



20 a 22 de Junho de 2016 - São Paulo/SP

Carbon Capture and Use (CCU)

Sérgio A. Pacca
USP

Realização

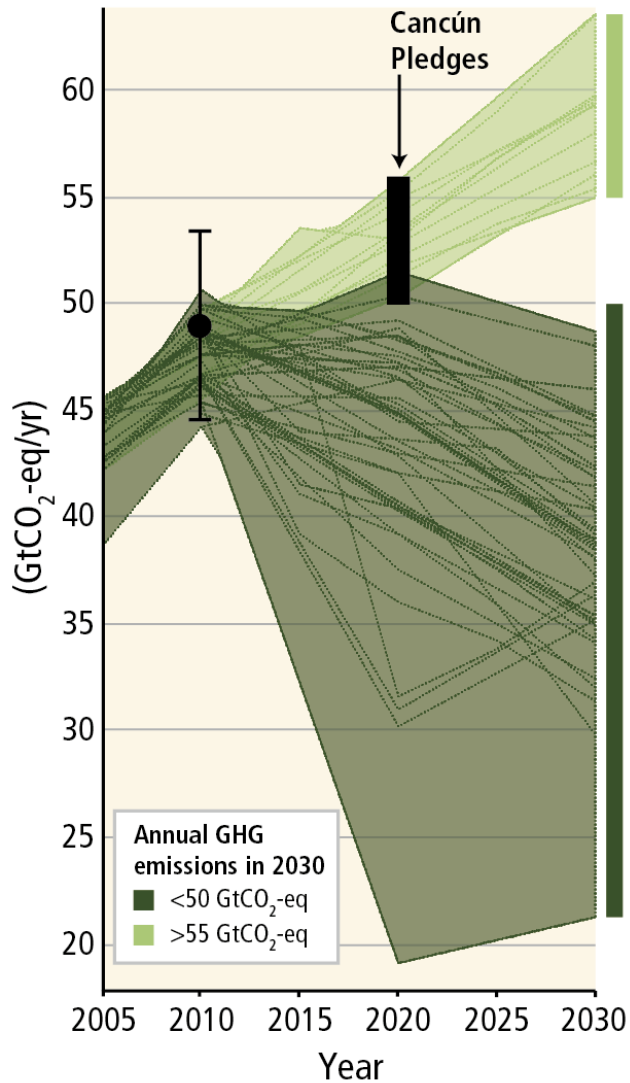


Sumário

- **Projeção das emissões e papel da captura de CO₂**
- **CCS e CCU - Definição do CCU**
- **Possíveis rotas para conversão do CO₂**
- **Propostas de CCU para o setor de cimento**
- **Avaliação comparativa das tecnologias**
- **Conclusões**

