

# MODELAGEM DE CUSTOS DE ABATIMENTO E DE CURVAS DE APRENDIZAGEM TECNOLÓGICA

## INDÚSTRIA

Larissa P. Nogueira de Oliveira

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.*

# Conteúdo

- Objetivos da construção de cenários
  - Classificação de Cenários
  - Construção de Cenários:
    - Metodologias
    - Variáveis-chave
    - Premissas
    - Resultados
  - Medidas de Mitigação
- A CCMA
  - CMA com Inovação
    - Curvas de aprendizado
    - Exemplo
  - Fontes de Informação

# Objetivos da Construção de Cenários

## ➤ Objetivos:

### ➤ Historicamente:

- ❖ Estratégias militares (anos 1950);
- ❖ Planejamento: cenários Shell (anos 1970);

### ➤ Atualmente (Hughes, 2012):

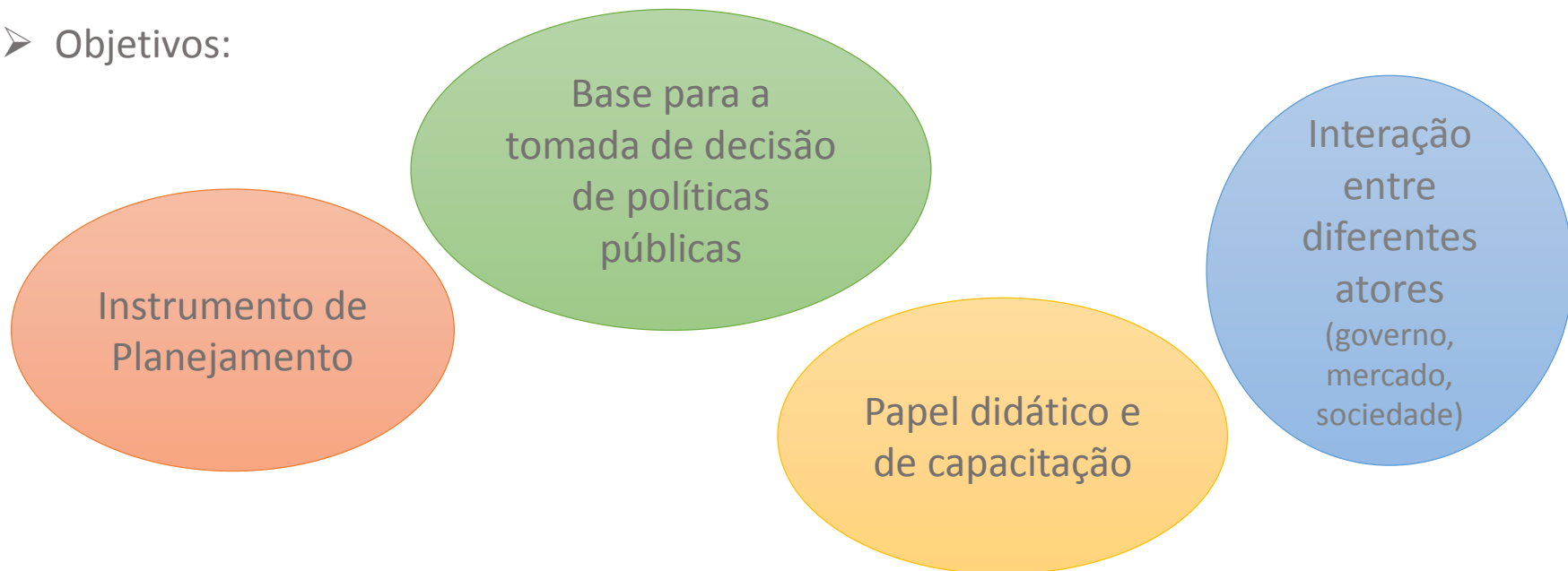
- ❖ Papel defensivo;
- ❖ Papel proativo;
- ❖ Construção de consenso.

## ➤ Análises:

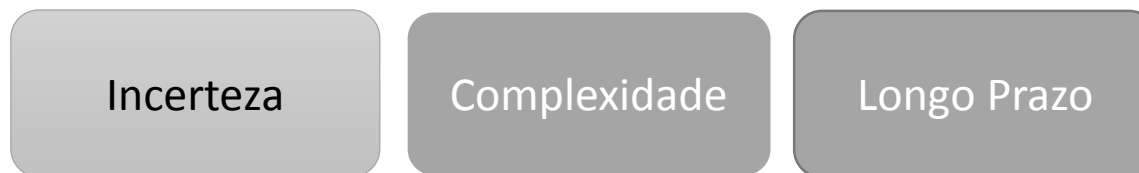
Positiva x Normativa  
Cenários Exploratórios x Cenários *Backcasting*  
*What if?*

# Objetivos da Construção de Cenários

## ➤ Objetivos:



## ➤ Características:



# Classificação de Cenários

## ➤ Como classificar cenários?

|                                   |                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Base</b>                       | Cenário em relação a qual os cenários alternativos serão confrontados.                                                                                                                               |
| <b>Tendencial</b>                 | <i>Business-as-usual</i> . Considera que as projeções seguirão as tendências técnicas, econômicas e de mercado atuais., incluindo políticas já em andamento.                                         |
| <b>Alternativo</b>                | Cenário gerado a partir de perturbações impostas pelo analista (expl.: subsídio a determinada fonte/tecnologia, taxa de carbono, forçamento tecnológico, etc).                                       |
| <b>Baixo Carbono</b>              | Cenário em que se efetua o potencial de redução de emissão a um determinado nível (US\$/tCO <sub>2</sub> e), reduzindo as emissões em relação ao cenário base. O potencial é obtido com base em BAT. |
| <b>Baixo Carbono com Inovação</b> | Idem anterior, porém, para a obtenção do potencial, são consideradas também tecnologias ainda não disponíveis e/ou em desenvolvimento.                                                               |

