



*Opções de Mitigação de Emissões
de Gases de Efeito Estufa em
Setores-Chave do Brasil*

MODELAGEM DE CUSTOS DE ABATIMENTO E DE CURVAS DE APRENDIZAGEM TECNOLÓGICA

ENERGIA

Pedro Rochedo

Outubro de 2015

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



Índice

- /// Aspectos conceituais
- /// Construção de Cenários
- /// Custo e Potencial de Abatimento
- /// Aprendizado Tecnológico
- /// Fontes de Informação



*Opções de Mitigação de Emissões
de Gases de Efeito Estufa em
Setores-Chave do Brasil*

Aspectos Conceituais



Conceitos: Cenários

/// Com relação ao futuro:

/// Projeção: descrição ou “caminho” para o futuro

/// Previsão: projeção mais provável

/// Inferência estatística, nível de confiança, risco, incerteza

/// Predição: processo subjetivo

/// Experiência



Conceitos: Cenários

/// Cenário:

/// Lugar onde se passa algum fato

/// Conjuntura, panorama, plano de ação

/// Scenario:

/// Resumo do enredo

/// Desenvolvimento previsto de possíveis eventos



Conceitos: Cenários

/// Cenário:

~~/// Lugar onde se passa algum fato~~

~~/// Conjuntura, panorama, plano de ação~~

/// Scenario:

~~/// Resumo do enredo~~

/// **DESENVOLVIMENTO PREVISTO DE POSSÍVEIS
EVENTOS**



Conceitos: Cenários

- /// Dentro do nosso contexto:
 - /// Cenário: análise dos efeitos de estados futuros possíveis
 - /// Estado: Consumo energético, emissões, perfil de consumo
- /// Inerentemente relacionado à conjunto de premissas
 - /// “Futuros possíveis”
- /// Conjunto de cenários podem avaliar incertezas no presente
 - /// Exemplo: novas políticas, novas tecnologias

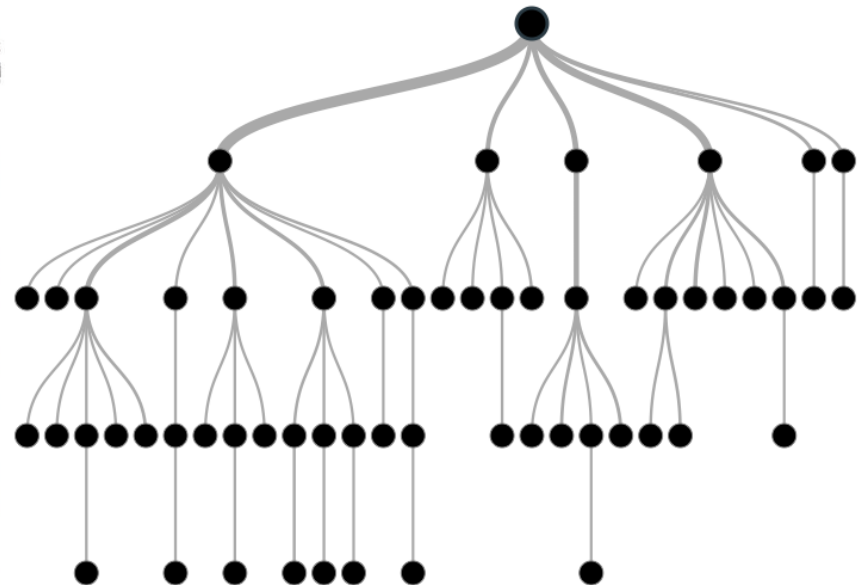
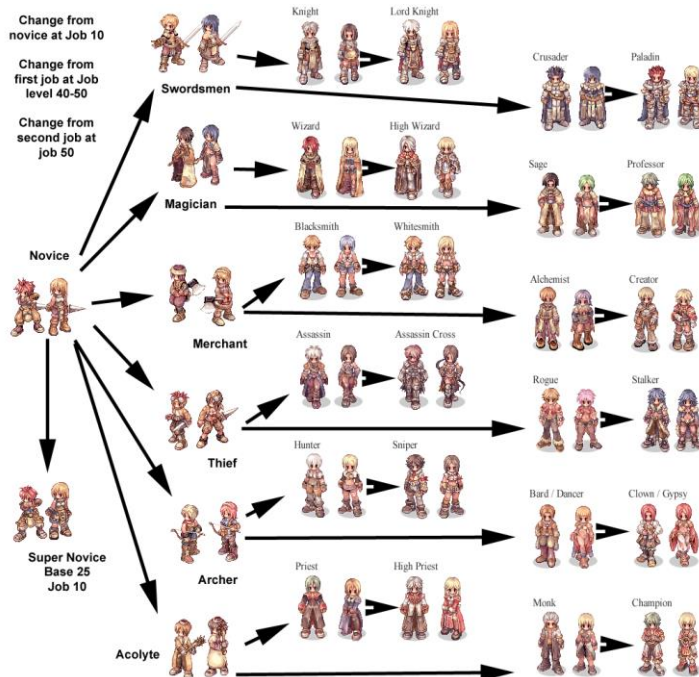


Conceitos: Cenários

/// Como gostaríamos de ver o futuro:



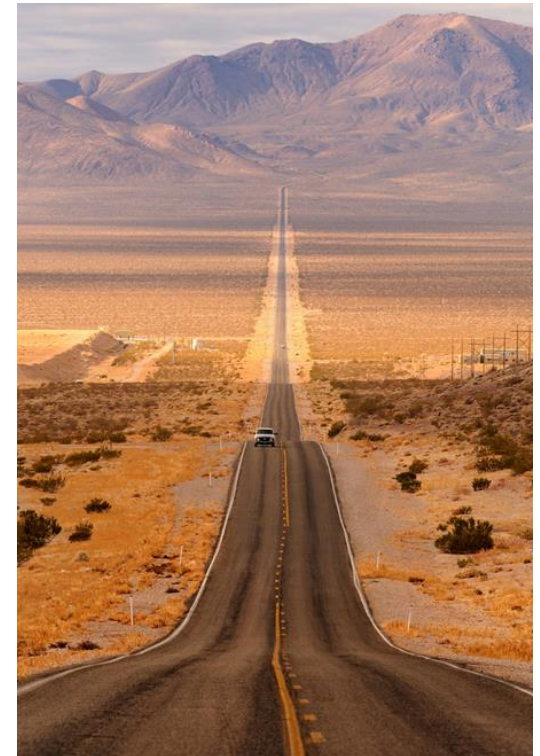
/// Como avaliar o futuro com cenários:





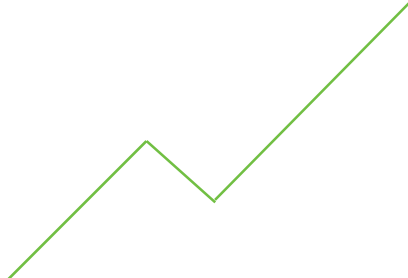
Conceitos: Cenários

/// Como o futuro é de verdade:

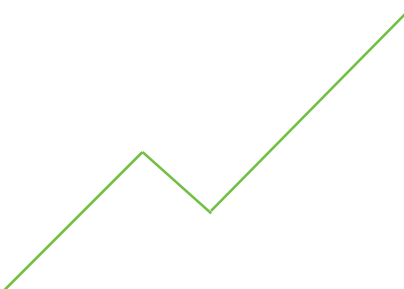


"It's a dangerous business, going out your door. You step onto the road, and if you don't keep your feet, there's no knowing where you might be swept off to." – J. R. R. Tolkien

Conceitos: Objetivo dos Cenários

- /// Fundamental: criar conjunto de informações sobre estados futuros
 - /// Utilidade:
 - /// Auxiliar o planejamento
 - /// Avaliar robustez e/ou vulnerabilidades estruturais
 - /// Verificar efeitos de possíveis atividades atuais e/ou futuras (CP ou LP)
 - /// Auxiliar elaboração de instrumentos (política, mercado, ambiental)
- 

Conceitos: Aplicação dos Cenários

- /// Objetivo: criar conjunto de informações sobre estados futuros
 - /// Aplicação: utilizado de forma relativa, não de forma absoluta
 - /// Resultados são comparados dentro de um mesmo referencial
 - /// Importante definir a base de comparação (referencial)
- 



Conceitos: termos

- /// Cenário Referencial: base de comparação dos cenários alternativos
- /// Cenários Alternativos: demais visões de futuro
 - /// Diferenciam-se do referencial (ex: premissas)
- /// Linha de Base: ponto de partida da análise
 - /// Maior consenso ou aceitação sobre premissas básicas
 - /// Geralmente conservador
 - /// Pode ser o Referencial
 - /// IEA: Current Policies Scenario



Conceitos: termos

- /// Business-as-usual (BAU): “passado explica o futuro”
- /// Menor influência das premissas
- /// Menor esforço técnico para elaboração
- /// Em certos casos, pode não fazer sentido algum
- /// Mitigação/Baixo Carbono: cenários com esforços de redução de emissões de GEE
- /// Representam os cenários alternativos
- /// Através de políticas (mercado, ambientais)



*Opções de Mitigação de Emissões
de Gases de Efeito Estufa em
Setores-Chave do Brasil*

Construção de Cenários



Construção de Cenários

/// Modelos Matemáticos (quantitativos)

- 1) Determinar escopo do problema e objetivo da análise
- 2) Definir premissas do cenário referencial
- 3) Quantificar o cenário referencial
- 4) Definir premissas do cenário alternativo
- 5) Quantificar o cenário alternativo
- 6) Comparar resultados e extrair conclusões



Construção de Cenários

- /// Determinar escopo do problema e objetivo da análise
- /// Variáveis de saída (decisão)
 - /// Ex: Energia, eletricidade, emissões
- /// Horizonte e escala de tempo
 - /// Ex: 2030 de ano em ano
- /// Nível de detalhamento e escopo
 - /// Ex: Setor elétrico do Sudeste
- /// Objetivo: análises e contribuições



Construção de Cenários

- /// Determinar premissas do cenário referencial
- /// Definir variáveis de entrada (exógenas)
 - /// Ex: PIB, população, imp/exp, taxa de desconto
- /// Determinar conjunto de premissas necessárias
 - /// Ex: perfil tecnológico, perfil de consumo, desagregação setorial, evolução tecnológica, entrada de novos agentes/fontes/tecnologias, restrições físicas/técnicas/econômicas/mercado, custos
- /// Determinar variáveis endógenas



Construção de Cenários

- /// Quantificar o cenário referencial
 - /// Elaborar modelo matemático e base de cálculo
 - /// Banco de dados
 - /// Equações, restrições e premissas
 - /// Softwares, planilhas, etc
- /// Validar resultados com dados disponíveis
 - /// Minimamente os resultados do ano inicial
- /// Organizar e avaliar resultados



Construção de Cenários

- /// Determinar premissas do cenário **alternativo**
- /// Definir **possíveis mudanças** nas variáveis de entrada (exógenas)
 - /// Ex: PIB, população, imp/exp, taxa de desconto
- /// Determinar **variações** nos conjunto de premissas necessárias
 - /// Ex: perfil tecnológico, perfil de consumo, desagregação setorial, evolução tecnológica, entrada de novos agentes/fontes/tecnologias, restrições físicas/técnicas/econômicas/mercado, custos
- /// Determinar variáveis endógenas



Construção de Cenários

- /// Quantificar o cenário alternativo
 - /// **Adaptar** modelo matemático e base de cálculo
 - /// Banco de dados
 - /// **Equações, restrições e premissas**
 - /// Softwares, planilhas, etc
- /// Validar resultados com dados disponíveis
 - /// Minimamente os resultados do ano inicial
- /// Organizar e avaliar resultados



Construção de Cenários

- /// Comparar resultados e extrair conclusões
- /// Organizar resultados de todos os cenários
- /// Elaborar análises quali/quantitativas dos resultados
- /// Avaliar efeito dos cenários alternativos em relação ao referencial
 - /// Determinar benefícios ou prejuízos dos cenários alternativos
- /// Reavaliar limitações da análise/modelo/cenários



Opções de Mitigação de Emissões
de Gases de Efeito Estufa em
Setores-Chave do Brasil

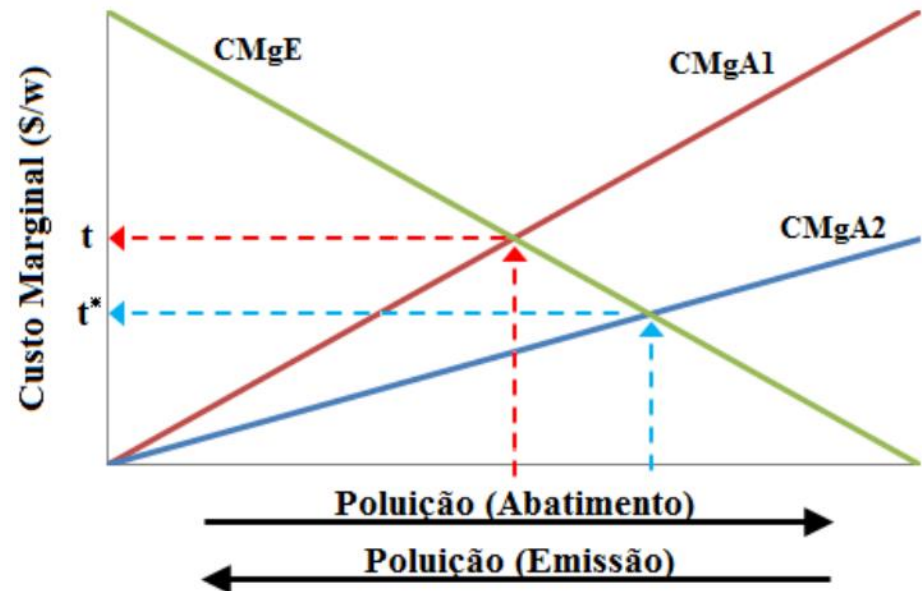
Custo e Potencial de Abatimento

Custo e Potencial de Abatimento

/// Conceito econômico: Nível Ótimo de Poluição

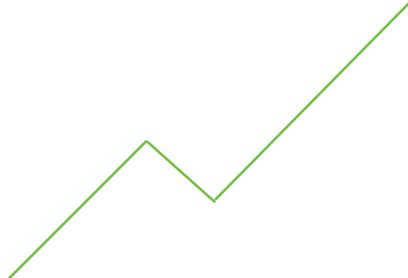
/// Equilíbrio entre Custo Mg Externo e Custo Mg Abatimento