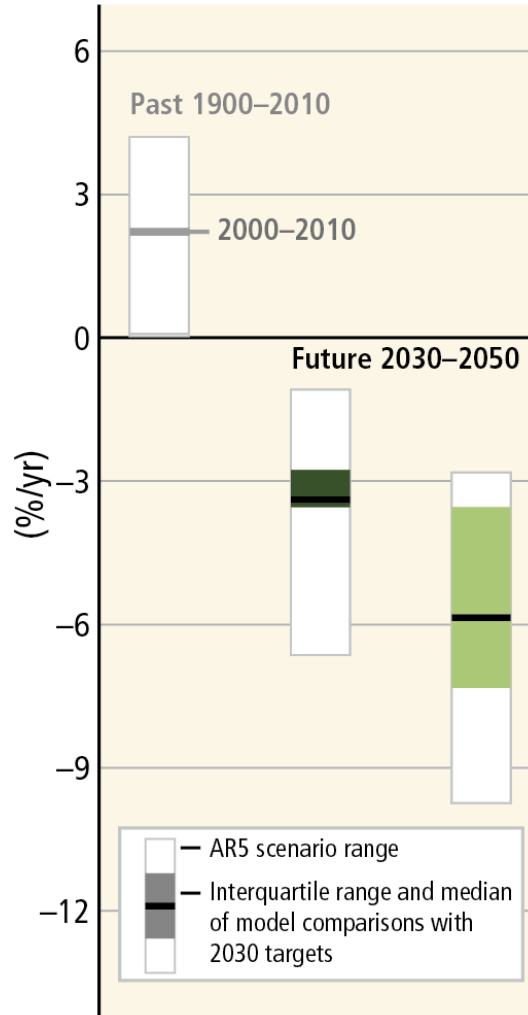
Before 2030

Annual GHG emissions

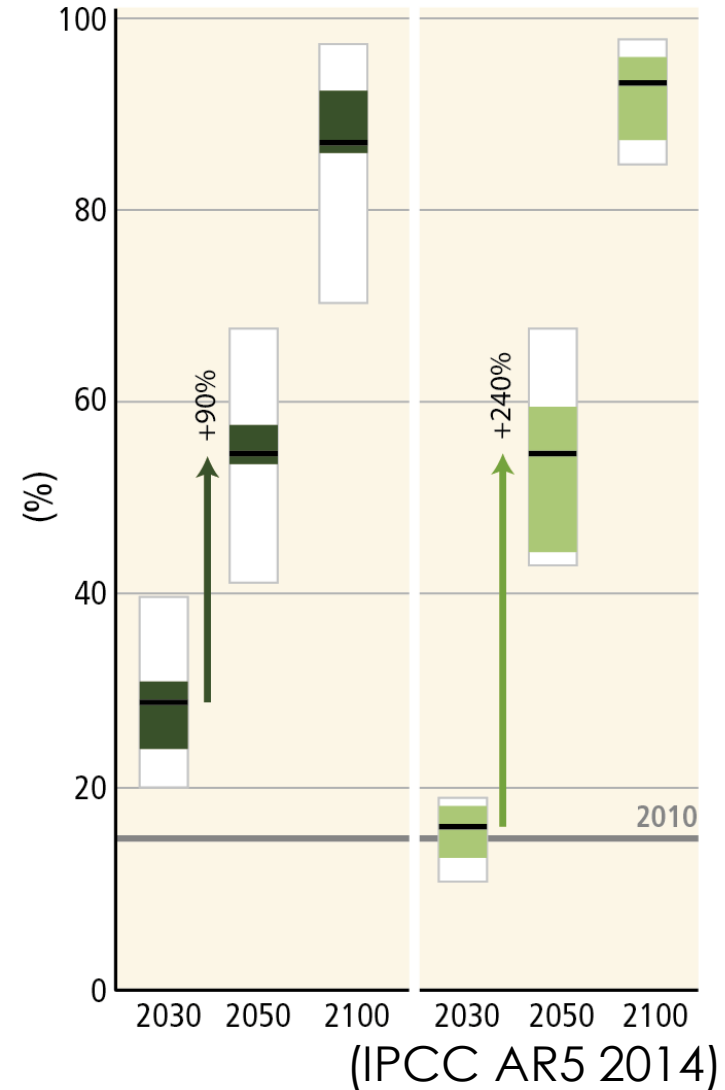


After 2030

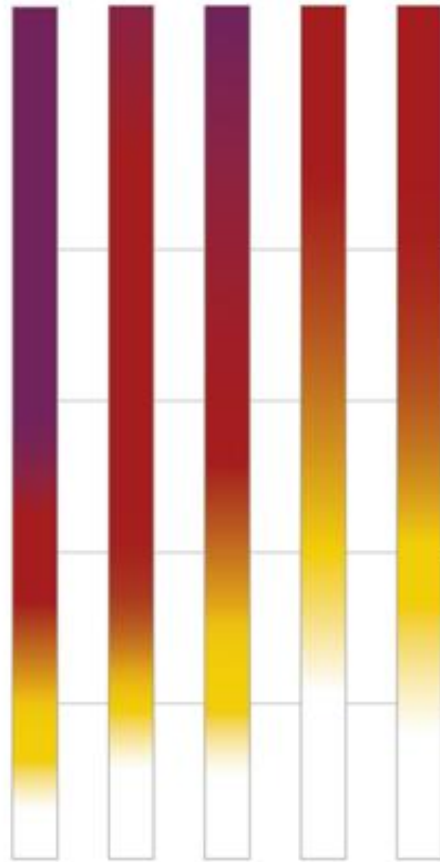
Rate of CO₂ emissions change



Share of zero and low-carbon energy

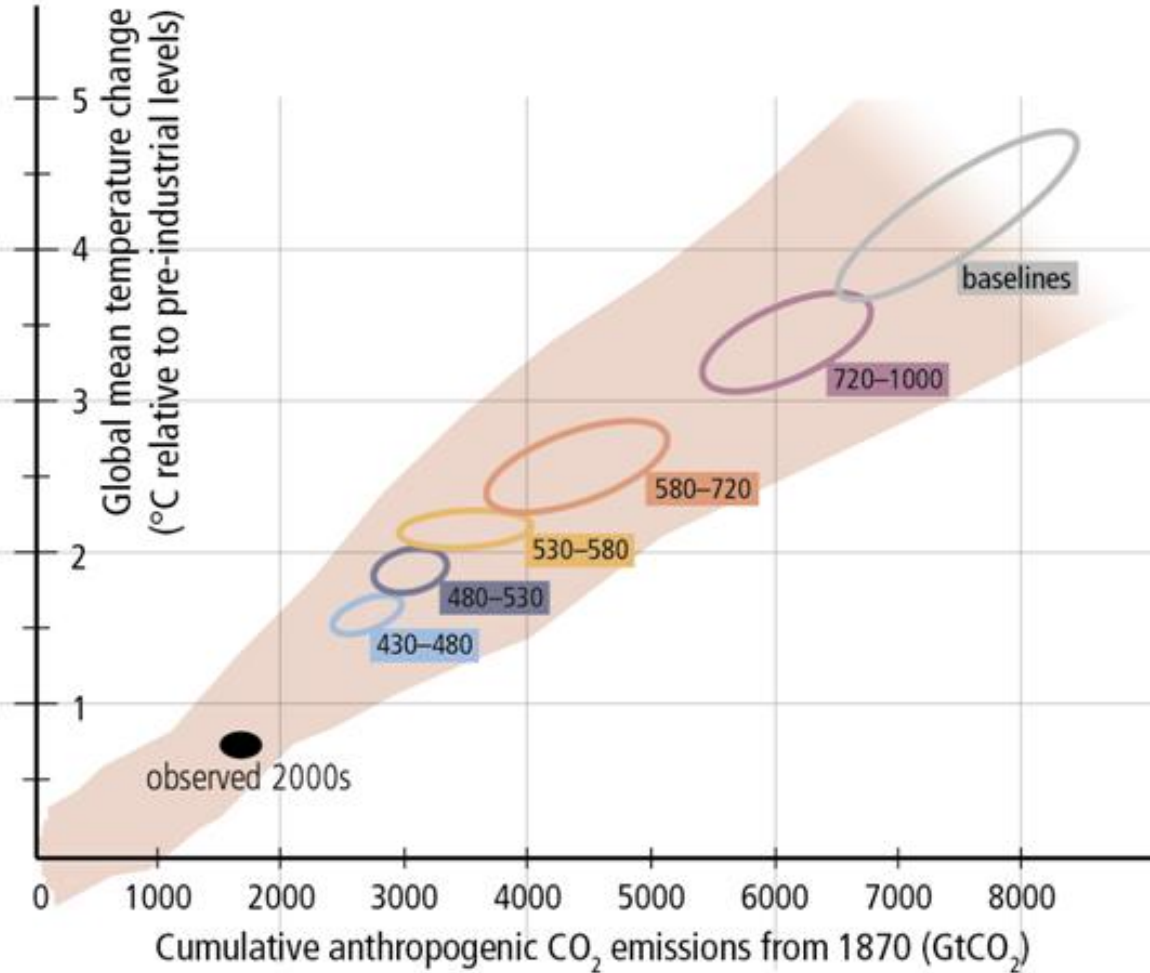


(a) Risks from climate change...



Unique & threatened systems
Extreme weather events
Distribution of impacts
Global aggregate impacts
Large-scale singular events

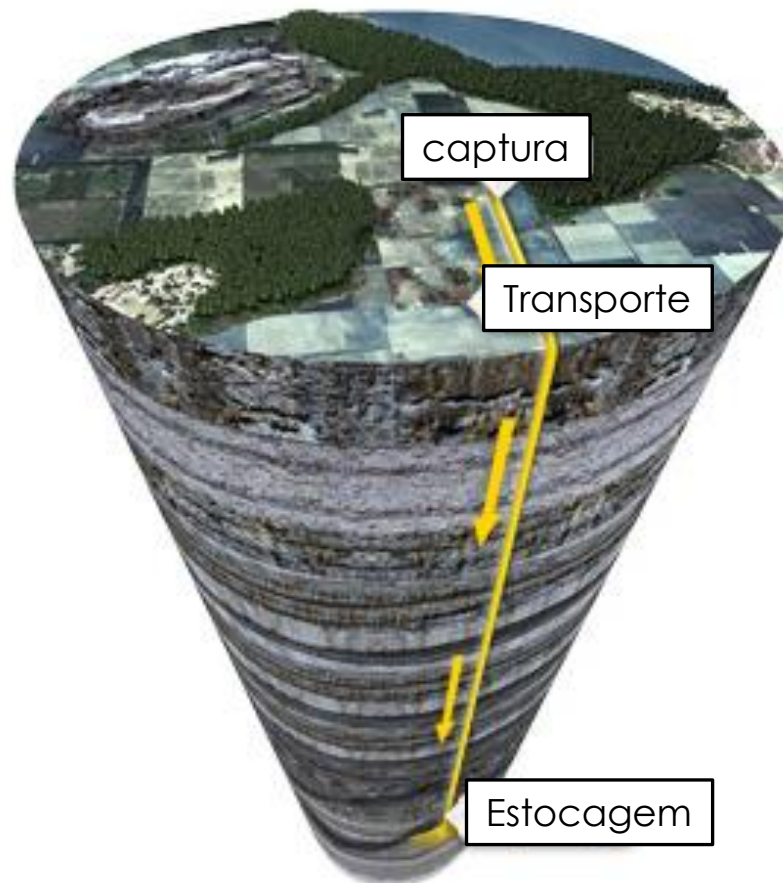
(b) ...depend on cumulative CO₂ emissions...



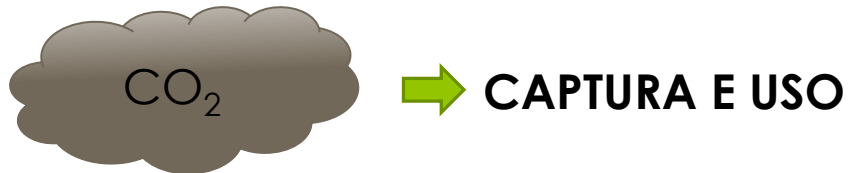
(IPCC AR5 2014)

Carbon Capture and Storage (CCS)

- **Captura**
- **Transporte**
- **Estocagem**



Carbon Capture and Use (CCU)



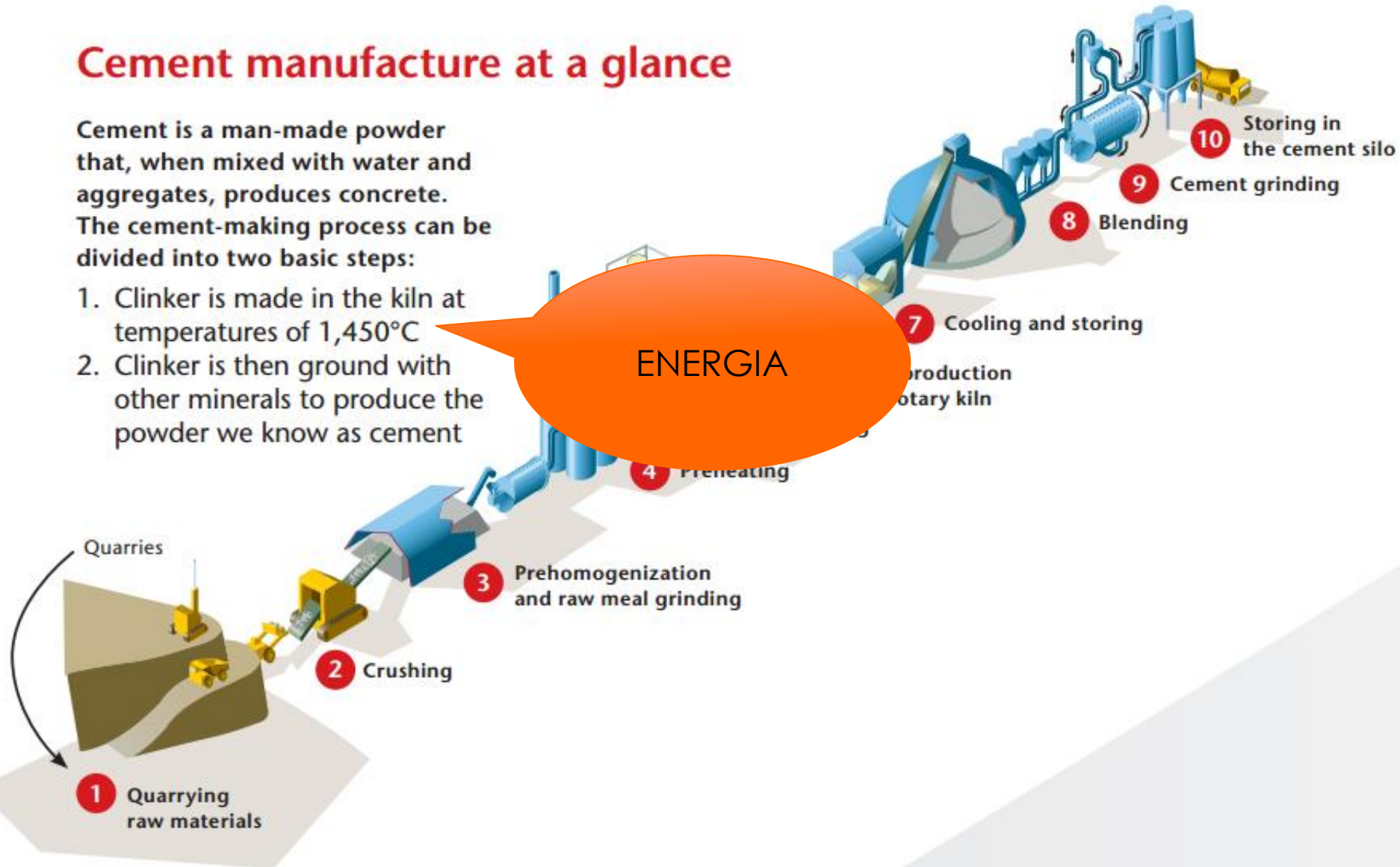
- Economicamente competitiva com o CCS
- Desvia o CO_2 do transporte e da estocagem geológica
- Molécula não reativa que persiste na atmosfera



