



# TECNOLOGIAS DE BAIXO CARBONO APLICÁVEIS AOS SETORES-CHAVE DO BRASIL

## TRANSPORTES

Bruno Soares Moreira Cesar Borba

Março de 2015



*Esse material objetiva a capacitação acerca das metodologias empregadas no projeto “Opções de mitigação de emissões de GEE em setores-chaves do Brasil”. Portanto, seu conteúdo não expressa resultados do projeto.*



# Índice

- Caracterização do setor transportes
- Consumo energético do setor no mundo
- Características do setor transportes no Brasil
- Políticas para o setor reduzir emissões / consumo
  - Eficiência energética
  - Mudança modal
  - Biocombustíveis
- Custo marginal de abatimento
  - Exemplos de medidas e custos de abatimento
- Fontes de informação



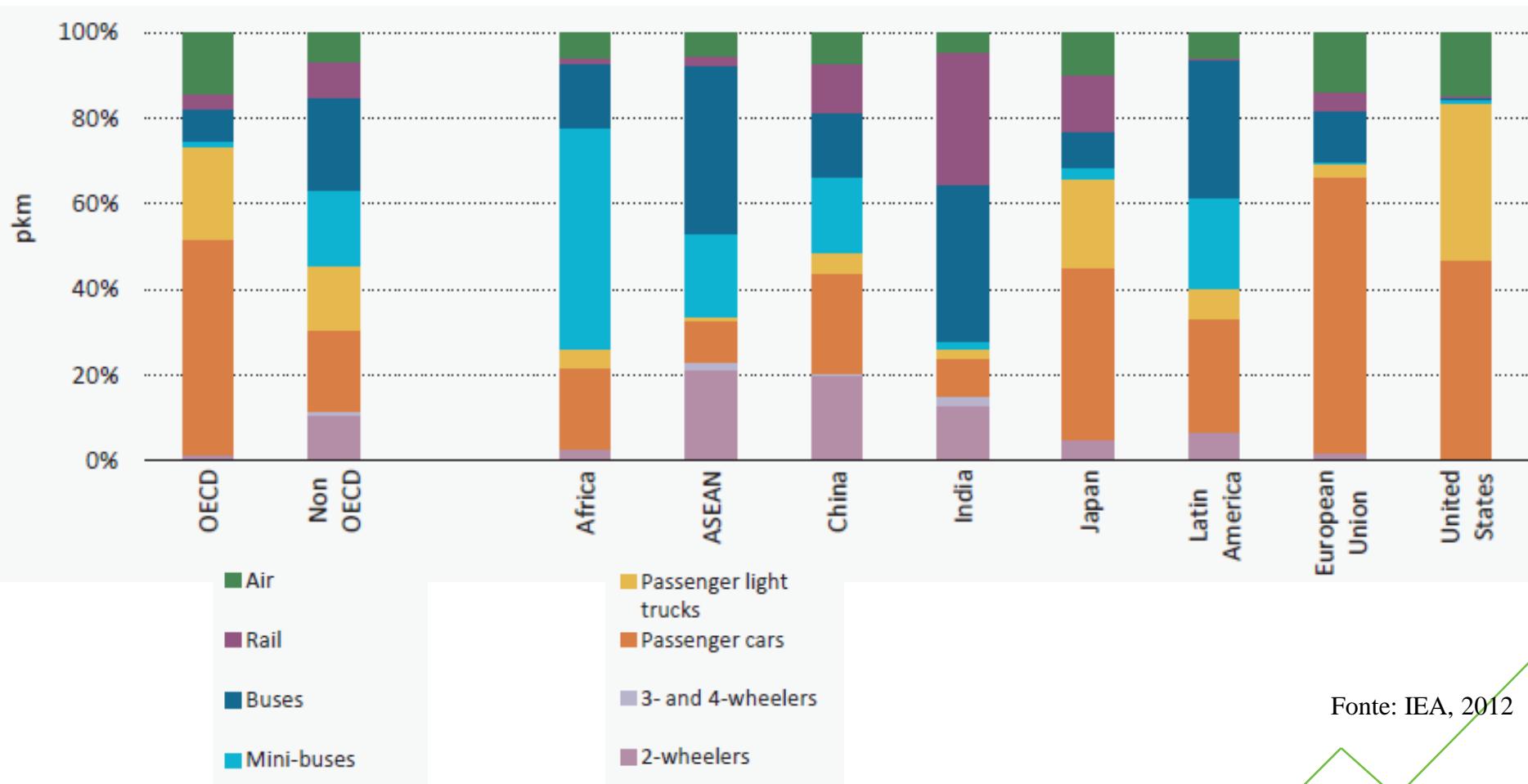
# Caracterização do Setor

- O estudo sobre transportes é vasto e complexo, principalmente se tratado em todo o seu contexto de integração entre diferentes meios de mobilidade
- Divide-se entre cargas e passageiros, movimentados em ambientais urbanos, semiurbanos, regionais, nacionais e internacionais
- Há cinco tipos básicos de modais utilizados no setor transportes: rodoviário, ferroviário, aquaviário, aéreo e dutoviário (utilizado apenas no transporte de carga)
  - Cada um possui características operacionais específicas e, consequentemente, estruturas de custos específicas que os tornam mais adequados para determinados tipos de produtos e de operações