$$CMgE(Q) = CMgA(Q)$$



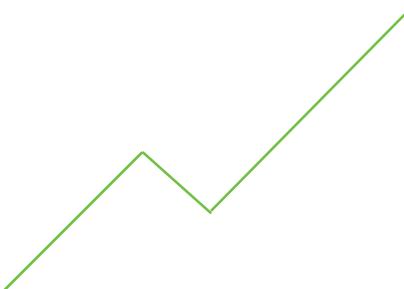
Custo e Potencial de Abatimento

/// 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

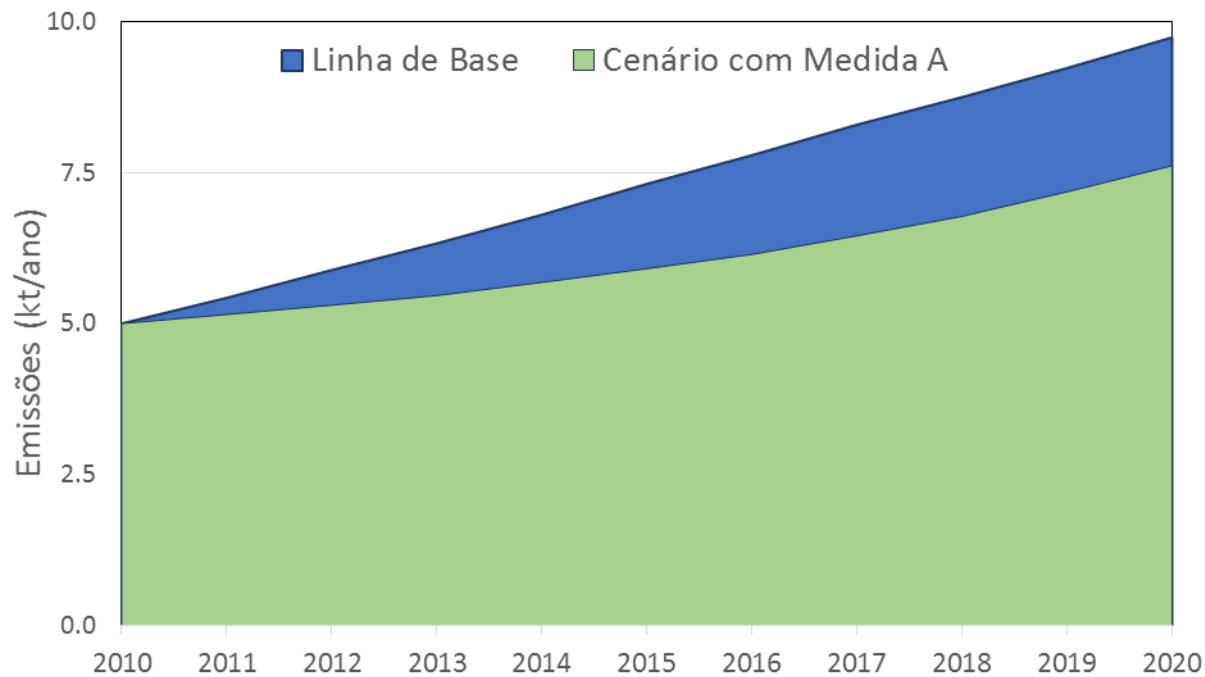




Custo e Potencial de Abatimento

/// 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 kWa (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:

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

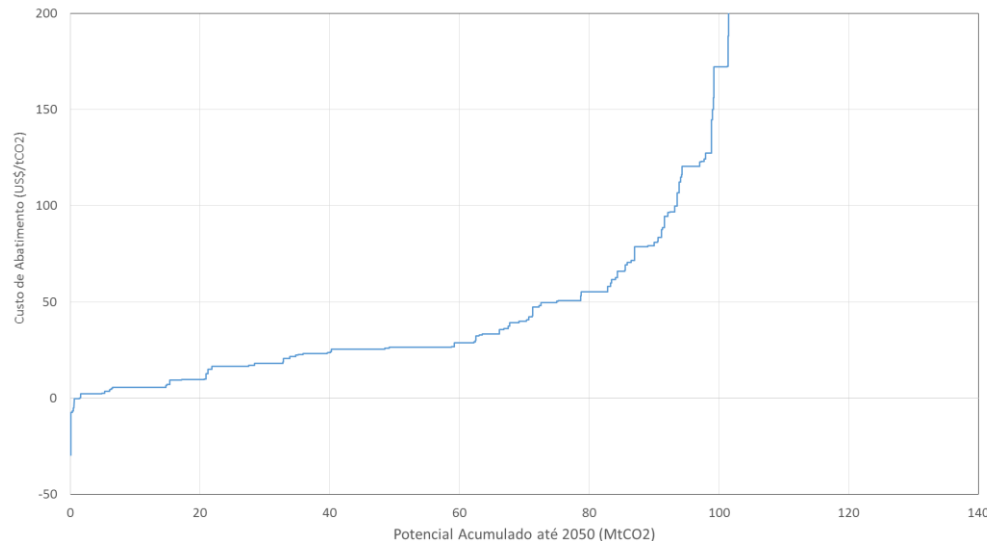
- /// Captura Virtual: Mais barato evitar emissão que o CCS na planta base



Custo e Potencial de Abatimento

/// Construindo a curva de abatimento

- /// Calcular custo e potencial de abatimento para todas as medidas
- /// Ordenar medidas por ordem de custo
- /// De menores para maiores





Custo e Potencial de Abatimento

- /// É preciso ter muito cuidado ao avaliar uma MAC Curve
- /// Provavelmente existe uma sobreposição de mitigação ao somar medidas de abatimento
- /// É a tendência ao somar medidas de forma individual
- /// Curvas individuais/setoriais podem resultar em informações equivocadas
- /// Potenciais de abatimento SUPERestimados
- /// Custos de abatimento SUBestimados

Custo e Potencial de Abatimento

/// Exemplo: Refino da região Sudeste (RJ,SP,MG)