Cement manufacture at a glance

Cement is a man-made powder that, when mixed with water and aggregates, produces concrete. The cement-making process can be divided into two basic steps:

1. Clinker is made in the kiln at temperatures of 1,450°C
2. Clinker is then ground with other minerals to produce the powder we know as cement

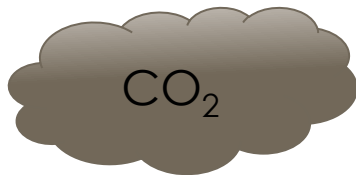


Rotas de conversão

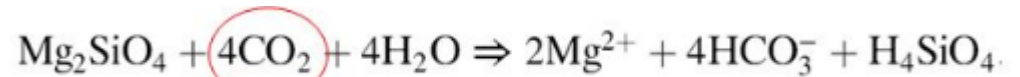
- **Mineral**
- **Biológica**
- **Química**

Rota mineral

- Wollastonita (CaSiO_3)
- Olivina (MgSiO_4)



➔ **Intemperismo**



Catalisadores para acelerar

Rota biológica

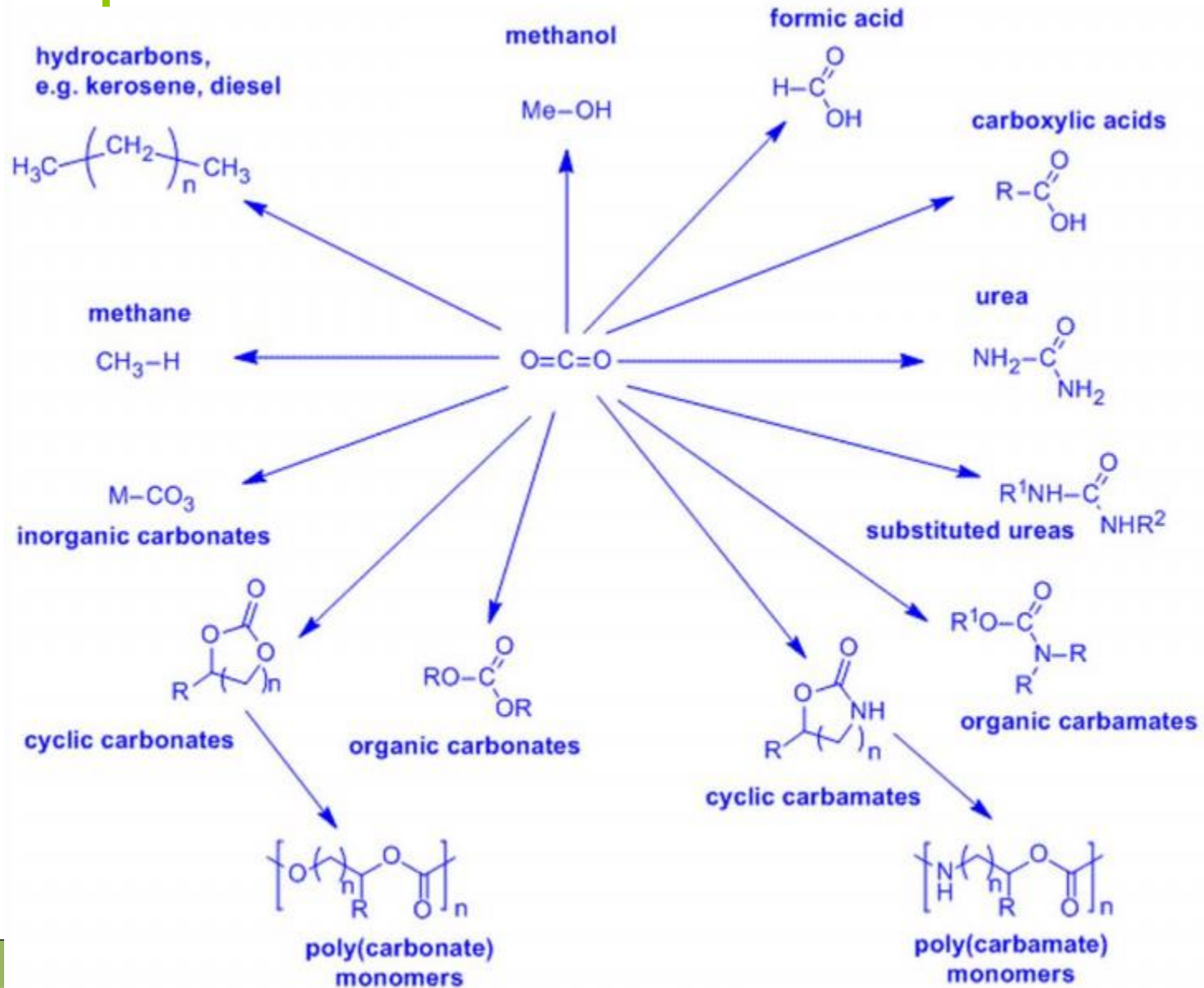
- **Fotossíntese**



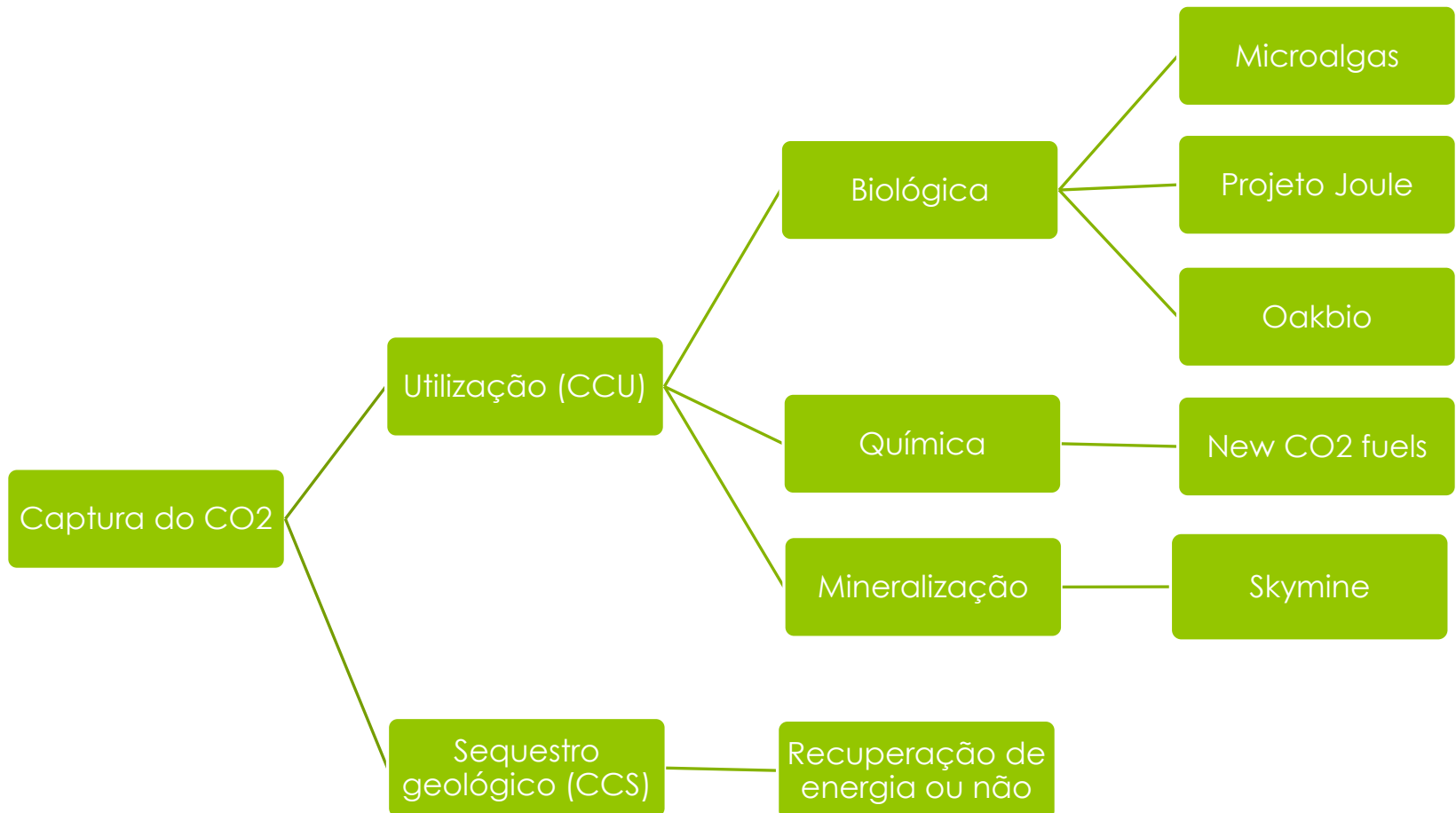
- Algas verdes
- Algas azuis

- **Outros tipos de metabolismo » Organismos heterótrofos**

Rota química



Rotas pós-captura



Microalgas

- Rota biológica – fotossíntese
- Podem implicar em emissões negativas
- Energia solar ou não ~ na célula 3MWh por tonelada de CO₂
- 300 m³ de água por tonelada de CO₂ - 3,4 g de CO₂/litro.dia