# Construção de Cenários

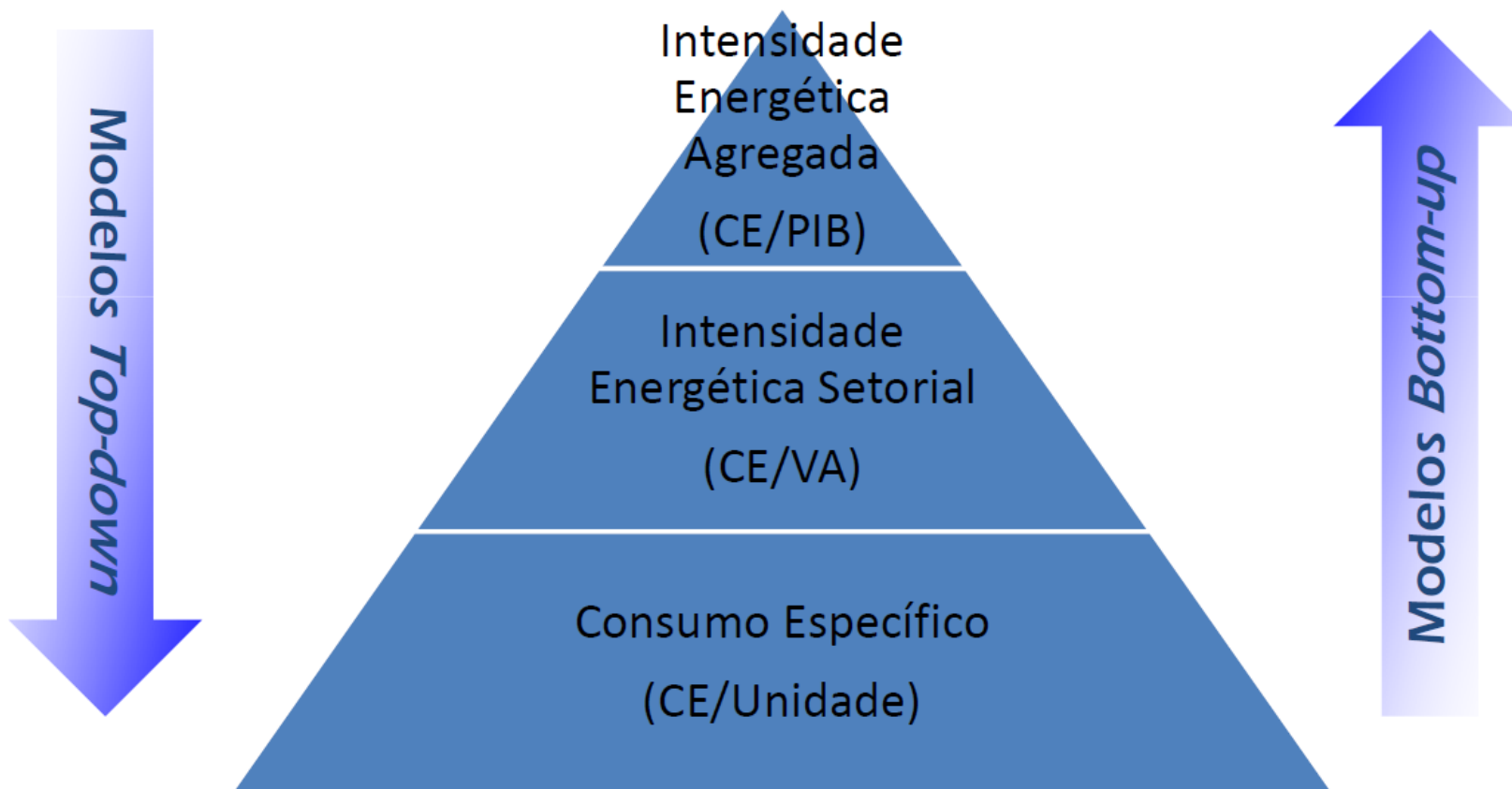
## Metodologias Disponíveis

- Desenvolvimento de cenários de longo prazo:
  - Necessidade de metodologia adequada → Adoção de modelos:
    - *Por Lucena (2011) e Szklo (2008)*
      - ❖ *Econométricos*
      - ❖ *Técnico-paramétricos*
      - ❖ *Otimização – equilíbrio parcial*
      - ❖ *Simulação*
    - *Por Greening et al. (2007)*
      - ❖ *Análise de decomposição*
      - ❖ *Econométricos*
      - ❖ **Top-Down**
      - ❖ **Bottom-up**
      - ❖ *Análise microeconômica específica*
  - Definição da fronteira de análise: relação com o *scenario-maker*
    - ❖ *Global*
    - ❖ *Nacional*
    - ❖ *Pequenas Regiões*
    - ❖ *Empresas*
    - ❖ *Planta Industrial*

# Construção de Cenários

## Metodologias Disponíveis

- Técnicas de Construção de Cenários: *Top-Down* vs. *Bottom-up*
  - Aplicação em sistemas energéticos:



Fonte: de Lucena (2011).



# Construção de Cenários

## Metodologias Disponíveis

### ➤ Técnicas de Construção de Cenários: *Top-Down* vs. *Bottom-up*

| <b>Puramente <i>Top-down</i> (TD)</b>                                             | <b>Puramente <i>Bottom-up</i> (BU)</b>                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Utiliza dados agregados (consistência macro)                                      | Utiliza dados detalhados de tecnologias (não busca consistência macro)                                                                                                                    |
| Avaliação do planejamento através dos seus impactos na produção, na renda, no PIB | Avaliação do planejamento a partir dos seus impactos no desenvolvimento e aplicação de tecnologias (eficiência produtiva)                                                                 |
| Assume que os mercados são eficientes (eficiência alocativa)                      | Não parte da hipótese de eficiência do mercado                                                                                                                                            |
| Permite a avaliação dos efeitos intersetoriais                                    | Não permite avaliação de efeitos intersetoriais                                                                                                                                           |
| Progresso técnico agregado                                                        | Progresso técnico tende a ser superestimado: existência de "hidden costs" para inovações tecnológicas (custos de transação, barreiras de mercado, "otimismo da bancada", "trancamentos"). |
| Tecnologias analisadas por parâmetros de equações                                 | Technology explicitamente tratada no modelo                                                                                                                                               |
| Adequado para avaliação de políticas fiscais, monetárias                          | Adequado para avaliação de políticas de gerenciamento pelo lado da demanda (GLD)                                                                                                          |
| Não permite avaliação detalhada dos impactos ambientais                           | Adequado para avaliação de políticas ambientais setoriais                                                                                                                                 |

# Construção de Cenários

## Variáveis-chave

- Construção de cenários para a indústria: variáveis chave

As variáveis-chave são aquelas decisivas na escolha tecnológica e na mensuração do potencial de abatimento do setor:

- ❖ Atividade: prod/cap  $\uparrow$  - potencial  $\uparrow$
- ❖ Consumo específico do setor: SEC  $\uparrow$  - potencial  $\uparrow$
- ❖ Eficiência de conversão:  $\eta$   $\uparrow$  - potencial  $\downarrow$
- ❖ Emissões de GEEs: prod/cap  $\uparrow$  - potencial  $\uparrow$
- ❖ Custos (investimento, O&M, etc): custo  $\uparrow$  - potencial  $\downarrow$

# Construção de Cenários

## Premissas

- Construção de cenários para a indústria: premissas

Após definição do ano base, período e escala de análise:

- ❖ Evolução da demanda → premissa de crescimento econômico

A partir de dados macroeconômicos como PIB, VA, etc.

Expl: Dados IBGE, PNE (EPE, 2014).

- ❖ Evolução tecnológica → caracterização do portfólio tecnológico.

Definição do *start-up* de novas tecnologias, sucateamento de tecnologias antigas, ganhos de escala e de eficiência, restrições de atividade (*lock-in* tecnológico, inflexibilidade industrial), portfólio de insumos e combustíveis disponíveis, etc.

Expl: estudos EPE, estudos IEA, informações de associações e empresas.

- ❖ Evolução do preço dos insumos utilizados → preços de combustíveis e matéria-prima.

Gás natural (insumo e MP), eletricidade, etc.

Expl: estudos IEA.

