



4<sup>th</sup>  
INTERNATIONAL WORKSHOP  
ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION

“INTEGRATING CLEANER PRODUCTION INTO SUSTAINABILITY STRATEGIES”

---

# Influência da enzima celulase sobre o desempenho energético-ambiental da produção de etanol de segunda geração – estudo preliminar

**Feni Agostinho <sup>a</sup> & Ana Beatriz B. Bertaglia <sup>b</sup>**

<sup>a</sup> Universidade Paulista (UNIP), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção; feni@unip.br

<sup>b</sup> Universidade Paulista (UNIP), Aluna de Graduação em Engenharia de Controle e Automação; anabeatrizbertaglia@gmail.com



# Introdução

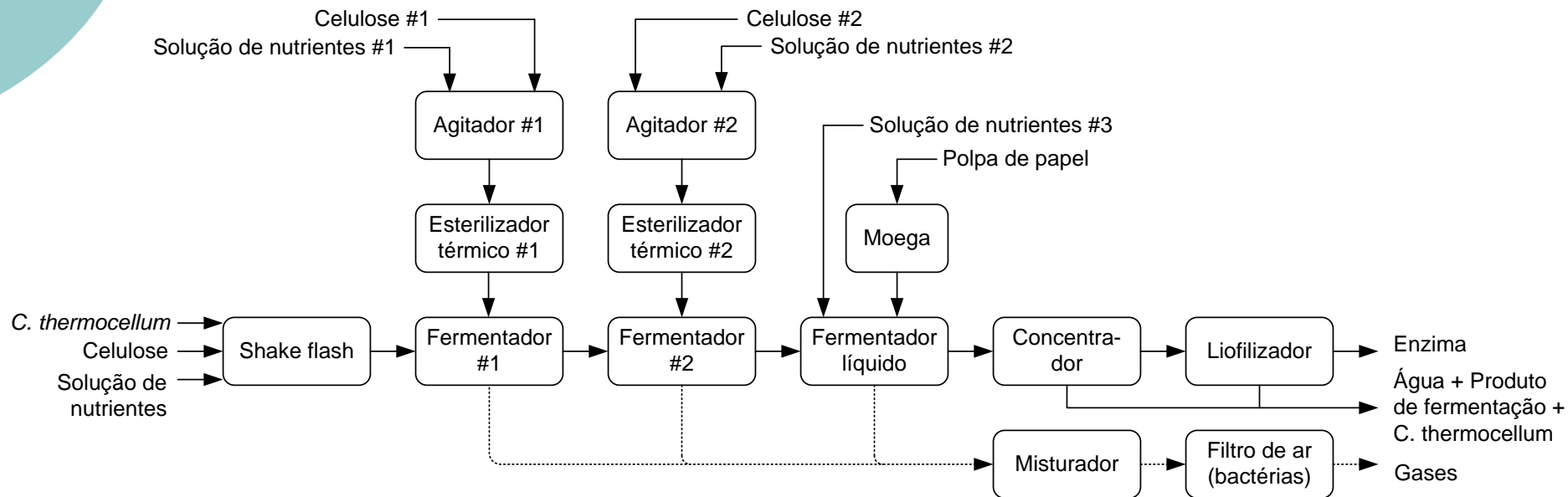
---

- Necessidade de combustíveis alternativos aos fósseis
- Etanol de primeira geração
- Etanol de segunda geração
- Principal fator limitante para segunda geração: **ENZIMAS**
  - Elevado custo (25-50% do etanol produzido)
  - Produção *off-site* vs. *on-site*
  - Desempenho energético-ambiental
- Produção industrial de enzimas celulase: poucos estudos de LCA disponíveis; usualmente produção *on-site*; casos de estudo diferentes do Brasileiro
- Qual o custo energético-ambiental da produção industrial *off-site* da enzima celulase e seu impacto sobre o etanol de segunda geração vislumbrado para o Brasil?
- Este trabalho objetiva responder estas questões através do uso da ferramenta Análise de Energia Incorporada.



