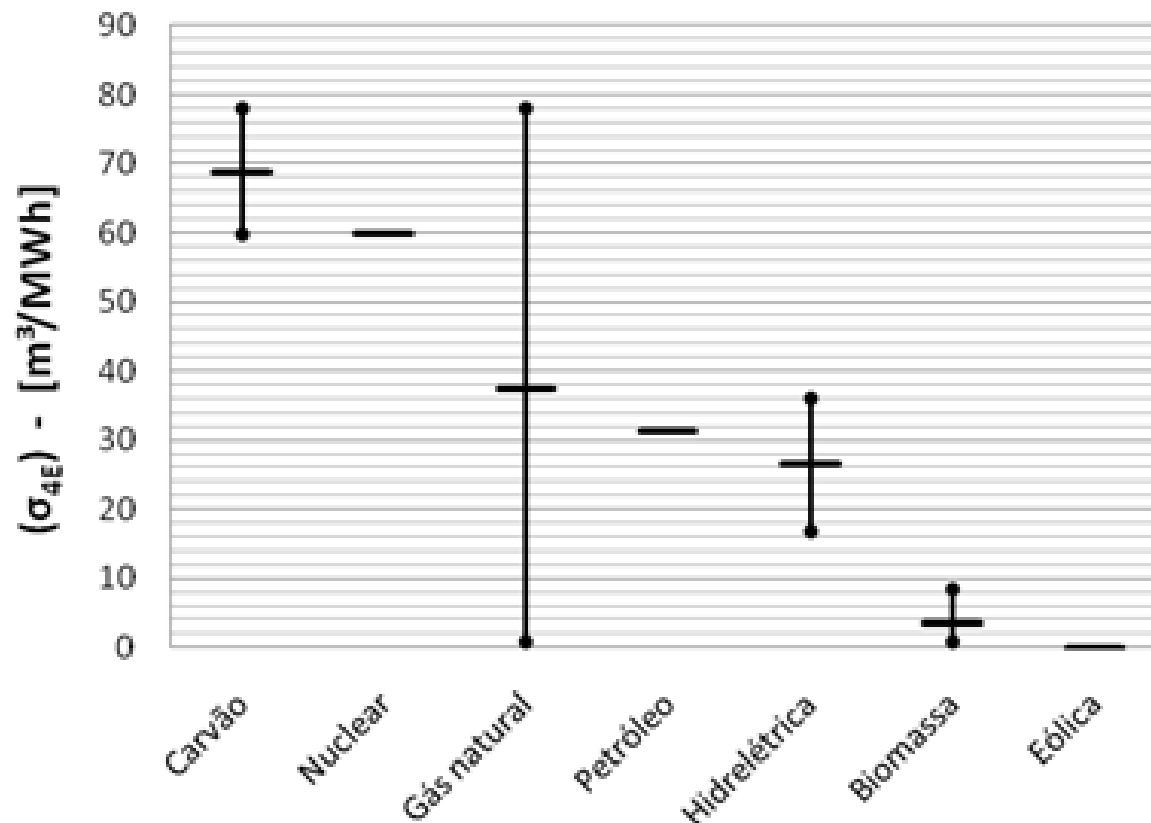


# Coeficiente de impacto de consumo de matéria prima

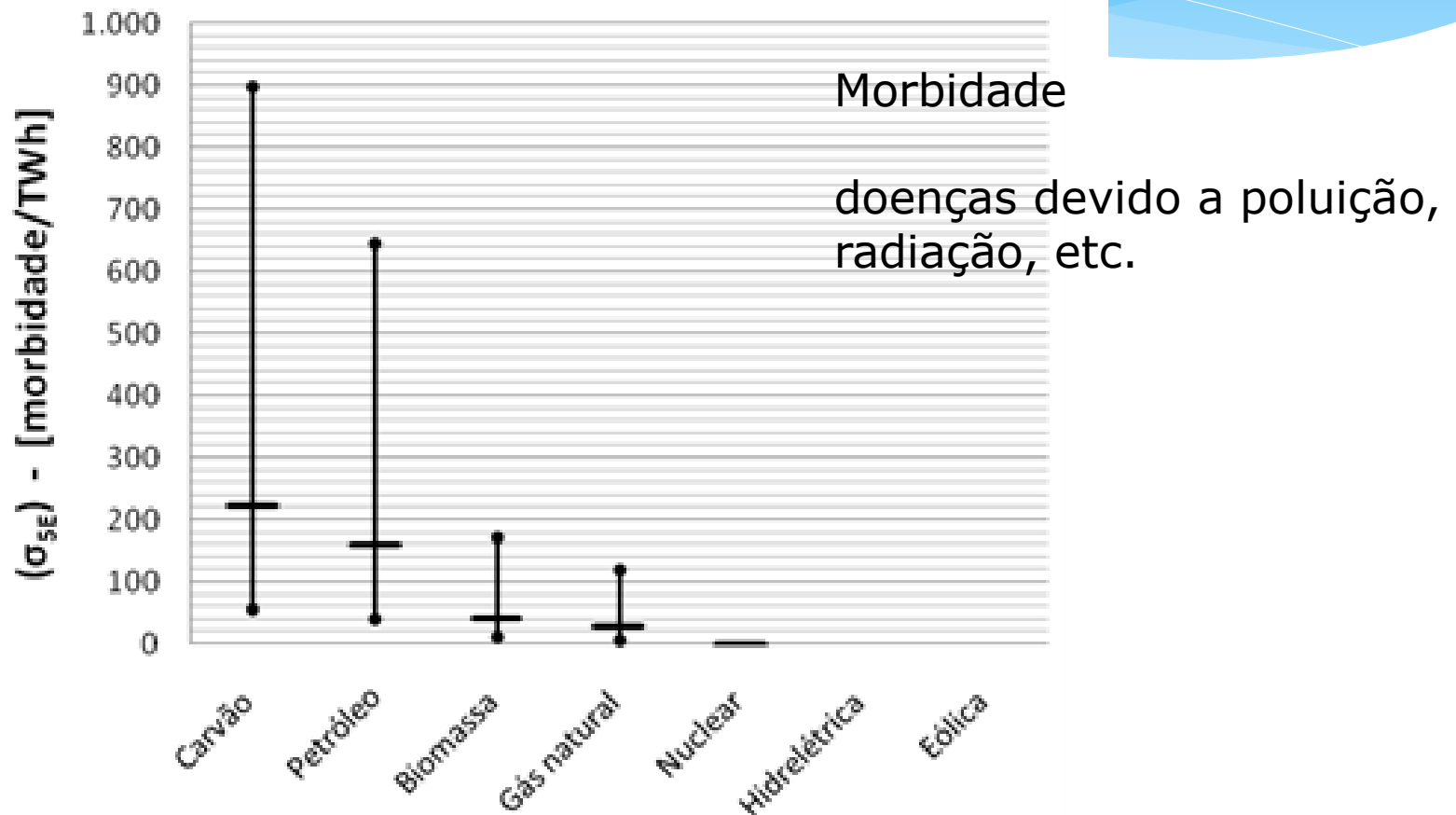




# Coeficiente de impacto de consumo de água para várias energias



# Coeficiente de impacto de morbidade para várias energias



# Fatalidades causadas em acidentes de várias fontes de energia (**toda cadeia produtiva**)

Fonte de energia elétrica	( $\sigma_{6E-1}$ ) [fatalidades]	
Hidrelétrica	171.216	← Acidente de Shimantan na China
Carvão	5.099	
Nuclear	4.100	← Acidente de Chernobyl na URSS
Petróleo	3.330	
Gás Natural	737	← Inúmeros acidentes com fatalidades de 1 a 10 pessoas
Biomassa	--	
Eólica	--	

# Acidentes

- \* A geração e uso da energia causam acidentes e fatalidades.
- \* Acidentes da proporção de Shimantan e Chernobyl com grande número de fatalidades ocorreram somente uma única vez.
- \* Em Shimantan as mortes ocorreram devido a inundação (~ 30 mil) e doenças causadas após a inundação
- \* Em Chernobyl, 31 morreram durante o acidente e cerca de 4000 após o acidente ao longo de vários anos

# Como avaliar danos ambientais distintos?

- \* Análises de sustentabilidade incluem normalmente 3 dimensões, cada uma com diferentes variáveis:
  - \* Ambiental – emissão de gases do efeito estufa, consumo de água, etc;
  - \* Social – deslocamento de populações, poluição, geração de empregos, etc