- PROJETO: tipo e intensidade de luz; culturas geneticamente modificadas; balanço de nutrientes; concentração de oxigênio; qualidade da água

- PROJETO: reservatórios ou bioreatores – relação S/V

Reservatórios lineares



\$75.000 p/300m³

Biorreatores – luz solar



\$1.800.000 p/300m³

Biorreatores – luz artificial



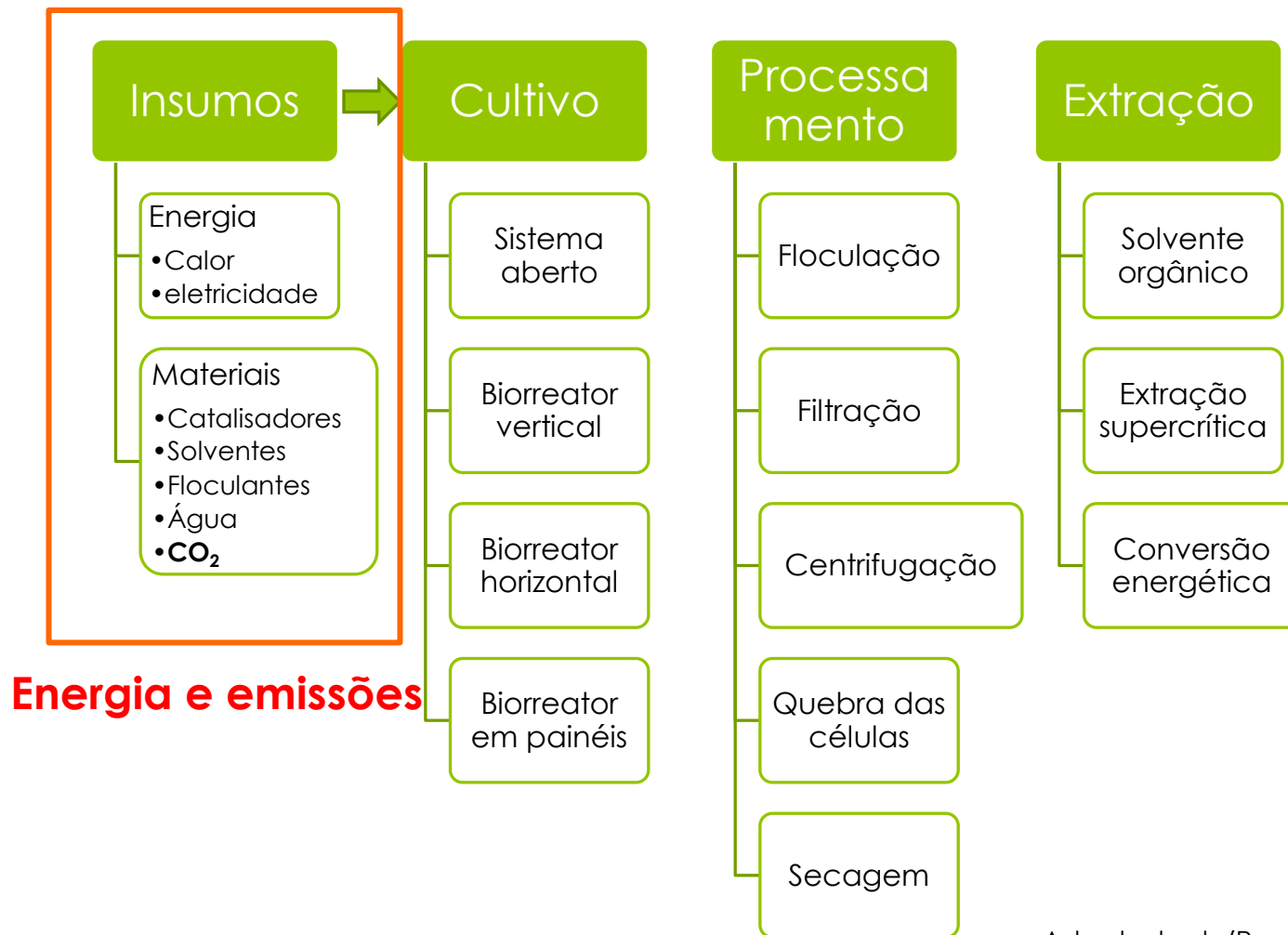
St Marys Cimentos em Bowmanville

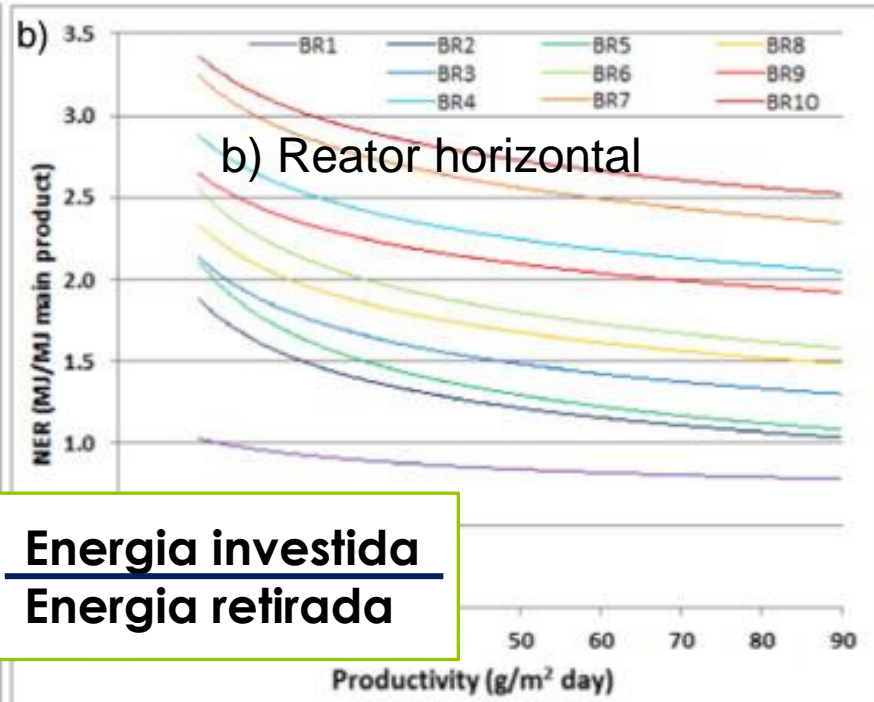
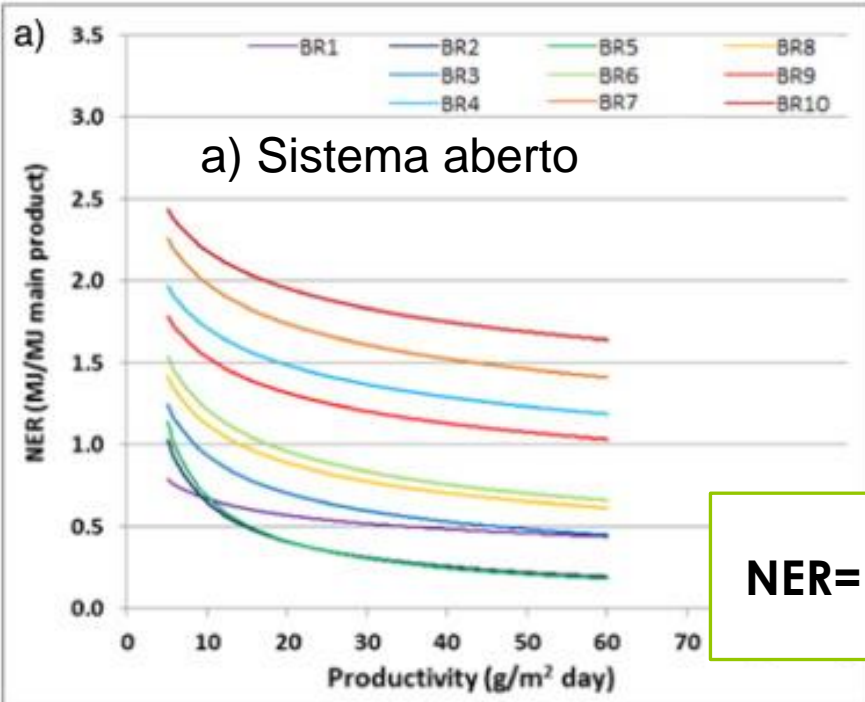
Produtividade dos reatores

	Reservatórios abertos		Reatores horizontais		Reatores verticais		Reatores em painéis	
	Baixo rendimento	Alto rendimento	Baixo rendimento	Alto rendimento	Baixo rendimento	Alto rendimento	Baixo rendimento	Alto rendimento
Produtividade (g/m ² .dia)	10	30	18	45	20	50	22	55
Densidade da cultura (g/l)	0,2	0,4	1,5	2,5	1,5	2,5	1,5	2,5

