



TECNOLOGIAS DE BAIXO CARBONO APLICÁVEIS AOS SETORES- CHAVE DO BRASIL

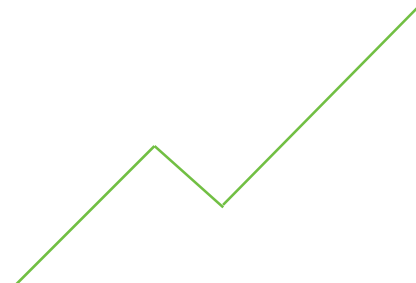
ENERGIA

Pedro Rochedo

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.



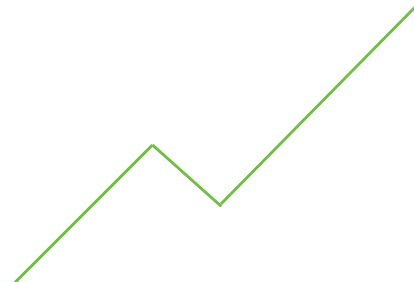


Índice

- /// Aspectos conceituais e definições básicas
- /// Estrutura do Setor Energético
- /// Fontes de Emissão de GEE
- /// Medidas de Abatimento
- /// Custo de Abatimento e Potencial de Abatimento
- /// Fontes de Informação



Aspectos Conceituais





Conceitos

- /// Unidades
- /// Potência e Energia
- /// Poder Calorífico, Eficiência e Fator de capacidade
- /// Cadeia Energética
- /// Consumo Energético x Setor Energético x Setor Elétrico



Conceitos: Unidades

/// Existem diversas unidades para energia

/// Sistema Internacional: Joule (J).

$$/// \quad 1 J = 1 N \cdot m = 1 kg \cdot \frac{m^2}{s^2}$$

/// Outras unidades comuns para energia:

$$/// \quad 1 Wh = 3600 J = 3,6 kJ$$

$$/// \quad 1 Cal = 4,18 J$$

$$/// \quad 1 eV = 1,60 \cdot 10^{-19} J$$

$$/// \quad 1 BTU = 1.055 J = 1,055 kJ$$



Conceitos: Unidades

/// $1 \text{ Wa} = 8.760 \text{ Wh} = 31,53 \text{ MJ}$

/// Outras unidades de energia convenientes:
equivalência energética

/// $1 \text{ TEP (Tonelada Equivalente de Petróleo)} = 41,85 \text{ GJ}$

/// $1 \text{ BEP (Barril Equivalente de Petróleo)} = 6,38 \text{ GJ}$

/// $1 \text{ kton (Quiloton ou Quilo tonelada de TNT)} = 4.18 \text{ TJ}$

/// Exemplo: Consumo Energético Brasileiro em 2013
(EPE, 2014)

/// $260,25 \text{ Mtep} = 39,67 \text{ Mbep} = 345,38 \text{ GWa} = 10,89 \text{ EJ} = 10,89 \cdot 10^{18} \text{ J}$



Conceitos: Energia e Potência

/// Potência: variação da energia no tempo

/// Consumida ou Gerada

/// Unidade S.I.: Watt (W)

$$/// \quad 1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}$$

/// Um motor de 10 kW operando por um dia é capaz de gerar:

$$/// \quad E = P \cdot t = 10 \text{ kW} \cdot 1d \cdot \left(\frac{24h}{1d}\right) = 240 \text{ kWh}$$



Conceitos: Energia dos combustíveis

- /// Poder Calorífico: energia liberada como calor em processos de combustão
- /// Superior (PCS): Energia bruta (produtos na condição ambiente)
- /// Inferior (PCI): Energia líquida (desconta calor de vaporização da água)
- /// Energia disponível para processos termoquímicos



Conceitos: Eficiência e Fator de Capacidade

/// Eficiência: razão entre energia de saída e de entrada

/// 1ª Lei (Quantidade) ou 2ª Lei (Qualidade)

/// Combustíveis: Pode ser calculado em relação ao PCS ou PCI

$$\eta = \frac{\text{output}}{\text{input}}$$

/// Fator de Capacidade: relaciona geração de energia e potência

$$\text{Geração} = \text{Potência} \cdot \text{tempo}$$

/// Exemplo: $P = 10\text{MW}$; $FC = 80\%$ $\rightarrow G = 10 \cdot (0.8 \cdot 8760) = 70\text{ GWh}$



Conceitos: Cadeia Energética

/// Energia Primária

- ///* Produtos energéticos providos pela natureza na sua forma direta
- ///* Exemplos: petróleo, gás natural, carvão mineral, solar, etc.

/// Energia Secundária

- ///* Produtos energéticos resultantes de centros de transformação
- ///* Exemplos: diesel, gasolina, eletricidade, etanol,



Conceitos: Cadeia Energética

/// Energia Final

/// Produtos energéticos disponíveis aos pelos diversos setores consumidores

/// Ex: eletricidade, gás de refinaria, gasolina, carvão vegetal, etc

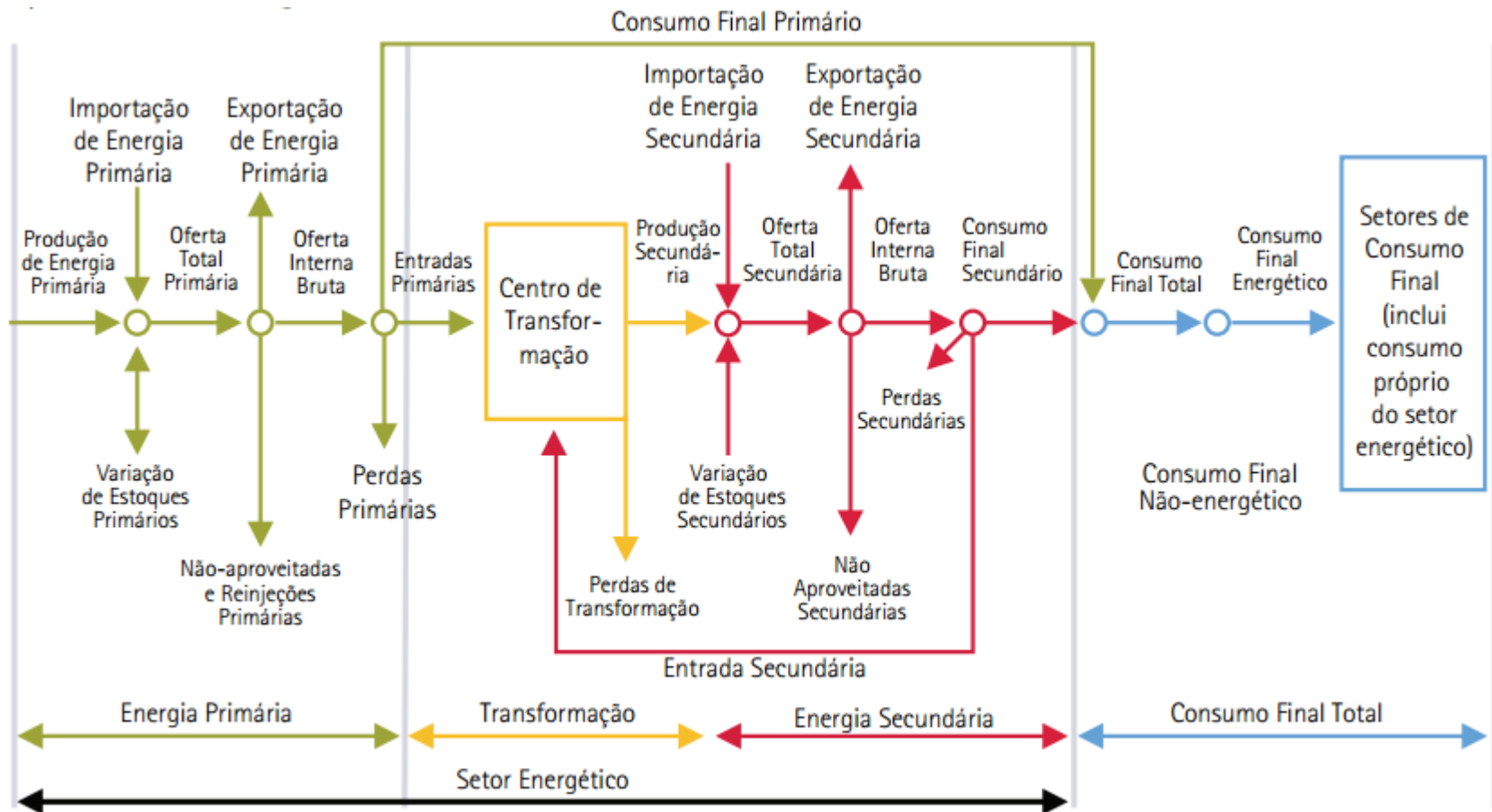
/// Serviço Energético

/// Finalidade para o qual o consumo energético é realizado

/// Ex: calor, iluminação, força motriz,



Conceitos: Cadeia Energética



Fonte: EPE (2014)



Conceitos: Consumo Energético

/// Total de energia consumida por:

/// Unidade industrial;

/// Setor da economia;

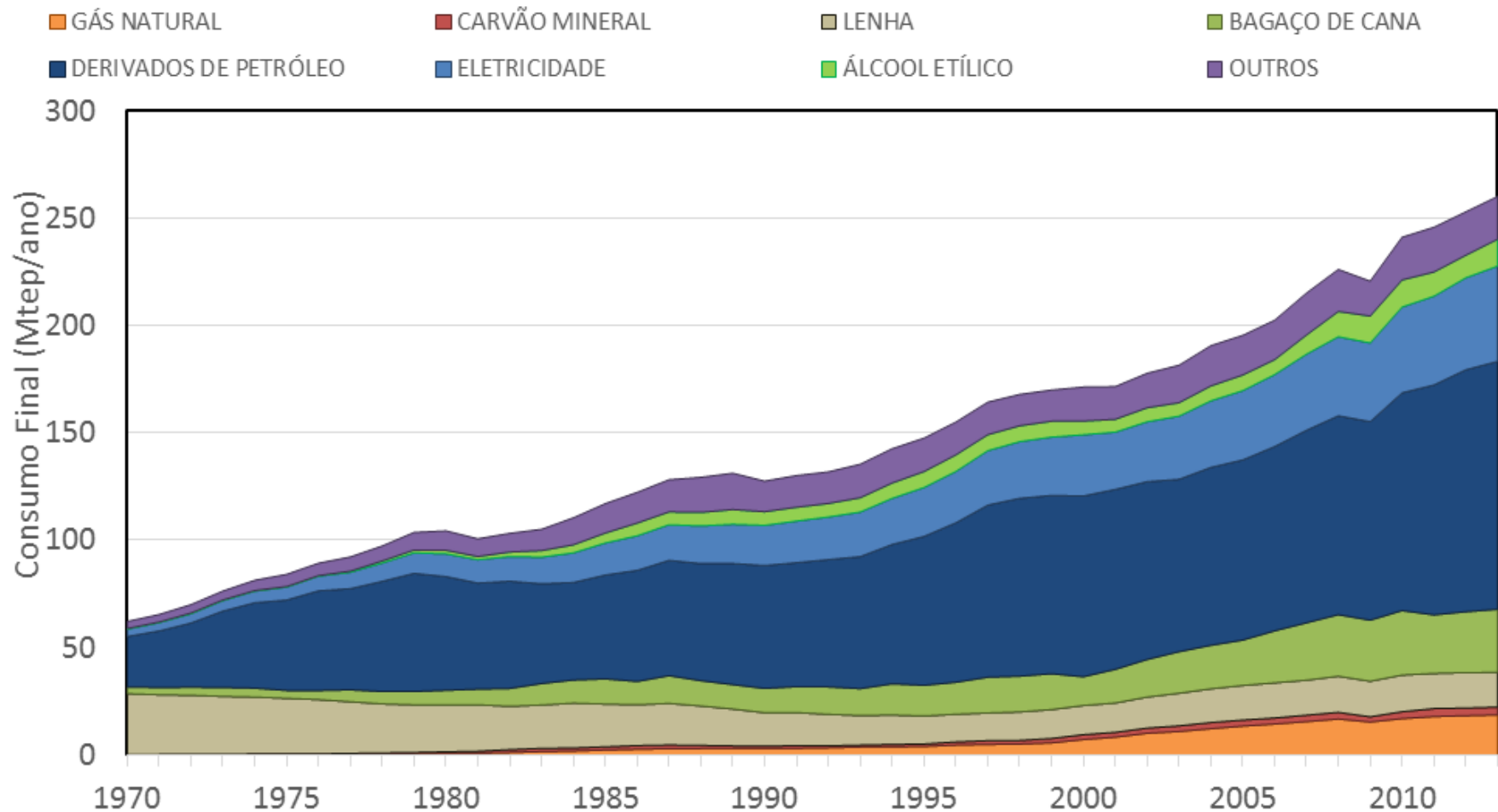
/// Região;

/// País, etc;