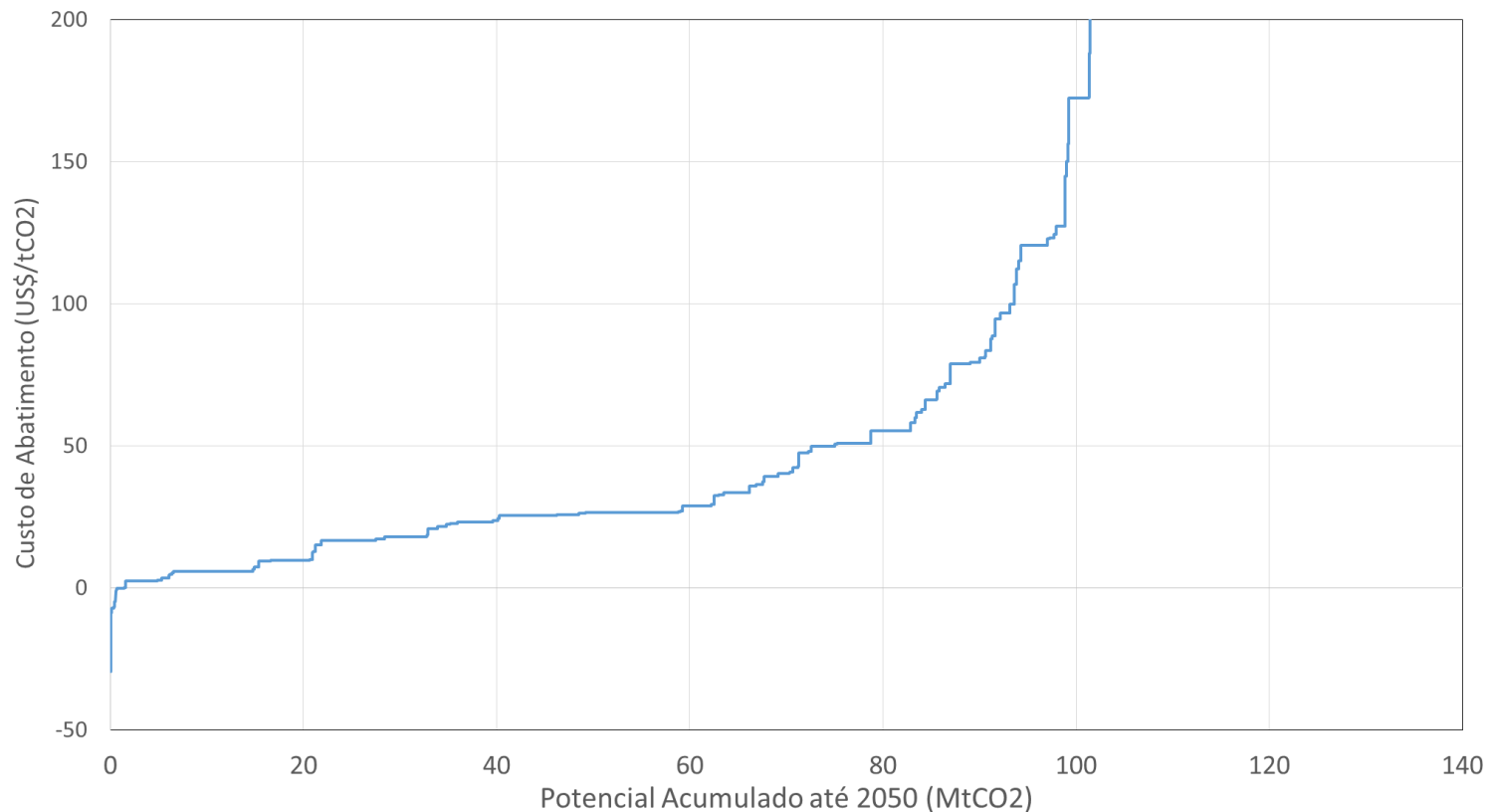
- /// Simulador CEASAR (Carbon and Energy Strategy Analysis for Refineries)
- /// Guedes, 2015 – “Avaliação De Alternativas Para Redução Do Uso Final De Energia No Setor De Refino De Petróleo Brasileiro E Estimativa De Custos De Abatimento De Emissões De Gases De Efeito Estufa”
- /// Estimativa de cerca de 200 medidas de eficiência energética em refinarias
 - /// Por unidade de processo
 - /// Por utilidade (vapor, calor, eletricidade, hidrogênio)



Custo e Potencial de Abatimento

/// Exemplo: Refino da região Sudeste (RJ,SP,MG)

/// Curva de abatimento: ótica setorial → medidas vistas como independentes



Custo e Potencial de Abatimento

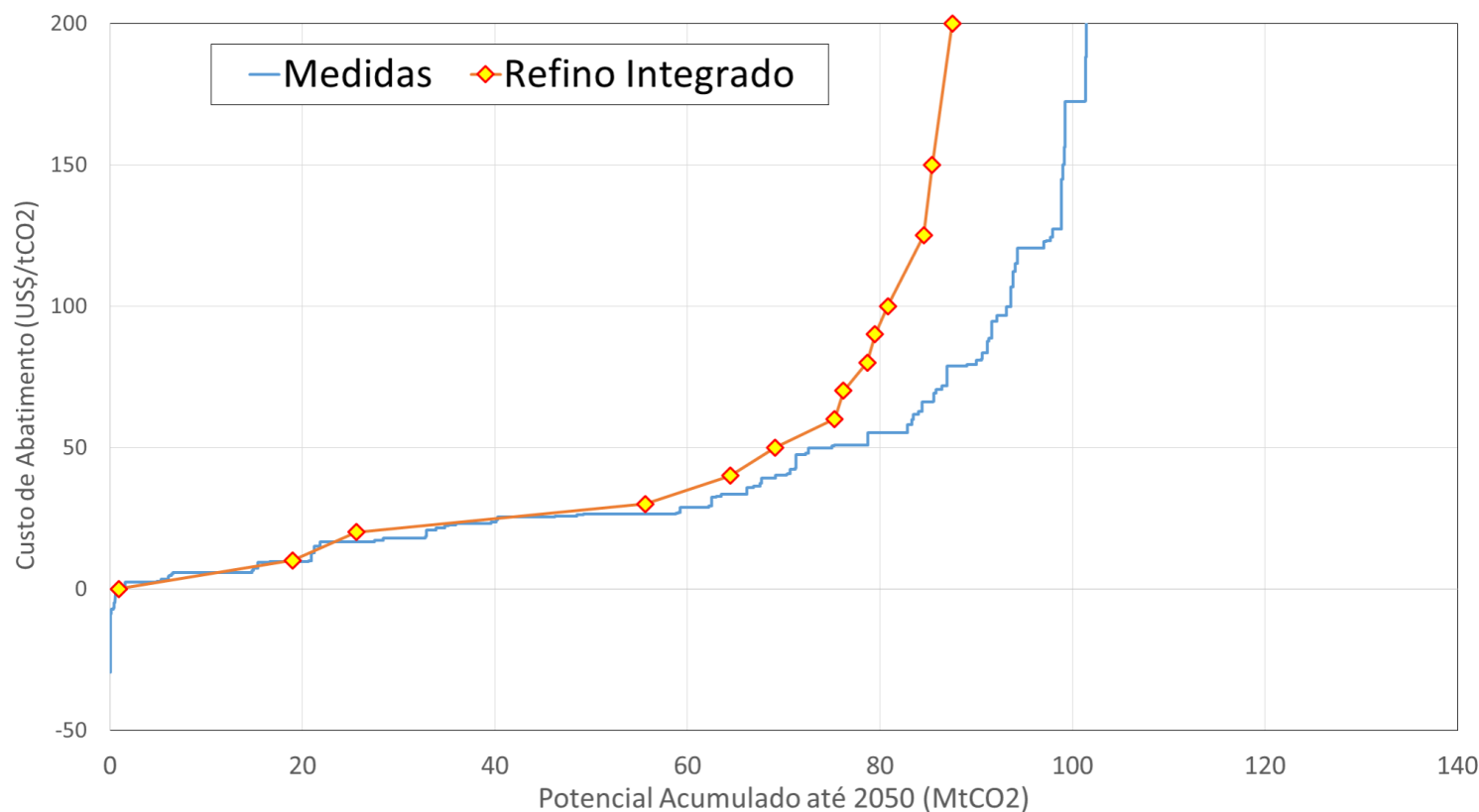
- /// Exemplo: Refino da região Sudeste (RJ,SP,MG)
- /// Ao ser aplicadas em conjunto, um “set” de medidas podem estar com o potencial de mitigação superestimado
- /// Exemplo : duas medidas que reduzem o consumo de vapor
 - /// Situação 1: a redução das medidas conjuntas não é igual ao somatório das reduções individuais
 - /// Situação 2: ambas medidas são comparadas com à emissão da linha de base
 - /// Ao aplicar uma delas, o coeficiente de emissão específico ($tCO_{2eq}/demanda$) é reduzido