# Metodologia – Sistema em estudo

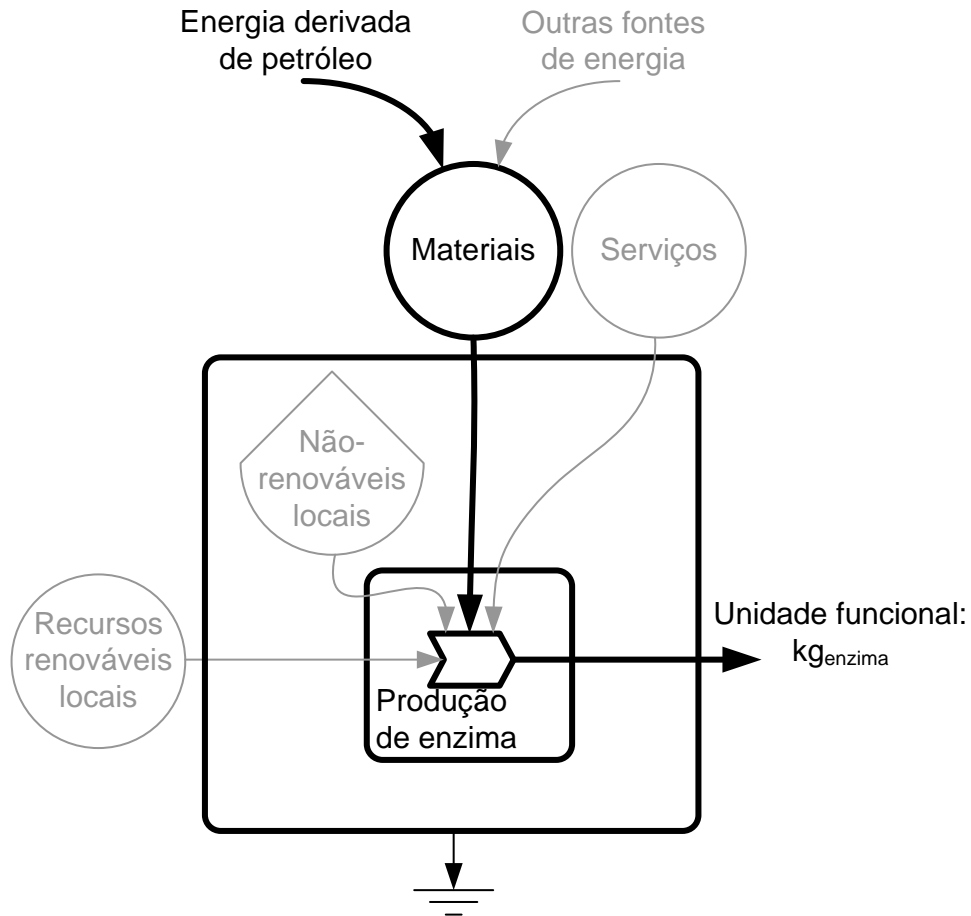
- Produção de enzima celulase através do método de fermentação submersa (submersa vs. estado sólido)





# Metodologia – *Embodied energy*

- Análise de energia incorporada (Slesser, 1974)



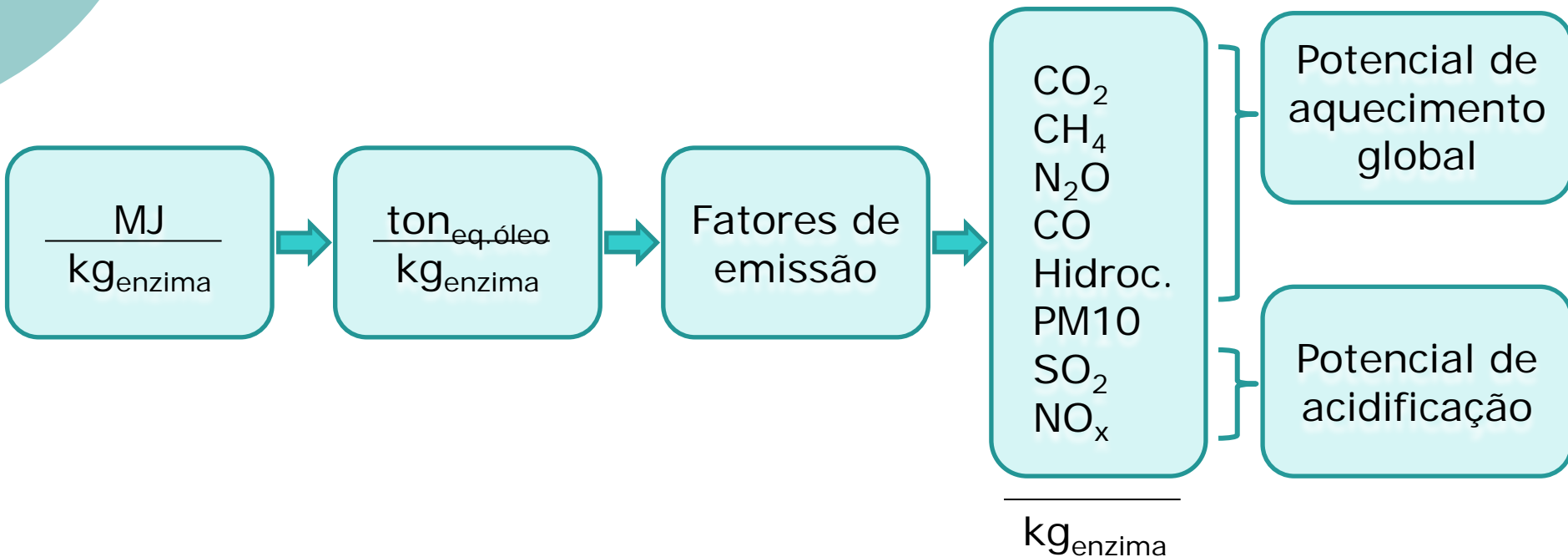
Indicador de desempenho:

MJ/kg<sub>enzima</sub>



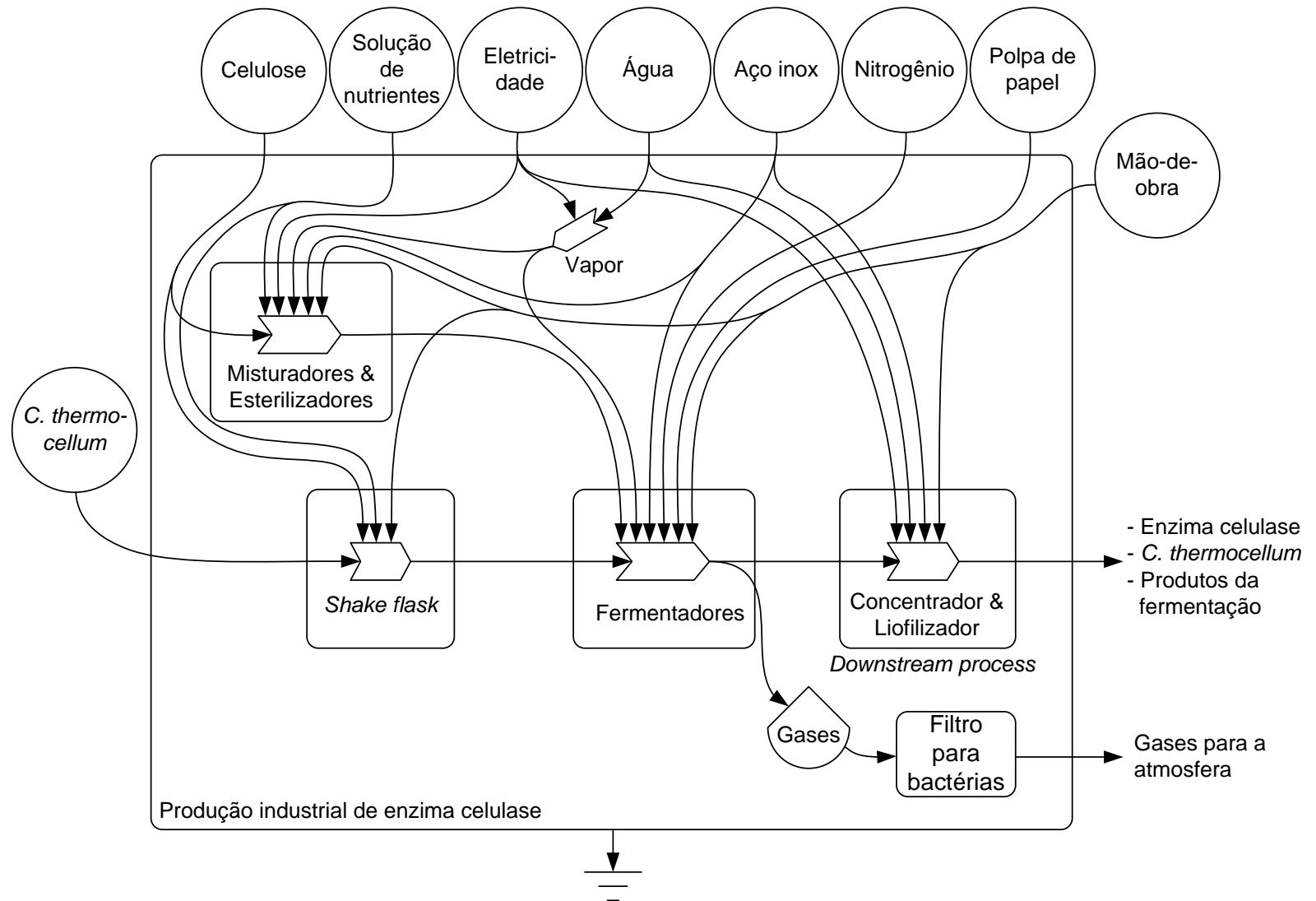
# Metodologia – Emissões indiretas

- Fatores de emissão da EPA-USA
  - Combustão do diesel equivalente em caldeiras industriais





# Resultados e Discussões - Diagrama





# Resultados e Discussões - Energia

Tabela 1. Energia comercial total incorporada na produção industrial de enzima.

Nota <sup>a</sup>	Item	Quantidade	Unidade/ kg <sub>enzima</sub>	Intensidade energética MJ/Unidade	Energia comercial incorporada MJ/kg <sub>enzima</sub>	% MJ/kg <sub>enzima</sub>
Fase de implantação						
1	Concreto	3,72E+00	kg	6,72	25,00	2,8
2	Areia	3,35E+00	kg	0,62	2,08	0,2
3	Alvenaria	2,60E+00	kg	4,16	10,82	1,2
4	Aço Inoxidável	2,92E-03	kg	80,40	0,23	<0,0
5	Custos de implantação <sup>b</sup>	3,82E+01	USD	-	-	-
Fase de operação						
6	Eletricidade	7,23E+06	J	2,90E-06	20,97	2,3
7	Água (produção)	1,85E+03	kg	2,37E-03	4,38	0,5
8	Água (refrigeração)	8,05E+03	kg	2,37E-03	19,08	2,1