# Caracterização do Setor

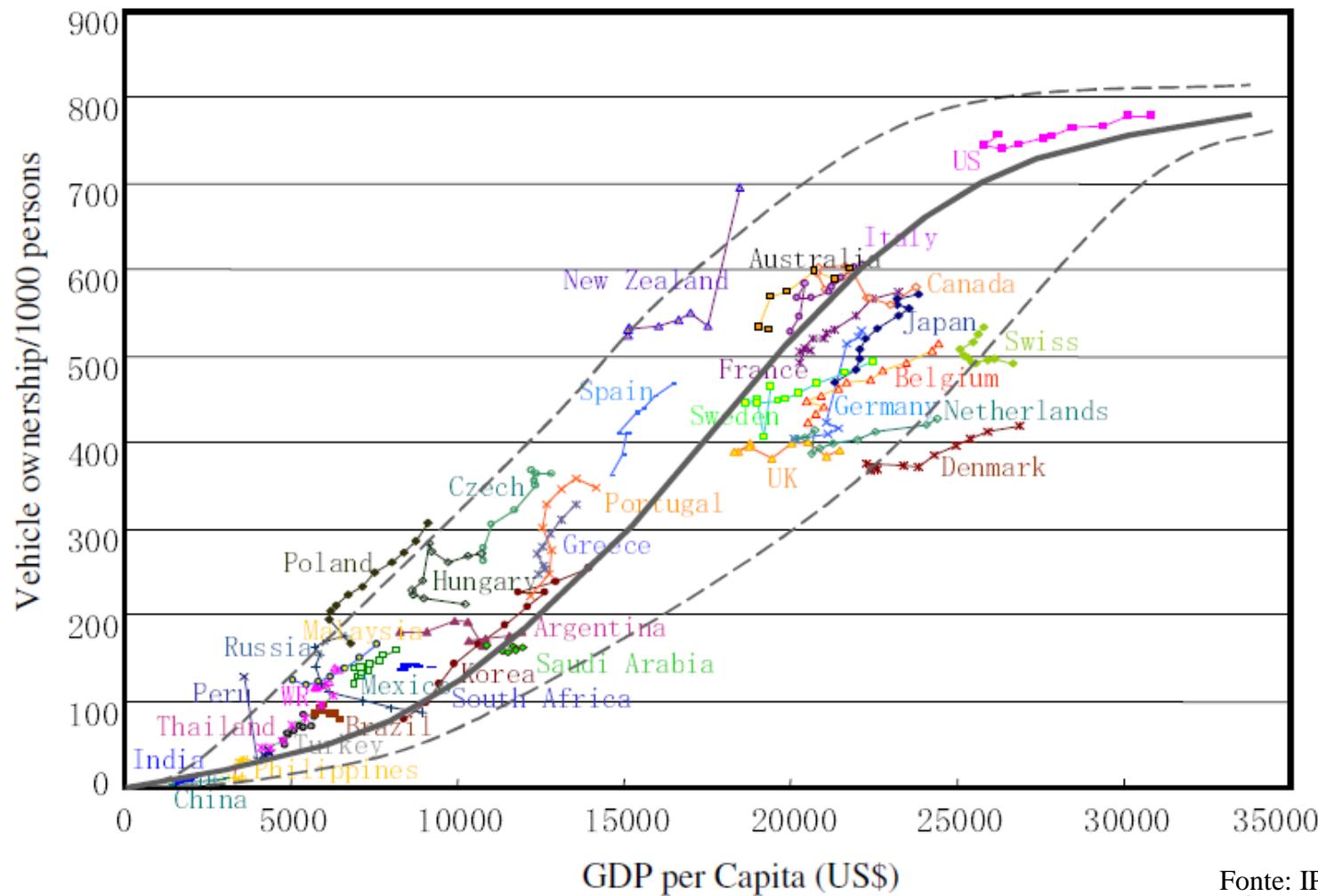
## Transporte Motorizado por Modal





# Caracterização do Setor

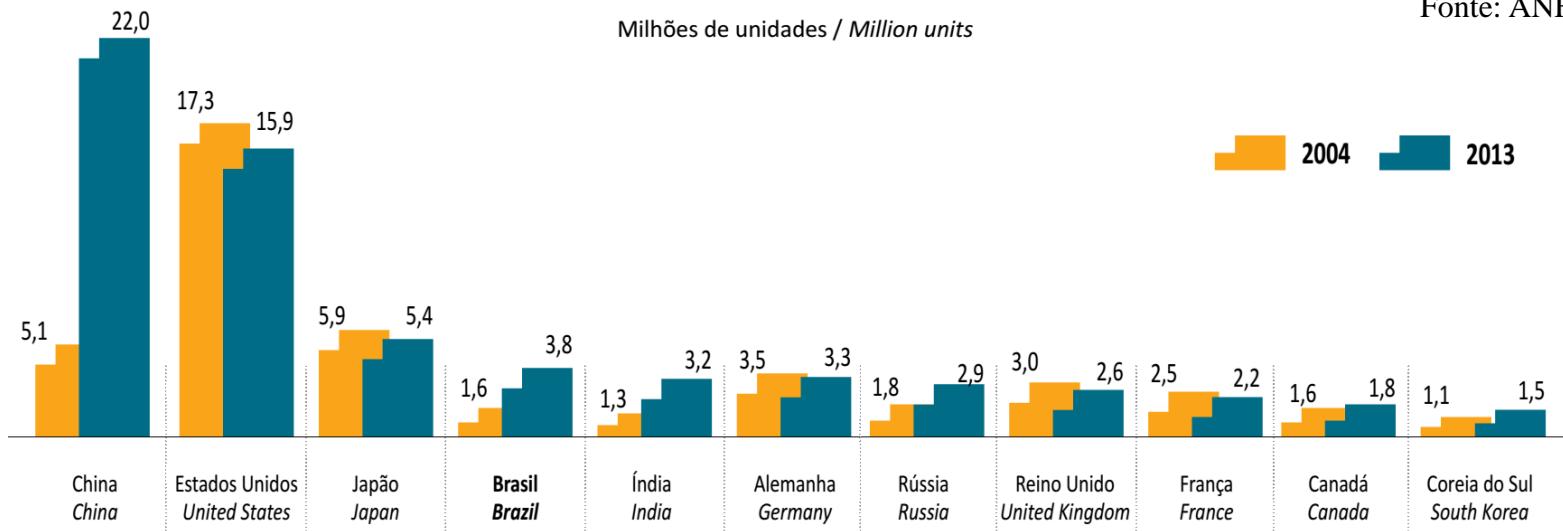
## Posse de Veículos x PIB per capita





# Caracterização do Setor

## Licenciamento Veículos Novos



Fonte: ANFAVEA, 2014

## Produção Veículos Novos

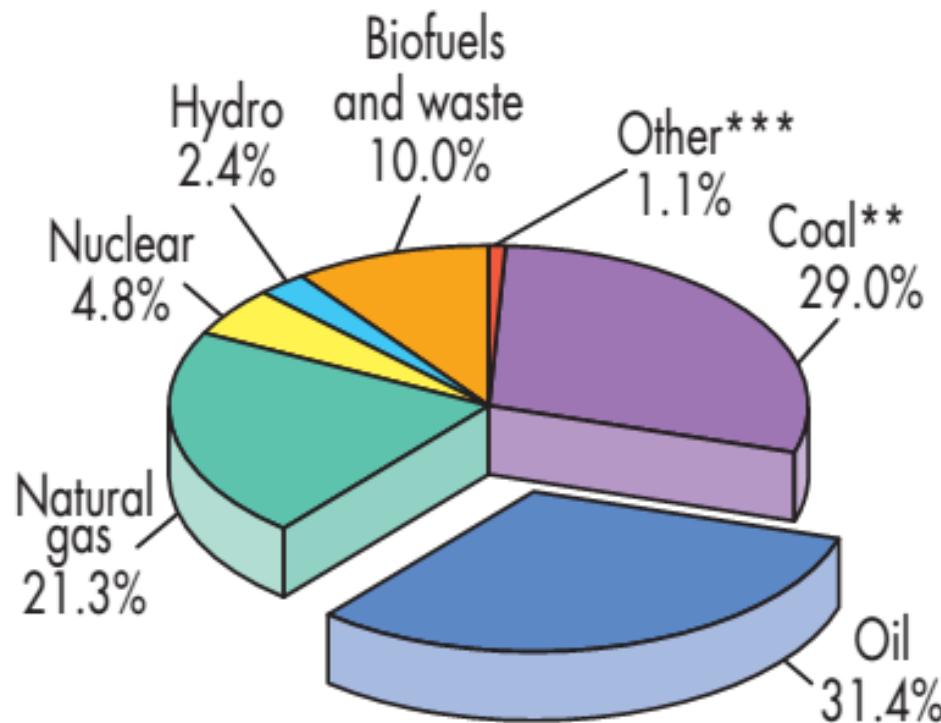
Mil unidades / Thousand units

PAÍS / COUNTRY	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
China / China	5.234	5.708	7.278	8.883	9.299	13.791	18.265	18.419	19.272	22.117
Estados Unidos / United States	11.989	11.947	11.292	10.781	8.694	5.731	7.763	8.662	10.333	11.046
Japão / Japan	10.512	10.800	11.484	11.596	11.576	7.934	9.629	8.399	9.943	9.630
Alemanha / Germany	5.570	5.758	5.820	6.213	6.046	5.210	5.906	6.147	5.649	5.718
Coreia do Sul / South Korea	3.469	3.699	3.840	4.086	3.827	3.513	4.272	4.657	4.562	4.521
Índia / India	1.511	1.639	2.017	2.254	2.332	2.642	3.557	3.927	4.175	3.881
<b>BRASIL / BRAZIL</b>	<b>2.317</b>	<b>2.530</b>	<b>2.612</b>	<b>2.980</b>	<b>3.216</b>	<b>3.183</b>	<b>3.382</b>	<b>3.416</b>	<b>3.403</b>	<b>3.712</b>
México / Mexico	1.577	1.684	2.046	2.095	2.168	1.561	2.342	2.681	3.002	3.052
Tailândia / Thailand	928	1.123	1.194	1.287	1.394	999	1.645	1.458	2.429	2.457



# Consumo Energético

## Participação do Uso de Energia Primária



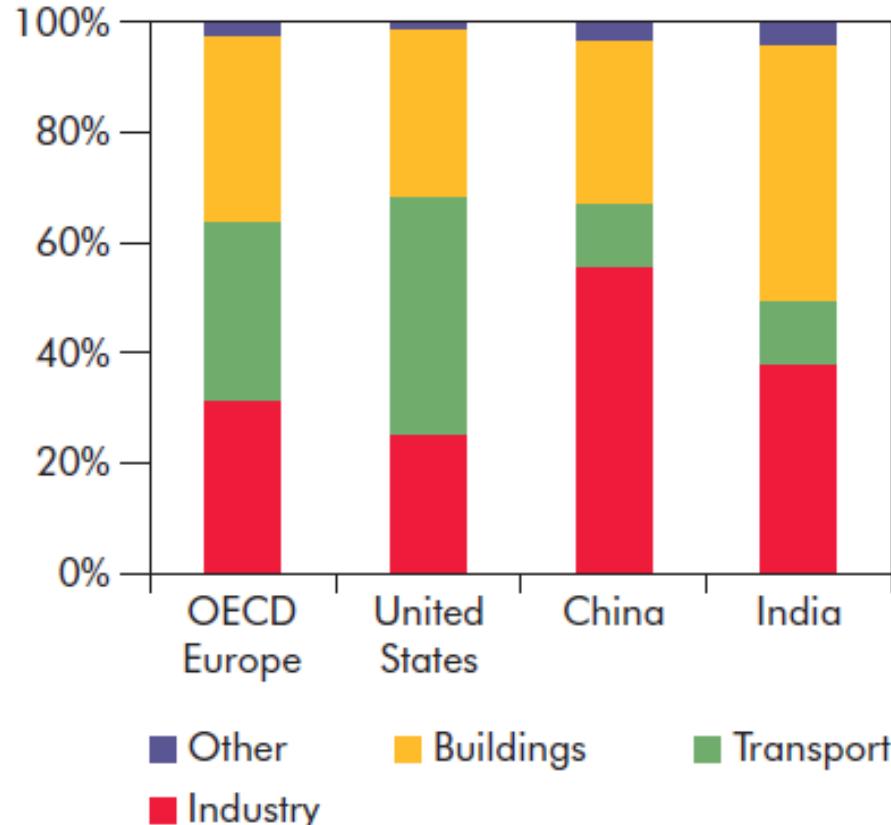
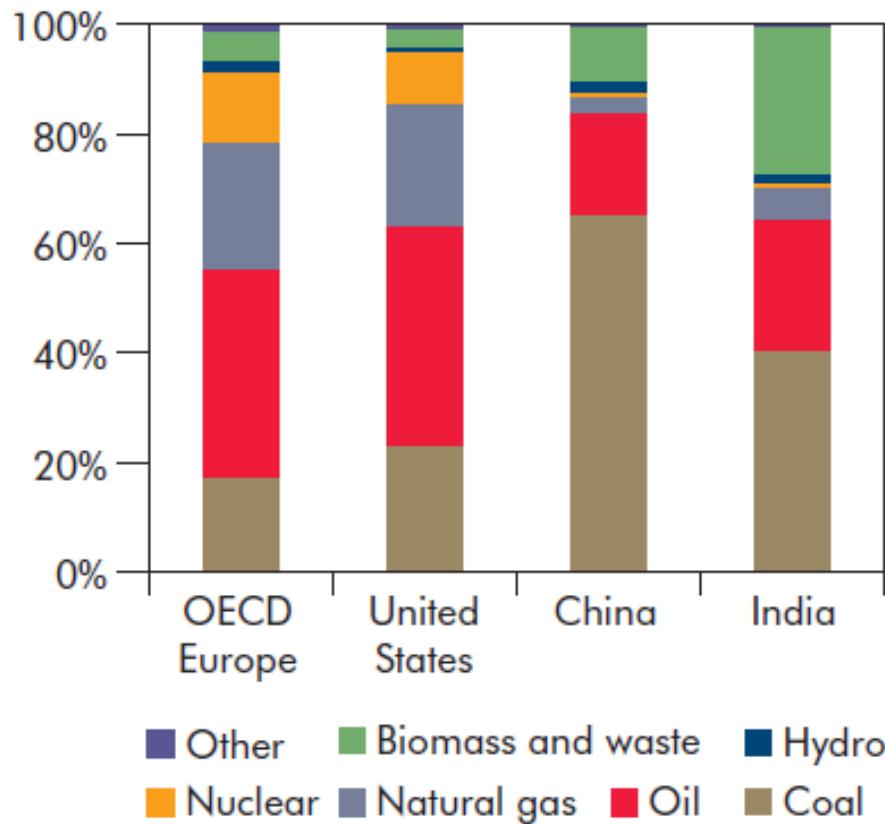
13 371 Mtoe

Fonte: IEA, 2014



# Consumo Energético

## Participação do Uso de Energia Primária



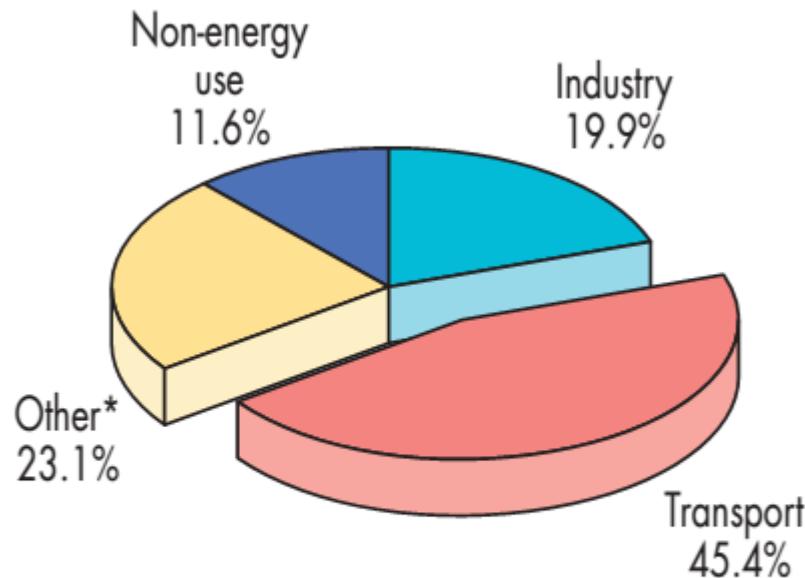
Fonte: IEA, 2010



# Consumo Energético

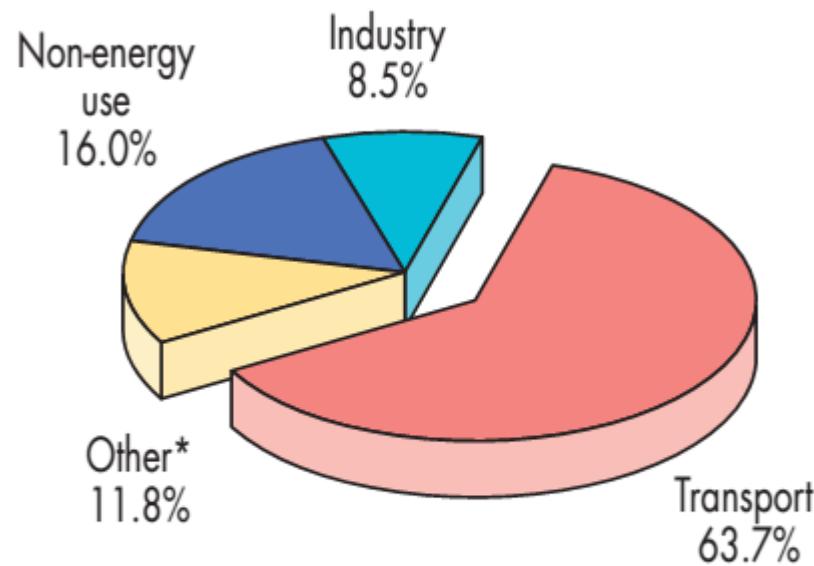
## Consumo de Derivados de Petróleo por Setor (MtEp)