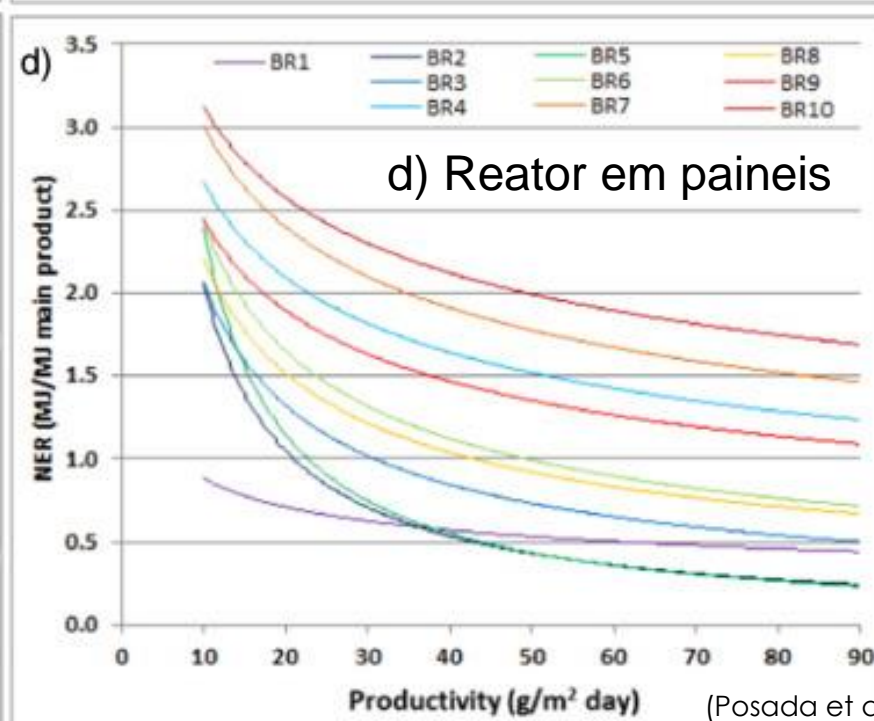
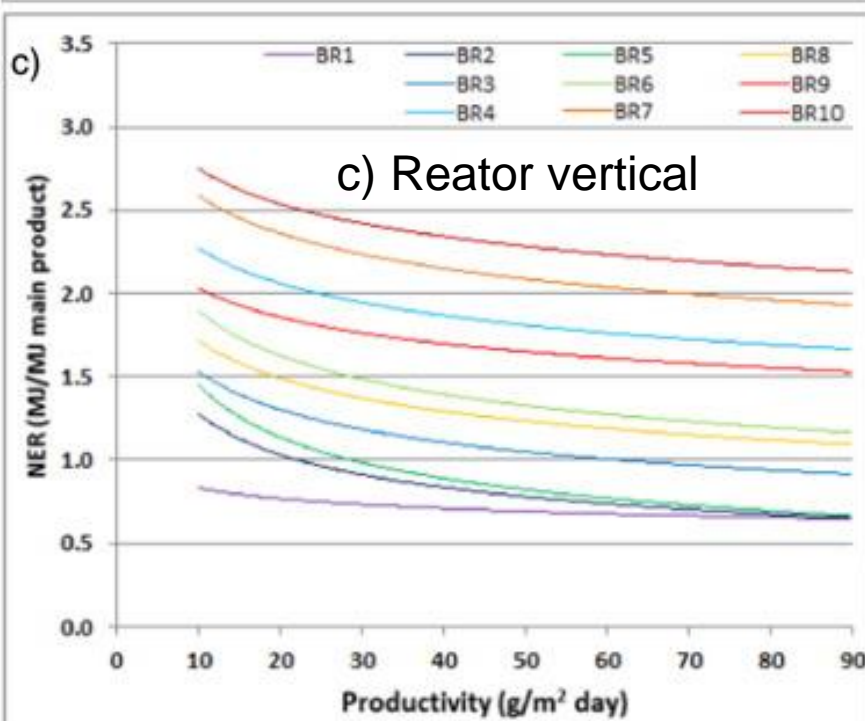
Eficiência no uso do CO₂ (75% res. abertos e 98% biorreatores)

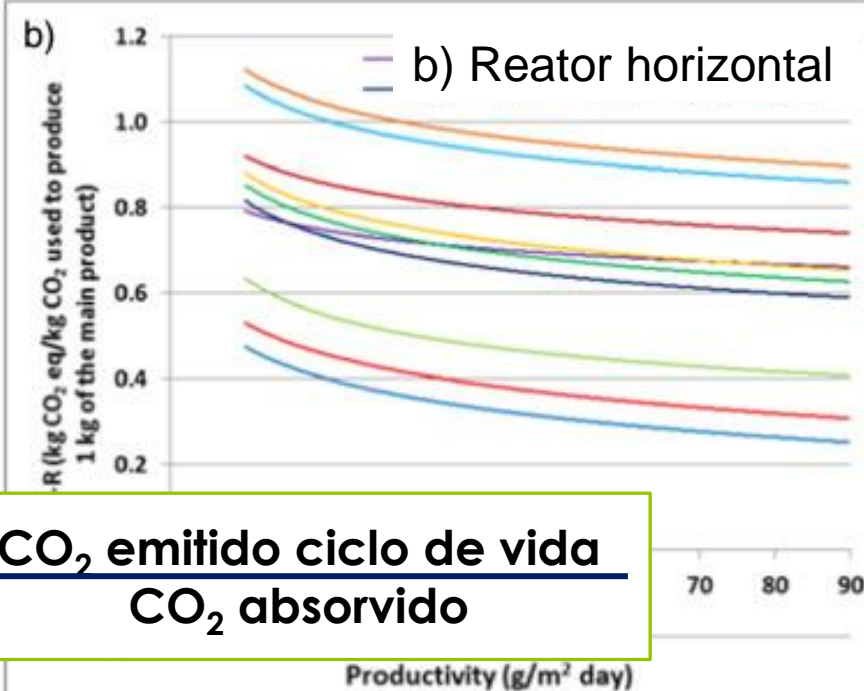
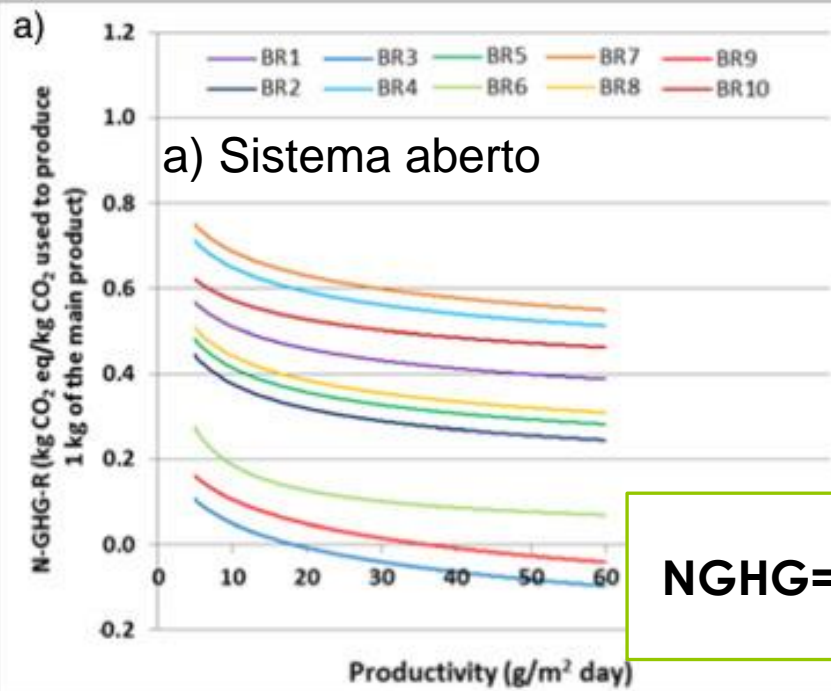
Sistema de produção de microalgas