/// Somatório de todas as energias finais



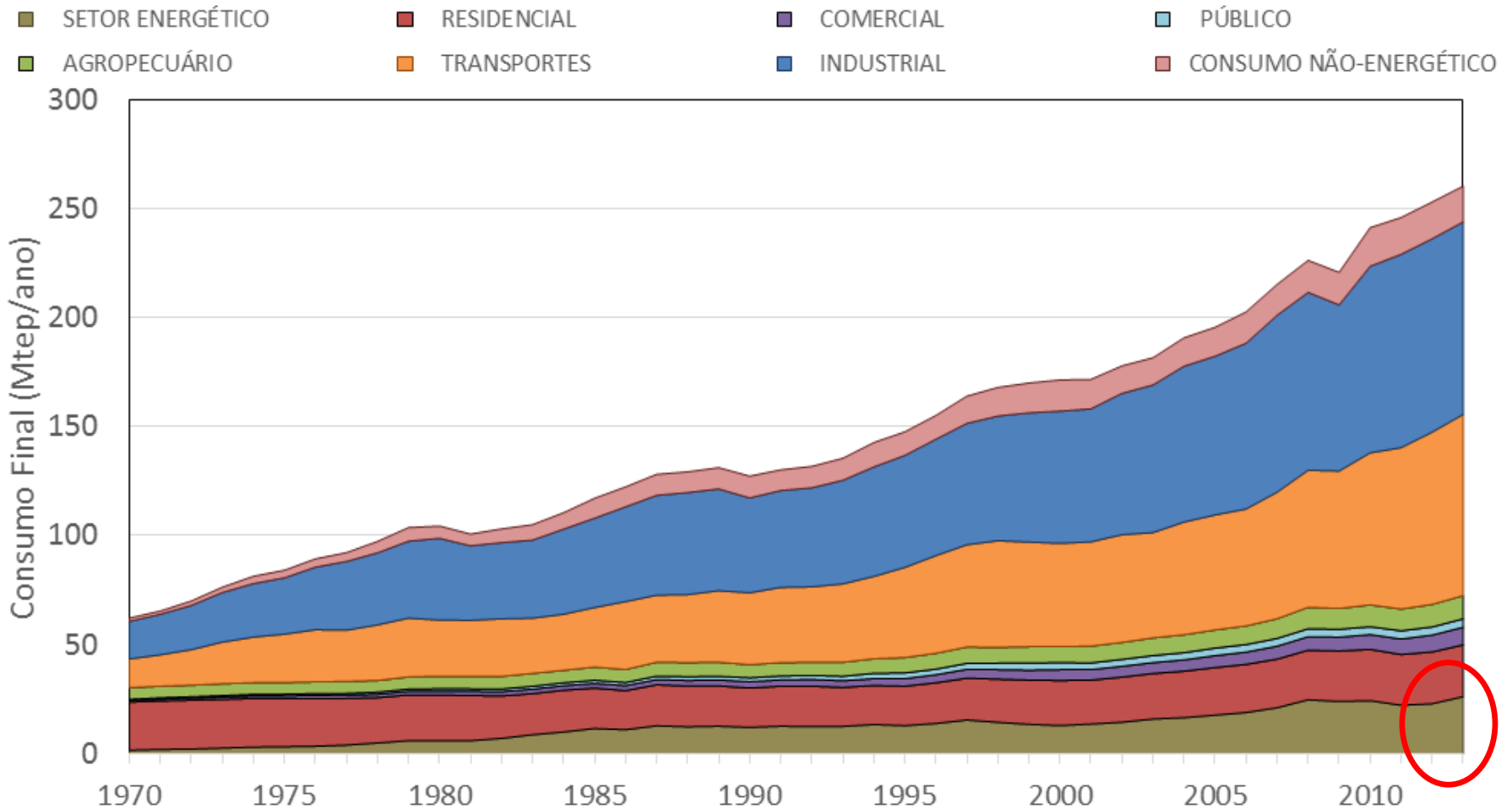
Conceitos: Consumo Energético (fonte)



Fonte: EPE (2014)



Conceitos: Consumo Energético (setor)





Conceitos: Setor Energético

- /// Contempla as atividades e tecnologias de:
 - /// Extração
 - /// Conversão
 - /// Armazenamento
 - /// Transporte
 - /// Distribuição
- /// Exceção: utilização da energia final para prover serviços energéticos aos setores de uso final da economia

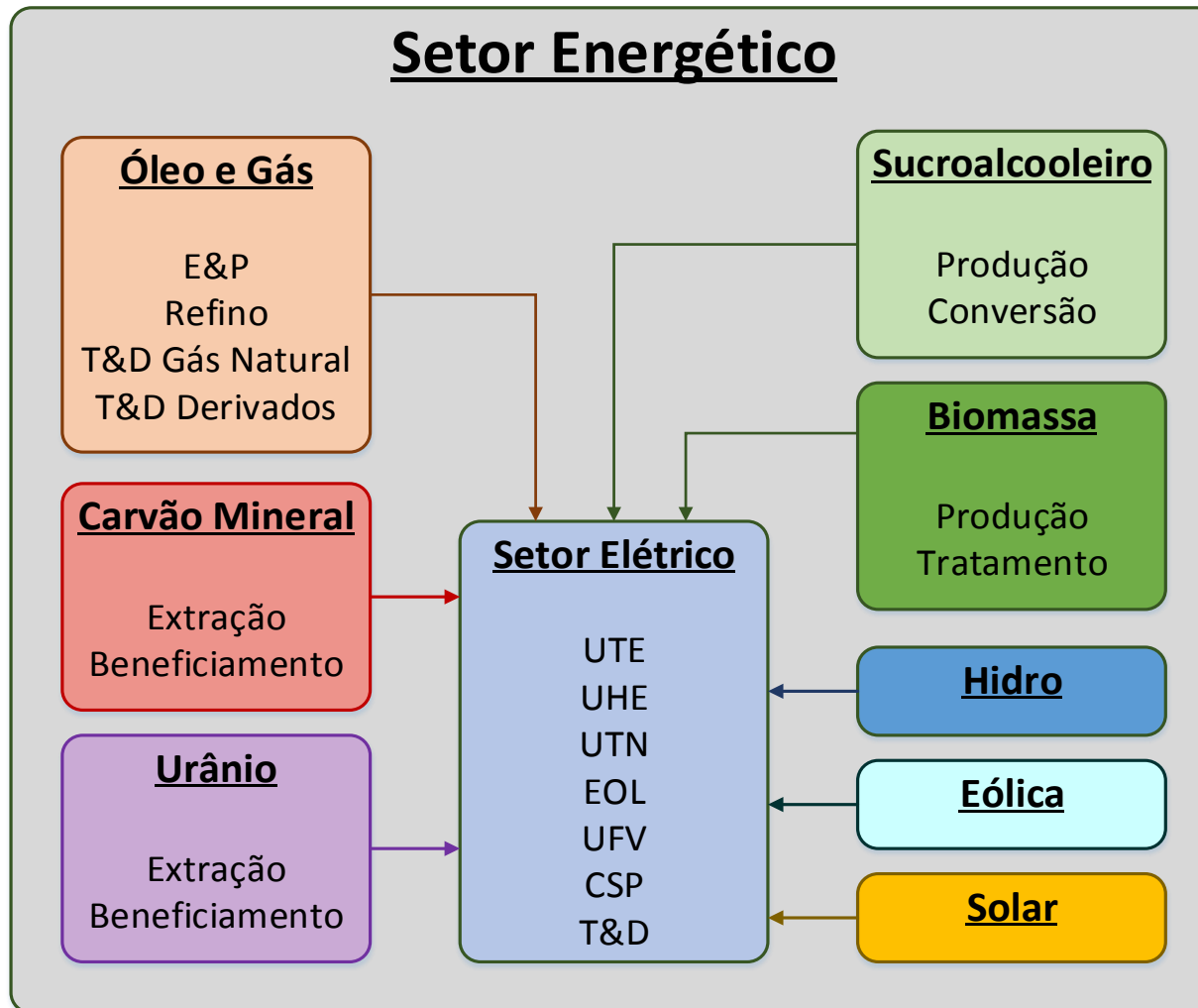


Conceitos: Setor Elétrico

- /// Contempla as atividades e tecnologias de:
 - /// ~~Extração~~
 - /// ~~Conversão~~ Geração
 - /// Armazenamento
 - /// ~~Transporte~~ Transmissão
 - /// Distribuição
- /// Setor Elétrico está contido dentro do Setor Energético



Setor Energético Brasileiro





Estrutura do Setor Energético

- /// O sistema energético brasileiro é fortemente dependente de energia renovável
- /// 46% da energia primária em 2013 (EPE, 2014):
- /// Hidroelétrica: maioria da oferta de eletricidade;
- /// Etanol: representa cerca de 14% do consumo de combustível no setor de transportes;



Estrutura do Setor Energético

/// Óleo e Gás

/// Carvão

/// Sucroalcooleiro

/// Biomassa

/// Setor Elétrico



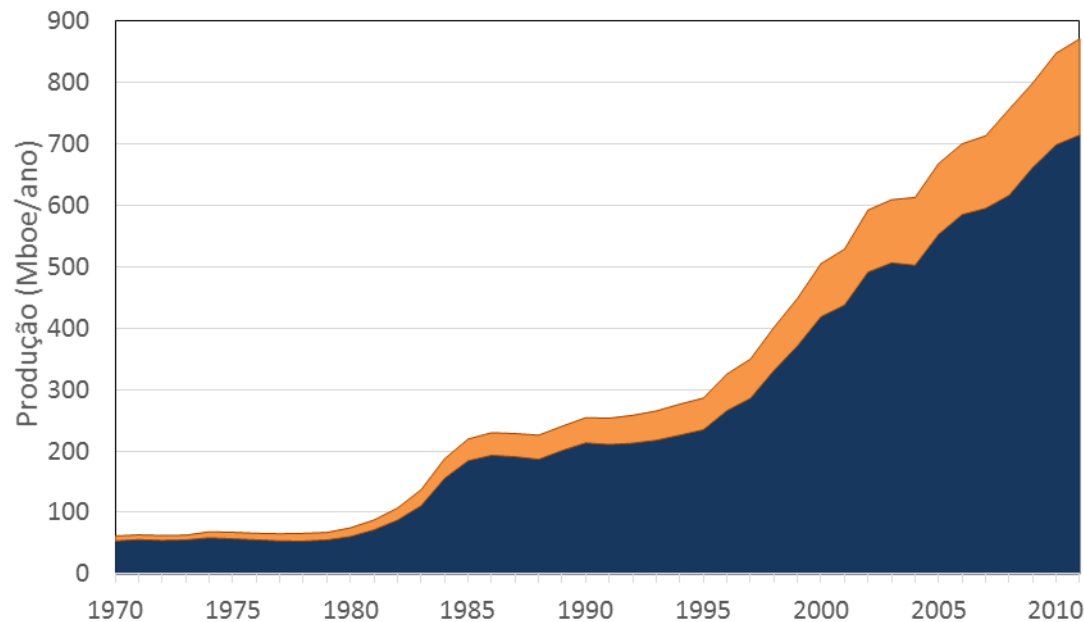
Setor Energético *Óleo e Gás*



Óleo e Gás: E&P

/// Produção em 2013

/// 738 Mbbl de óleo e 28 GNm³ de gás natural



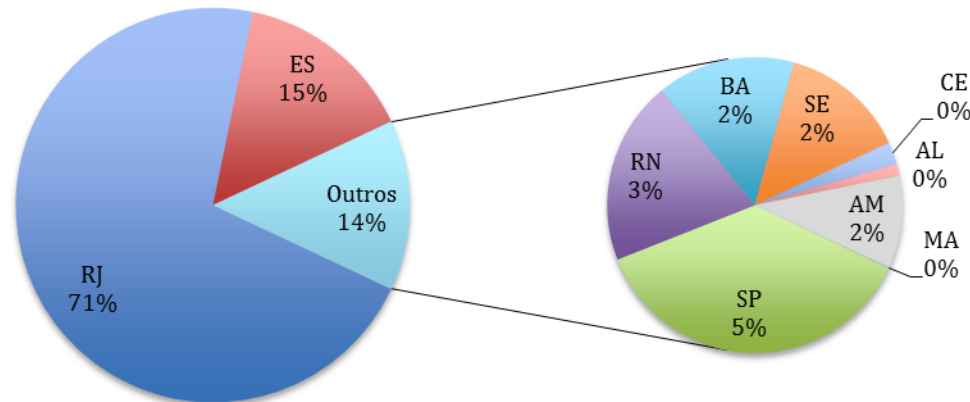
Fonte: EPE (2014) e ANP (2014)



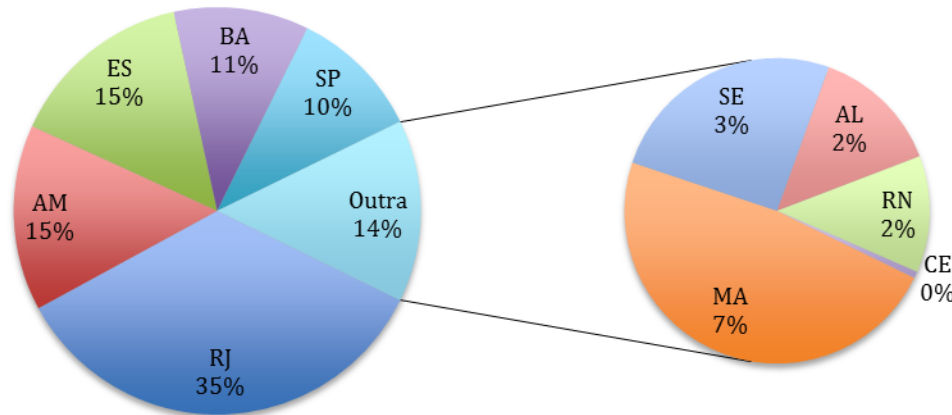
Óleo e Gás: E&P

/// Produção: distribuição regional

Óleo



Gás Natural



Fonte: ANP
(2014)



Óleo e Gás: E&P

/// Reservas de óleo

/// Provadas (2012): 15,2 Gbbl

/// Razão R/P:

$$/// \quad R/P = \frac{15,2 \text{ Gbbl}}{0,74 \frac{\text{Mbbl}}{\text{ano}}} = 20,5 \text{ anos}$$



Óleo e Gás: E&P

/// Pré-Sal

/// Recurso enorme

/// Reserva entre 70 e 100 Gbbl

/// Estimativa URR: 107 Gbbl (USGS)

/// 8.000m abaixo do nível do mar

/// 200 a 300km da costa

/// Gás associado ($40\text{Nm}^3/\text{bbl}$)

/// Teor de CO_2 varia entre 10%v e 40%v

→ CCS



Óleo e Gás: E&P

- /// Óleo: produção entre 5 e 6 Mbbl/dia de óleo em 2035
 - /// Saraiva (2013): 5.5 Mbbl/dia
 - /// WEO (2013): 6 Mbbl/dia em 2035
 - /// Produção anual de cerca de 2.1 Gbbl/ano
- /// Gás: produção de gás associado do pré-sal
 - /// WEO (2013): produção de 50 GNm³/ano em 2035
 - /// Império (2015): entre 20 e 35 GNm³/ano em 2035



Óleo e Gás: E&P

/// Consumo de Energia: 0.6 a 3.5 GJ/t_{óleo}

/// Profundidade, onshore/offshore, razão
gás/óleo, tipo de óleo

	Africa	Asia/ Australasia	Europe	FSU	Middle East	North America	South & Central America	Overall
2012								
% Onsite combustion	77.4	59.2	90.2	67.5	42.4	83.1	90.7	76.5
% Purchased	4.0	1.7	8.3	0.6	29.9	5.6	0.6	5.3
% Unspecified	18.6	39.2	1.6	32.0	27.7	11.3	8.7	18.3
Total energy consumption (GJ/t)	1.01	1.90	1.24	1.16	0.24	3.39	1.25	1.40
Production (10 ⁶ t)	490	319	376	113	383	292	75	2047

	2012	2011	2010
Onshore (GJ/t)	1.60	2.24	2.07
Offshore (GJ/t)	1.21	1.23	1.10
Unspecified (GJ/t)	1.47	1.30	1.65
Overall (GJ/t)	1.40	1.54	1.47