Custo e Potencial de Abatimento

/// Exemplo: Refino da região Sudeste (RJ,SP,MG)

/// Curva de abatimento: ótica integrada → não existe dupla contagem





*Opções de Mitigação de Emissões
de Gases de Efeito Estufa em
Setores-Chave do Brasil*

Aprendizado Tecnológico



Aprendizado Tecnológico

/// O que é aprendizado?

/// Adquirir ou modificar conhecimento, comportamento e habilidades atuais

/// “Informação aplicada”

/// O que é Aprendizado Tecnológico?

/// Aumentar produtividade ou reduzir custo médio de produção

/// Incremental: aprender a fazer de forma melhor

/// Associação: lições de experiências anteriores

/// Inovação: tecnologias de “ruptura” ou disruptiva



Aprendizado Tecnológico

/// Modelos de aprendizado tecnológico

/// Modelos matemáticos (não-lineares)

/// Correlacionam a redução de custo com “experiência”

1-factor: aumento da produção/capacidade acumulado (learning-by-doing)

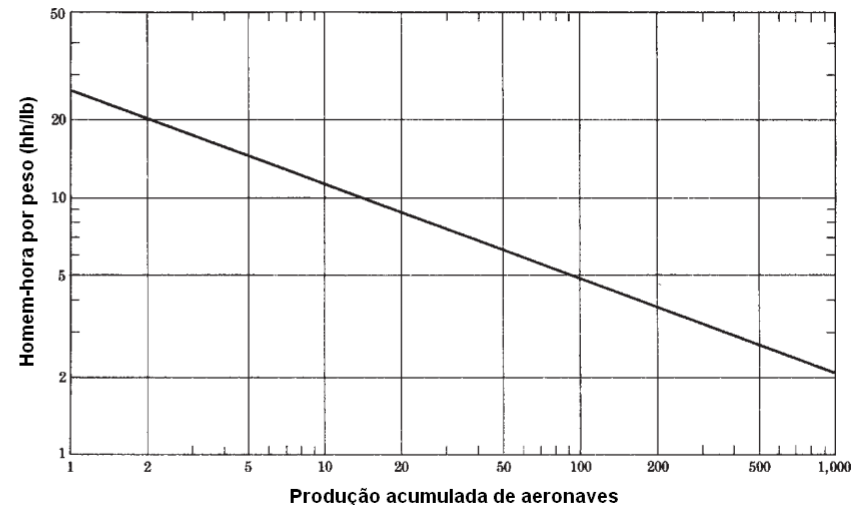
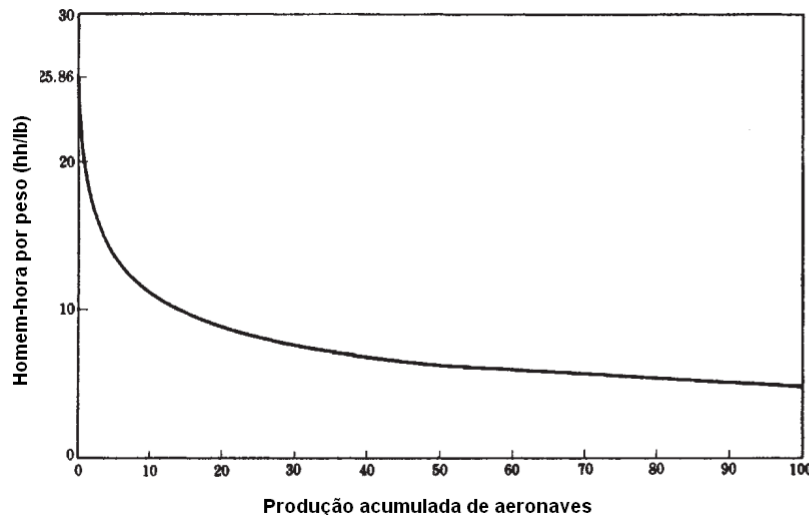
2-factors: Captura efeitos de gastos em P&D

Multi-factor: “component-basis learning”



Aprendizado Tecnológico

- /// Origem: 1936, Wright – aeronáutica
- /// HH para montagem decrescia sistematicamente com o aumento da produção
- /// Curva dos "80%": custo médio reduzia 20% a cada duplicação
- /// Representação matemática dos ganhos históricos por experiência ou aprendizagem (learning-by-doing)





Aprendizado Tecnológico

/// Modelo Wright: potencial

$$C = C_0 \cdot A^{-b}$$

/// Primeiro modelo elaborado

/// Mais utilizado na literatura

/// Modelo DeJong: limitação do modelo Wright

$$\lim_{A \rightarrow \infty} C = \lim_{A \rightarrow \infty} C_0 \cdot A^{-b} \rightarrow \lim_{A \rightarrow \infty} C \sim 0$$

/// Parâmetro de incompressibilidade do custo : F

$$C = C_0 \cdot [F + (1 - F) \cdot (A^{-b})]$$

/// Motivação: energia mínima de separação e compressão do CO₂.