1973



**2 251 Mtoe**

2012



**3 652 Mtoe**

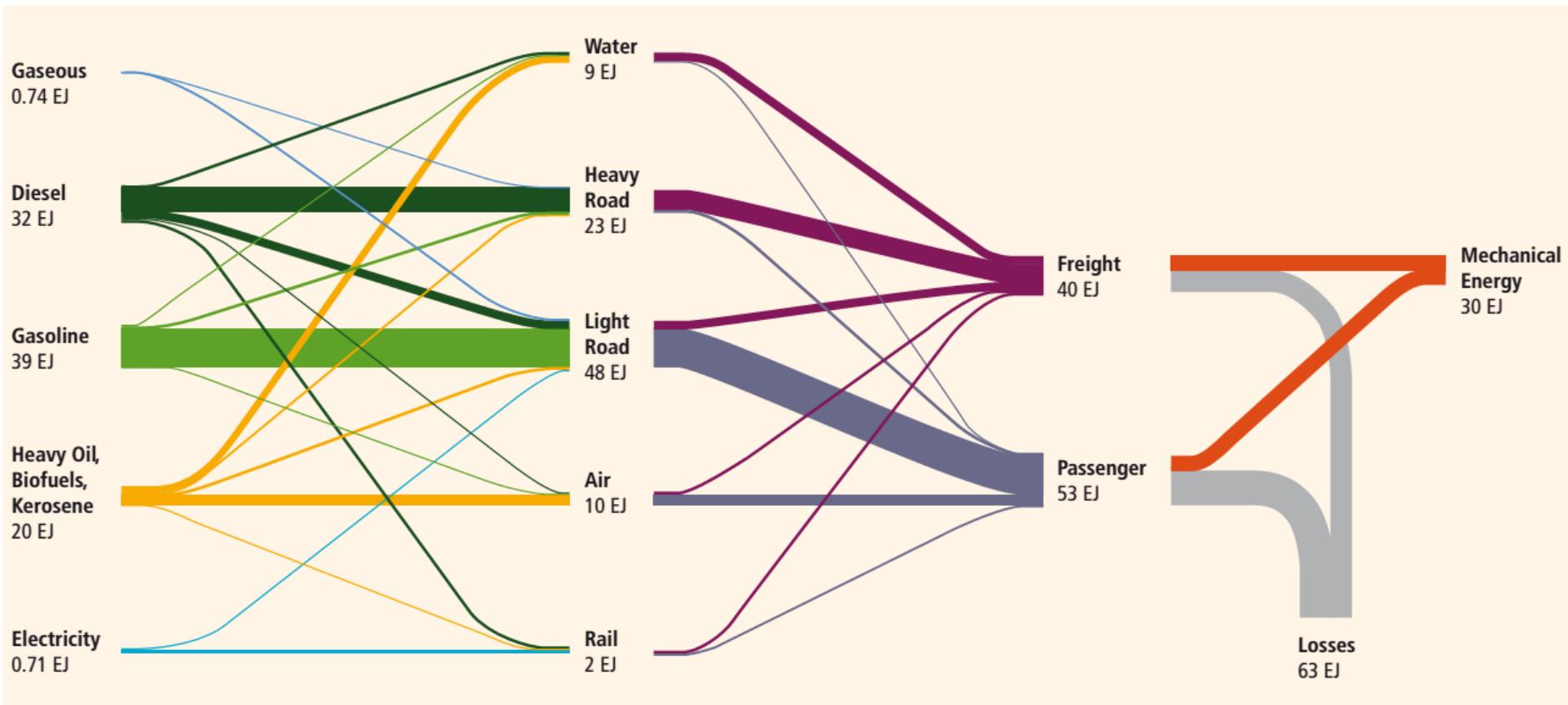
\*Includes agriculture, commercial and public services, residential, and non-specified other.