Fonte: OGP
(2012)



Óleo e Gás: E&P

/// Emissões de GEE

/// Fontes de emissão

/// Consumo de combustível (~50%)

/// Flare (~35%)

/// Vent e fugitivas (~15%)

/// Variam entre 8 e 35 kgCO_{2eq}/bbl (OGP, 2012; EPA, 2014)

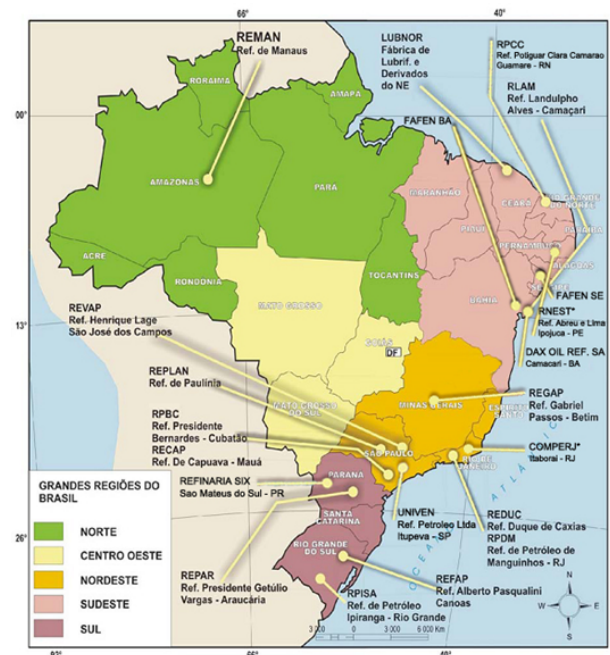
/// Petrobrás: 25-30 kgCO_{2eq}/bbl_{óleo} (Petrobras, 2013)



Óleo e Gás: Refino

/// Capacidade: 2,1 Mbbl/dia

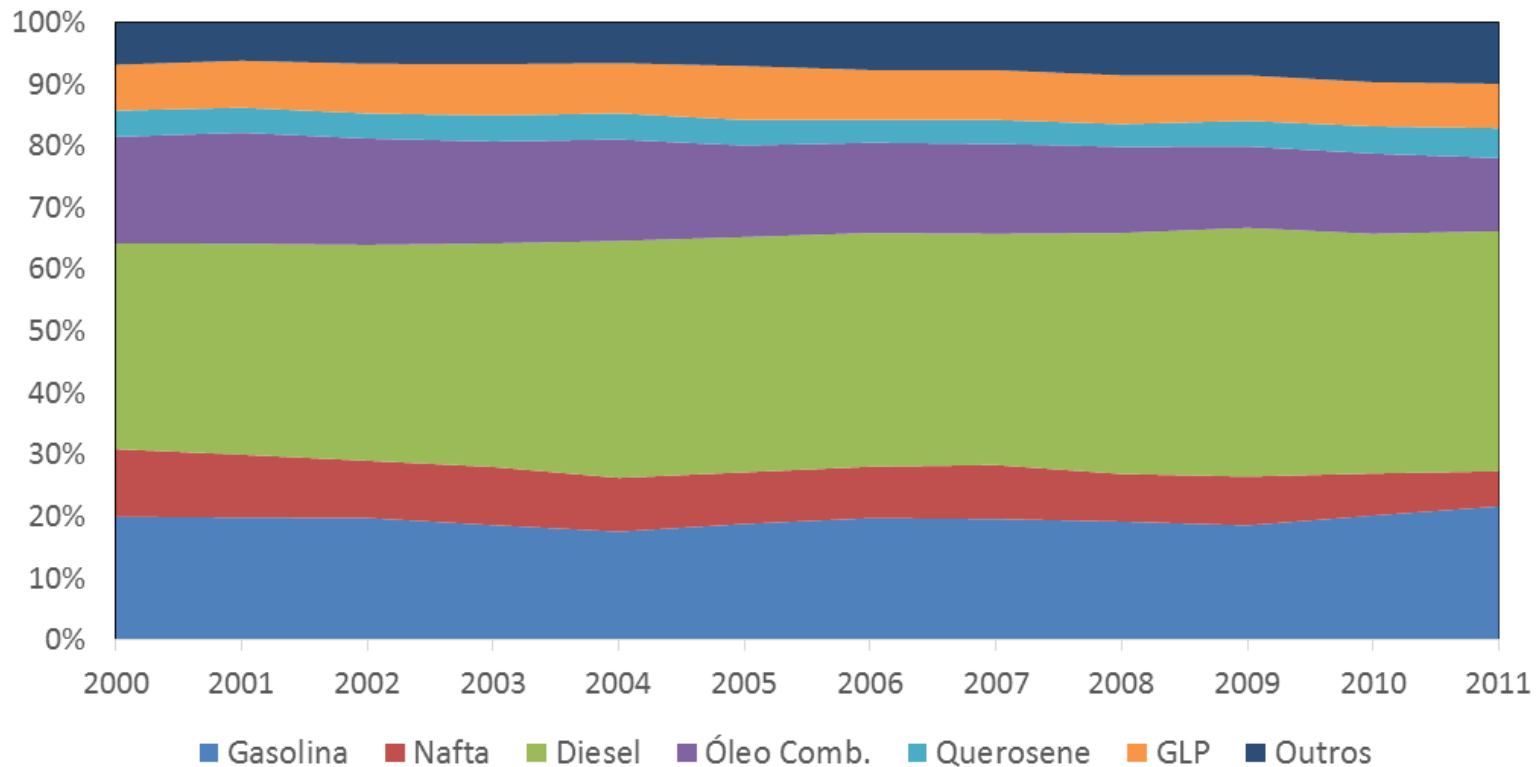
Refinaria	Município (UF)	Início de operação	Capacidade Nominal
			(kbbbl/dia)
Replan	Paulínia (SP)	1972	415
Rlam	São Francisco do Conde (BA)	1950	280
Revap	São José dos Campos (SP)	1980	252
Reduc	Duque de Caxias (RJ)	1961	242
Repar	Araucária (PR)	1977	208
Refap	Canoas (RS)	1968	201
Rpbc	Cubatão (SP)	1955	170
Regap	Betim (MG)	1968	151
Recap	Mauá (SP)	1954	53
Reman	Manaus (AM)	1956	46
RPCC	Guamaré (RN)	2000	38
Riograndense	Rio Grande (RS)	1937	17
Manguinhos	Rio de Janeiro (RJ)	1954	14
Univen	Itupeva (SP)	2007	9
Lubnor	Fortaleza (CE)	1966	8
Dax Oil	Camaçari (BA)	2008	2
Total			2106





Óleo e Gás: Refino

/// Perfil de produção de derivados



Fonte: ANP (2012)



Óleo e Gás: Refino

/// Hidrorefino em 2010

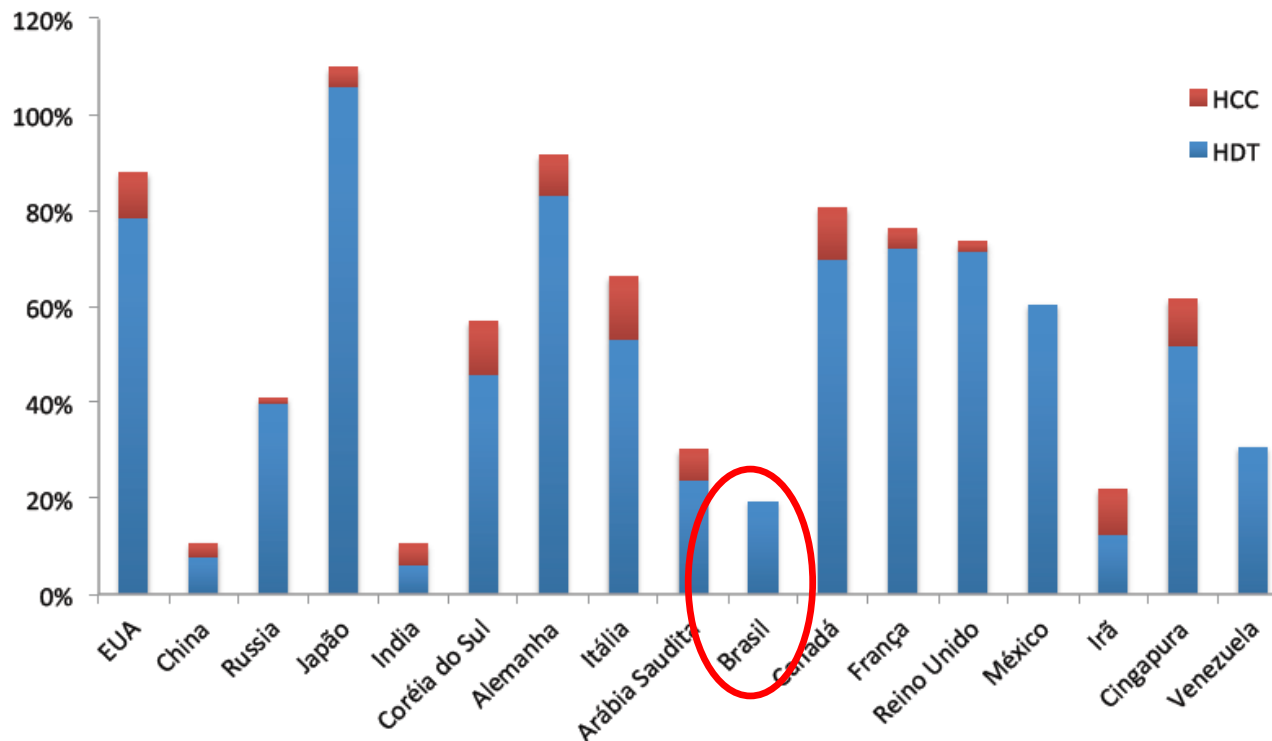


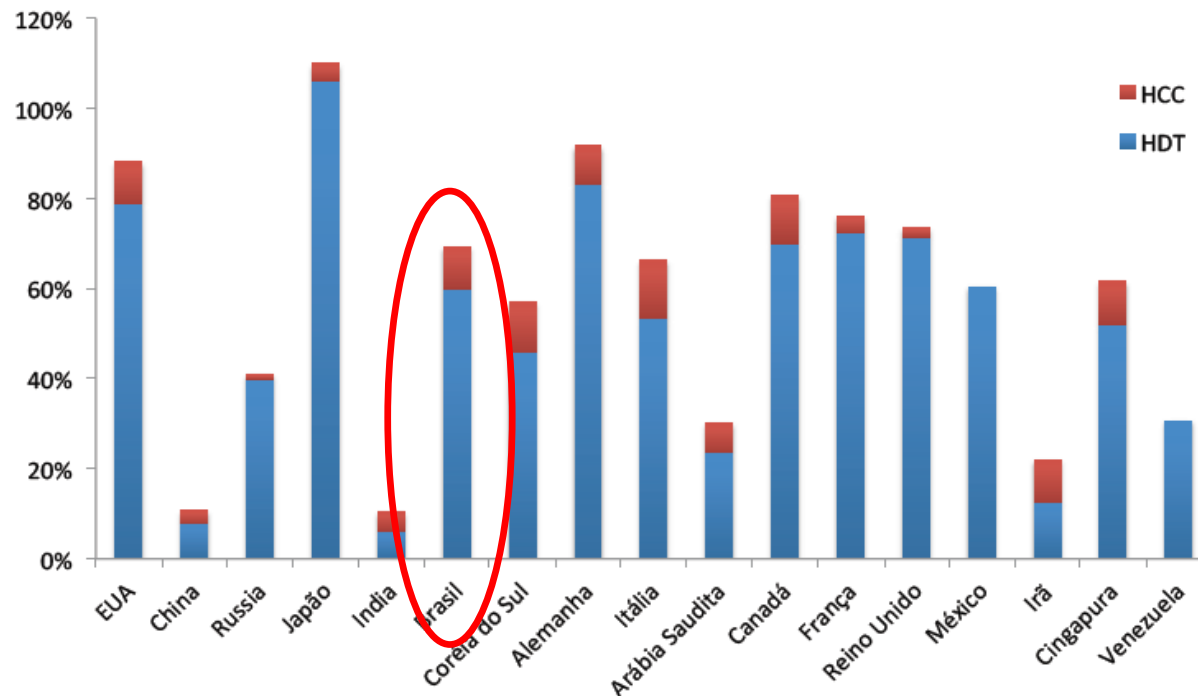
Figura 27 – Índice de hidrorefino dos principais países refinadores em 2010

Fonte: Bonfá (2011)



Óleo e Gás: Refino

/// Hidrorefino em 2020



**Figura 28 – Índice de hidrorefino dos principais países refinadores em 2010 comparados
ao Brasil em 2020**

Fonte: Bonfá (2011)



Óleo e Gás: Refino

/// Fontes de emissão de GEE

/// Consumo energético

/// Calor Direto + Vapor + Eletricidade

/// Estimativas de 4 a 15% de autoconsumo

/// Processo

/// Geração de Hidrogênio

/// Indiretas: eletricidade do grid



Óleo e Gás: Refino

/// Fontes de emissão de GEE

- /// Literatura apresenta fatores de 0,1 a 0,4 tCO_{2eq}/t de óleo processado
- /// Média global próxima de 0,22 tCO_{2eq}/t
- /// EUA: 0.33 tCO_{2eq}/t (EPA, 2014) e 2,7% das emissões de GEE
- /// EU: 0.27 tCO_{2eq}/t (EEA, 2014) e 3,2% das emissões de GEE
- /// Brasil: 0.25 tCO_{2eq}/t (MCTI, 2013; Petrobras, 2013) e 2,0% das emissões de GEE



Setor Energético

Carvão Mineral



Carvão Mineral: Nacional

/// Carvão Nacional

/// Reservas: sul do país

Estado	Lavrável	Reserva Medida (Mt)	Reserva Indicada (Mt)	Reserva Inferida (Mt)	Total (Mt)
Maranhão	-	1	2	-	3
São Paulo	-	1	1	1	3
Paraná	3	3	-	-	3
Santa Catarina	913	1.388	598	222	2.208
Rio Grande do Sul	1.571	5.158	10.006	6.306	21.469
Total	2.487	6.551	10.607	6.528	23.686

Fonte: Galvão
(2011)



Carvão Mineral: Nacional

/// Carvão Nacional

/// Produção de 8,6 Mt em 2013 (EPE, 2014)

/// R/P = 761 anos (Reserva Medida)