  - \* Econômica – eficiência econômica, menores custos de energia, etc.
- \* Como comparar diferentes variáveis? Que critérios utilizar?
- \* Como tomar decisão tendo em vista diferentes dimensões e variáveis?
  - \* As variáveis constituem critérios a serem considerados

# Requisitos de possíveis análises

- \* Análises quantitativas e qualitativas – análises multicritérios são muito utilizadas
  - \* Critérios das 3 dimensões
- \* Definição do objetivo e extensão da análise (escopo – estabelecer os limites do problema)
- \* Definir métodos consistentes com os objetivos
- \* Considerar a opinião de possíveis stakeholders para definir as variáveis e critérios da análise
- \* Utilização de indicadores
- \* Discussão aberta dos pesos para os diferentes critérios levando em consideração a opinião de stakeholders

# Comentários finais

- \* A geração e uso de energia causam impactos socioambientais e econômicos
- \* Pode-se mensurar esses efeitos de várias formas
- \* É necessário levar em conta todo o ciclo de vida e toda a cadeia produtiva nas análises de impacto
- \* Empreendimentos que geram ou utilizam a mesma fonte de energia podem ter impactos distintos devido seu footprint e características de projeto
- \* Deve-se baixar a intensidade energética e o coeficiente de impacto



Fim