Aprendizado Tecnológico

- /// Modelo Diferencial (D&L): curva em forma de "S"
- /// Objetivo: Conciliar uma curva em "S" e o patamar mínimo
- /// Base inicial: distribuição logarítmica

$$\frac{dC(t)}{dt} = C(t) \cdot (1 - C(t))$$

- /// Generalização com o parâmetro de incompressibilidade:

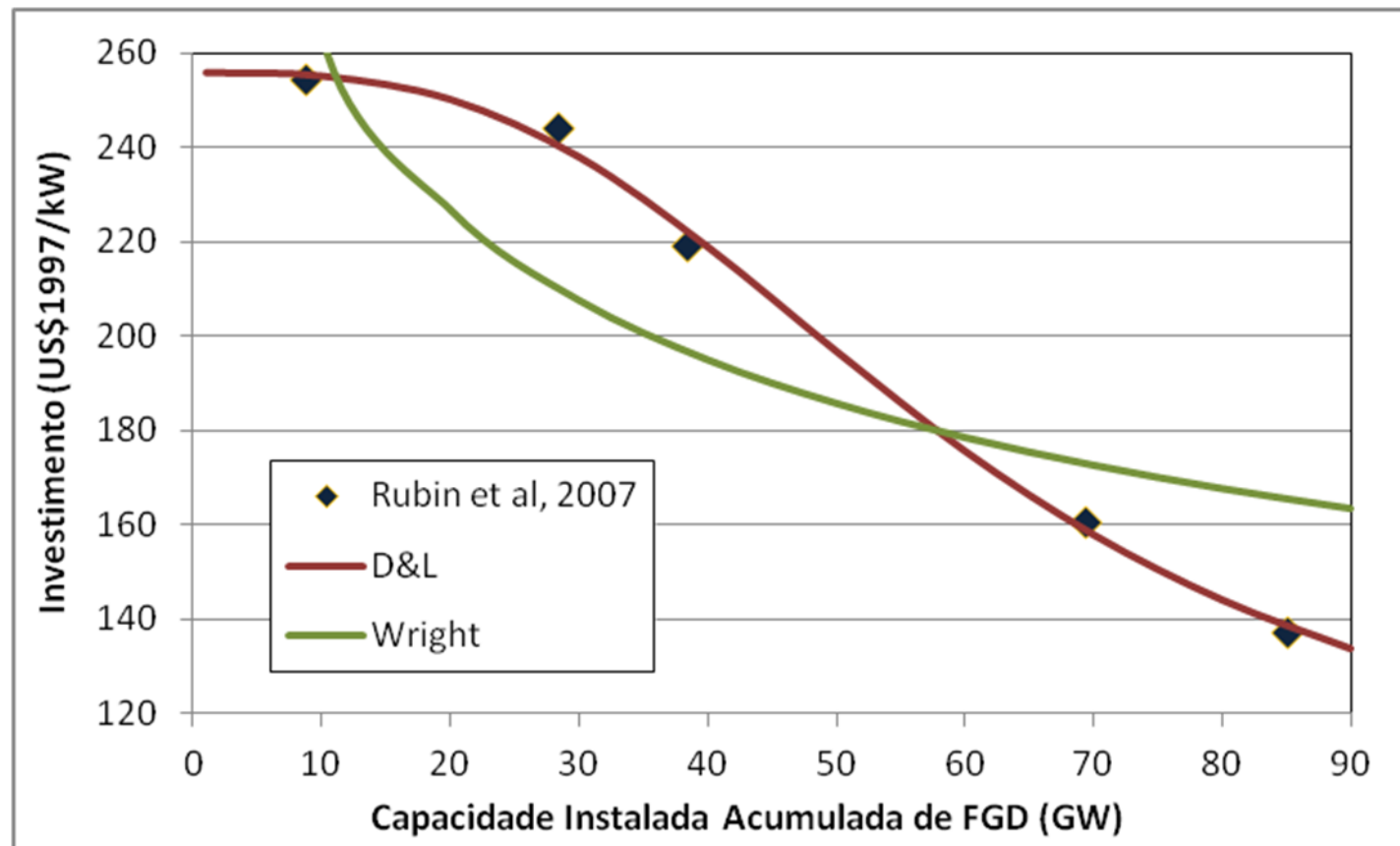
$$C(t) = C_0 \cdot \left\{ F + (1 - F) \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{t - \mu}{\delta}\right)} \right] \right\}$$

- /// Modelo mais robusto e permite o patamar mínimo
- /// Se aproxima de curvas reais do setor energético



Aprendizado Tecnológico

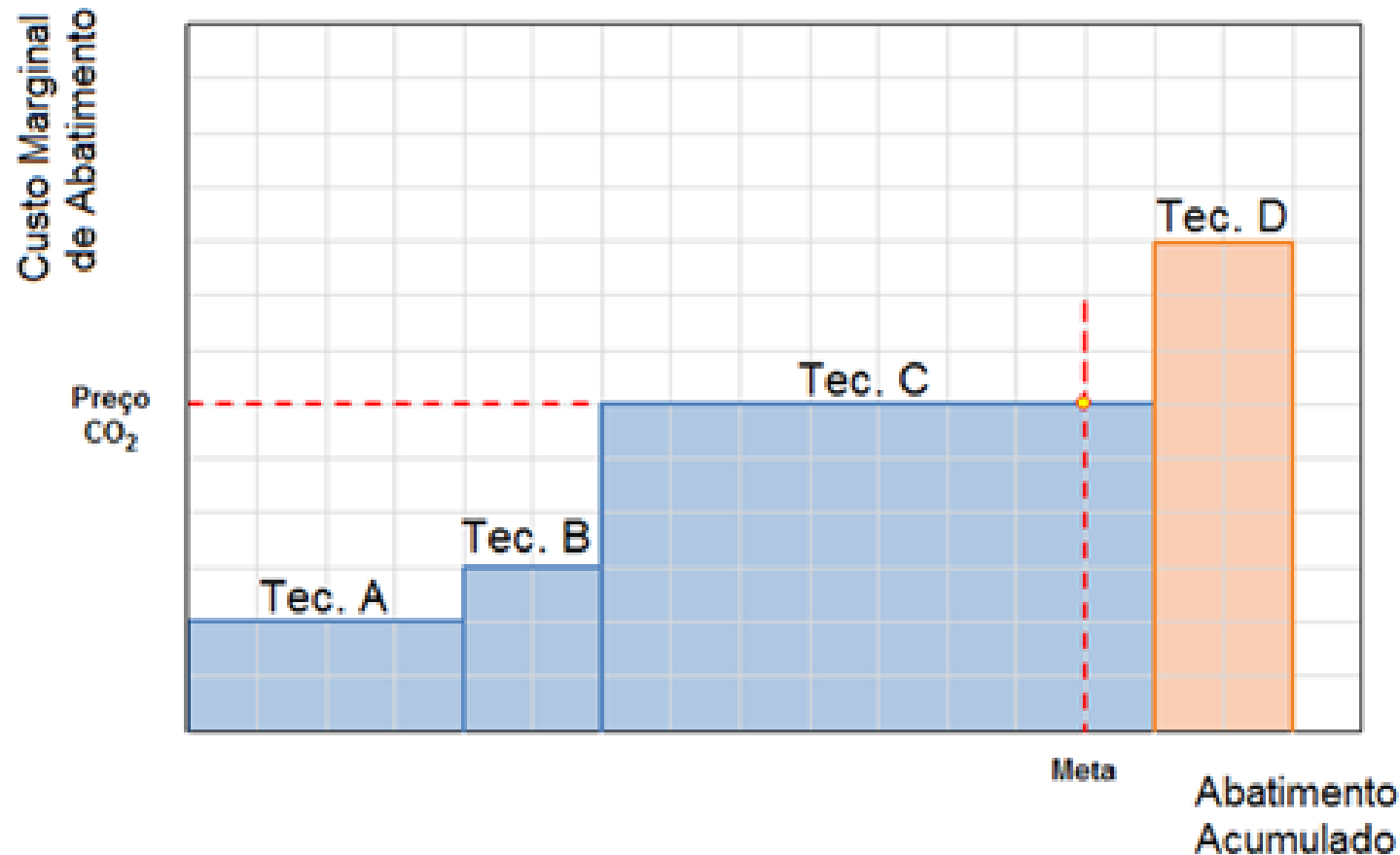
/// Comparação entre modelos: evolução do FGD