/// Baixa qualidade

/// Alto teor de cinzas: > 50%p

/// Baixo poder calorífico: 10-15 GJ/t

/// Destinado ao uso térmico



Carvão Mineral: Nacional

/// Carvão Nacional: fontes de emissões de GEE

/// Mineração: CH₄ e CO₂

/// Céu aberto: 0,3-2,0 m³CH₄/t (IPCC, 2006)

/// Subterrâneo: 10,0-25,0 m³CH₄/t (IPCC, 2006)

/// Beneficiamento

/// Céu aberto: 0,0-0,2 m³CH₄/t (IPCC, 2006)

/// Subterrâneo: 0,9-4,0 m³CH₄/t (IPCC, 2006)



Carvão Mineral: Importado

/// Carvão Importado

/// Carvão Vapor: maior qualidade

/// PCI: 25-30 GJ/t

/// Cinzas: 2-10%p

/// Importação de 7,5 Mt em 2013 (EPE, 2014)

/// Carvão Metalúrgico

/// Importação de 10,6 Mt em 2013 (EPE, 2014)



Setor Energético

Sucroalcooleiro



Sucroalcooleiro

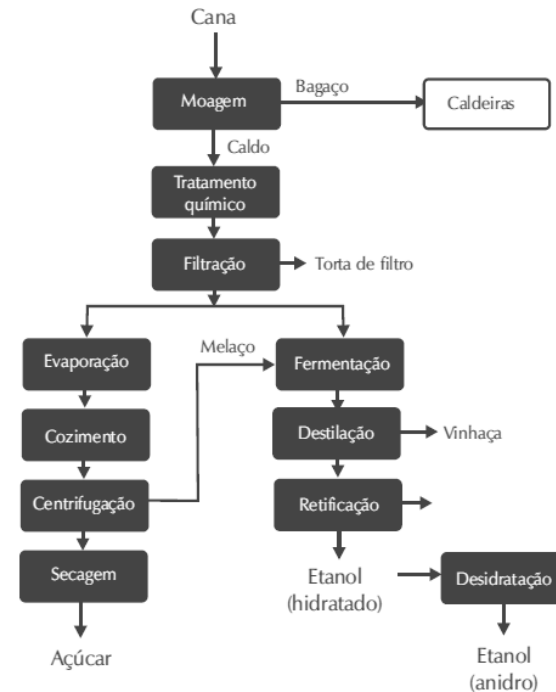
/// Importância histórica no Brasil

- /// 1975: Programa Nacional do Alcool (Pro-Álcool)
- /// Competição com a produção do açúcar
- /// Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar
 - /// Área plantada: 8,8 Mha (61% no Sudeste)
 - /// Produção: 658 Mt em 2013/2014 (CONAB, 2014)
 - /// Produtividade da cana: média nacional de 70-75 t/ha



Sucroalcooleiro: Etanol

/// Cadeia de Produção



/// Processo: fermentação dos açúcares





Sucroalcooleiro: Etanol

/// 376 unidades produtoras de etanol em 2014

/// Anexas: 230

/// Produção: 27,6 Mm³ em 2013

/// Anidro: 12,0 Mm³

/// Hidratado: 15,6 Mm³



Sucroalcooleiro: Eletricidade

- /// Processos demandam vapor e eletricidade
- /// Fonte de energia: Bagaço
 - /// Originalmente encarado como resíduo agrícola
 - /// Tecnologia tradicional: contrapressão de 22 bar
 - /// Autossuficiência
 - /// Aumento da pressão do vapor: excedente elétrico
 - /// Apenas cerca de 25% do bagaço (CONAB, 2011)



Sucroalcooleiro: Eletricidade

/// Capacidade Instalada: 5,6 GW

/// Consumo Próprio: 2,0 GW

/// Conectadas ao grid: 3,6 GW

/// Rendimento médio nacional: 135
kWh/t de bagaço

/// 36% exportados para o grid



Sucroalcooleiro: Bagaço e palha

- /// Potencial de aumento do excedente elétrico
- /// Melhores tecnologias
- /// Aproveitamento da palha
- /// Competição: etanol de segunda geração
- /// Eletricidade vs Etanol



Setor Energético *Biomassa*



Biomassa: Biodiesel

- /// Esforços históricos tímidos na década de 80
- /// 2004: Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel
 - /// Foco na agricultura familiar
- /// Blend: Aumento gradativo no diesel
 - /// B2, B3, B5, B6... B7(?)



Biomassa: Biodiesel

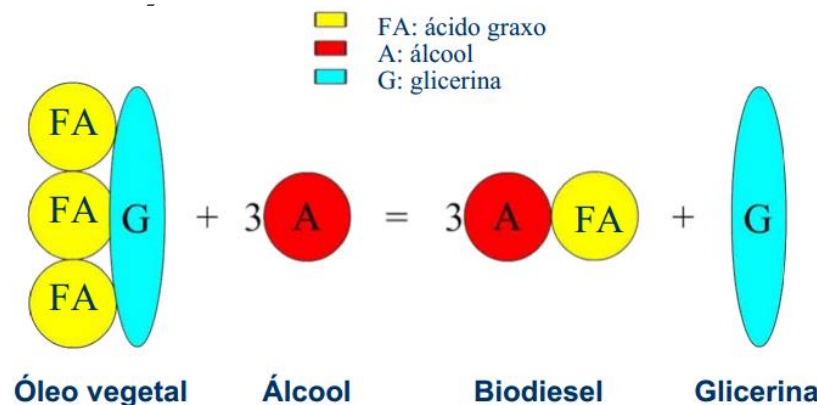
/// Processo convencional:
Transesterificação

/// Matéria-prima:

/// Oleaginosas, gordura ou óleo vegetal

/// Metanol ou Etanol

/// Produz



Fonte: Aranda
(2007)



Biomassa: Biodiesel

/// Principais fontes:

Matéria-Prima	Região				
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
Óleo de Soja	64,61%	67,17%	87,81%	42,86%	64,86%
Gordura Bovina	24,96%	12,60%	8,98%	52,26%	31,77%
Óleo de Algodão		20,12%	1,32%	1,89%	
Outros Materiais Graxos	10,43%		0,74%	0,62%	0,83%
Óleo de Fritura usado		0,11%	1,08%	2,37%	0,50%
Gordura de Porco			0,07%		1,94%
Gordura de Frango					0,10%
Óleo de Palma / Dendê					

Fonte: ANP
(2014)



Biomassa: Biodiesel

/// Produção de biodiesel no Brasil:

/// 2005: 736 m³

/// 2013: 2,9 Mm³

/// Capacidade Instalada: ~7,5 Mm³/ano

/// 61 unidades produtoras

/// Produção atende apenas à especificação
do blend diesel



Biomassa: Florestal

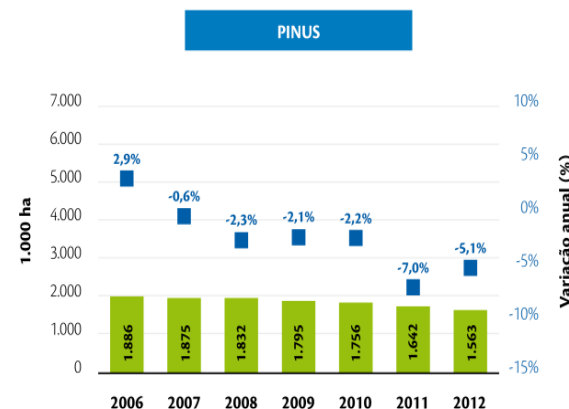
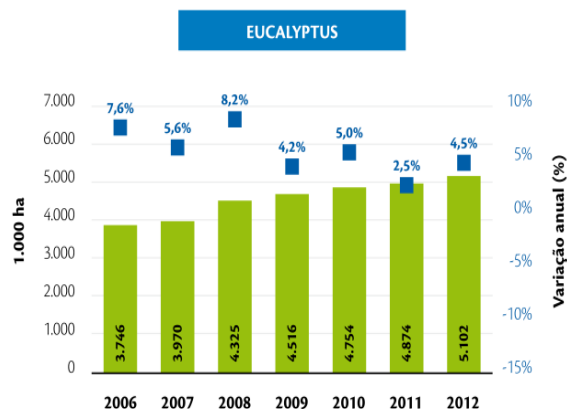
/// Floresta nativa enorme

/// 2ª maior área florestal do mundo com ~520 Mha

/// Floresta plantada: 6,7 Mha em 2012

/// Eucalyptus: 76,6%

///



Fonte: ABRAF
(2013)



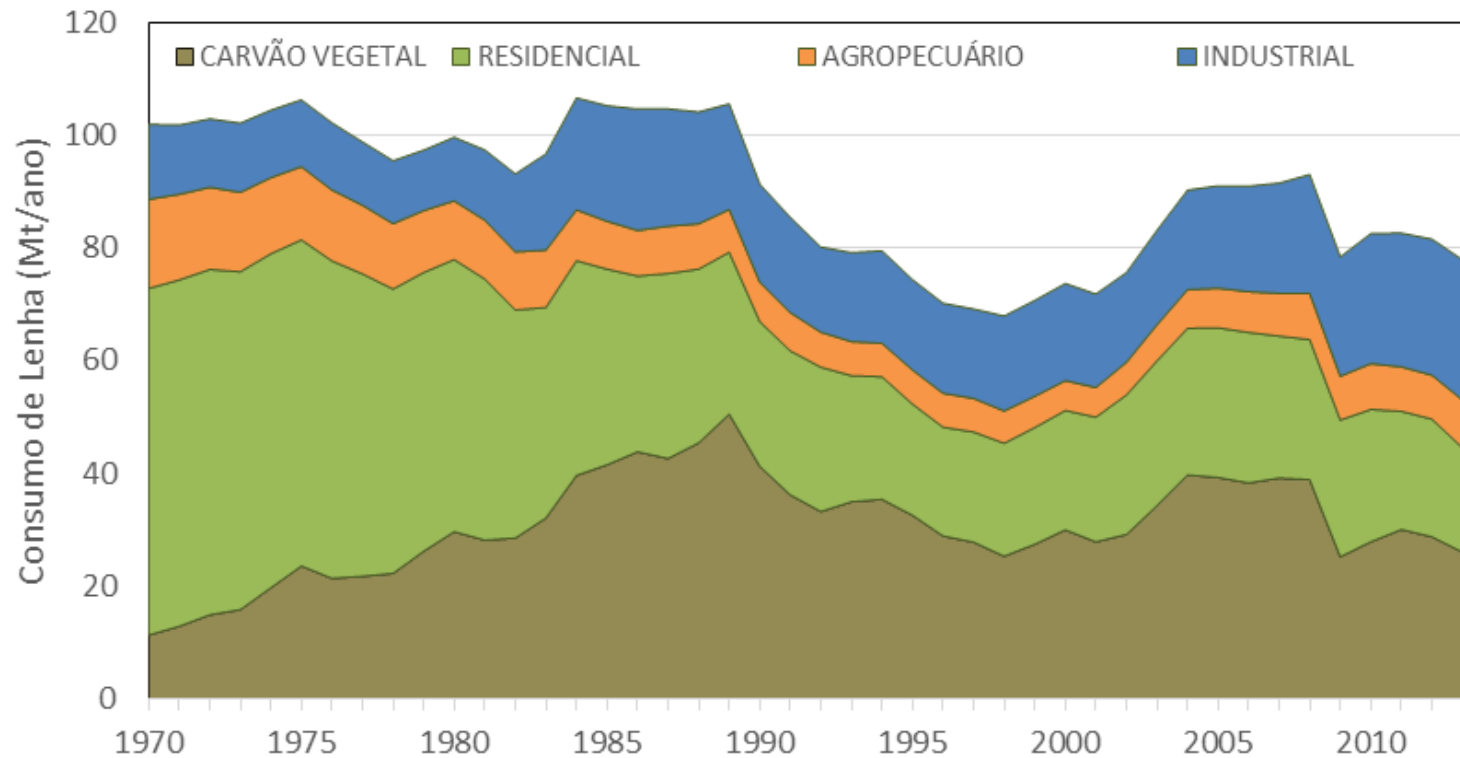
Biomassa: Florestal

- /// Condições favoráveis florestas plantadas comerciais de rápido crescimento
- /// Produtividade : $\sim 40 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{ano}$
- /// Produção para fins energéticos em 2013: 79,3 Mt (EPE, 2014)
- /// Carvão Vegetal: 32,8%
- /// Consumo Final: 65,8%
- /// Eletricidade: 1,4%



Biomassa: Florestal

/// Perfil de consumo



Fonte: EPE
(2014)



Biomassa

/// Questões Importantes

/// Origem da biomassa: desmatamento

/// Questões climáticas: Enorme potencial para redução de emissões de GEE

/// Alto potencial nacional para uma fonte limpa

/// Alimentação: Competitividade pela área

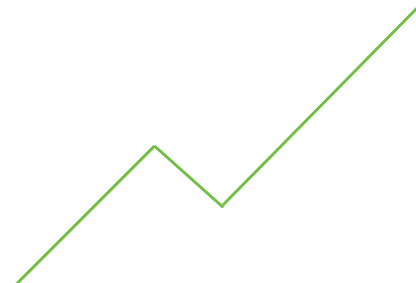
/// Atualmente não é relevante

/// Poderia ser no futuro?