Fonte: IEA, 2014



# Consumo Energético

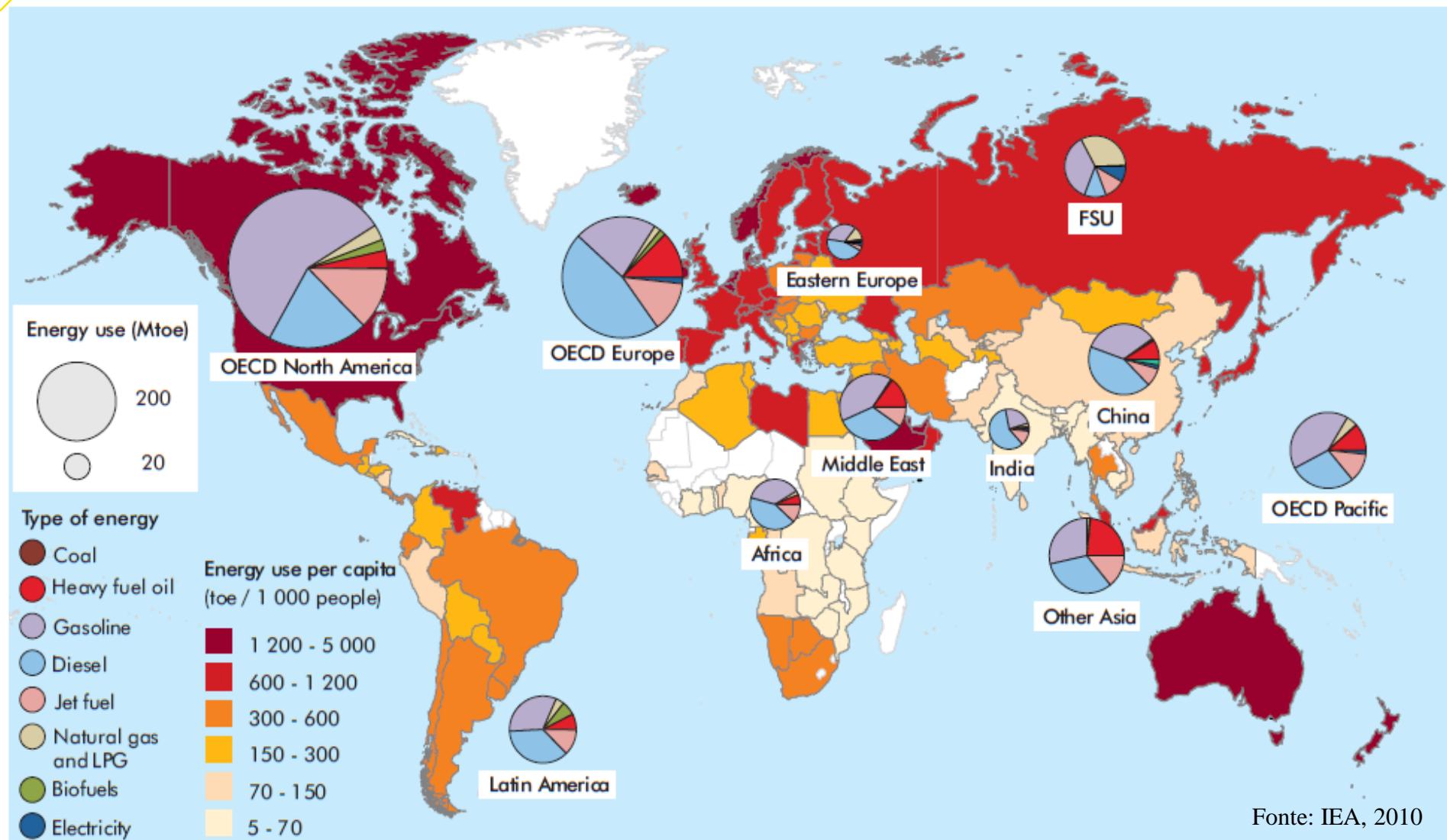
## Consumo de Energia por Modal



Fonte: IPCC, 2014

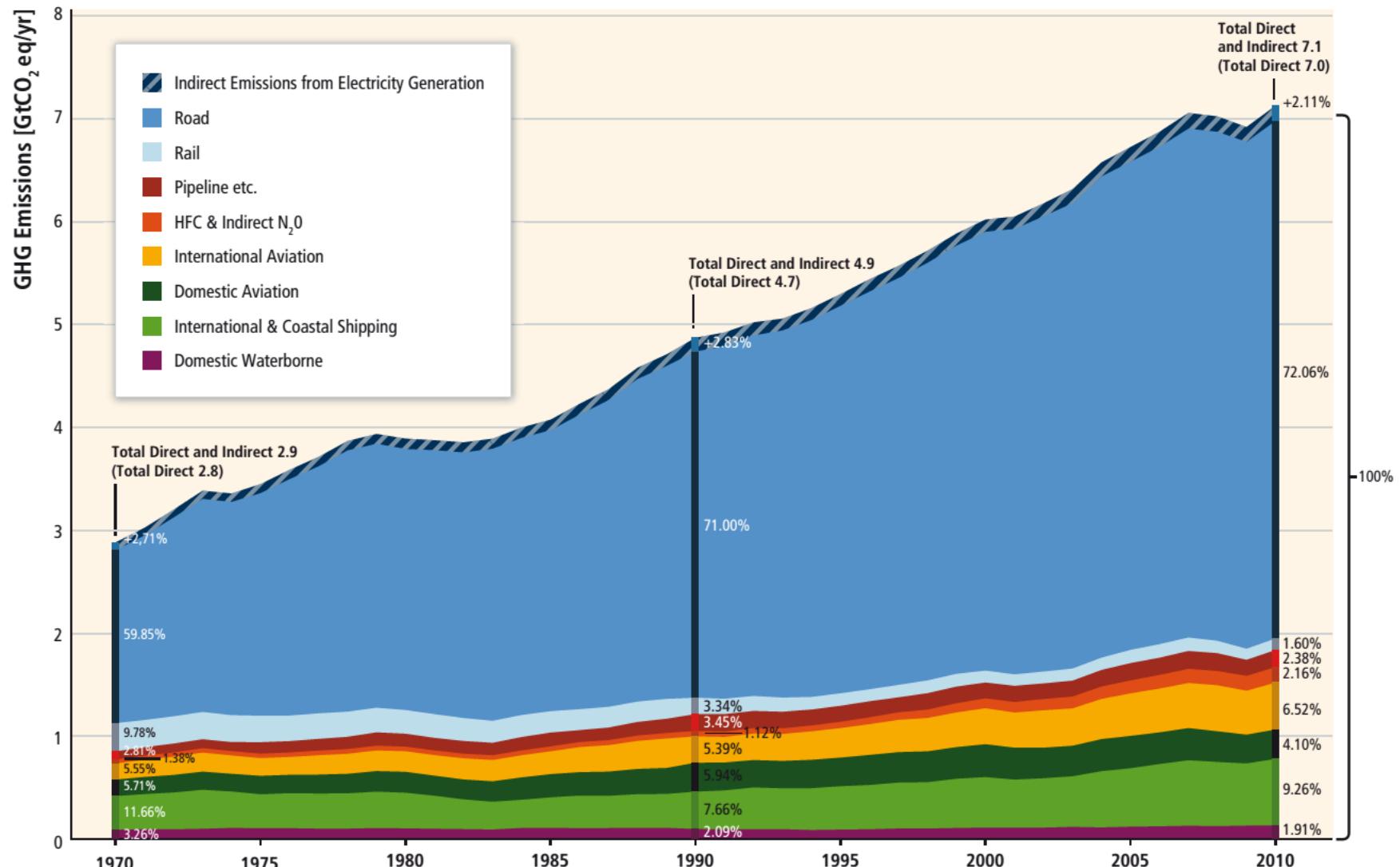


# Consumo Energético





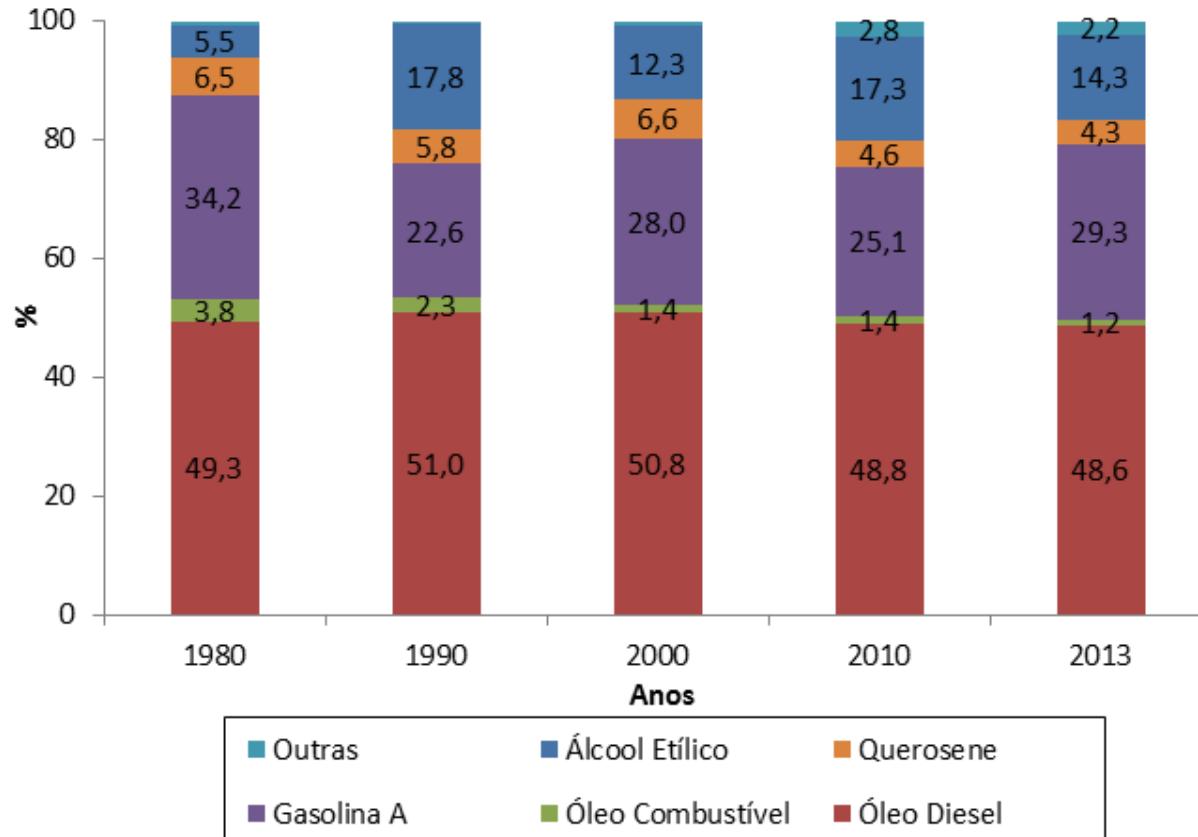
# Emissões de GEE



Fonte: IPCC, 2014

# Característica do Setor - Brasil

## Consumo de Energia por Combustível



Fonte: EPE, 2014

- Em 2013, o setor de transportes nacional consumiu 83 MtEp (92% no modal rodoviário)
- É o segundo maior usuário de energia final no país, com 32% do consumo final energético



# Característica do Setor - Brasil

## Emissões de GEE

(GgCO <sub>2</sub> )	Rodoviário	Ferroviário	Hidroviário	Aerooviário	Total
1990	71.339	1.625	3.448	3.503	79.914
1995	92.210	1.353	3.500	3.940	101.003
2000	110.684	1.238	2.931	5.278	120.130
2005	122.765	1.730	3.561	5.374	133.431
2010	147.376	2.077	4.275	6.452	160.180
2012	181.791	3.015	4.964	8.559	198.329

Fonte: MCTI, 2014

# Característica do Setor - Brasil

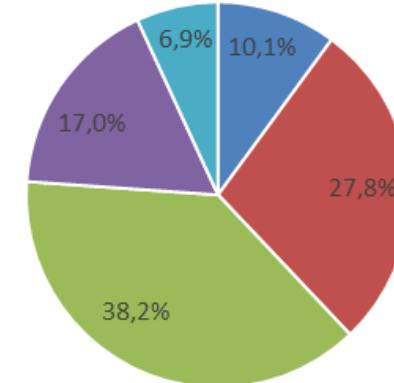
## Malha Rodoviária Nacional

(km)	Pavimentada	Não Pavimentada	Total
Federal	66.674,7	12.707,6	79.382,3
Estadual	119.691,0	105.600,6	225.291,6
Municipal	26.826,7	1.234.918,3	1.261.745,0
Rede Planejada	-	-	154.195,0
Total	213.192,4	1.353.226,5	1.720.613,9

Fonte: CNT, 2014

Em 2014, o país possuía 1,7 milhão de quilômetros de rodovia, dos quais apenas 213 mil quilômetros pavimentados e, ou seja, 12% de toda a malha rodoviária.

## Condição das rodovias pavimentadas



■ Ótimo ■ Bom ■ Regular ■ Ruim ■ Péssimo

Fonte: CNT, 2014

# Políticas do Setor de Transportes

- Podem ser classificados de diversas formas. Por exemplo:
  - Medidas de uso da terra - medidas de atitude e de comportamento
    - Não incide sobre o sistema de transportes, mas sobre os padrões de uso da terra que geram a demanda por transporte. Como: Construção de casas, lojas, postos de trabalho e afins na mesma região; Normas de estacionamento; Horários de trabalho flexíveis; Telecomunicações como uma alternativa para viagens.
  - Medidas de infra-estrutura (fornecimento e gestão)
  - Medidas de substituição modal (desincentivo ao uso do transporte individual, incentivo ao transporte público, construção de ciclovias, etc.)

# Políticas do Setor de Transportes

- Essas medidas estão relacionadas ao aumento de eficiência dos sistemas, dos modos de transporte, ou ainda dos veículos e motores, sendo que destacáveis dentre elas:
  - Aumento da eficiência (do sistema, do modo ou dos veículos);
    - O aumento da eficiência do sistema pode ser obtido mediante melhorias associadas à logística, a gestão do transporte de carga, ao tráfego e à infraestrutura;
  - Aumento do uso de combustíveis menos intensivos em carbono, como os biocombustíveis ou GNV, por exemplo;
  - Medidas de substituição modal (desincentivo ao uso do transporte individual, incentivo ao transporte público, construção de ciclovias, etc.)

# Políticas do Setor de Transportes

## Dilemas

- Transporte como derivado da demanda ou como uma atividade de alto valor agregado?
  - Análise de transporte convencional é baseada na premissa de que a viagem tem um custo, e que os tempos de viagem deve ser tão curto possível
  - Mudança no padrão das viagens e maior valoração do lazer com o aumento da renda
  - Teoria escapatória – tentativa de compensar diminuição da qualidade de vida e o cotidiano com viagens de lazer
  - Flexibilidade no padrão das viagens (com substituição tecnológica e flexibilização do horário de trabalho, por exemplo) pode gerar novos padrões com viagens mais longas

# Políticas do Setor de Transportes

## Dilemas

- Minimização do tempo de viagem?
  - Os maiores benefícios do usuário são derivados da economia com o tempo de viagem
  - Tempo perdido no congestionamento é dinheiro perdido
  - Contradição com questões de segurança e ambientais (certo nível de congestionamento é desejável em determinadas regiões)
  - Tempo razoável de viagem

# Políticas do Setor de Transportes

## Rebound Effect (USA)

- elasticidade do uso do veículo em relação ao custo do combustível por quilômetro

	Sample average (1966–2004)	2004
$\varepsilon_{M,PM}$	−0.211 (0.022)	−0.079 (0.005)
$\varepsilon_{M,PM cong.}$	−0.246 (0.023)	−0.092 (0.007)

- $\varepsilon_{M,PM}$  – efeito ricochete;
- $\varepsilon_{M,PM|cong.}$  – efeito ricochete congestionamento constante;
- erros padrão entre parêntesis
- em termos percentuais, o efeito ricochete é de 21,1% na média da amostra, mas apenas 7,9% em 2004. Isso significa que uma melhoria da economia de combustível de 10% traduz em uma redução do consumo global de 9,21%