9	Vapor d'água <sup>c</sup>	2,03E+03	kg	-	-	-
10	Polpa de papel	9,16E+01	kg	7,37	675,09	74,9
11	Celulose	5,05E-01	kg	10,32	5,21	0,6
12	Solução de nutrientes	-	-	-	-	-
	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,76E+00	kg	60,60	106,90	11,9
	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2,52E+00	kg	8,90	22,43	2,5
	MgSO <sub>4</sub> •7H <sub>2</sub>	3,78E-01	kg	10,00	3,78	0,4
	CaCl <sub>2</sub> •2H <sub>2</sub> O	5,04E-01	kg	9,24	4,66	0,5
13	<i>C. thermocellum</i> <sup>d</sup>	6,70E-10	kg	-	-	-
14	Nitrogênio	4,87E-01	kg	1,67	0,81	0,1
15	Custos de operação <sup>b</sup>	3,21E+01	USD	-	-	-
16	Mão-de-obra <sup>b</sup>	1,28E+00	h	-	-	-
Total =					901,44	100



## Resultados e Discussões - Energia

---

- Influência da produção de enzima celulase sobre o desempenho energético do etanol de segunda geração

5,49 MJ/L<sub>EtOH</sub> (Agostinho e Ortega, 2013)

15,23 MJ/L<sub>EtOH</sub> (somente enzima; este trabalho)