Setor Energético

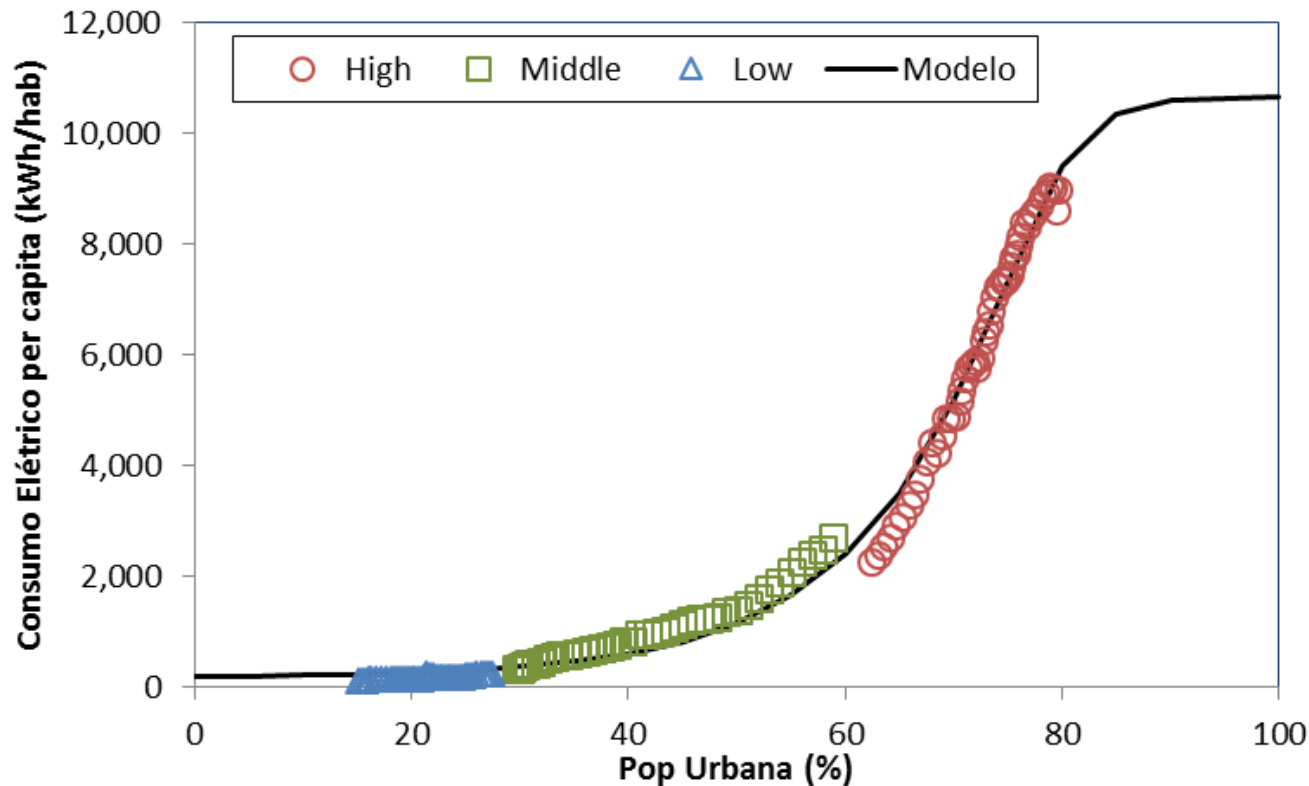
Setor Elétrico





Setor Elétrico: Perfil de consumo

/// Global: países por "income groups"

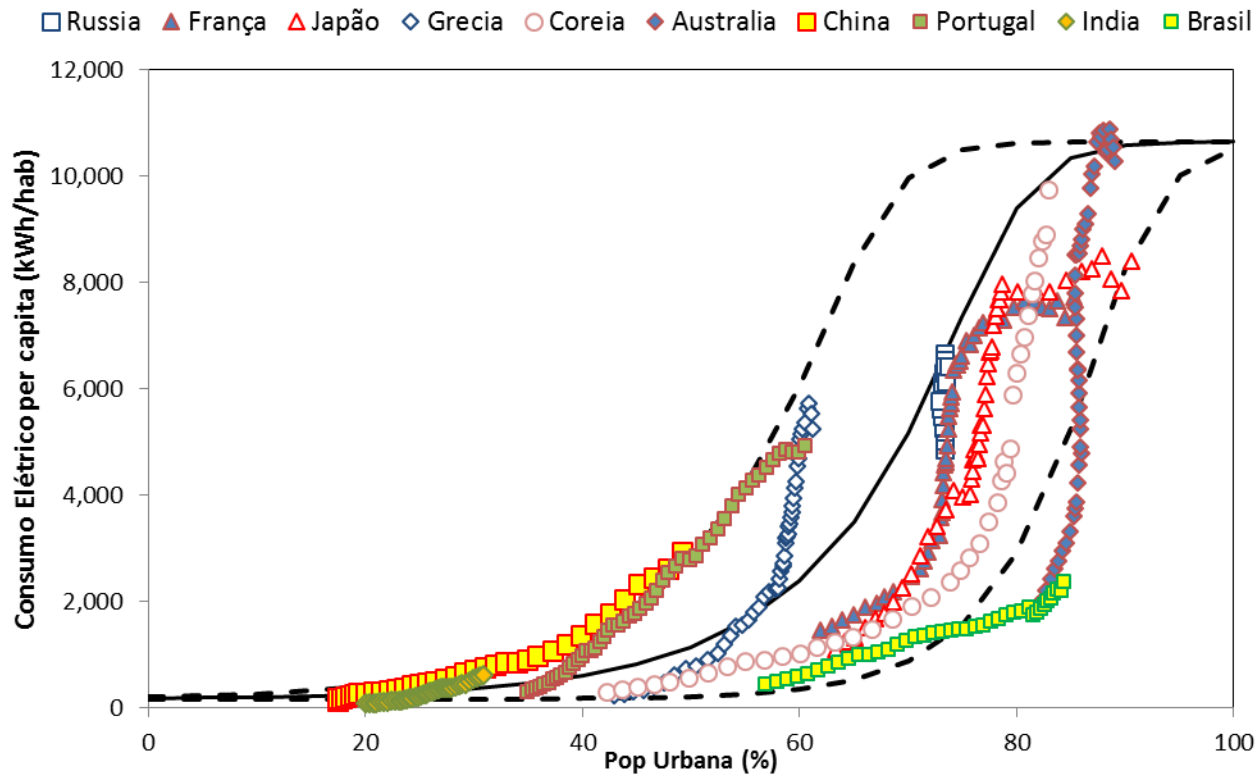


Fonte: WDB
(2014)



Setor Elétrico: Perfil de consumo

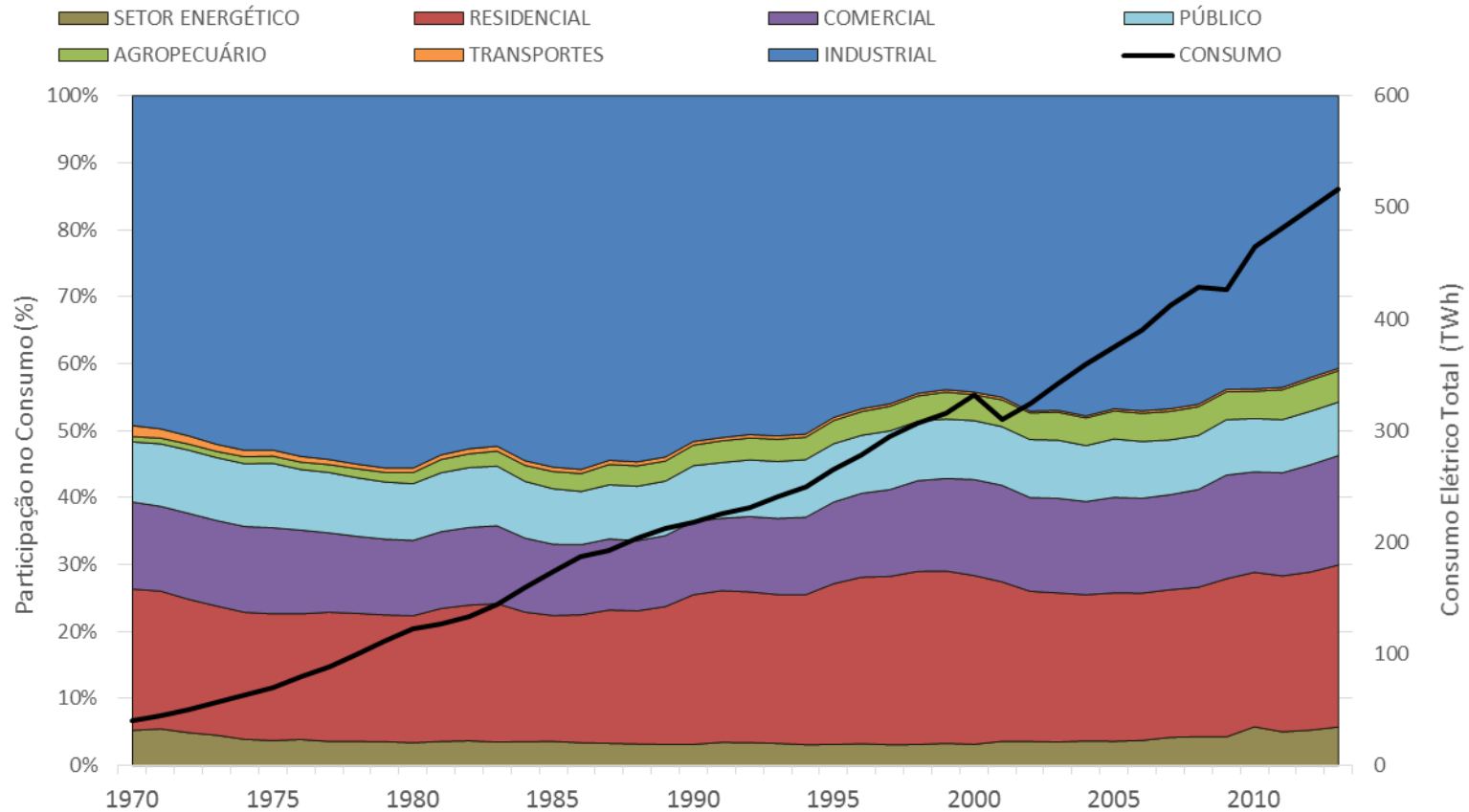
/// Global: países selecionados



Fonte: WDB
(2014)



Setor Elétrico: Consumo



Fonte: EPE
(2014)



Setor Elétrico: Geração

/// Capacidade Instalada: 138 GW (Aneel, 2015)

/// Importância da Hidroeletricidade

/// 66% da Capacidade Instalada

/// 75,7% da Geração elétrica em 2013

/// Decrescente:

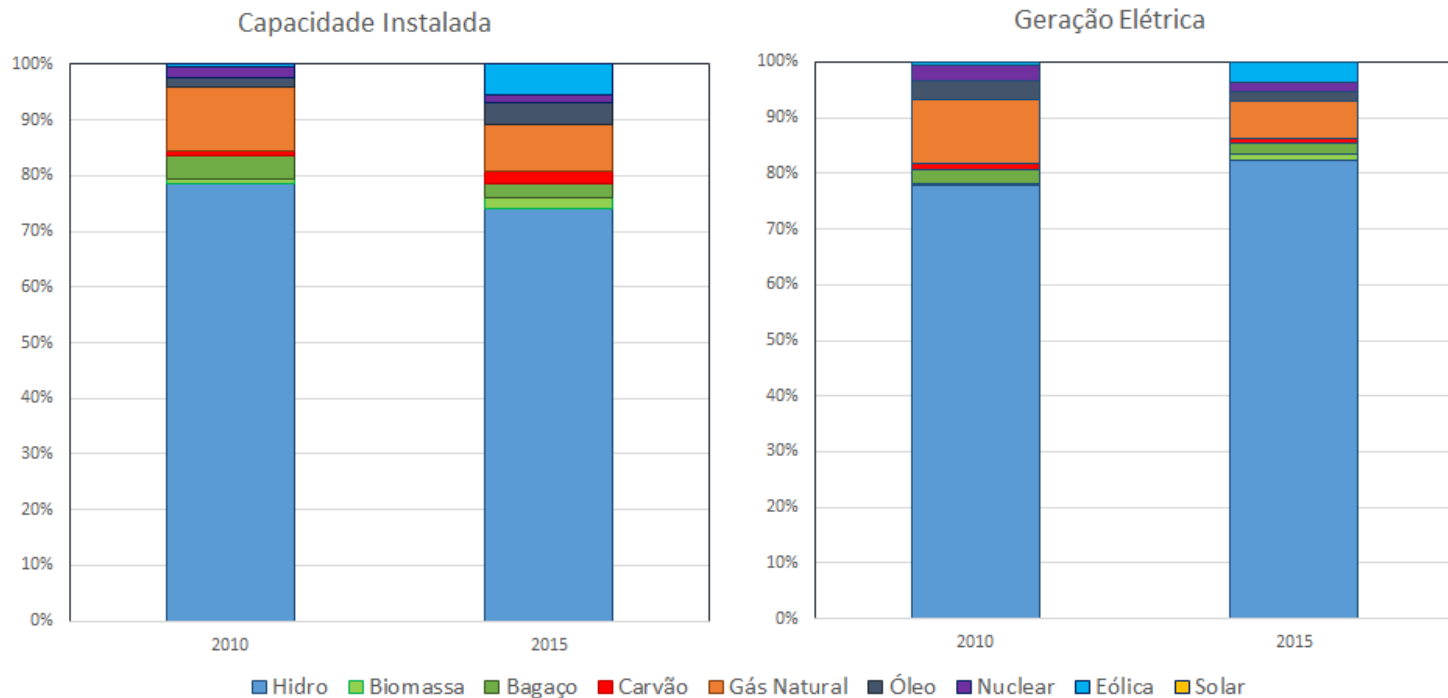
/// Histórico: 1995 (95,6%), 2010 (86,8%)

/// Cenários: 2030-2050 (73-77%)



Setor Elétrico: Geração

/// Estimativa de Capacidade e Geração (Lucena, 2015)





Setor Elétrico: Geração

/// Forte participação das energia renováveis

/// Atual: Hidro, Cana, Biomassa, Eólica

/// Enorme Potencial a serem aproveitados

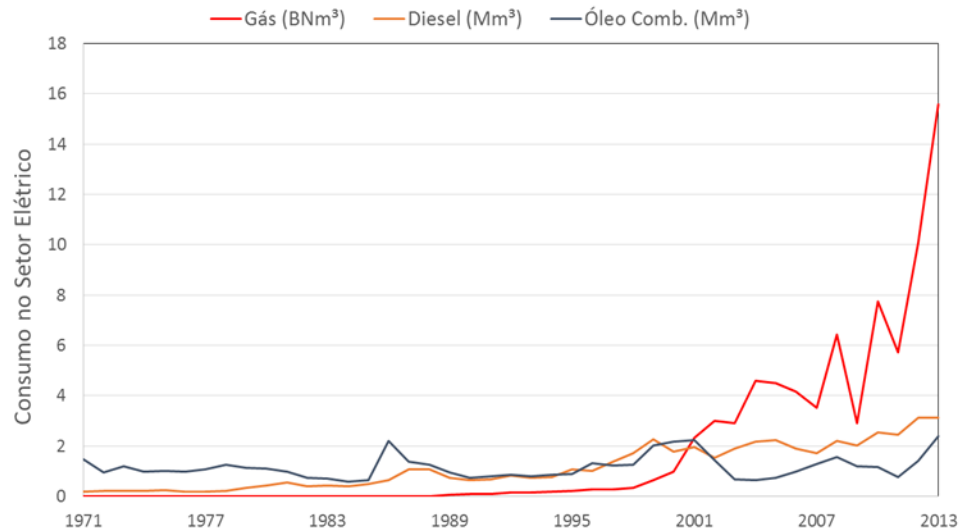
/// Hidro, Biomassa, Eólica, Solar PV/CSP