Fonte: Dender, 2009



# Eficiência Veicular

## Medidas Incrementais

Vehicle type	Technology description	Km per liter			
		2005**	2010	2020	2030
BAU vehicle (IEA)	<ul style="list-style-type: none"><li>Only marginal fuel economy improvements to meet gradually tightening standards</li></ul>	LDV gas	9	9	10
		LDV diesel	15	16	17
		Medium/heavy	3	4	4
Powertrain and non-engine improvements (A.)	<ul style="list-style-type: none"><li>Light weighting, aerodynamics, rolling resistance</li><li>Start-stop system</li><li>Thermo management</li><li>Inner engine measures</li><li>Exhaust after-gas</li></ul>	LDV gas	9	13	17
		LDV diesel	16	18	22
		Medium/heavy	4	4	5
Hybrid vehicle with powertrain and non-engine improvement (A. + B.)	<ul style="list-style-type: none"><li>Battery and electric motor with integrated power management</li><li>Transmission adaptation</li><li>Electrification of auxiliaries, etc</li></ul>	LDV gas	12	15	20
		LDV diesel	18	20	25
		Medium/heavy**	4	5	6
Plug in hybrid* with powertrain and non-engine improvement (A. + C.)	<ul style="list-style-type: none"><li>Hybrid vehicle with a battery capable of being charged through the grid</li></ul>	LDV gas	23	31	40
		LDV diesel	37	41	50
		Medium/heavy**	6	8	10

\* Fuel economy of plug in hybrids, as listed here, takes into account all miles, including those run on electricity

\*\* 2005 figures only provided for BAU vehicles, with assumption that fuel efficient technologies come in after 2005

\*\*\* Heavy trucks are not assumed to adopt hybrid or plug-in technology



# Eficiência Veicular

## Medidas Incrementais

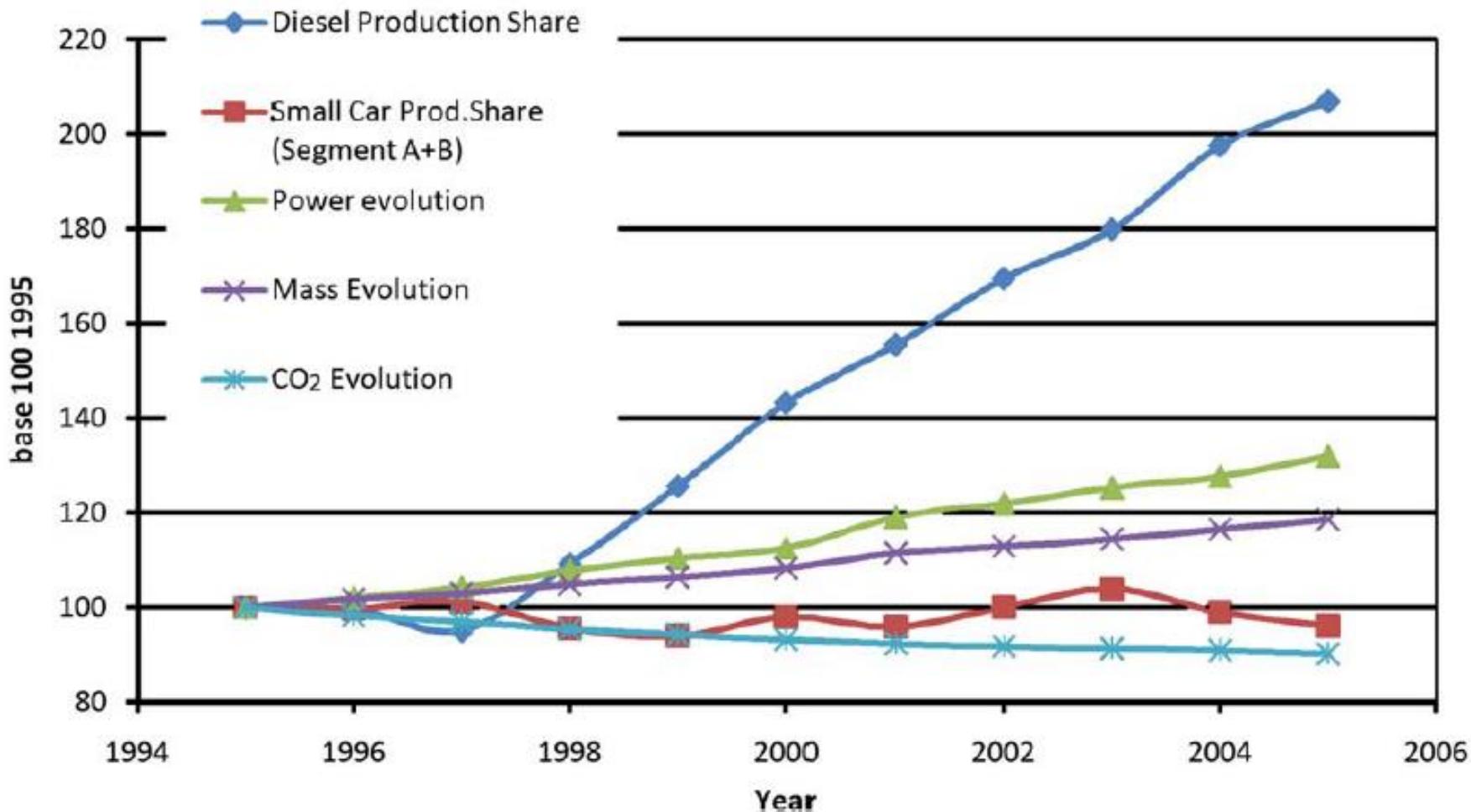
Technical measure	Impact on fuel consumption	Related cost EUR
Start-stop system	-3%	200–350
Transmission improvements	-4%	100–250
Thermo management	-2%	100–150
<b>Inner-engine measures</b>		
– Downsizing and turbo charging	-7%	300–550
– Direct injection	-5%	200–300
– Variable valve lift and timing	-5%	250–350
– Cylinder deactivation	-4%	300–500
– Camless valve actuation including variable valve lift	-10%	350–650
– Variable compression ratio	-4%	300–600