---

20,72 MJ/L<sub>EtOH</sub> → EROI 1,55

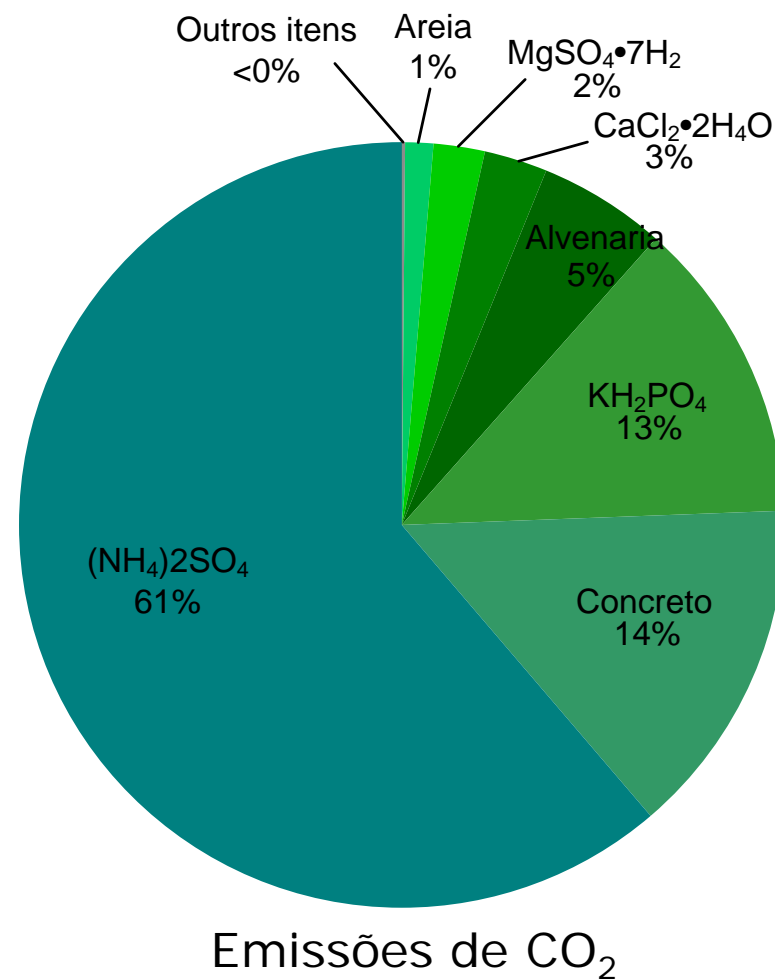
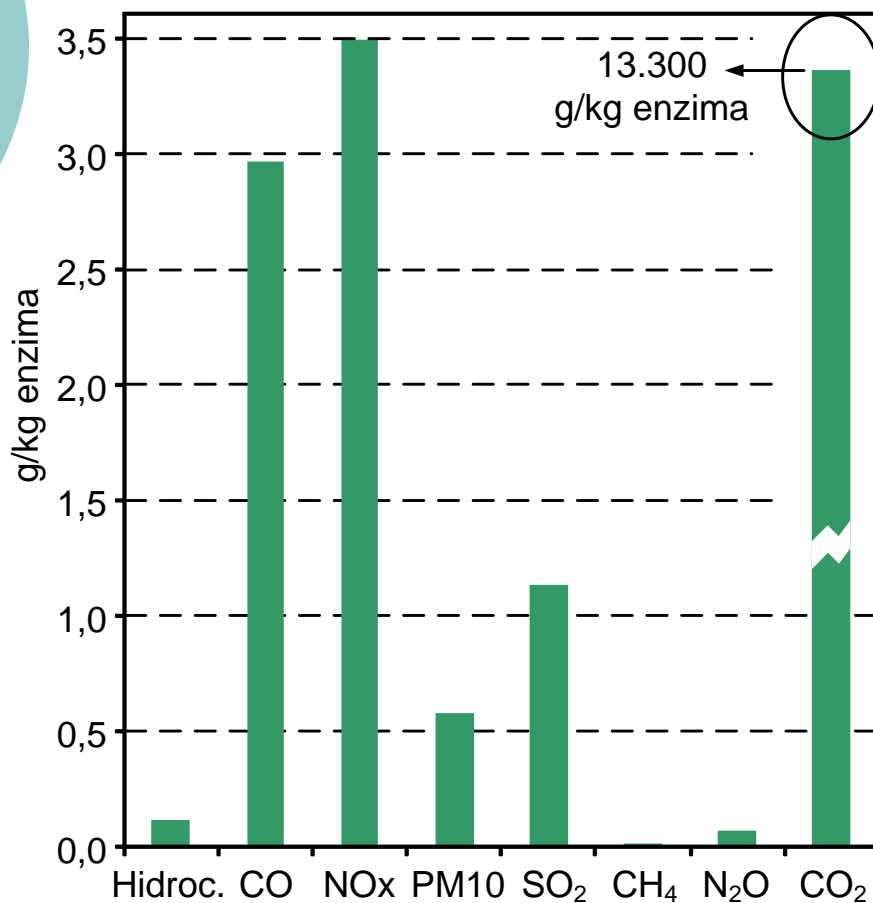
EROI 4,61 (Etanol de primeira geração)

EROI 11-18 (Diesel e gás)





# Resultados e Discussões - Emissões





## Resultados e Discussões - Emissões

---

- Influência da produção de enzima celulase sobre o Potencial de Aquecimento Global (PAG) e de Acidificação (PA) do etanol de segunda geração

### PAG

1,62 kgCO<sub>2</sub>-eq./L<sub>EtOH</sub> (Agostinho e Ortega, 2013)

2,25 10<sup>-4</sup> kgCO<sub>2</sub>-eq./L<sub>EtOH</sub> (somente enzima; este trabalho)