/// Sensibilidade às questões climáticas



Setor Elétrico: óleo e gás natural

/// Principais fontes fósseis no SE nacional



Combustível	Capacidades (MW)		
	Instalado	Outorga	Construção
Óleo (Diesel e Combustível)	7.988	2.048	0
Gás Natural	12.978	260	1.042

Fonte: ANEEL (2014)



Setor Elétrico: óleo e gás natural

/// Tecnologias maduras

/// MCI, Turbina a Gás, Turbina a Vapor

/// Baixa perspectiva de inovação tecnológica

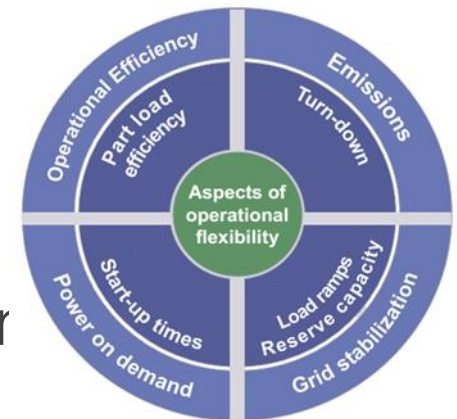
/// Trajetórias para mitigação

/// Aumento da eficiência

/// Biocombustíveis

/// Abandono da tecnologia

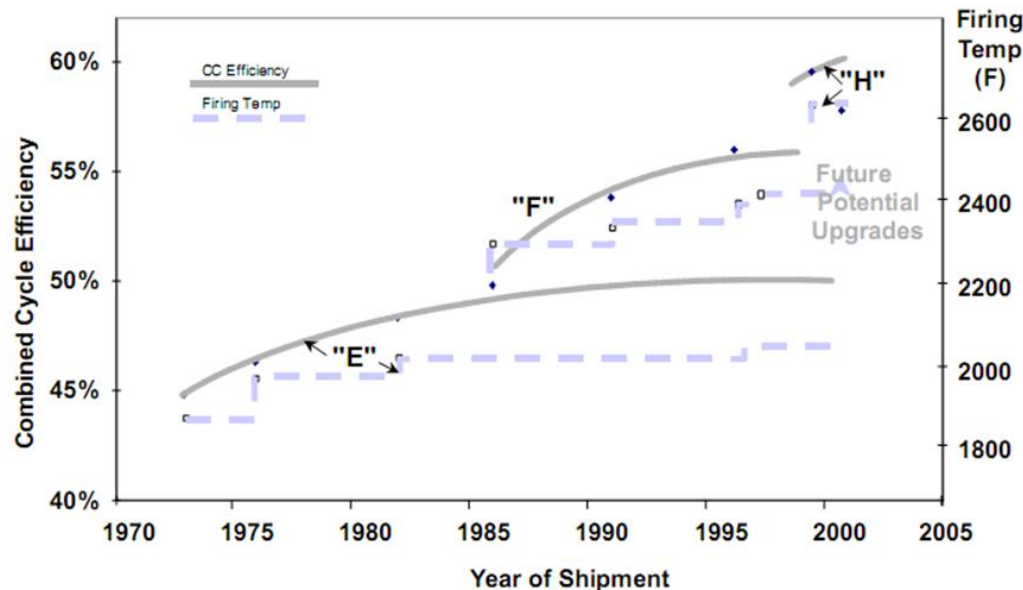
/// Importância : fixação de fontes interr





Setor Elétrico: óleo e gás natural

- /// MCI: substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis
- /// Biodiesel, Etanol, biogás
- /// Turbina a Gás: Turbinas que atingem maior temperaturas de chama
- /// Turbinas a hidrogênio: forte expectativa





Setor Elétrico: carvão mineral

/// Principal fonte de energia para o setor elétrico global

/// 41% da energia elétrica mundial

Geração Elétrica a Carvão		
África do Sul 93%	Polônia 87%	China 79%
Australia 78%	Cazaquistão 75%	Índia 68%
Israel 58%	Rep. Tcheca 51%	Marrocos 51%
Grécia 54%	EUA 45%	Alemanha 41%

Fonte: World Coal Assoc.
(2013)

/// Expansão continua

/// China: construção de cerca de 150 MW/dia



Setor Elétrico: carvão mineral

/// No Brasil: participação ainda é limitada

/// Capacidade Instalada:

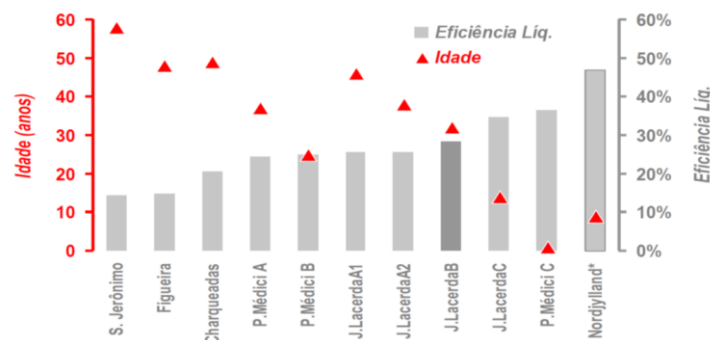
/// Carvão Nacional: 1,9 GW

/// Carvão Importado: 1,8 GW

/// Maior eficiência: ~42%

/// Forte perspectiva de expansão no médio/longo prazo

/// Aumentariam significativamente as emissões do setor



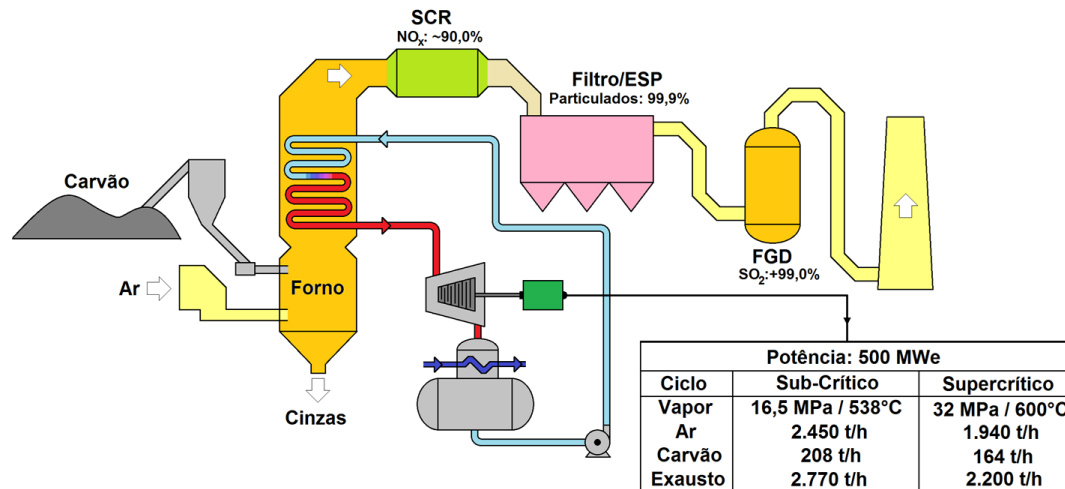


Setor Elétrico: carvão mineral

/// Tecnologias

/// Carvão Pulverizado: 39%-45% (PCI)

/// Ciclo subcrítico vs Ciclo Supercrítico



Fonte:
Rochedo
(2011)

/// Leito Fluidizado: 38% (PCI)



Setor Elétrico: Nuclear

- /// Forte expectativa
 - /// Grande densidade energética
 - /// Grandes reservas espalhadas pelo mundo
- /// Atualmente muito controversa
 - /// Risco de acidente e proliferação
 - /// Impactos ambientais de longo prazo
 - /// Incerteza de custos da cadeia
 - /// Opinião pública



Setor Elétrico: Nuclear

- /// Programa na década de 1970

- /// Reserva nacional: 309 kt

 - /// 5ª Maior reserva mundial

- /// Produção anual: ~300 t/ano

 - /// R/P: >1.000 anos

- /// Brasil ainda não domina toda a cadeia de produção do elemento combustível

 - /// Conversão em UF_6

 - /// ARAMAR: Planta piloto de 40 t/ano



Setor Elétrico: Nuclear

/// Existem 2 reatores em operação e 1 em construção

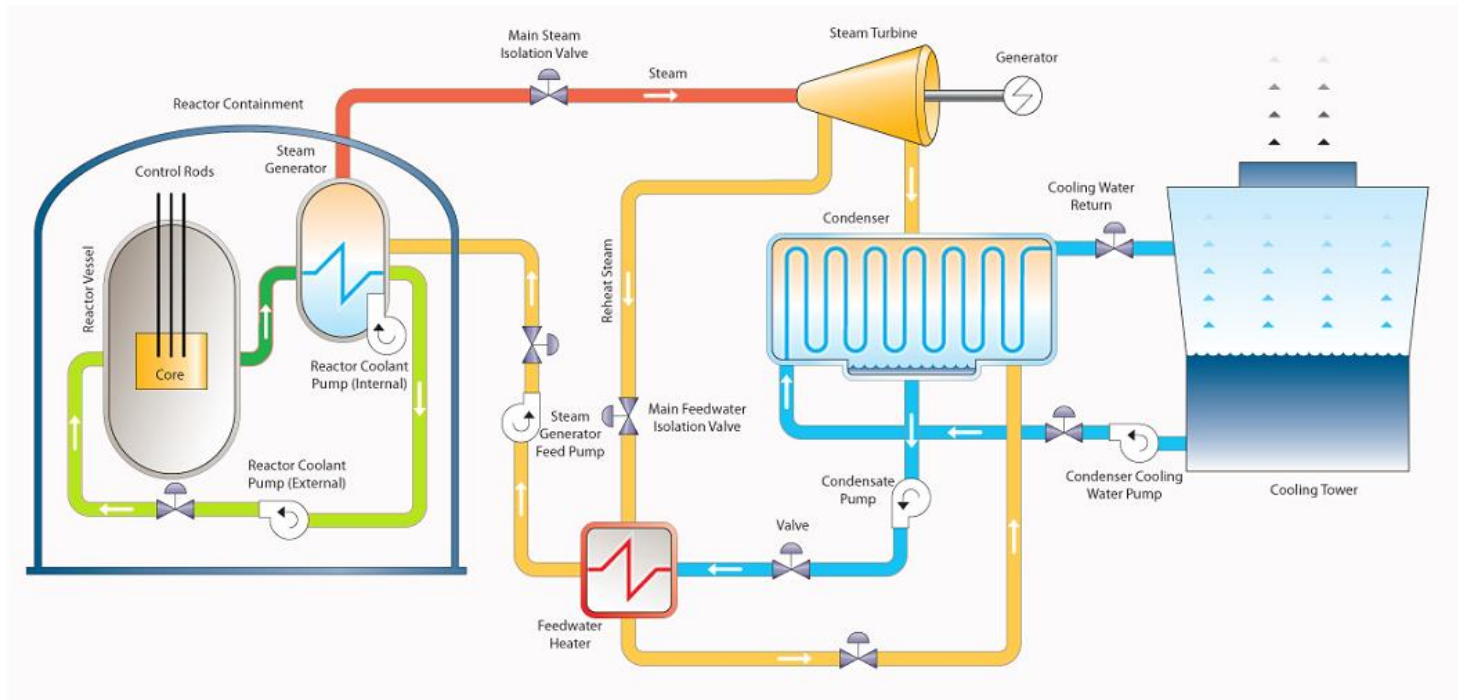
Nome	Angra I	Angra II	Angra III
Operador	Eletrobras Eletronuclear S.A.		
Status	Operação	Operação	Construção
Tecnologia	PWR	PWR	PWR
Modelo	2-loop WE	PRE KONVOI	PRE KONVOI
Capacidade Elétrica (MW)	640	1350	1350
Capacidade Térmica (MW)	1882	3764	3765
Construção	1/5/71	1/1/76	1/6/10
Conexão ao grid	1/4/82	21/7/00	-

Fonte: IAEA, 2014



Setor Elétrico: Nuclear

/// Tecnologia: Pressurized Water Reactor (PWR)



Fonte: Adaptado de FlowServe (2014)



Setor Elétrico: Hidroelétricas

- /// Principal fonte de energia do setor elétrico nacional
- /// Capacidade Instalada (ANEEL, 2014):
 - /// UHE Grande: 75,913 GW (59 usinas)
 - /// UHE Média: 10,7 GW (94 usinas)
 - /// UHE Pequenas: 5,4 GW (958 usinas)
- /// Operação: sistema hidrotérmico
 - /// Brasil, Noruega, Canadá, etc



Setor Elétrico: Hidroelétricas

/// Potencial Hidroelétrico: SIPOT (Eletrobras, 2014)

/// Estimado: 46,9 GW

/// Inventário: 70,9 GW

/// Viabilidade: 16,4 GW

/// Projeto: 6,7 GW

/// Construção: 14,2 GW

/// Operação: 91,5 GW



Setor Elétrico: Biomassa

- /// Apenas 9% da capacidade instalada
- /// Bagaço é a fonte mais importante
 - /// Seguido do Licor Negro (Papel e Celulose)
- /// Tecnologias Disponíveis
 - /// Combustão em Leito Fixo
 - /// Combustão em Leito Fluidizado
 - /// Combustão Pulverizada
 - /// Incompatibilidade: eficiência/custo e a escala do setor



Setor Elétrico: Eólica

- /// Grande avanços nos últimos anos
 - /// Aprendizado tecnológico internacional
 - /// 2010: < 0,5 GW
 - /// 2015: 5,2 GW (Operação) e 0,4 GW (Construção)
- /// Brasil ainda conta com potencial enorme
 - /// Onshore: Estimativas de 300 GW
 - /// Offshore: estimativas de 60 GW (<10 km da costa)