# Construção de Cenários

## Resultados

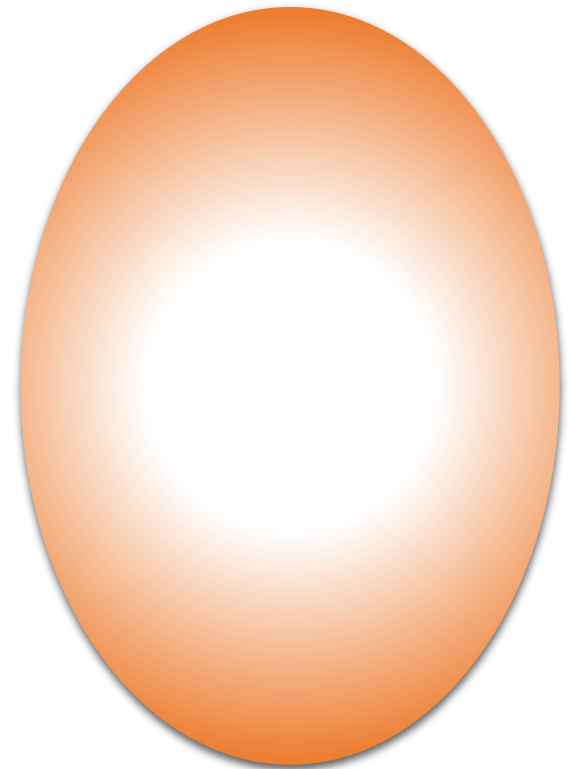
- Construção de cenários para a indústria: resultados

### *Análise setorial*

- ✓ Perfil e evolução do consumo energético
- ✓ Perfil e evolução de emissões
  - **Potencial de abatimento não aditivo**
- ✓ Custos de abatimento por opção de mitigação
  - **Curva de custo marginal de abatimento**
- ✓ Potencial de abatimento por faixa de custo de abatimento

### *Análise integrada*

- ✓ Perfil e evolução do consumo energético
- ✓ Perfil e evolução de emissões
- ✓ Recursos, insumos e portfólio tecnológico necessário
  - **Potencial de abatimento aditivo**
- ✓ Custo global do sistema energético



# Medidas de Mitigação

## Classificação

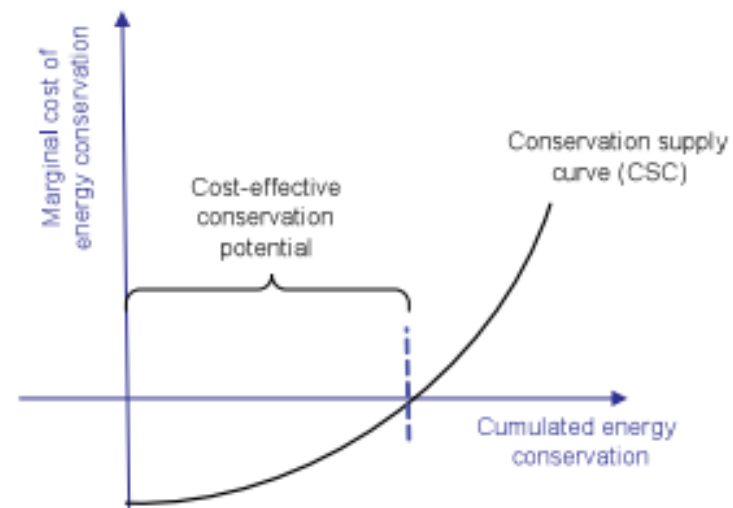
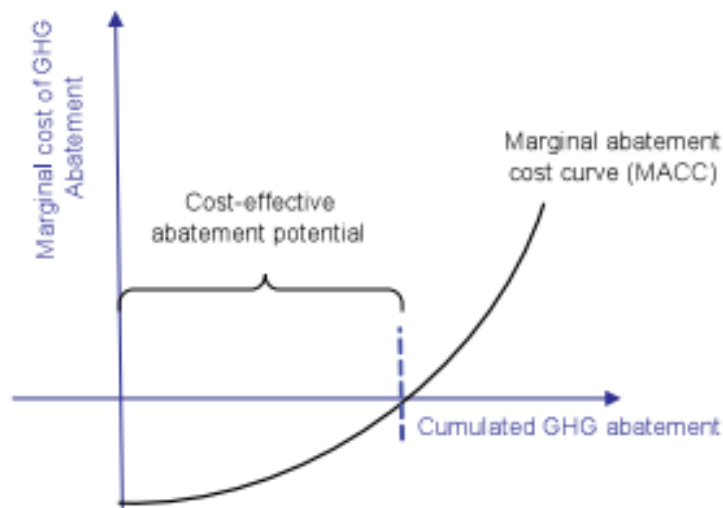
- Transversais: aplicáveis a diversos setores.
  - *De operação*: implica em mudança no modo de operação de uma planta industrial.
  - *De equipamento*: implica na troca de equipamento dentro de uma unidade industrial.
  - *De combustível*: implica na adaptação de uma planta industrial para que adote um insumo combustível alternativo.
- Específicas: aplicáveis apenas em um setor/processo produtivo específico.
  - *Incrementais*: implica em mudanças de processo mais modestas e específicas de uma linha produtiva, em geral ocasionada por inovações incrementais.
  - *Novos processos*: implica em mudanças estruturais profundas na planta industrial para receber um processo significativamente diferente do habitualmente utilizado. Constituem grandes saltos de inovação tecnológica.

# A Curva de Custo de Abatimento

- Custo de abatimento: custo incorrido para que seja abatida uma unidade de gás de efeito estufa →  $\$/\text{tCO}_2\text{e}$ .
- A curva de custo marginal de abatimento (*Marginal Abatement Cost Curve - MACC*) é uma forma prática de se identificar as opções tecnológicas disponíveis, seus custos e seus potenciais de mitigação.
- A MACC apresenta os custos extras, ou marginais, atrelados a potenciais de redução de emissões em relação á uma linha de base.
- Linha de base: cenário que reflete as escolhas tecnológicas e de comportamento em circunstâncias correntes, usuais (*business as usual – BAU*), desconsiderando, portanto, quaisquer intervenções de cunho mitigatório (políticas de baixo carbono).
- MACC pode ser sobre o futuro, não sobre o presente, e por isso pode ter opções tecnológicas inexistentes na linha de base.

# A Curva de Custo Marginal de Abatimento

- Lógica semelhante ao custo de conservação de energia:

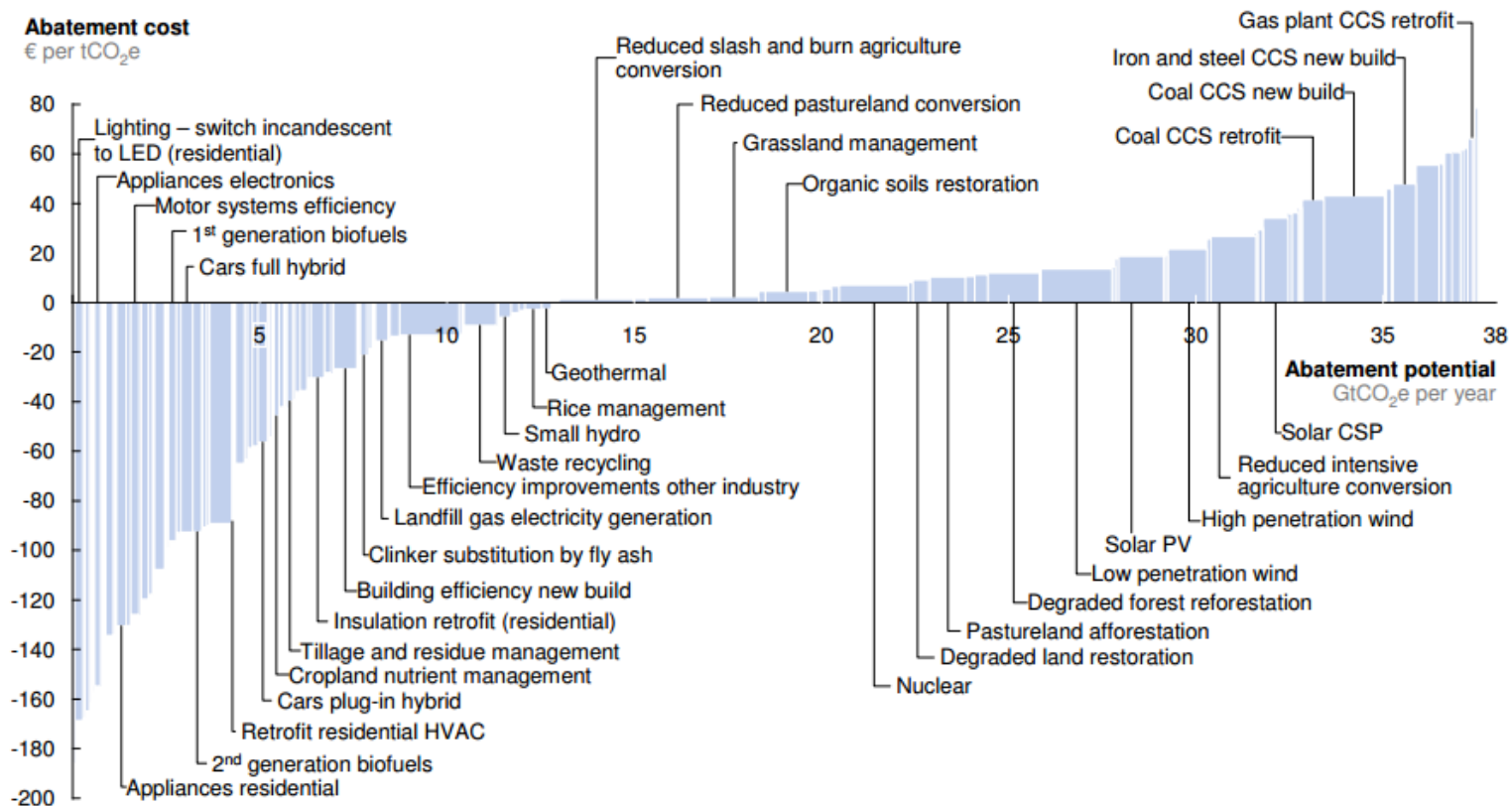


Fonte: Fleiter et al. (2009).

- 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.

# A Curva de Custo Marginal de Abatimento

➤ MACC Global de McKinsey&Co. (2010):





# A Curva de Custo Marginal de Abatimento

- Como calcular o custo de abatimento?
  - Parâmetros a definir:
  - Escala de análise: empresa, setor, país, etc...
  - Período de análise e ano base: 2010-2050.
  - Linha de base: conformação atual (ou BAU) do objeto de análise.
- Levantar opções de mitigação disponíveis dentro do horizonte de análise:
  - Parâmetros técnicos:
    - ✓ Ganhos de eficiência;
    - ✓ Insumos utilizados.
  - Parâmetros econômicos:
    - ✓ Custos de investimento (equipamentos, novo sistema, nova unidade, etc);
    - ✓ Custos de operação e manutenção (fixos e variáveis);
    - ✓ Custos de combustíveis;
    - ✓ Custo do carbono;
    - ✓ Receitas.

# A Curva de Custo Marginal de Abatimento

## ➤ Como calcular o custo de abatimento?

Parâmetros a definir:

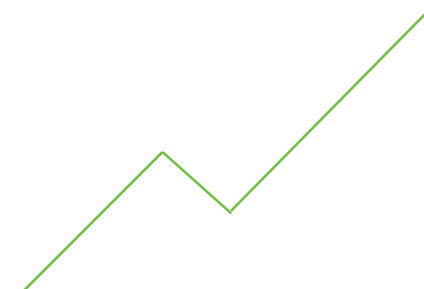
### ➤ Parâmetros financeiros:

- ✓ Vida útil do projeto;
- ✓ Taxa de desconto: social ou privada?

### ➤ Parâmetros ambientais:

- ✓ Emissões de gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, etc...) evitadas.

A partir dos dados levantados:

- Obter potencial de mitigação para cada opção tecnológica;
  - Obter custo de abatimento para cada opção tecnológica;
  - Montar curva de custo marginal de abatimento.
- 

# A Curva de Custo Marginal de Abatimento

- Determinação do Custo de Abatimento 2010-2050

$$CA = \frac{\sum_{i=2010}^{2050} Custos_i}{\sum_{i=2010}^{2050} Emissões Evitadas_i}$$

- Os custos incorridos refletem, na verdade, um delta de custos entre o cenário de baixo carbono e o cenário de referência, trazido a valor presente;
- As emissões evitadas refletem um delta de emissões entre o cenário de baixo carbono e o cenário de referência.

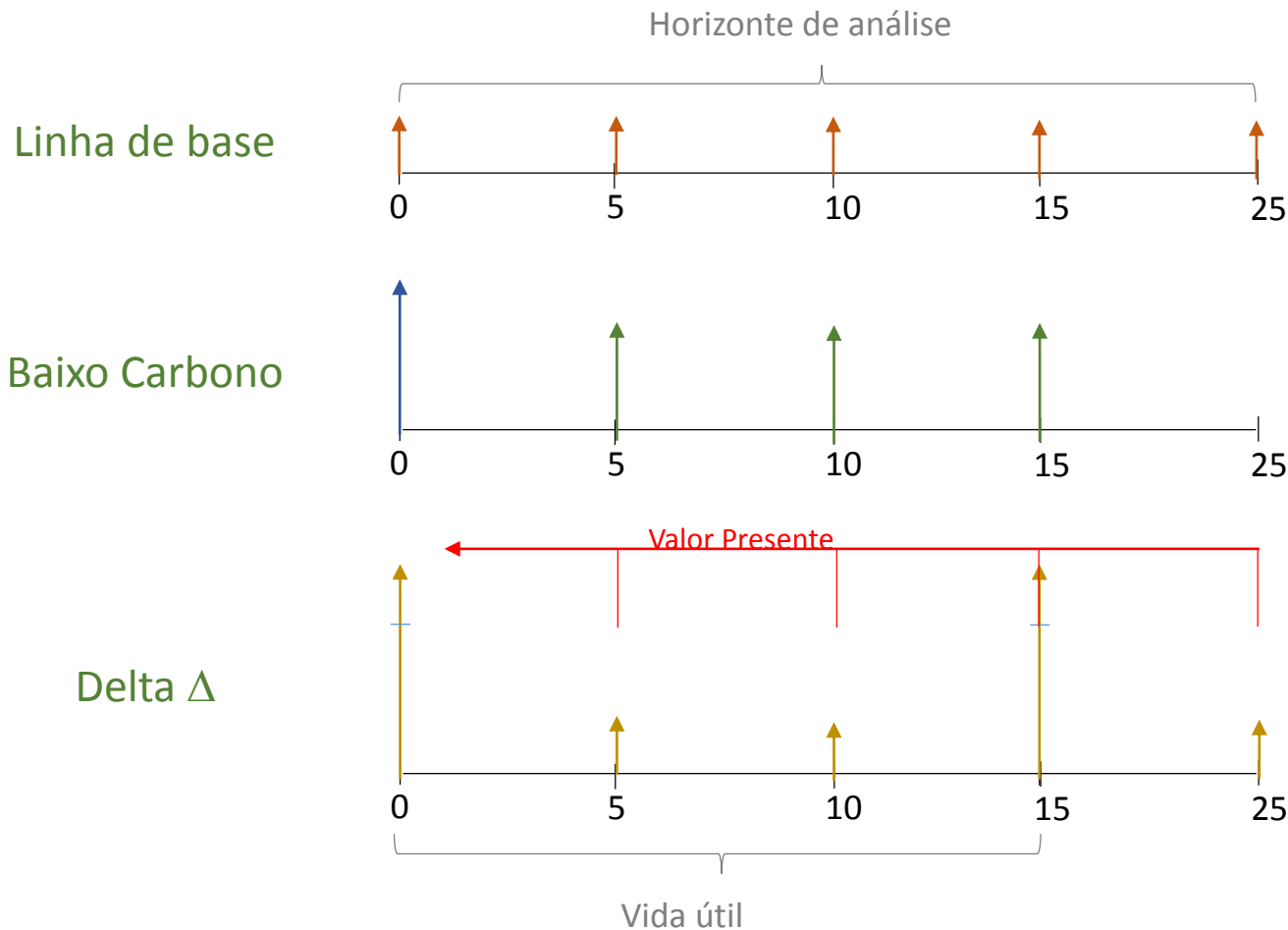
$$CA = \frac{\sum_{i=2010}^{2050} \Delta Custos_{BCxLB_i}}{\sum_{i=2010}^{2050} \Delta Emissões_{BCxLB_i}}$$