Fonte: Vattenfall, 2007



# Eficiência Veicular

## O Caso Europeu

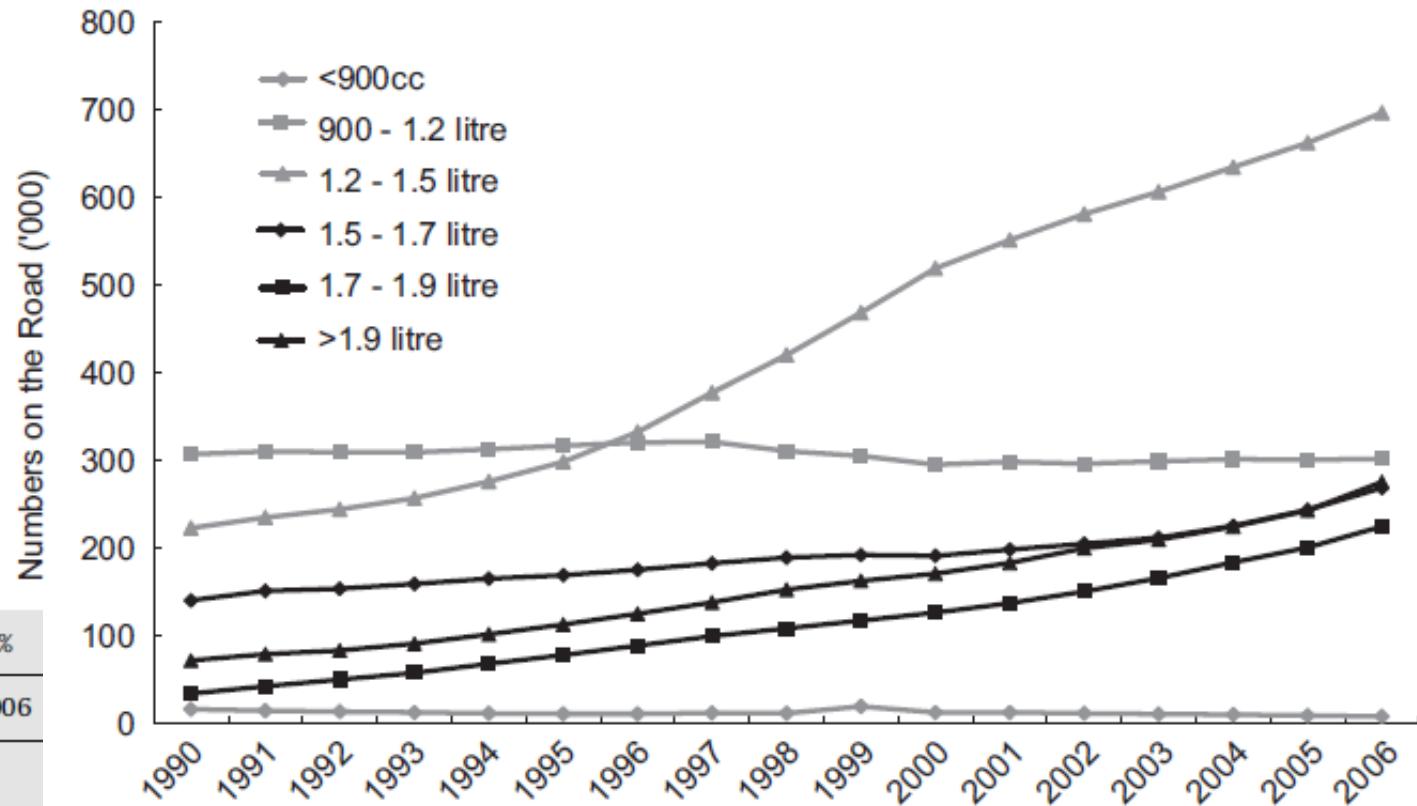


Fonte: Cuenot, 2007



# Eficiência Veicular

## O Caso Europeu: Irlanda

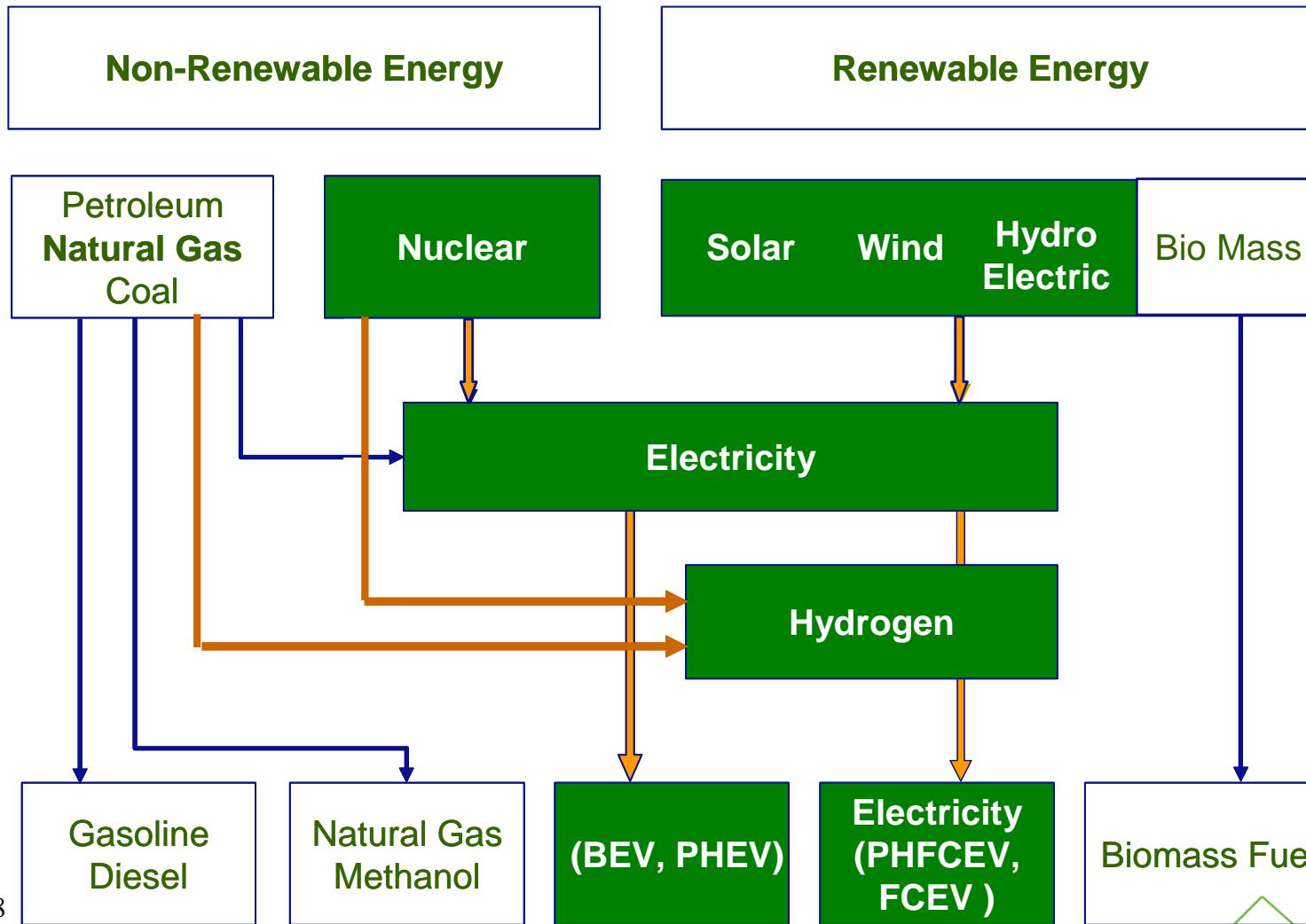


Fonte: Gallachóir, 2009



# Eficiência Veicular

## Medidas Avançadas





# Eficiência Veicular

## Medidas Avançadas

- Veículos Híbridos Elétricos
  - Possui mais de um motor de propulsão. Combina motor de combustão interna e motor elétrico
- Veículos Híbridos Plug-In
  - Semelhante ao híbrido elétrico. Todavia, a bateria utilizada pode ser carregada diretamente da rede elétrica por meio de uma tomada.
- Veículos Elétricos
  - Única fonte de energia é o armazenamento eletroquímico de energia elétrica proveniente da rede
- Veículos a Célula a Combustível
  - Produz eletricidade a bordo a partir de um combustível, como o hidrogênio



# Eficiência Veicular

## Medidas Avançadas

Vehicle type	Fuel	Initial price (USk\$)	Specific fuel consumption <sup>a</sup> (MJ/100 km)	Specific fuel price (US\$/100 km)	Driving range (km)	Price of battery changes during vehicle life cycle <sup>b</sup> (USk\$)
Conventional	Gasoline	15.3	236.8 <sup>c</sup>	2.94	540	$1 \times 0.1$
Hybrid	Gasoline	20.0	137.6	1.71	930	$1 \times 1.02$
Electric	Electricity	42.0	67.2	0.901	164	$2 \times 15.4$
Fuel cell	Hydrogen	100.0	129.5	1.69	355	$1 \times 0.1$
H <sub>2</sub> -ICE	Hydrogen	60.0 <sup>d</sup>	200	8.4	300	$1 \times 0.1$
NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> -ICE	Ammonia	40.0 <sup>e</sup>	175	6.4 <sup>f</sup>	430	$1 \times 0.1$

<sup>a</sup> Fuel consumption based on driving times divided as 45% on highway and 55% in city.

<sup>b</sup> Life cycle of vehicle is taken as 10 years.

<sup>c</sup> Heat content of conventional gasoline is assumed to be its lower heating value (LHV = 32 MJ/l).

<sup>d</sup> Estimated based on gasoline ICE to H<sub>2</sub>-ICE conversion data from Atlantic Hydrogen [4].

<sup>e</sup> Estimated based on assumption that the costs of the fuel tank + fuel distribution + fuel safety systems are negligible with respect to the H<sub>2</sub>-ICE vehicle.

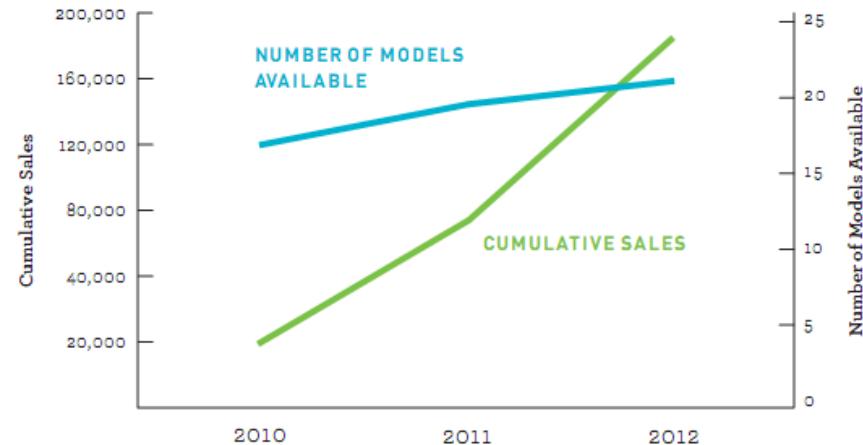
<sup>f</sup> Estimated for US\$6.4/kg of ammonia.



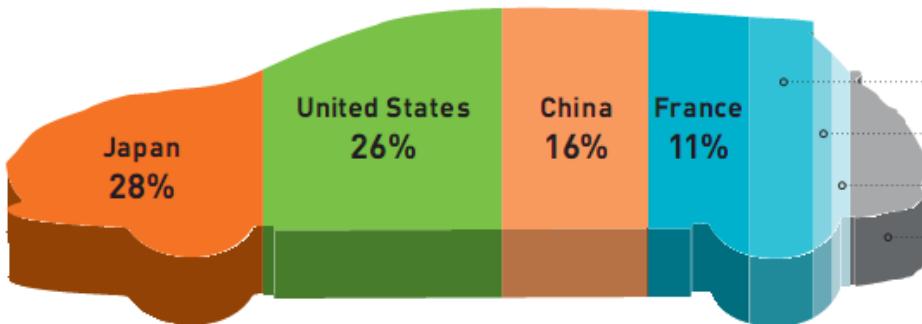
# Eficiência Veicular

## Veículos Elétricos

- Frota mundial: 180 mil veículos
- Postos de recarga (não residencial)
  - Lenta: 46 mil
  - Rápida: 1,9 mil



### Vendas BEV 2012



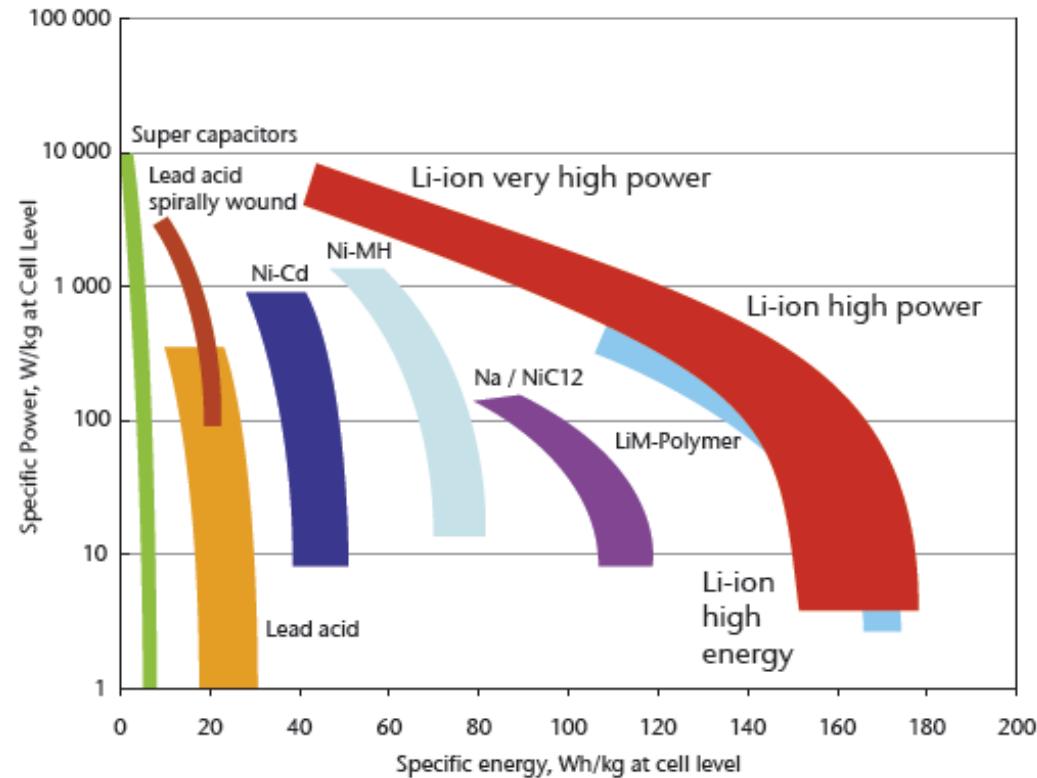
Japan	15,937
United States	14,592
China	8,733
France	6,067
Norway	3,883
Germany	1,294
United Kingdom	1,167
Other	5,009

Fonte: IEA, 2013

# Eficiência Veicular

## Veículos Elétricos

- Principais tecnologias de baterias recarregáveis:
  - Chumbo-ácidas (Pb)
  - Níquel cádmio (Ni-Cd)
  - Hidreto metálico de níquel
  - Íon de lítio (Li-ion)



Fonte: IEA, 2010



# Eficiência Veicular

Emissões ao longo da cadeia (Well to wheels)

- Para os veículos puramente elétricos, as emissões de GEE estão associadas apenas ao processo de geração de energia elétrica (desconsiderando emissões de fabricação do produto, etc)
- O fator médio de emissão do grid brasileiro (margem operativa) (MCTI, 2015):
  - 2010: Oscilou entre 0,21 e 0,73 tCO2/MWh
  - 2014: Oscilou entre 0,56 e 0,61 tCO2/MWh
- Desempenho médio de um veículo elétrico: 6 km/kWh
- Logo, emissões prováveis dos VE no Brasil: entre 35 e 120 gCO2/km (emissão veículo leve a gasolina na ordem de 200-250 gCO2/km – apenas uso final)