Setor Elétrico: Eólica



Ceará

Kopenhagen



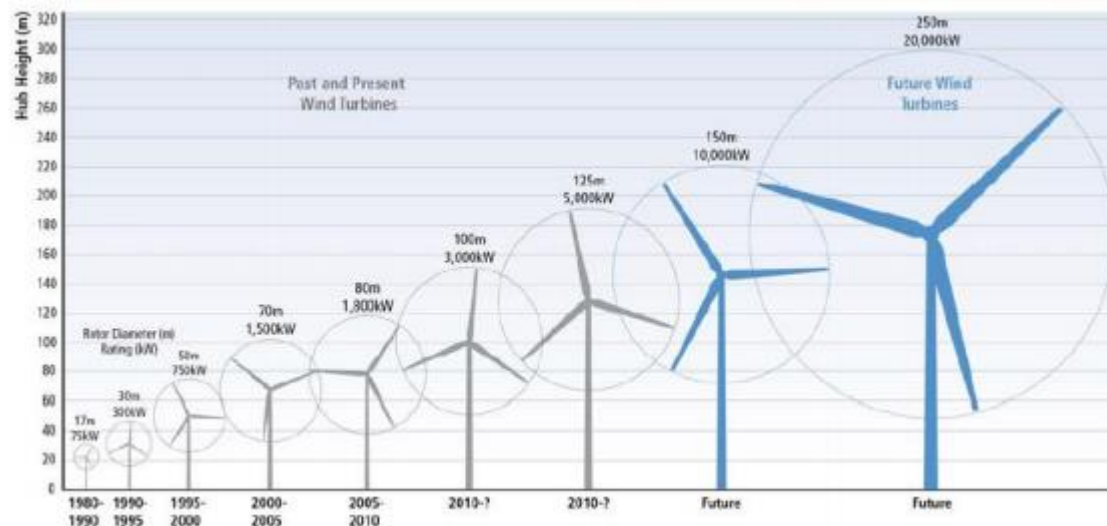


Setor Elétrico: Eólica

/// Tecnologia de aerogeradores

/// Potência: 0,5 a 3,0 MW

/// Altura: 50 a 100m são convencionais





Setor Elétrico: Solar PV

- /// Mundo: Capacidade Instalada é de 139 GW
 - /// EU: 59%
- /// Custo elevado para geração centralizada
- /// Grande diferencial: geração distribuída
 - /// Pode impulsionar a tecnologia no Brasil
- /// Grande redução de custo nos últimos anos
 - /// Aprendizado e Efeito China



Setor Elétrico: Solar PV

/// Capacidade Instalada no Brasil

/// Maioria de forma distribuída em sistemas isolados

/// Centralizado: 19,2 MW em 317 usinas em operação

/// Construção: duas usinas com potência total de 58,5 MW

/// Tecnologia

	Eficiência comercial do módulo (%)	Eficiência máxima de laboratório (%)	Capacidade instalada em 2012 (MWp)	
Mc-Si	13 – 19	25	~40.000	Células de primeira geração
Pc-Si	11 – 15	20	~40.000	
r-Si	4 – 8	20	-	
a-Si	7 – 9	10	< 4.000	Células de segunda geração
CdTe	10 – 11	18	< 3.000	
Cl(G)S	7 – 12	20	< 2.000	
GaAs	-	29	< 2.000	
InGaP/GaAs/InGaAs	-	38		Células de terceira geração
CPV	20 – 25	40	165	
OPV	~4	11	30	
DSSC	-	12	5	



Setor Elétrico: Solar CSP

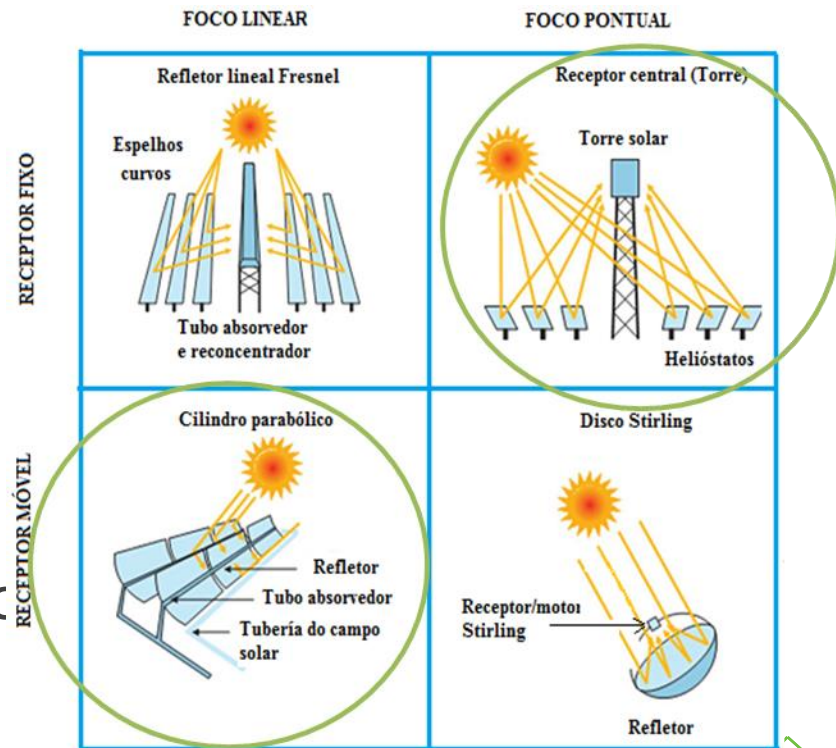
/// Concentrated Solar Power

/// Uso de espelhos para atingir temperaturas entre 200 e 2.000 °C

/// Típico: 500 a 800 °C

/// Ainda possui alto cu

/// Espaço para desenv





Setor Elétrico: Solar CSP

- /// Estimativa de Potencial CSP Brasileiro (Burgi, 2013)
- /// Cilindro Parabólico s/ HTS: 412,8 GW e 602 TWh
- /// Cilindro Parabólico HTS 6h: 203,3 GW e 538 TWh
- /// Torre com HTS 7,5h: 97,7 GW e 303 TWh
- /// Possibilidade de hibridização: back-up térmico
- /// Caso especial: CSP Híbrida com Jurema Preta



Fontes de Emissão de GEE



Fontes de Emissão de GEE

/// Estimativas de emissões de GEE

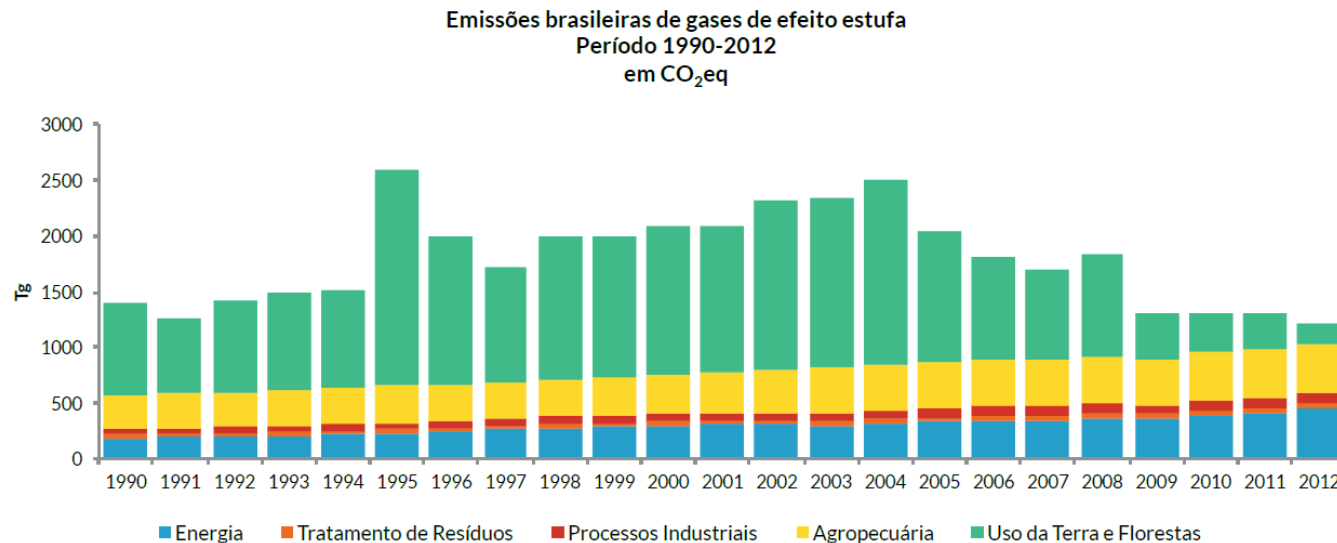


Figura I – Emissões de gases de efeito estufa no Brasil, por setor, de 1990 a 2012 (Tg = milhões de toneladas).

Fonte: MCTI (2014)



Fontes de Emissão de GEE

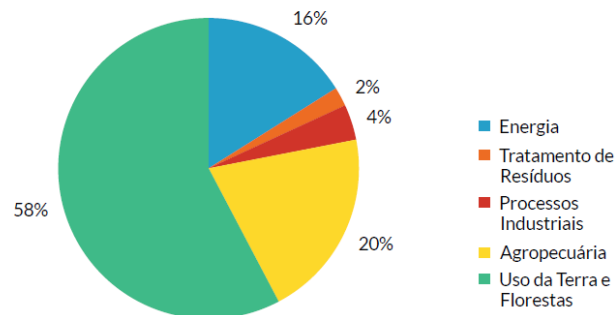
/// Estimativas de emissões de GEE

/// Uso do solo: importância histórica

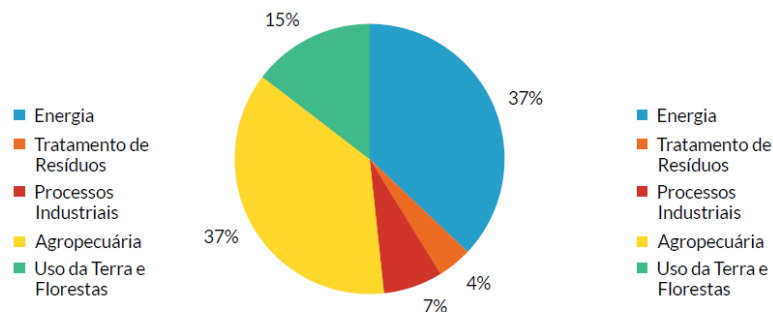
/// Energia: perspectiva de se tornar maior emissor no longo prazo

/// Energia: Setor Energia + Setores de Consumo Final

Emissões CO₂eq em 2005



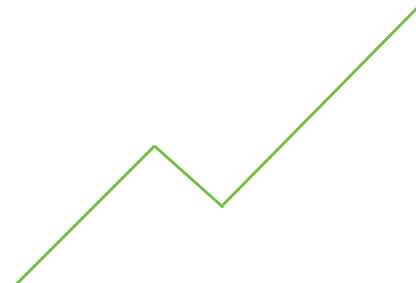
Emissões CO₂eq em 2012



Fonte: MCTI
(2014)



Medidas de Abatimento





Medidas de Abatimento: óleo e gás natural

/// Produção de Óleo e Gás

/// Redução de Emissões Fugitivas

/// Selagem de equipamentos rotativos

/// Redução de Flare

/// Recuperação de gases

/// Redução do consumo



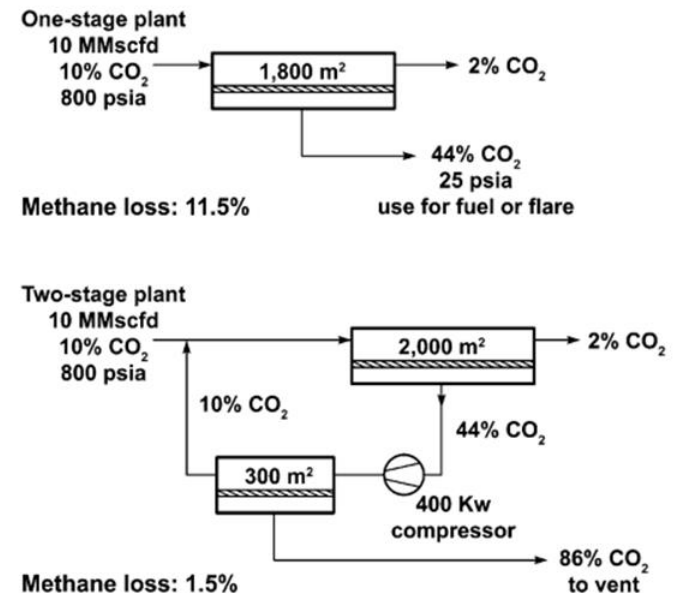
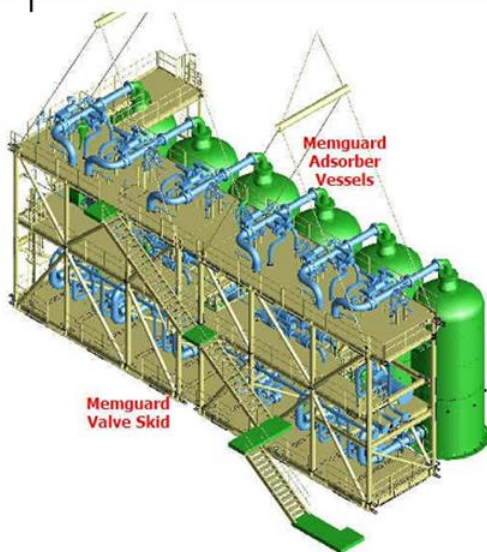
Medidas de Abatimento: óleo e gás natural

/// Produção de Óleo e Gás

/// Caso especial: CCS no Pré-Sal

/// Alto teor de CO₂ no gás associado exige processamento offshore

/// Tecnologia: membrana





Medidas de Abatimento: óleo e gás natural

/// Refino de petróleo

- /// Substituição de combustível (ex: óleo combustível)
- /// Redução do consumo específico de utilidade de cada unidade
 - /// Vapor: melhorias em isolamento, recuperação de condensado, integração energética, substituir ejetores por bomba de vácuo, etc
 - /// Calor: substituir queimador, controle de ar, pré-aquecimento de ar, reduzir formação de coque, etc
 - /// Eletricidade: motores com ASD/VSD, controle avançado, integração
 - /// Hidrogênio: novos catalisadores, Unid. Recuperação de H₂



Medidas de Abatimento: óleo e gás natural

/// Refino de petróleo

/// CCS: opções de baixo a alto custo

- /// Craqueamento Catalítico Fluido (FCC): fonte de CO₂ com alta concentração
- /// Geração de Hidrogênio: fonte de CO₂ com alta concentração e pressão
- /// Fornos e Caldeiras: menor concentração e diversas fontes dispersas
- /// Alta penalidade energética: aumento do consumo energético
- /// Alto custo



Medidas de Abatimento: carvão mineral

/// Mineração Subterrânea

- ///* Degasificação: recuperação de gases com alto teor de metano
- ///* Degas. Avançada: recuperação de gases com menor teor de metano
- ///* Oxidação térmica ou catalítica: para baixas concentrações de metano