$C_i^{Abatimento} - C_i^{Base}$   
 $E_i^{Base} - E_i^{Abatimento}$

- Os custos devem ser obtido em valor presente pelo método do valor presente líquido.

# A Curva de Custo Marginal de Abatimento

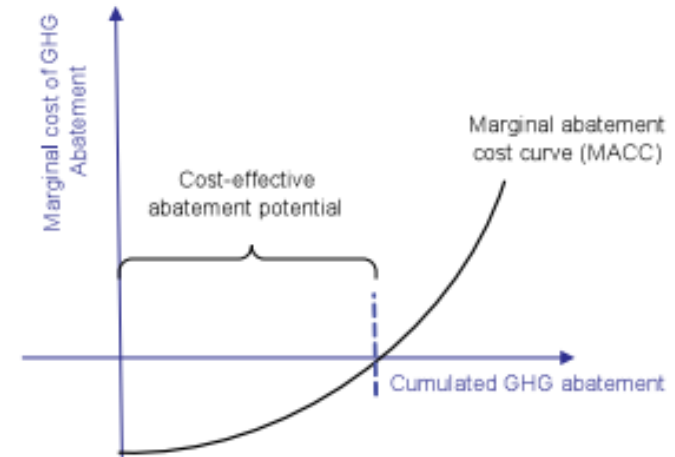
- Horizonte de análise vs. Tempo de vida útil do projeto:



- Dentro do método VPL, o valor deve ser obtido considerando-se o horizonte de análise, havendo a necessidade de se repetir o investimento posteriormente se  $V_{\text{útil}} < T_{\text{análise}}$ .

# A Curva de Custo Marginal de Abatimento

- Custo Marginal de Abatimento Negativo:
  - ✓ Dispondo-se os custos de abatimento do menor para o maior, tem-se a CMA;
  - ✓ CMA negativo indica que a opção de mitigação é, na verdade, mais barata do que a opção tecnológica na linha de base e, por isso, poderia ser adotada mesmo na ausência de políticas de incentivo.
  - ✓ No entanto, MACC consistem essencialmente em opções tecnológicas e, por isso, não cobrem *custos de transação*, assim como custos associados a barreiras culturais, de informação, de mercado, financeiras, logísticas, etc.



# A Curva de Custo Marginal de Abatimento

- A escolha da taxa de desconto:
  - ✓ Taxa de desconto social: deve refletir os benefícios gerados à sociedade pela implementação da opção de mitigação.
  - ✓ Taxa de desconto privada: deve refletir a atratividade do projeto para o investidor privado.
  - ✓ A escolha da taxa de desconto a ser utilizada depende da finalidade da análise:
    - Tomadores de decisão podem identificar quais políticas de intervenção podem se mostrar eficientes;
    - Empresários podem identificar oportunidades de negócios e ganhos de competitividade;
    - Pesquisadores podem entender o link entre metas de redução de emissões e ações concretas de suporte.
- Na indústria, as taxas de desconto tendem a variar entre 15% e 20%.

# Curva de Custo Marginal de Abatimento Com Inovação

## ➤ Inovação na Indústria

### *Alguns conceitos básicos:*

- ✓ O processo de inovação envolve pesquisa, desenvolvimento, demonstração e expansão (RDD&D).
- ✓ Inovação de produto e de processo são interdependentes.
- ✓ Inovação para indústria sustentável é aquela que envolve novos processos que reduzem impactos ambientais de atividades de manufatura e/ou novos produtos que indiretamente permitem a redução de consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub>. (IEA, 2014).

### *Conceito de curva de aprendizado:*

- ✓ A curva de aprendizado é uma descrição matemática da performance do esforço repetitivo (*learning-by-doing*). Enquanto o esforço é repetido, tende-se a levar menos tempo para se realizar o mesmo trabalho. (Anzanello & Fogliatto, 2011)
- ✓ Os modelos de aprendizado tecnológico utilizam como dados de entrada ganhos históricos de experiência que podem ser associados ao desenvolvimento paralelo e conhecimento adquirido de outras áreas ou com a intensidade de P&D (Rochedo & Szklo, 2013).

# Curva de Custo Marginal de Abatimento Com Inovação

➤ Modelos de curva de aprendizado:

*Wrights:*

$$y = C_1 x^b$$

*Stanford-B:*

$$y = C_1 (x + B)^b$$

*Dejong's:*

$$y = C_1 [M + (1 - M)x^b]$$

*S-Curve:*

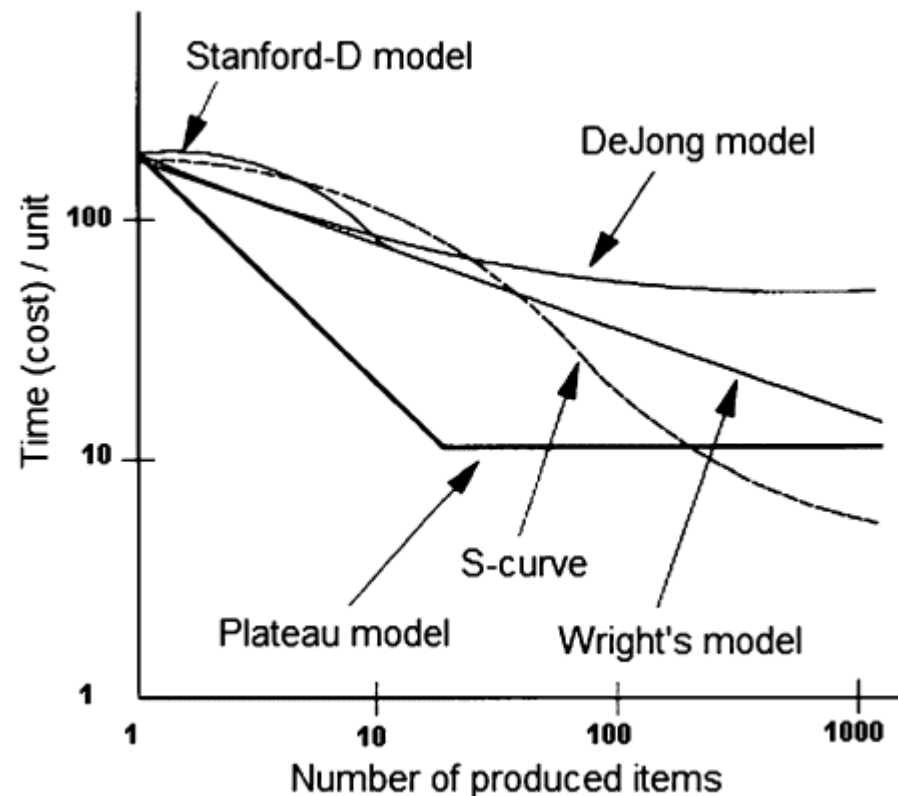
$$y = C_1 [M + (1 - M)(x + B)^b]$$

*Plateau:*

$$y = C + C_1 x^b$$

*Time Dependent:*

$$C = C_0 A_0 e^{-b.d.t}$$



Fonte: Anzanello & Fogliatto (2011).