# Substituição Modal

## Falhas

- Não incorpora a realidade da propensão humana para a acessibilidade e conforto
- Em vez de restringir o uso de veículos particulares ? aumento da competitividade de modos alternativos.
  - O caso de Curitiba:
    - Eficiência energética do setor (10 GJ / cap / ano) comparável a outras cidades brasileiras (Recife: 7 GJ / cap / ano e Brasília: 13 GJ / cap / ano em Brasília;
    - Posse de veículos: 40%



# Substituição Modal

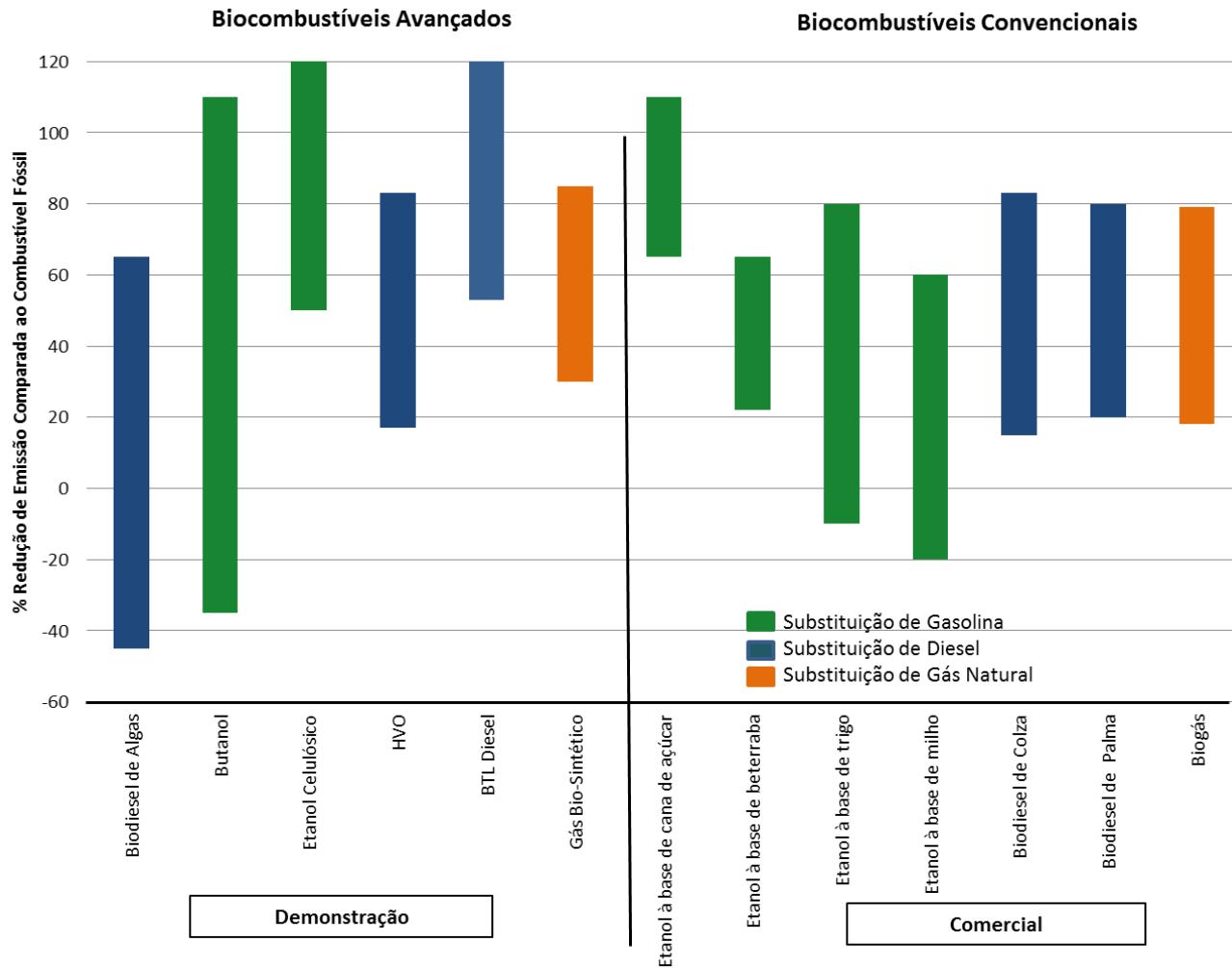
## Falhas

- O caso de Cingapura (altos impostos, taxa de estacionamento e restrição a entrada no centro urbano) – Início década de 70:
  - Redução do congestionamento em 45% e dos acidentes em 20%;
  - Essas restrições, juntamente com altas taxas de importação e altos impostos, não impediram que o número total de carros continuasse a crescer drasticamente;
  - Em 1990 foi criado sistema de cotas de veículos (número de veículos certificados era leiloado mensalmente);
  - Em 1995 sistema de tarifação rodoviária;
  - Percentual de pessoas que usam o carro para ir ao trabalho: 13,4% em 1980, 18,1% em 1990 e 23,7% em 2000
  - Entre 1994 e 2004, a frota de veículos particulares cresceu 31,7% enquanto a população cresceu 23%

Fonte: Gallachóir, 2009



# Biocombustíveis



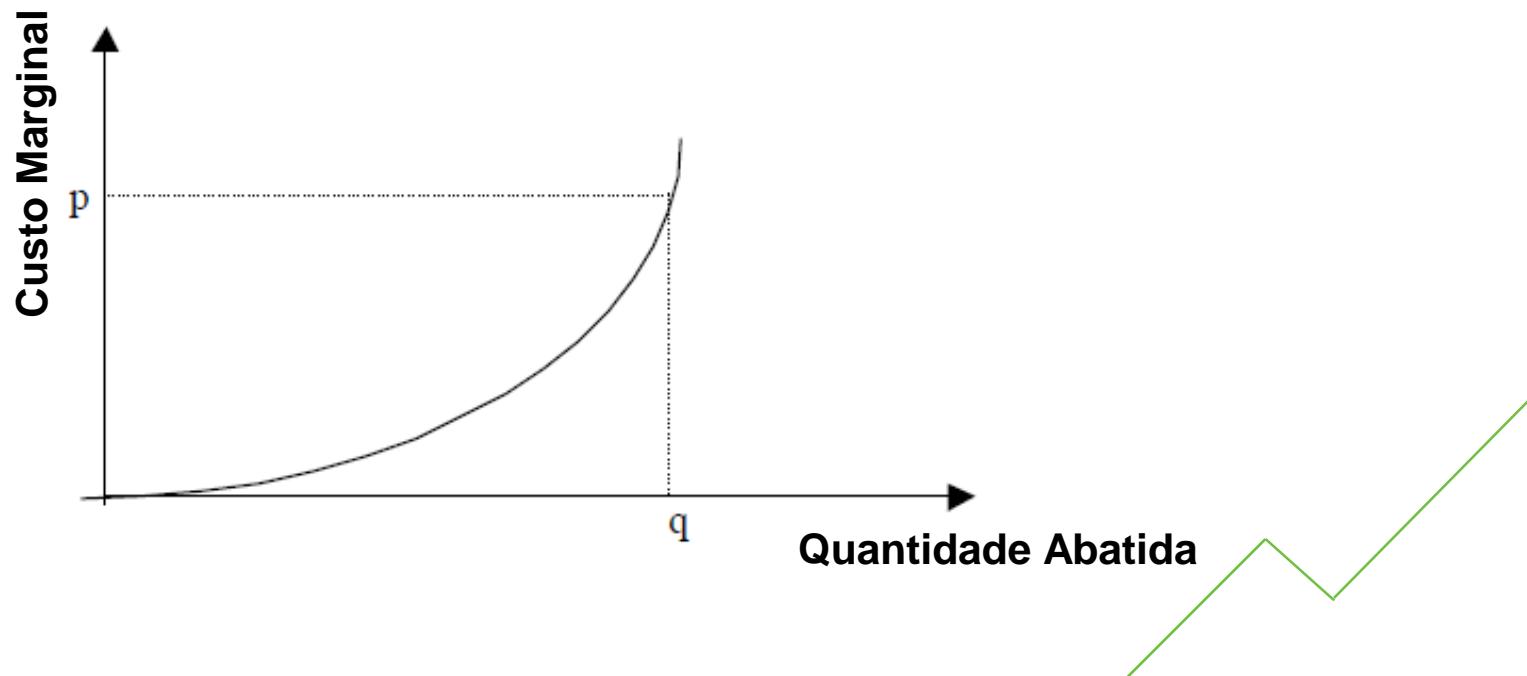
# Custo Marginal de Abatimento

- São os custos para reduzir determinada quantidade de poluente emitido no ambiente
  - Ou seja, são os custos de adoção de meios tecnológicos e gerenciais para reduzir emissões
  - De maneira geral, estão associados às emissões de GEE
- Podem ser calculados em escala local, regional, setorial, etc.
  - Local: empresa, indústria, etc.
  - Regional: cidade, estado, país, etc.
  - Setorial: diferentes setores da economia



# Custo Marginal de Abatimento

- Um ponto na curva representa o custo marginal para se abater uma unidade adicional de GEE
- A área abaixo da curva indica o custo total de abatimento da quantidade  $q$  de GEE



# Custo Marginal de Abatimento

- Pode-se determinar o CMA de uma opção de mitigação para o período 2010 – 2030 pela fórmula:

$$CMA = \frac{\sum_{i=2010}^{2030} (C_i^{Abatimento} - C_i^{Base})}{\sum_{i=2010}^{2030} (E_i^{Base} - E_i^{Abatimento})}$$