Medidas de Abatimento: biomassa

- /// Biodiesel

- /// Novos processos

- /// Hidrotratamento

- /// Floresta Plantada

- /// Aumento da eficiência de conversão

- /// Cana

- /// Redução do consumo energético de produção de açúcar e etanol

- /// Sistemas de conversão de bagaço que aumentem o excedente elétrico



Medidas de Abatimento: Setor Elétrico

/// Fontes fósseis

/// Aumento da eficiência de conversão

/// Substituição ou blend com biocombustíveis

/// Nuclear e Fontes Renováveis

/// Por si só, já podem ser consideradas medidas de abatimento

/// Enorme potencial energético

/// Espaço para avanços tecnológicos, principalmente em biomassa, eólica e solar



Medidas de Abatimento: Setor Elétrico

- /// As medidas anteriores se referem à oferta de energia
- /// Mas e quanto à demanda de energia?
 - /// Esforços setoriais para redução do consumo promovem impactos no setor energético
- /// Ex. 1: Setor Industrial A e B identificam uso de gás natural como medida para reduzir emissões
 - /// Aumento pela competição do gás natural na Indústria
 - /// Pode reduzir preço do óleo combustível
 - /// Deslocar óleo para outros setores (ex: Setor Elétrico)
 - /// A oferta de gás pode não ser suficiente: Abatimento portanto não eficaz



Medidas de Abatimento: Setor Elétrico

- /// Ex. 2: Setor Industrial A identifica que eletrificação é medida custo-efetiva para reduzir emissões
- /// Promove pressão no Setor Elétrico: aumento da expansão
- /// Expansão no médio/longo prazo é dada por fontes fósseis
- /// Efeitos:
 - /// 1) Transferência de emissões para o Setor Elétrico: pode não ser efetivo em reduzir as emissões totais
 - /// 2) Aumento do fator de emissão do grid: reduz o potencial de abatimento, em relação à eletricidade mais limpa



Custo e Potencial de Abatimento

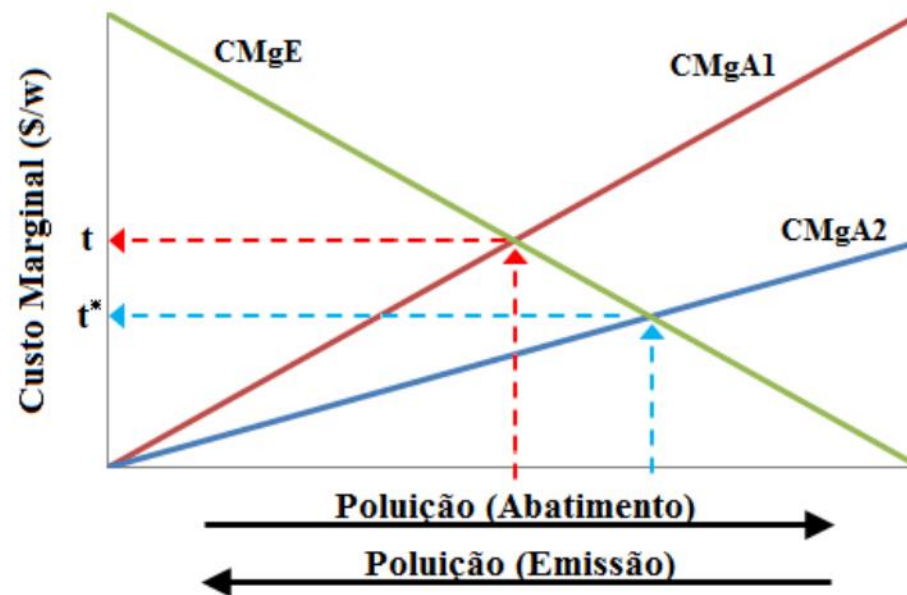


Custo e Potencial de Abatimento

/// Conceito econômico: Nível Ótimo de Poluição

/// Equilíbrio entre Custo Mg Externo e Custo Mg Abatimento

$$CM_{gE}(Q) = CM_{gA}(Q)$$





Custo e Potencial de Abatimento

/// Custo de Abatimento

- /// É o custo de uma opção tecnológica, ou conjunto de opções tecnológicas, que atuam de forma a reduzir a emissão de um poluente
- /// Análogo: LCOE ou custo nivelado de eletricidade
- /// Curva de custo de abatimento
 - /// Representação do esforço econômico gradativo envolvido na redução de um poluente



Custo e Potencial de Abatimento

/// Potencial de Abatimento

- /// Quantidade de emissão de um poluente passível de redução por um *set* de tecnologias
- /// Pode ser individual: 1 opção
- /// Pode ser setorial/nacional/regional: conjunto de opções



Custo e Potencial de Abatimento

/// Cálculo do Custo e Potencial

/// 1) Elaboração de uma linha de base

/// Compreende em estimar os custos e emissões na ausência de medidas de abatimento em avaliação

/// 2) Elaboração da linha de mitigação

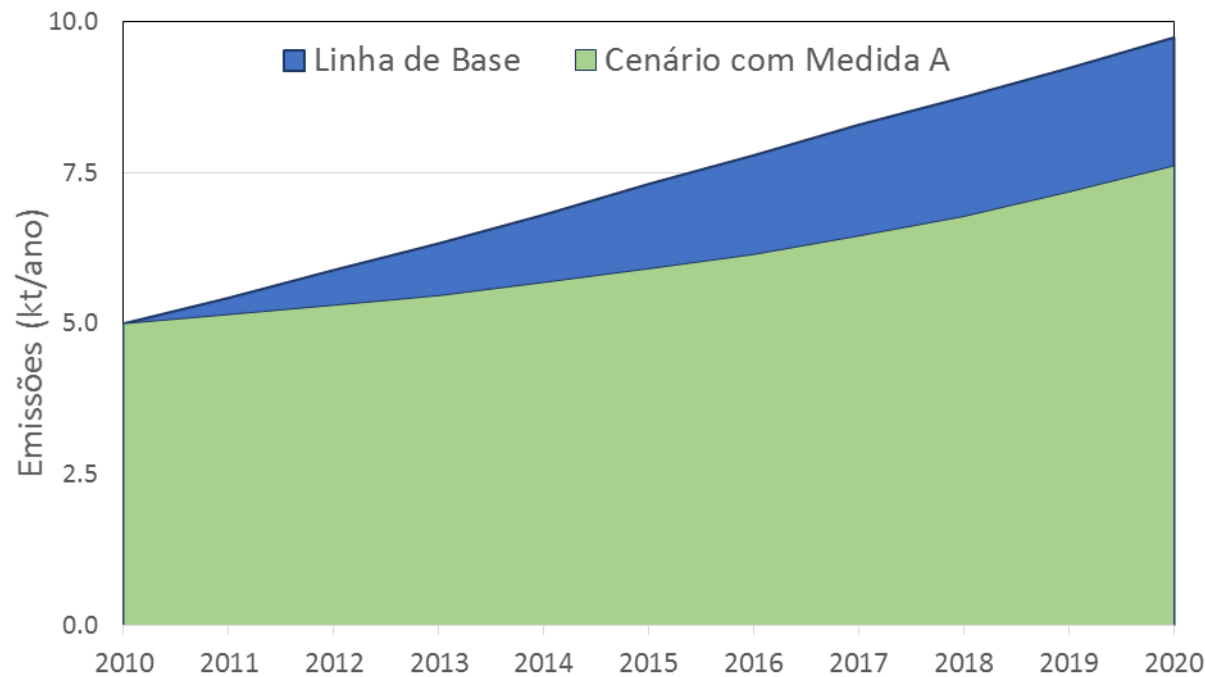
/// Compreende em estimar os custos e emissões de um *set* de tecnologias mitigadoras



Custo e Potencial de Abatimento

/// Cálculo do Custo e Potencial

/// Exemplo:





Custo e Potencial de Abatimento

/// Cálculo do Custo e Potencial

/// 3) Calcular o custo de abatimento

$$C = \frac{[(IF_{Cenário} \cdot FRC + \sum O\&M_{Cenário}) - (IF_{Base} \cdot FRC + \sum O\&M_{Base})]}{[Emissões_{Base} - Emissões_{Cenário}]}$$

/// Também é possível trabalhar apenas com a variação de custo e emissão, de forma:

$$C = \frac{(IF_{Medida} \cdot FRC + \sum O\&M_{Medida})}{\Delta Emissões}$$



Custo e Potencial de Abatimento

- /// Exemplo (Termoelétrica a carvão): Qual o custo de abatimento de uma termoelétrica a carvão PC supercrítica, com eficiência de 42% (PCI), em relação à tecnologia padrão instalada no Brasil, uma PC subcrítica com eficiência de 36%.
- /// Planta Convencional: IF=1500 US\$/kW; VOM=85 US\$/kW_a (comb. Incluído); FOM=30 US\$/KW/a; FC=60%.
- /// Planta Avançada: IF=1800 US\$/kW; VOM=100 US\$/kW_a (comb. Incluído); FOM=50 US\$/KW/a; FC=60%.
- /// Geral: $r=10\%$ a/a; $t=30$ anos; $PCI=20$ GJ/t; $FE=2.5$ tCO₂/t



Custo e Potencial de Abatimento

/// Planta Convencional:

$$C_{base} = \left(IF_{Base} \cdot FRC + \sum O\&M_{Base} \right) = \frac{(1500 \cdot 0.106 + 0.6 \cdot 85 + 30)}{0,6}$$

$$C_{base} = 400 \text{ US\$/kW}a$$

/// Para gerar 1 kW_a (87.6 GJ):

$$E_{base} = \left(\frac{\text{Geração}}{\eta_{Base}} \right) \cdot PCI^{-1} \cdot FE$$

$$E_{base} = \left(\frac{(87.6 \text{ GJ})}{0.36} \right) \cdot \frac{1t}{20GJ} \cdot 2.5 \frac{tCO_2}{t} = 11,0 \frac{tCO_2}{kW}a$$



Custo e Potencial de Abatimento

/// Planta Avançada:

$$C_{Medida} = \left(IF_{Medida} \cdot FRC + \sum O\&M_{Medida} \right) = \frac{(1800 \cdot 0.106 + 0.6 \cdot 100 + 50)}{0,6}$$

$$C_{Medida} = 501 \text{ US\$/kW}a$$

/// Para gerar 1 kWa (87.6 GJ):

$$E_{Medida} = \left(\frac{\text{Geração}}{\eta_{Medida}} \right) \cdot PCI^{-1} \cdot FE$$

$$E_{Medida} = \left(\frac{(87.6 \text{ GJ})}{0.42} \right) \cdot \frac{1t}{20GJ} \cdot 2.5 \frac{tCO_2}{t} = 9.4 \frac{tCO_2}{kW}a$$



Custo e Potencial de Abatimento

/// Custo de Abatimento:

$$C = \frac{(C_{Medida} - C_{Base})}{(E_{Base} - E_{Medida})} = \frac{(501 - 400)}{(11.0 - 9.4)}$$

$$C = 63 \text{ US\$/tCO}_2$$

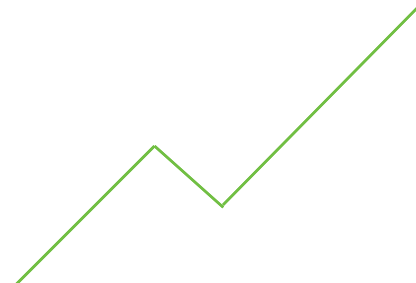
/// Potencial de Abatimento:

$$Pot = (E_{Base} - E_{Medida}) = 1.6 \frac{\text{tCO}_2}{\text{kW a}}$$

/// Captura Virtual: Mais barato evitar emissão que o CCS na planta base



Fontes de Informação





Custo e Potencial de Abatimento

/// Sistema Energético Mundial

/// International Energy Agency (IEA): www.iea.org

/// World Energy Outlook (WEO), Energy Technology Perspectives (ETP)

/// EUA - Energy Information Agency (EIA): www.eia.gov

/// World Energy Council: www.worldenergy.org

/// Dados do Sistema Energético Brasileiro

/// Empresa de Pesquisa Energética (EPE): www.epe.gov.br

/// Balanço Energético Nacional (BEN), Plano Nacional de Energia (PNE)



Custo e Potencial de Abatimento

/// Petróleo e Gás: Internacional

/// American Petroleum Institute (API): www.api.org

/// US Geological Survey (USGS): www.usgs.gov

/// OPEP: www.opec.org

/// International Association of oil and gas producers (IOGP):
www.iogp.org

/// Petróleo e Gás: Nacional

/// Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
(ANP): www.anp.gov.br

/// Produção, Capacidades, Mercado, Regulação, Especificações, Preços

/// Petrobras: www.petrobras.com.br



Custo e Potencial de Abatimento

/// Carvão Mineral: Internacional

/// World Coal Association: www.worldcoal.org

/// US Coal Mining Association: www.nma.org

/// Carvão Mineral: Nacional

/// Associação Brasileira de Carvão Mineral (ABCM):
www.carvaomineral.com.br

/// Centro Tecnológico do Carvão Limpo (CTCL)



Custo e Potencial de Abatimento

/// Sucroalcooleiro

/// União de Industria da Cana-de-açúcar (ÚNICA):
www.unica.com.br

/// Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB):
www.conab.gov.br

/// Nuclear: Internacional

/// Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA): www.iaea.org

/// Power Reactor Information System (PRIS): www.iaea.org/pris/

/// Nuclear: Nacional

/// Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN):
www.cnen.gov.br

/// Industrias Nucleares do Brasil (INB): www.inb.gov.br



Custo e Potencial de Abatimento

/// Dados do Setor Elétrico Nacional

/// Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL):
www.aneel.gov.br

/// Banco de Informação de Geração (BIG)

/// Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS):
www.ons.org.br

/// Eletrobras: www.eletrobras.com

/// Dados Macroeconômicos e Demográficos mundiais

/// World Bank: data.worldbank.org

/// UNEP: geodata.grid.unep.ch



Custo e Potencial de Abatimento

/// Institutos de Pesquisa

- /// National Energy Technology Laboratory (NETL)
- /// National Renewable Energy Laboratory (NREL)
- /// Oak Ridge National Laboratory
- /// Berkeley National Laboratory
- /// Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL)
- /// Rotterdam Climate Initiative
- /// Diversos outros



Custo e Potencial de Abatimento

/// Outras Fontes de Informação

/// Dissertações e Teses

/// Programa de Planejamento Energético (PPE) da COPPE:
www.ppe.ufrj.br

/// Relatórios e estudos de institutos, consultorias e empresas

/// McKinsey&Co, ICF, DNV, IPIECA, CONCAWE, Carbon Trust

/// Statoil, BP, Shell, GE, Siemens, Alstom, UOP, Doosan

/// Artigos científicos em periódicos

/// Energy, Applied Energy, IJGGC, Renewable Energy, Energy Policy, etc



OBRIGADO

Pedro R. R. Rochedo
pedrorochedo@ppe.ufrj.br