Aprendizado Tecnológico

/// Implicações para formação de políticas

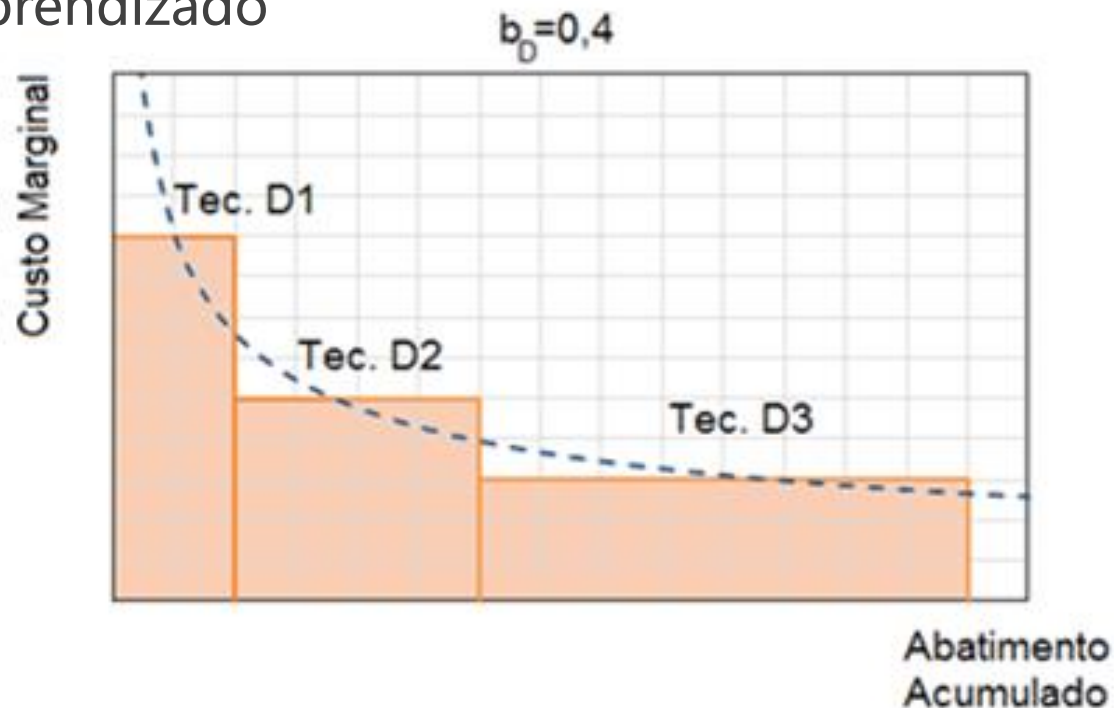




Aprendizado Tecnológico

/// Considere apenas a tecnologia "D"

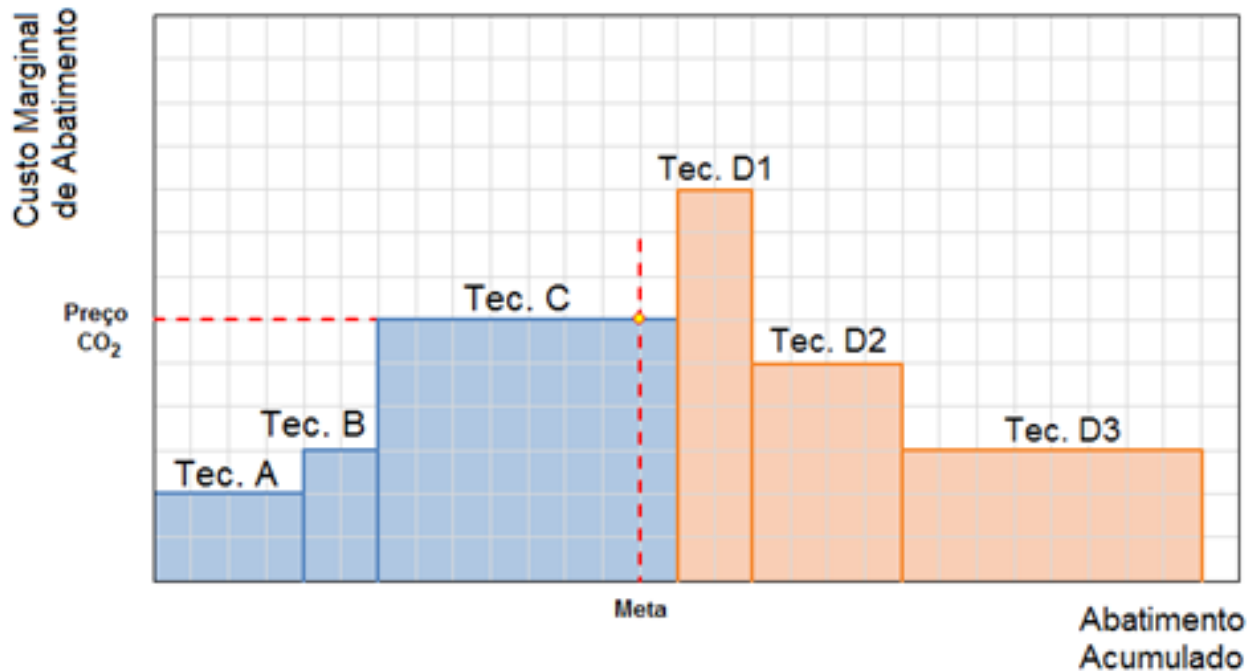
/// Maior custo inicialmente, mas pode passar por
aprendizado