# Curva de Custo Marginal de Abatimento Com Inovação

➤ Exemplo de curva de aprendizado aplicado à indústria:

*Polietileno verde:*

*Parâmetros:*

*$C_0$ : 150 US\$/t*

*LR: 20% → PR: 80% →  $b$ : 0,32*

*A: capacidade instalada (base prod. FC~85%)*

*$A_0$ : 600 kt*

*B: 0,5*

*D: 5%*

| <b>Linha de base (kton)</b> | 2010  | 2015  | 2020  | 2025  | 2030  | 2035  | 2040  | 2045  | 2050  |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SC nafta                    | 4.792 | 5.125 | 5.870 | 6.882 | 5.333 | 6.108 | 5.203 | 5.780 | 9.494 |
| SC etano                    | 2.203 | 2.356 | 2.576 | 3.019 | 4.464 | 5.113 | 5.888 | 6.541 | 8.870 |
| SC etanol                   | 524   | 561   | 640   | 751   | 872   | 999   | 1.127 | 1.252 | 1.371 |

| <b>Baixo Carbono (kton)</b> | 2010  | 2015  | 2020  | 2025  | 2030  | 2035  | 2040  | 2045  | 2050   |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| SC nafta                    | 4.792 | 5.125 | 5.688 | 6.393 | 4.533 | 4.599 | 2.882 | 1.778 | 2.057  |
| SC etano                    | 2.203 | 2.356 | 2.496 | 2.805 | 3.794 | 3.849 | 3.261 | 2.012 | 1.921  |
| SC etanol                   | 524   | 561   | 903   | 1.454 | 2.342 | 3.772 | 6.075 | 9.784 | 15.757 |

# Curva de Custo Marginal de Abatimento Com Inovação

➤ Exemplo de curva de aprendizado aplicado à indústria:

*Polietileno verde:*

*Parâmetros:*

*$C_0$ : 150 US\$/t*

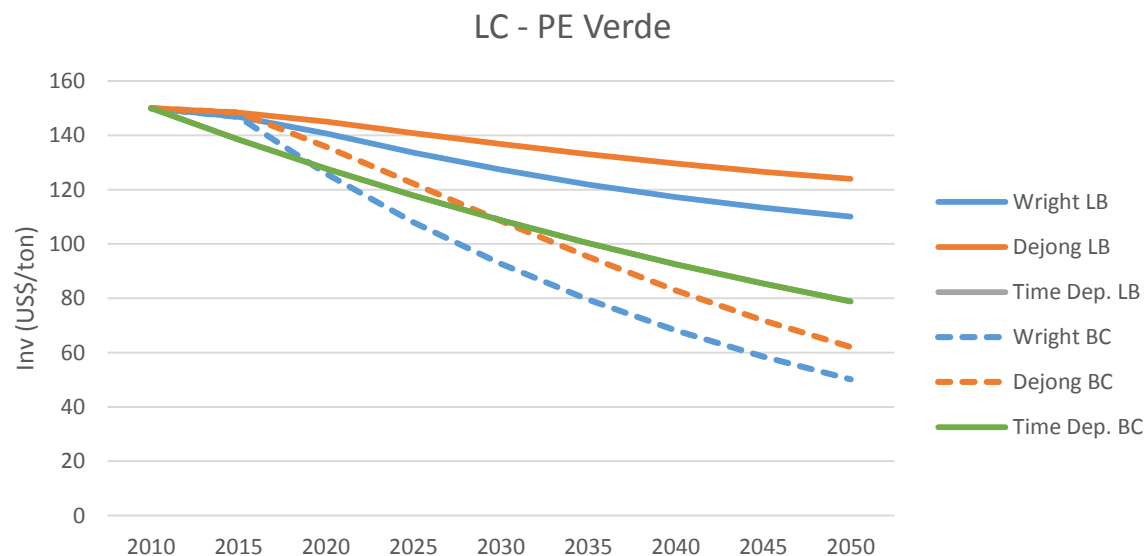
*$LR$ : 20% →  $PR$ : 80% →  $b$ : 0,32*

*$A$ : capacidade instalada (base prod.  $FC \sim 85\%$ )*

*$A_0$ : 600 kt*

*$B$ : 0,5*

*$D$ : 5%*



# Curva de Custo Marginal de Abatimento Com Inovação

➤ *Custo de abatimento com curva de aprendizado :*

*Parâmetros:*

*SEC:*

*SC(nafta): 25 GJ/ton*

*SC (etano): 17 GJ/ton*

*De(etOH): 8 GJ/ton*

*SPC:*

*SC(nafta): 40 GJ/ton*

*SC (etano): 25 GJ/ton*

*FES:*

*Comb: 0,065 tCO<sub>2</sub>e/GJ*

*Proc(nafta): 0,017 tCO<sub>2</sub>e/GJ*

*Proc (etano): 0,014 tCO<sub>2</sub>e/GJ*

*Custo Comb: 22 US\$/GJ*

*Taxa de Desconto: @8% (social), @15% (mercado).*



# Curva de Custo Marginal de Abatimento Com Inovação

## ➤ Custo de abatimento com curva de aprendizado:

| Cenários - ktCO <sub>2</sub> e | 2010   | 2015   | 2020   | 2025   | 2030   | 2035   | 2040   | 2045   | 2050   |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Cenário Emissões LB            | 14.524 | 15.533 | 17.611 | 20.646 | 19.240 | 22.038 | 21.146 | 23.492 | 35.503 |
| Cenário Emissões BC            | 14.524 | 15.533 | 17.210 | 19.572 | 17.186 | 18.162 | 14.546 | 12.112 | 15.730 |
| Redução (%)                    | 0%     | 0%     | -2%    | -5%    | -11%   | -18%   | -31%   | -48%   | -56%   |

|                                 | 2010 | 2015 | 2020     | 2025     | 2030       | 2035       | 2040       | 2045       | 2050        |
|---------------------------------|------|------|----------|----------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| Dconsumo energético (mil GJ)    | 0    | 0    | -13.126  | -35.167  | -68.384    | -129.004   | -221.633   | -382.154   | -660.199    |
| Dcusto comb. (US\$ mil)         | 0    | 0    | -288.774 | -773.672 | -1.504.441 | -2.838.080 | -4.875.920 | -8.407.392 | -14.524.385 |
| Demissões (ktCO <sub>2</sub> e) | 0    | 0    | 508      | 1.360    | 2.654      | 5.007      | 8.619      | 14.861     | 25.643      |