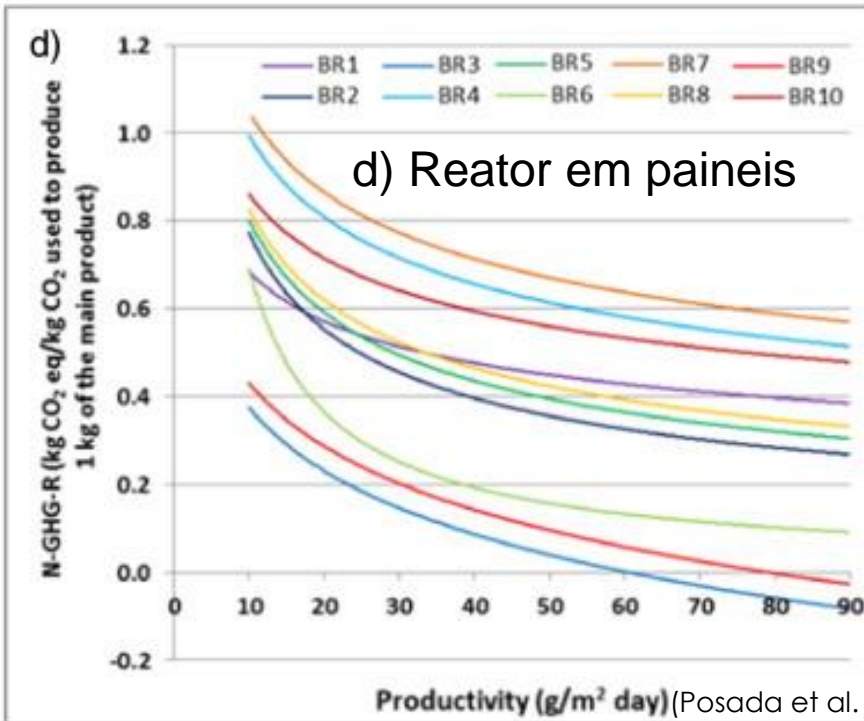
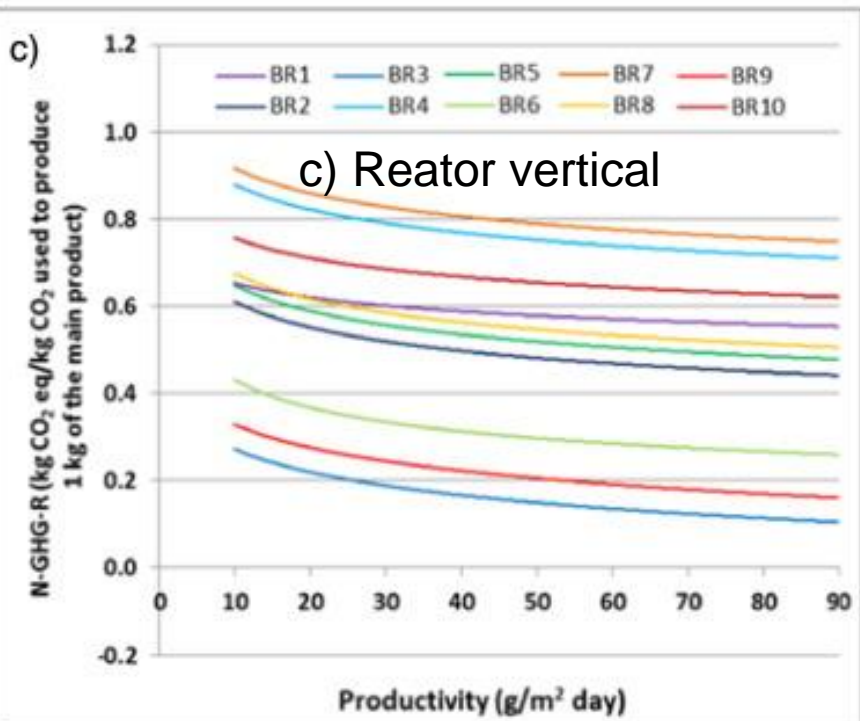


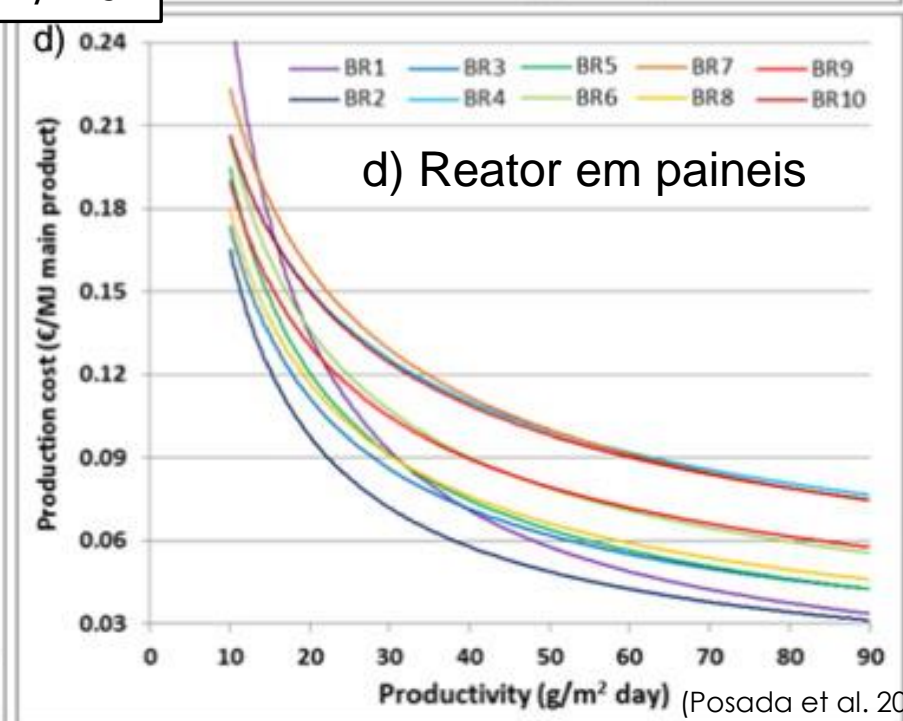
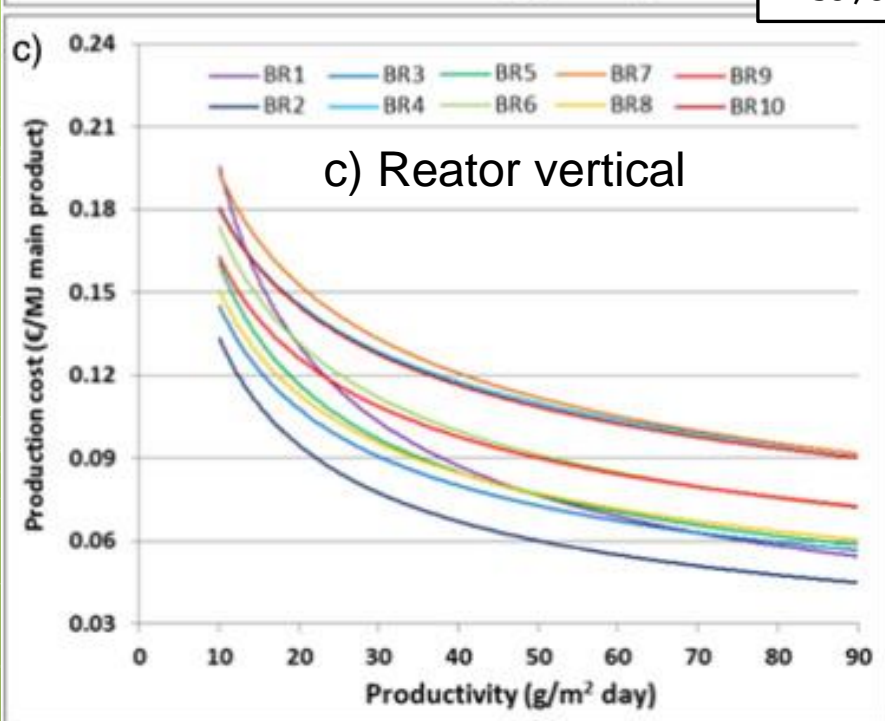
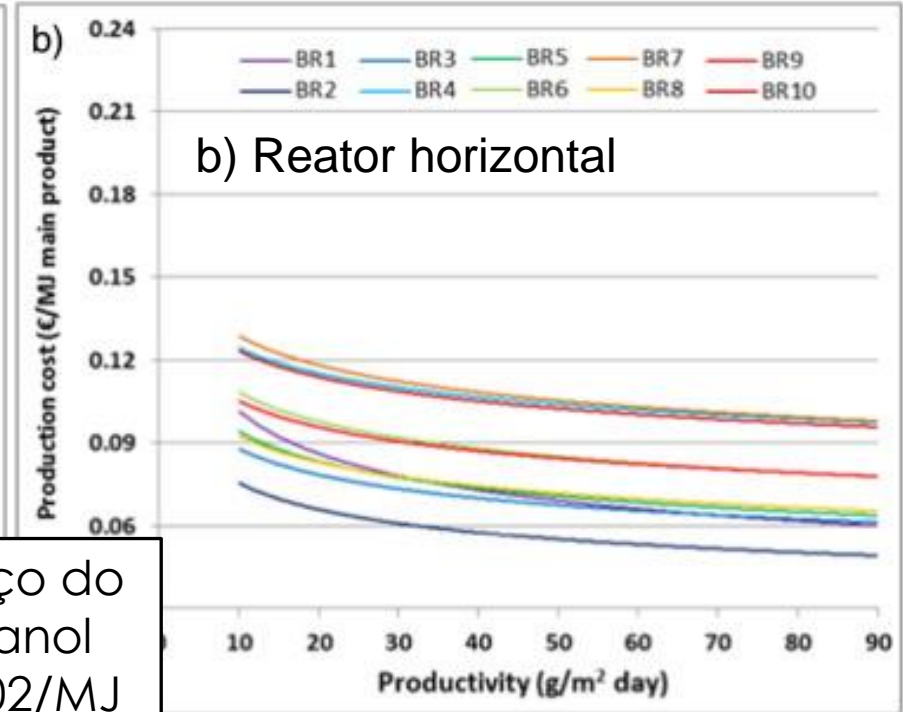
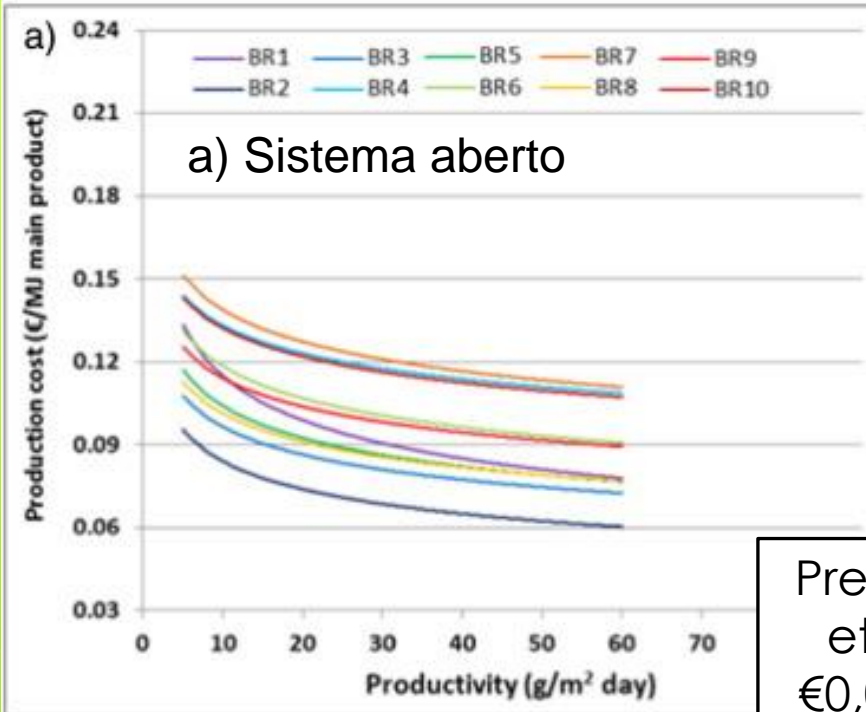
$$\text{NER} = \frac{\text{Energia investida}}{\text{Energia retirada}}$$