Aprendizado Tecnológico

/// Efeito quando retornamos à MAC Curve

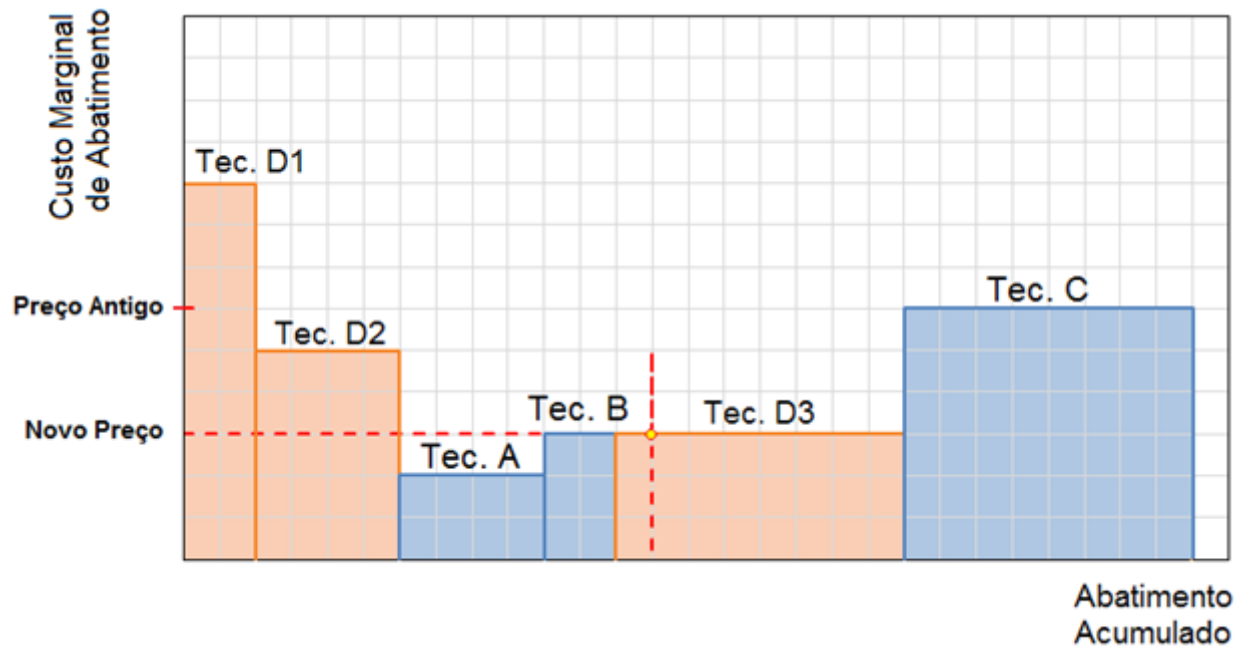




Aprendizado Tecnológico

/// Efeito quando retornamos à MAC Curve

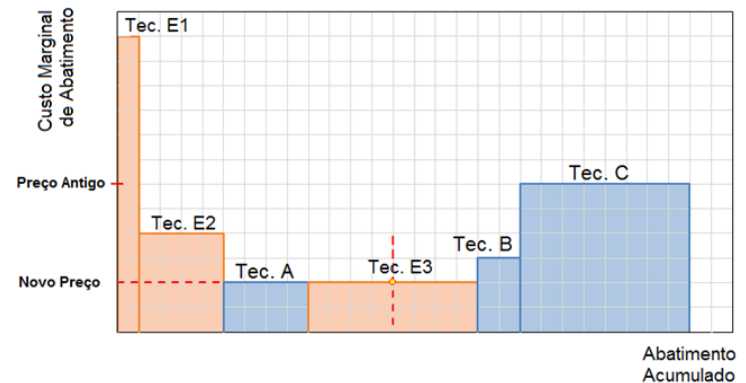
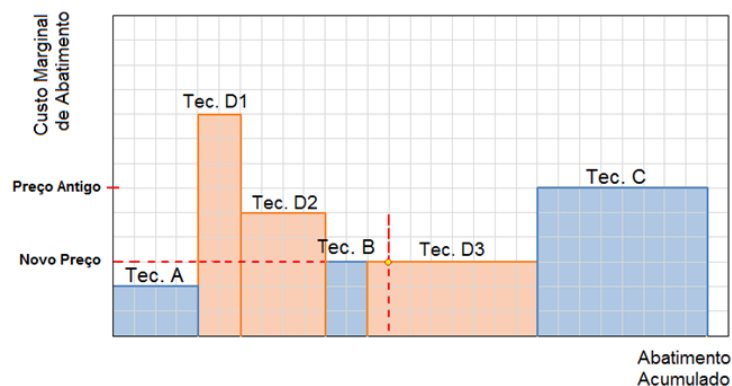
/// Exemplo: política de incentivo tecnológico (P&D, demonstração)





Aprendizado Tecnológico

- /// Capaz de atender à mesma restrição ambiental (Abatimento)
- /// Custo de abatimento é menor
- /// Potencial de Abatimento aumenta
- /// Impacto econômico (integral da curva) é menor
- /// Outras tecnologias ("E") podem possuir efeitos de



Referências

- /// Bohringer, C., 1998. The synthesis of bottom-up and top-down in energy policy modeling. *Energy Economics* 20 pp. 233-248.
- /// De Gouvello (org.), 2010. Brazil Low-Carbon Country Case Study. World Bank, Washington DC.
- /// EPE, 2014. Demanda de Energia 2050. Disponível em: < www.epe.gov.br >
- /// Fortes et al., 2015. Long-term energy scenarios: Bridging the gap between socioeconomic storylines and energy modeling. *Technological Forecasting & Social Change* 91 pp. 161–178.
- /// Greening et al., 2007. Modeling of industrial energy consumption: An introduction and context. *Energy Economics* 29 pp. 599–608.
- /// Greening et al., 2007. Modeling of industrial energy consumption: An introduction and context. *Energy Economics* 29 pp. 599–608.
- /// Hughes & Strachan, 2010. Methodological review of UK and international low carbon scenarios. *Energy Policy* 38 pp. 6056–6065.

Referências

- /// Hughes, N., 2013. Towards improving the relevance of scenarios for public policy questions: A proposed methodological framework for policy relevant low carbon scenarios. *Technological Forecasting & Social Change* 80 pp. 687–698.
- /// Kok et al., 2011. Combining participative backcasting and exploratory scenario development: Experiences from the SCENES project. *Technological Forecasting & Social Change* 78 pp. 835–851.
- /// Lee, Huey-Lin. Incorporating agro-ecologically zoned land use data and land-based greenhouse gases emissions into the GTAP framework. West Lafayette: Center for Global Trade Analysis, 2004. Disponível em: <https://www.bioenergykdf.net/sites/default/files/nagendra/KC_090916160504.pdf>.
- /// McFarland et al., 2004. Representing energy technologies in top-down economic models using bottom-up information. *Energy Economics* 26 pp. 685– 707.
- /// MCTI (2014). Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Brasília, Brasil. 80 pp.

Referências

- /// Napp et al., 2014. Modelling of energy consumption and CO2 emissions in the South African industry sector to 2050 using the TIMES energy systems modelling platform. Lecture at Energy Systems Conference 2014. London, UK.
- /// Schaeffer et al., 2012. Impactos da adoção de metas de redução de emissão de gases de efeito estufa sobre setores energointensivos do estado do Rio de Janeiro. Relatório Técnico. Contratante: Secretaria de Ambiente do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
- /// Simões et al., 2014. Assessing effects of exogenous assumptions in GHG emissions forecasts – a 2020 scenario study for Portugal using the Times energy technology model. Technological Forecasting & Social Change. Article in Press.



*Opções de Mitigação de Emissões
de Gases de Efeito Estufa em
Setores-Chave do Brasil*

OBRIGADO

Pedro R. R. Rochedo

pedrorochedo@ppe.ufrj.br