| <b>Wright</b>                 | 2010 | 2015 | 2020     | 2025     | 2030       | 2035       | 2040       | 2045       | 2050        |               |              |
|-------------------------------|------|------|----------|----------|------------|------------|------------|------------|-------------|---------------|--------------|
| Dinv (US\$mil)                | 0    | 0    | 37.518   | 52.702   | 78.580     | 115.497    | 167.061    | 238.457    | 337.043     |               |              |
| Dcustos (US\$mil)             | 0    | 0    | -251.256 | -720.970 | -1.425.861 | -2.722.583 | -4.708.859 | -8.168.935 | -14.187.341 |               |              |
| VPCusto/tCO <sub>2</sub> @8%  | 0    | 0    | -229     | -167     | -115       | -79        | -54        | -37        | -25         | <b>CA@8%</b>  | <b>-46,4</b> |
| VPCusto/tCO <sub>2</sub> @15% | 0    | 0    | -122     | -65      | -33        | -17        | -8         | -4         | -2          | <b>CA@15%</b> | <b>-8,6</b>  |

| <b>Dejong</b>                 | 2010 | 2015 | 2020     | 2025     | 2030       | 2035       | 2040       | 2045       | 2050        |               |              |
|-------------------------------|------|------|----------|----------|------------|------------|------------|------------|-------------|---------------|--------------|
| Dinv (US\$mil)                | 0    | 0    | 41.099   | 61.015   | 93.807     | 140.402    | 205.304    | 294.976    | 418.592     |               |              |
| Dcustos (US\$mil)             | 0    | 0    | -247.675 | -712.657 | -1.410.634 | -2.697.678 | -4.670.616 | -8.112.416 | -14.105.792 |               |              |
| VPCusto/tCO <sub>2</sub> @8%  | 0    | 0    | -226     | -165     | -114       | -79        | -54        | -37        | -25         | <b>CA@8%</b>  | <b>-46,0</b> |
| VPCusto/tCO <sub>2</sub> @15% | 0    | 0    | -121     | -64      | -32        | -16        | -8         | -4         | -2          | <b>CA@15%</b> | <b>-8,5</b>  |

| <b>Time Dep.</b>              | 2010 | 2015 | 2020     | 2025     | 2030       | 2035       | 2040       | 2045       | 2050        |               |              |
|-------------------------------|------|------|----------|----------|------------|------------|------------|------------|-------------|---------------|--------------|
| Dinv (US\$mil)                | 0    | 0    | 39.451   | 61.122   | 98.024     | 153.773    | 236.837    | 360.040    | 542.647     |               |              |
| Dcustos (US\$mil)             | 0    | 0    | -249.323 | -712.550 | -1.406.416 | -2.684.307 | -4.639.083 | -8.047.352 | -13.981.737 |               |              |
| VPCusto/tCO <sub>2</sub> @8%  | 0    | 0    | -227     | -165     | -114       | -78        | -53        | -37        | -25         | <b>CA@8%</b>  | <b>-45,7</b> |
| VPCusto/tCO <sub>2</sub> @15% | 0    | 0    | -121     | -64      | -32        | -16        | -8         | -4         | -2          | <b>CA@15%</b> | <b>-8,5</b>  |

Exemplo automatizado na planilha...

# Curva de Custo Marginal de Abatimento Com Inovação

➤ Exemplo de curva de aprendizado aplicado à indústria:

*Polietileno verde:*

*Parâmetros:*

*$C_0$ : 5.000 US\$/t*

*LR: 2% → PR: 98% →  $b$ : 0,03*

*A: capacidade instalada (base prod. FC~85%)*

*$A_0$ : 600 kt*

*B: 0,5*

*d: 5%*

| <b>Linha de base (kton)</b> | 2010  | 2015  | 2020  | 2025  | 2030  | 2035  | 2040  | 2045  | 2050  |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SC nafta                    | 4.792 | 5.125 | 5.870 | 6.882 | 5.333 | 6.108 | 5.203 | 5.780 | 9.494 |
| SC etano                    | 2.203 | 2.356 | 2.576 | 3.019 | 4.464 | 5.113 | 5.888 | 6.541 | 8.870 |
| SC etanol                   | 524   | 561   | 640   | 751   | 872   | 999   | 1.127 | 1.252 | 1.371 |

| <b>Baixo Carbono (kton)</b> | 2010  | 2015  | 2020  | 2025  | 2030  | 2035  | 2040  | 2045  | 2050   |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| SC nafta                    | 4.792 | 5.125 | 5.688 | 6.393 | 4.533 | 4.599 | 2.882 | 1.778 | 2.057  |
| SC etano                    | 2.203 | 2.356 | 2.496 | 2.805 | 3.794 | 3.849 | 3.261 | 2.012 | 1.921  |
| SC etanol                   | 524   | 561   | 903   | 1.454 | 2.342 | 3.772 | 6.075 | 9.784 | 15.757 |

# Curva de Custo Marginal de Abatimento Com Inovação

➤ Exemplo de curva de aprendizado aplicado à indústria:

*Polietileno verde:*

*Parâmetros:*

$C_0$ : 5.000 US\$/t

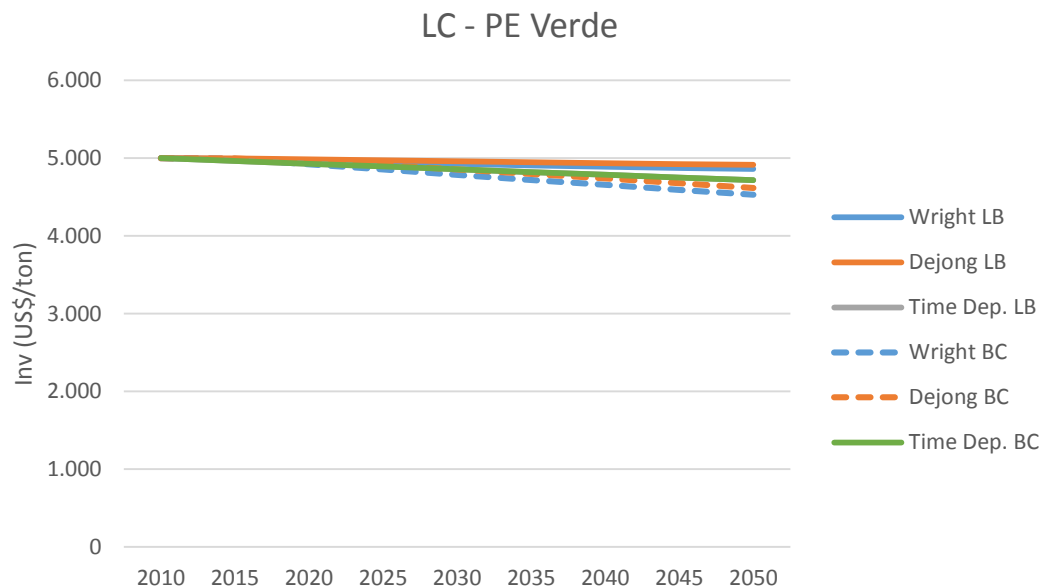
LR: 2% → PR: 98% →  $b$ : 0,03

$A$ : capacidade instalada (base prod. FC~85%)

$A_0$ : 600 kt

$B$ : 0,5

$d$ : 5%



Obrigada!