$$NGHG = \frac{\text{CO}_2 \text{ emitido ciclo de vida}}{\text{CO}_2 \text{ absorvido}}$$

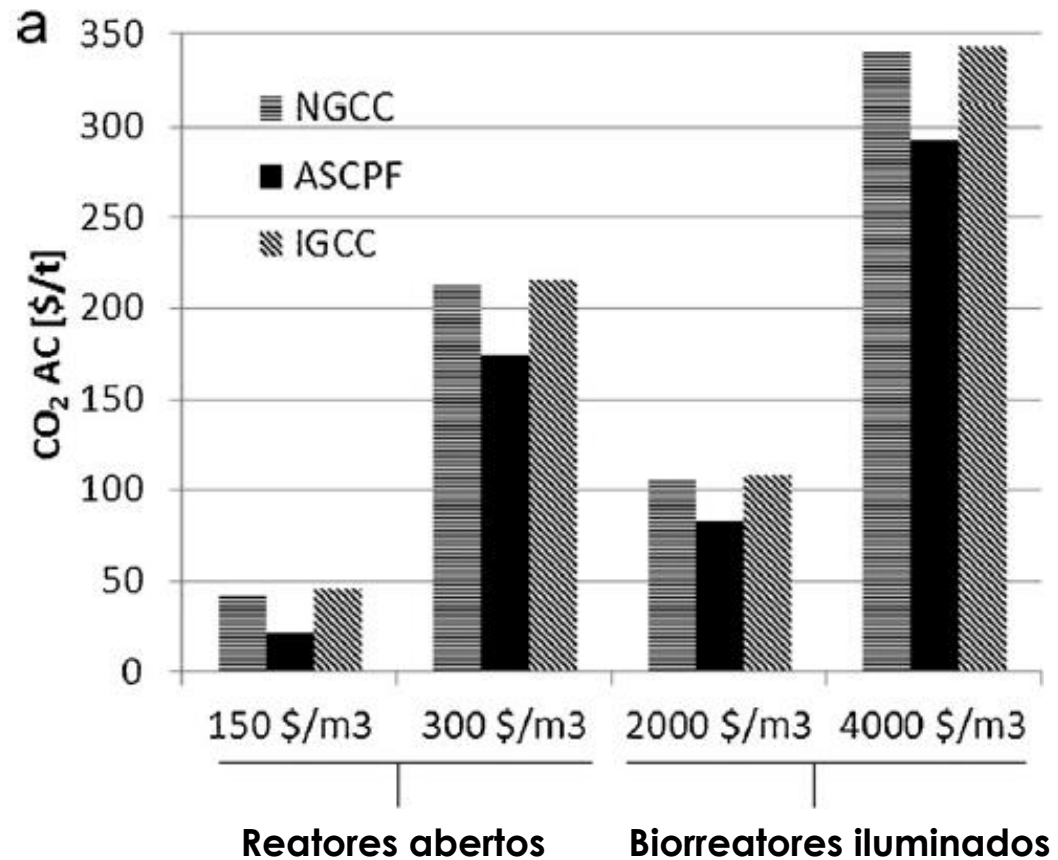




Preço do etanol
€0,02/MJ

Custos da mitigação pelas microalgas verdes

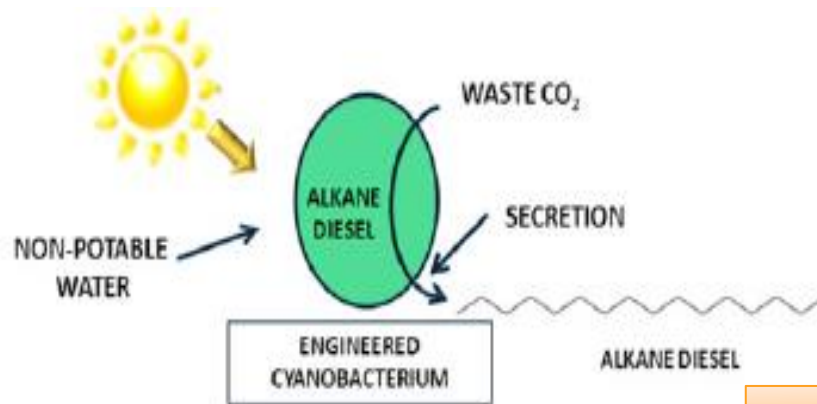
- Algas geram receita \$400/t
- Desidratação



Microalgas azuis vs. verdes

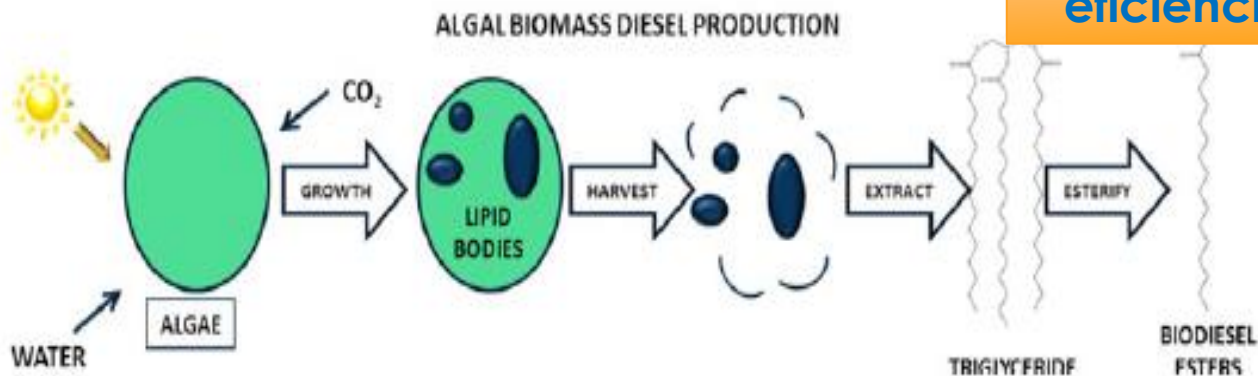
Projeto Joule da Hidelberg Cement

a conversão
de 1 tonelada
de CO₂
demanda
cerca de 22 GJ
ou 6 MWh



Pode alcançar
uma eficiência
de 12% na
conversão
energética

**Energia fotovoltaica
eficiência de 25%**



Oakbio

- Organismos quimo-autótrofo
- usar diretamente gás de exaustão para produzir PHA
- 90% da massa dos organismos é PHA
- PHA é um monômero com 4 carbonos que pode ser convertido em n-butanol » gasolina
- Consumo de H₂ para “alimentar” os organismos
- Fábrica Lehigh em Cupertino, CA – Cimentos Heidelberg – também usa exaustão de termelétrica
 - o custo de produção é \$1,66/kg de produto.
 - 230 toneladas de CO₂/ano
 - 76.000 toneladas de PHA