Onde:

$$C_i = (IT \cdot FA) + OM_i + FC_i + R_i$$

**C** – Custo

**E** – Emissão

**IT** – Investimento Total

**OM** – O&M

**FC** – Combustível

**R** – Receitas

**FA** – Fator de Anuidade



# Custo Marginal de Abatimento

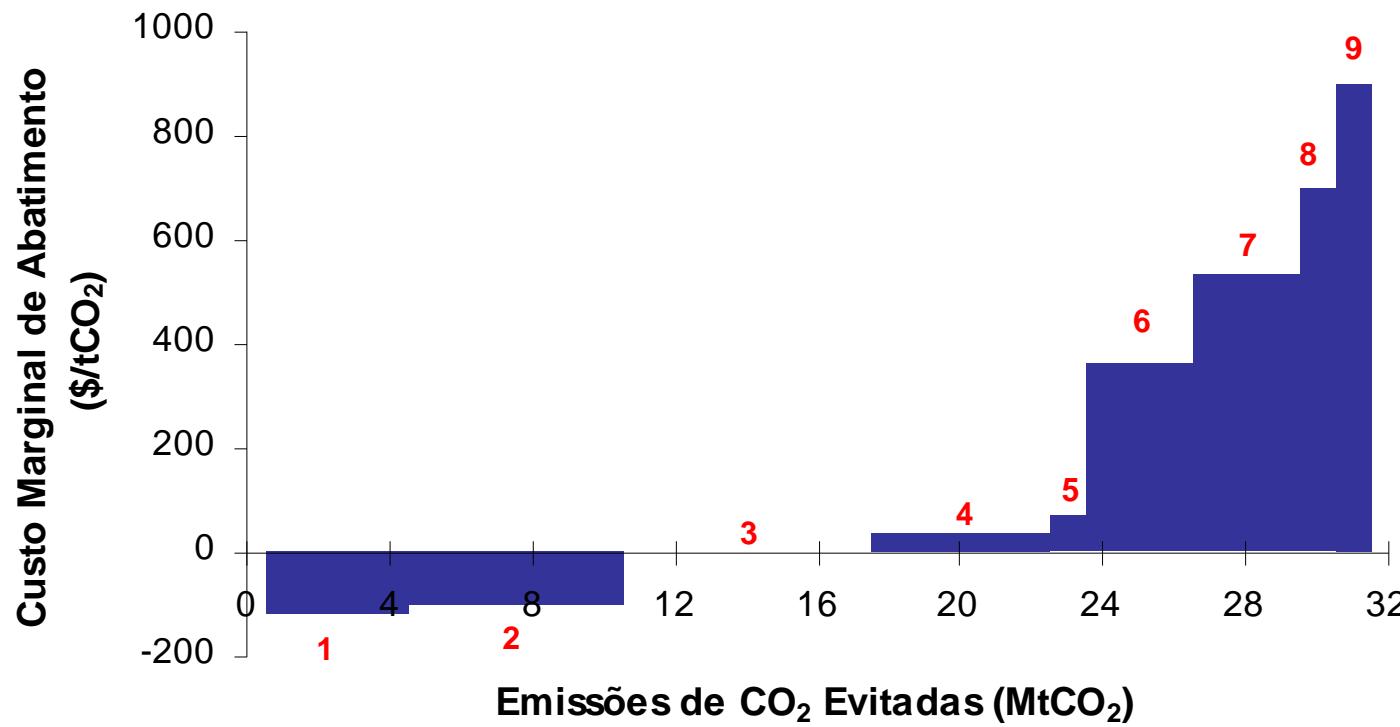
Exemplo: Custo marginal de abatimento para o setor de transporte  
do Brasil – Horizonte 2010 - 2035

Opção de Mitigação	Custo	Redução	Custo Total	Redução Acumulada	Custo Acumulado
	(\$/tCO <sub>2</sub> )	(10 <sup>3</sup> tCO <sub>2</sub> )	(10 <sup>3</sup> \$)	(10 <sup>3</sup> tCO <sub>2</sub> )	(10 <sup>3</sup> \$)
Ganho de eficiência no motor	-120	4.751	-570.071	4.751	-570.071
Ganho de eficiência fora do motor	-105	6.327	-664.358	11.078	-1.234.429
Sistema de transporte inteligente	0	6.434	0	17.512	-1.234.429
Sistema rápido de ônibus	35	5.641	197.418	23.153	-1.037.011
Melhorias de infra-estrutura	66	459	30.313	23.612	-1.006.697
Veículos híbridos elétricos	360	3.628	1.306.077	27.240	299.380
Veículos híbridos elétricos plug-in	530	2.507	1.328.558	29.747	1.627.938
Veículos elétricos	700	1.075	752.827	30.822	2.380.765
Veículos a célula a combustível	900	1.075	967.920	31.897	3.348.684

Fonte: Schaeffer et al., 2010.

# Custo Marginal de Abatimento

Exemplo: Custo marginal de abatimento para o setor de transporte  
do Brasil – Horizonte 2010 - 2035



Fonte: Schaeffer et al., 2010.



# Custo Marginal de Abatimento

			Abatement potential, Gt CO <sub>2</sub> e/year, 2030	Marginal abatement cost, EUR/t CO <sub>2</sub> e, 2030
<b>CO<sub>2</sub>e emissions from transport</b>	<b>Fuel economy of vehicles</b>	<b>1. Fuel efficient technologies</b>	Powertrain and non-engine tech.	0.9
			Hybrids	0.03
			Plug-in hybrids	0.2
	<b>CO<sub>2</sub>e emissions from fuel</b>	<b>2. Fuel switch<sup>4</sup></b>	Grain ethanol	<0.01
			Sugarcane ethanol	0.5
			Cellulosic ethanol <sup>5</sup>	0.8
			Biodiesel	0.1
<b>Vehicle miles traveled</b>	<b>3. Demand reduction</b>	VMT reduction from CO <sub>2</sub> tax	0.2	40
		Smart transit	0.2	0
<b>Total, million tons</b>			<b>3.0</b>	

1 Weighted average among commercial vehicles: -100 EUR/t CO<sub>2</sub>e; LDV gasoline: -38 EUR/t CO<sub>2</sub>e; LDV diesel: 77 EUR/t CO<sub>2</sub>e

2 Weighted average among commercial vehicles: 54 EUR/t CO<sub>2</sub>e ; LDV gasoline: 536 EUR/t CO<sub>2</sub>e ; LDV diesel: 675 EUR/t CO<sub>2</sub>e

3 Weighted average among commercial vehicles: -14 EUR/t CO<sub>2</sub>e ; LDV gasoline: 357 EUR/t CO<sub>2</sub>e ; LDV diesel: 350 EUR/t CO<sub>2</sub>e

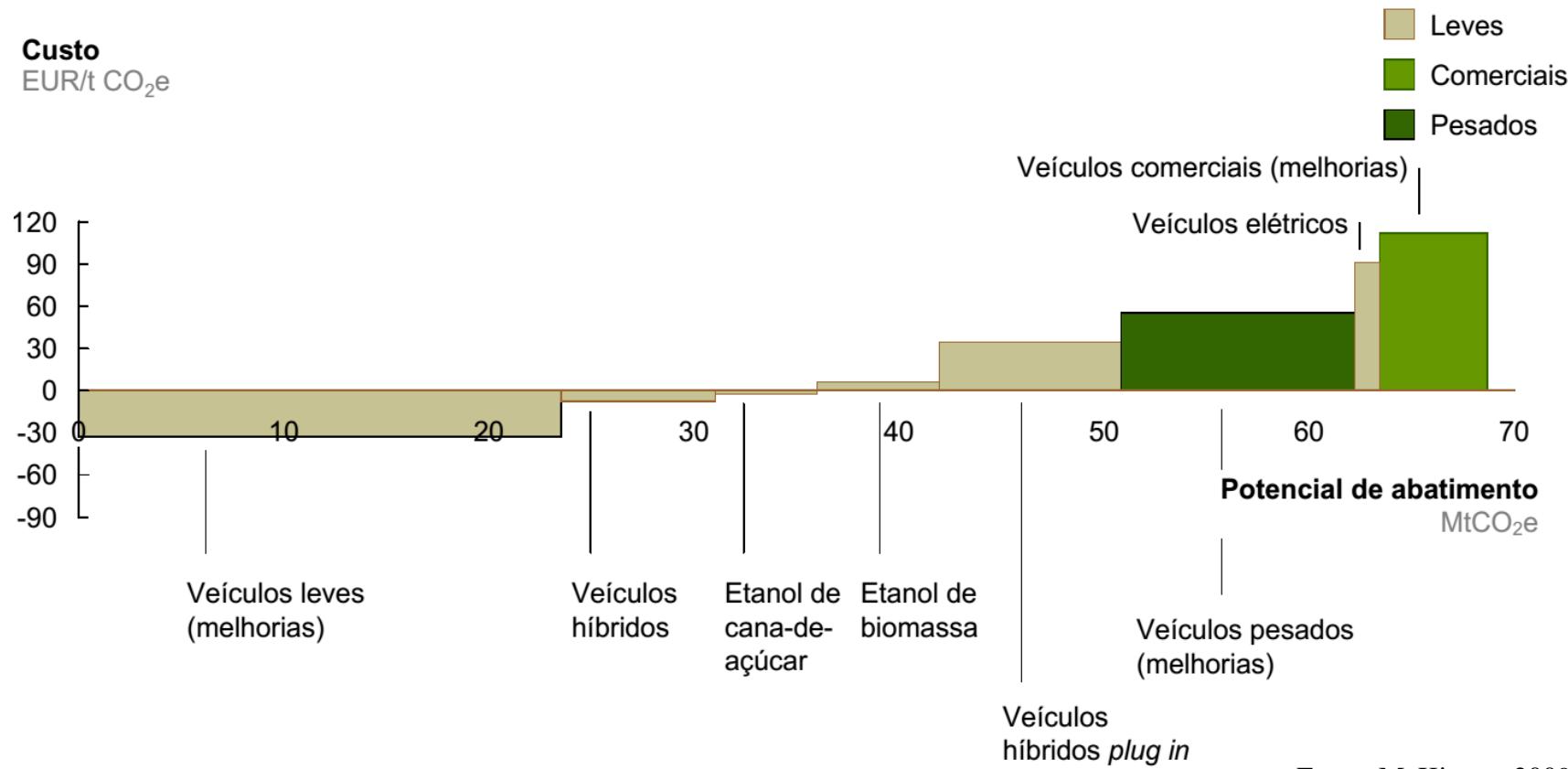
4 Under abatement scenario, gasoline vehicle efficiency approaches diesel efficiency, leaving only marginal abatement from shift to diesel

5 Assumes strong government support to promote this technology from the current development stage—yielding a 2030 cost of 0.28 Eur/lit of gas equivalent vs. 0.42 Eur/lit of gasoline equivalent for IEA, with further cost reductions possible from producing in developing countries

Fonte: Vattenfall, 2007



## Custo marginal de abatimento para o setor de transporte do Brasil – Horizonte 2010 - 2035



Fonte: McKinsey, 2009



# Fontes de Informação

- Segmentação e caracterização do consumo de energia e emissões no setor
  - IPCC (2014). Chapter 8 - Transport. In: Climate Change 2014 - Mitigation for Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III. Cambridge University Press, Cambridge and New York. 117pp.
  - IEA (2014). Key World Energy Statistics. International Energy Agency, Paris, France. 82 pp.
  - ANFAVEA (2015). Anuário da Indústria Automobilística Brasileira. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, Brasília, Brasil. 156 pp.
  - EPE (2014). Balanço Energético Nacional. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, Brasil. 288 pp.
  - MCTI (2013). Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Brasília, Brasil. 80 pp.
- Medidas de abatimento e processo decisório de abatimento (CMA)
  - McKinsey (2009). Caminhos para uma economia de baixa emissão de carbono no Brasil. McKinsey & Company. 47 pp.
  - IEA (2012). Energy Technology Perspectives 2012. International Energy Agency, Paris, France. 690 pp.
  - Gouvêlo C. de (2010). Estudo de Baixo Carbono para o Brasil. Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento, Brasília, Brasil. 280 pp.
  - IEA (2009). Transport, Energy and CO2 - Moving Toward Sustainability. International Energy Agency, Paris, France. 418 pp.
  - Schaeffer et al., 2010. Redução de emissões: opções e perspectivas para os setores de energia, transportes e indústria. Coalizão empresas pelo clima, FBDS. Disponível em <http://www.fbds.org.br/fbds/IMG/pdf/doc-494.pdf>.



# Obrigado

Bruno Borba – [bborba@id.uff.br](mailto:bborba@id.uff.br)