larissa@ppe.ufrj.br



# Curva de Custo Marginal de Abatimento Com Inovação

➤ *Custo de abatimento com curva de aprendizado :*

*Parâmetros:*

*SEC:*

*SC(nafta): 25 GJ/ton*

*SC (etano): 17 GJ/ton*

*De(etOH): **25 GJ/ton***

*SPC:*

*SC(nafta): 40 GJ/ton*

*SC (etano): 25 GJ/ton*

*FEs:*

*Comb: 0,065 tCO<sub>2</sub>e/GJ*

*Proc(nafta): 0,017 tCO<sub>2</sub>e/GJ*

*Proc (etano): 0,014 tCO<sub>2</sub>e/GJ*

*Custo Comb: 22 US\$/GJ*

*Taxa de Desconto: @8% (social), @15% (mercado).*





# Curva de Custo Marginal de Abatimento Com Inovação

## ➤ Custo de abatimento com curva de aprendizado:

| Cenários - ktCO <sub>2</sub> e | 2010   | 2015   | 2020   | 2025   | 2030   | 2035   | 2040   | 2045   | 2050   |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Cenário Emissões LB            | 15.103 | 16.153 | 18.319 | 21.475 | 20.204 | 23.142 | 22.391 | 24.875 | 37.017 |
| Cenário Emissões BC            | 15.103 | 16.153 | 18.208 | 21.179 | 19.774 | 22.331 | 21.259 | 22.923 | 33.141 |
| Redução (%)                    | 0%     | 0%     | -1%    | -1%    | -2%    | -4%    | -5%    | -8%    | -10%   |

|                                 | 2010 | 2015 | 2020     | 2025     | 2030     | 2035       | 2040       | 2045       | 2050       |
|---------------------------------|------|------|----------|----------|----------|------------|------------|------------|------------|
| Dconsumo energético (mil GJ)    | 0    | 0    | -8.662   | -23.207  | -43.394  | -81.862    | -137.513   | -237.109   | -415.632   |
| Dcusto comb. (US\$ mil)         | 0    | 0    | -190.563 | -510.549 | -954.672 | -1.800.959 | -3.025.282 | -5.216.396 | -9.143.914 |
| Demissões (ktCO <sub>2</sub> e) | 0    | 0    | 445      | 1.193    | 2.304    | 4.347      | 7.441      | 12.830     | 22.219     |

| <b>Wright</b>                 | 2010 | 2015 | 2020      | 2025      | 2030      | 2035      | 2040       | 2045       | 2050       |        |       |
|-------------------------------|------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|--------|-------|
| Dinv (US\$mil)                | 0    | 0    | 1.515.751 | 2.505.514 | 4.295.984 | 7.208.931 | 11.878.170 | 19.316.119 | 31.138.099 |        |       |
| Dcustos (US\$mil)             | 0    | 0    | 1.325.188 | 1.994.966 | 3.341.312 | 5.407.972 | 8.852.888  | 14.099.723 | 21.994.185 |        |       |
| VPCusto/tCO <sub>2</sub> @8%  | 0    | 0    | 1.378     | 527       | 311       | 182       | 118        | 74         | 46         | CA@8%  | 110,2 |
| VPCusto/tCO <sub>2</sub> @15% | 0    | 0    | 736       | 205       | 89        | 38        | 18         | 8          | 4          | CA@15% | 24,9  |

| <b>Dejong</b>                 | 2010 | 2015 | 2020      | 2025      | 2030      | 2035      | 2040       | 2045       | 2050       |        |       |
|-------------------------------|------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|--------|-------|
| Dinv (US\$mil)                | 0    | 0    | 1.528.101 | 2.537.996 | 4.363.495 | 7.334.504 | 12.097.869 | 19.686.669 | 31.749.132 |        |       |
| Dcustos (US\$mil)             | 0    | 0    | 1.337.538 | 2.027.447 | 3.408.822 | 5.533.546 | 9.072.588  | 14.470.273 | 22.605.218 |        |       |
| VPCusto/tCO <sub>2</sub> @8%  | 0    | 0    | 1.391     | 536       | 317       | 186       | 121        | 76         | 47         | CA@8%  | 112,6 |
| VPCusto/tCO <sub>2</sub> @15% | 0    | 0    | 742       | 209       | 90        | 39        | 18         | 8          | 4          | CA@15% | 25,3  |

| <b>Time Dep.</b>              | 2010 | 2015 | 2020      | 2025      | 2030      | 2035      | 2040       | 2045       | 2050       |        |       |
|-------------------------------|------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|--------|-------|
| Dinv (US\$mil)                | 0    | 0    | 1.522.337 | 2.537.689 | 4.378.914 | 7.390.944 | 12.247.836 | 20.033.118 | 32.486.519 |        |       |
| Dcustos (US\$mil)             | 0    | 0    | 1.331.774 | 2.027.140 | 3.424.241 | 5.589.985 | 9.222.555  | 14.816.723 | 23.342.606 |        |       |
| VPCusto/tCO <sub>2</sub> @8%  | 0    | 0    | 1.385     | 536       | 319       | 188       | 123        | 78         | 48         | CA@8%  | 114,2 |
| VPCusto/tCO <sub>2</sub> @15% | 0    | 0    | 739       | 209       | 91        | 39        | 19         | 9          | 4          | CA@15% | 25,5  |

Exemplo automatizado na planilha...

# Fontes de Informação

## ■ Construção de Cenários

Bohringer, C., 1998. The synthesis of bottom-up and top-down in energy policy modeling. *Energy Economics* 20 pp. 233-248.

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.

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.

Hughes & Strachan, 2010. Methodological review of UK and international low carbon scenarios. *Energy Policy* 38 pp. 6056–6065.

Kok *et al.*, 2011. Combining participative backcasting and exploratory scenario development: Experiences from the SCENES project. *Technological Forecasting & Social Change* 78 pp. 835–851.

Koopmans *et al.*, 2001. Bridging the energy efficiency gap: using bottom-up information in a top-down energy demand model. *Energy Economics* 23 pp. 57-75.

McFarland *et al.*, 2004. Representing energy technologies in top-down economic models using bottom-up information. *Energy Economics* 26 pp. 685– 707.

# Fontes de Informação

## ■ MACC

Borba *et al.*, 2012. Energy-related climate change mitigation in Brazil: Potential, abatement costs and associated policies. *Energy Policy* 49 pp. 430–441.

De Gouvello, C., 2010. Brazil Low-carbon Country Case Study. World Bank, Sustainable Development Department of the Latin America and Caribbean Region.

McKinsey & Company, 2010. Impact of financial crisis on carbon economics. Version 2.1 of the global greenhouse gas abatement cost curve.

McKinsey & Company, 2009. Pathways to a low-carbon economy: Version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve.

McKinsey & Company, 2009. Pathways to a low-carbon economy in Brazil.

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.

# Fontes de Informação

## ■ Inovação e Curva de Aprendizado

EIA, 2014. Energy Tehcnology Perspectives. International Energy Agency, Paris, France.

Anzanello, M. J., Fogliatto, F.S., 2011. Learning curve models and applications: Literature review and research directions. International Journal of Industrial Ergonomics 41 pp. 573-583.

Ramírez, C. A., Worrell, E., 2006. Feeding fossil fuels to the soil An analysis of energy embedded and technological learning in the fertilizer industry. Resources, Conservation and Recycling 46 pp. 75–93.

Rochedo, P., Szklo, A., 2012. Designing learning curves for carbon capture based on chemical absorption according to the minimum work of separation. Applied Energy 108 pp. 383–391.

Schoots, K., F. Feriolia, G.J. Kramer, B.C.C. van der Zwaan, 2008. Learning curves for hydrogen production technology: An assessment of observed cost reductions. INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY 33 pp.2630 – 2645.