Dissociação do CO₂ sob altas temperaturas

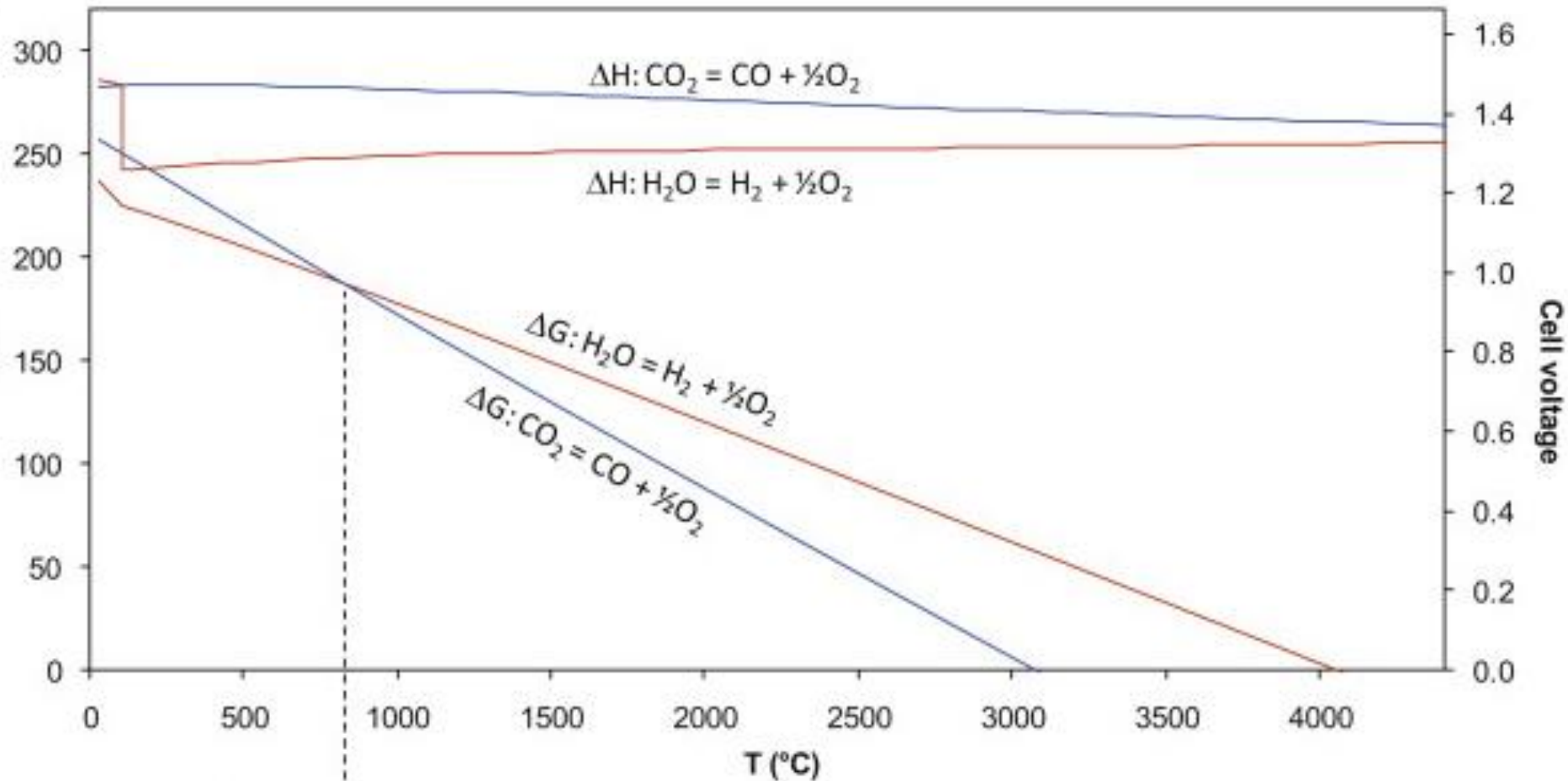
Low-temp electrolysis,
Photo(electro)lysis

High temperature
electrolysis

Thermochemical
cycles

Thermolysis

a)

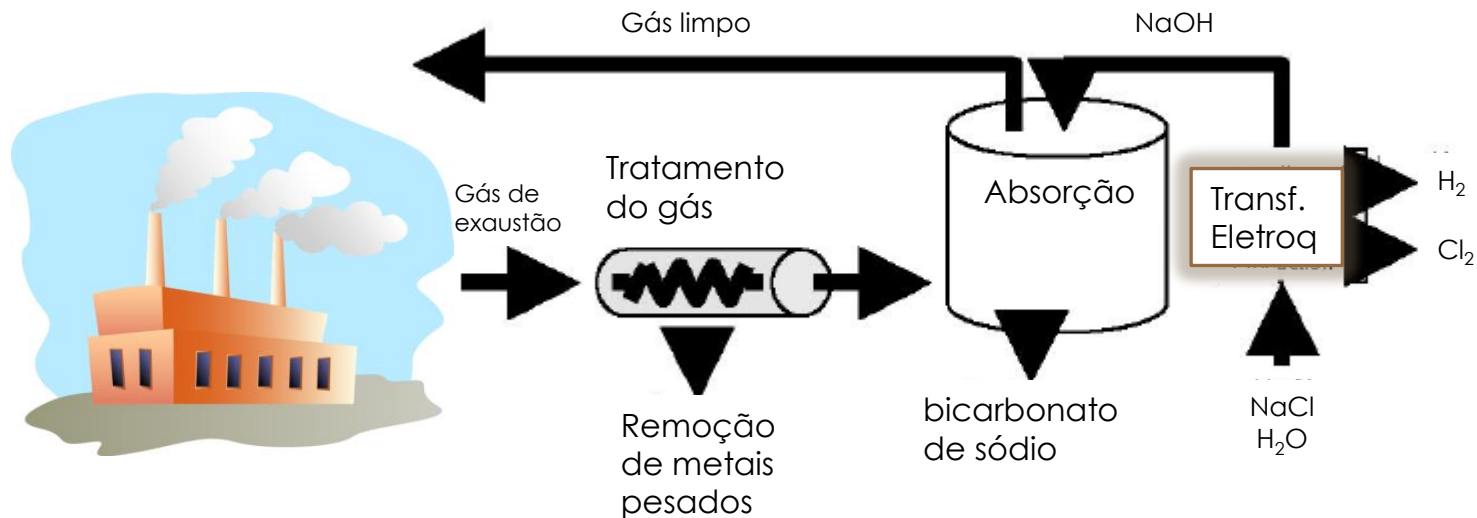


New CO₂ fuels

- **enriquecimento de combustíveis com CO₂**
- **eletrólise a altas temperaturas – com vapor**
 - **planta de cimento em Bowmanville, em Ontário no Canada**
 - **Gera 6,17 toneladas de H₂ por dia a partir do consumo de 600 toneladas de gás de exaustão**

Skymine

- O processo SkyMine transforma o CO_2 em bicarbonato de sódio por meio de três etapas: tratamento do gás, absorção e transformação eletroquímica.



Skymine

- para cada tonelada de CO₂
 - são produzidas 1,9 toneladas de bicarbonato de sódio.
 - são necessários cerca de 4 m³ de água.
 - são necessários 1329 kWh
 - 22,7 kg de hidrogênio (2732 MJ)
- As emissões de cimento no Brasil poderiam produzir cerca de 50% da capacidade instalada de bicarbonato no setor químico nacional.
- planta com a tecnologia SkyMine com capacidade de capturar 75.000 toneladas de CO₂ por ano foi inaugurada em 2014 em San Antonio, TX (CAPEX \$125.000, ou \$1,6/tCO₂)

CCU vs. CCS

	ENERGIA	ESCALA
CCS	Consumo de energia para compressão	Precisa de grandes volumes, implicando em transporte para os reservatórios
CCU	Pode consumir energia solar gratuita e renovável	Pode ser aplicado a volumes menores no próprio local

Comparação entre tecnologias e custo da tonelada de CO₂ evitada

TECNOLOGIA	PRÓS	CONTRAS	CUSTO
Microalgas	Podem utilizar a energia solar diretamente ou luz artificial, sistemas simples.	Consumo de água, tecnologia ainda em desenvolvimento.	\$100
Joule	Utiliza a energia solar diretamente, conversão energética maior do que algas verdes.	Desenvolvem-se em sistemas especiais	?
Oakbio	Pode operar continuamente com alta densidade de microrganismos em fermentadores tradicionais	Tecnologia não desenvolvida em escala comercial, que depende de organismos geneticamente desenvolvidos e consome H ₂	\$51
New CO ₂ fuels	Aproveitamento do calor excedente do kiln	Consome eletricidade, consome água.	\$104
Skymine	Demanda relativamente pouca energia	Massa de bicarbonato produzida é substancial	\$81
Captura por floresta	Tecnologia amplamente dominada e disponível no Brasil	Precisa de contabilidade confiável, demanda de área e instalação longe da fonte de emissão.	\$10

Conclusão

- **Tecnologias ainda estão em desenvolvimento**
- **Balanco de energia e CO₂ devem nortear os desenvolvimentos futuros – avaliação do ciclo de vida (ACV)**
- **Sky mine é interessante, mas implica em produzir bicarbonato**
 - Para viabilizar esta tecnologia seria necessário um estudo de mercado e/ou uma associação com empresas que já produzem este insumo.
- **Microalgas, tecnologia simples. demanda projetos de P&D locais**
- **New CO₂ Fuels**
 - P&D enriquecimento de combustíveis com CO₂
- **Balizadores: biomassa tradicional e energia solar fotovoltaica**

obrigado

spacca@usp.br