Influência de 0,01%

### PA

6,78 10<sup>-3</sup> kgSO<sub>2</sub>-eq./L<sub>EtOH</sub> (Agostinho e Ortega, 2013)

7,11 10<sup>-8</sup> kgSO<sub>2</sub>-eq./L<sub>EtOH</sub> (somente enzima; este trabalho)

Influência <0,01%



# Conclusões

---

- Considerando abordagens e sistema avaliado neste estudo tem-se:
  - A produção de etanol de segunda geração utilizando hidrólise enzimática a partir de celulases resulta em aumento de 377% sobre a demanda de energia incorporada do etanol produzido (de 5,49 para 20,72 MJ/L<sub>EtOH</sub>)
  - O uso da enzima celulase não influencia significativamente (<0,01%) no PAG e PA do etanol de segunda geração



4<sup>th</sup>  
INTERNATIONAL WORKSHOP  
ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION

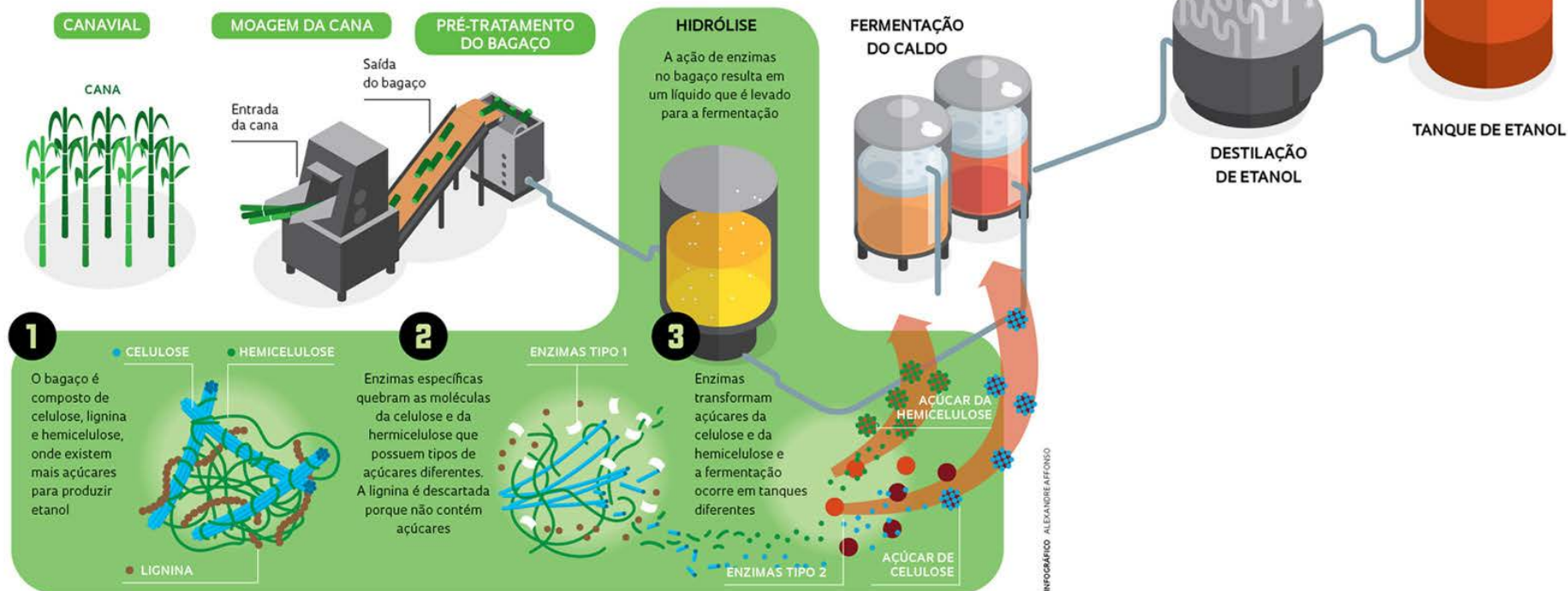
“INTEGRATING CLEANER PRODUCTION INTO SUSTAINABILITY STRATEGIES”

---

Obrigado!

# O futuro na segunda geração de etanol

Após o uso do caldo da cana na primeira geração, utilizam-se o bagaço e as folhas no processo de hidrólise. Na etapa final, ocorre a fermentação tradicional por leveduras que transformam os açúcares em etanol



Fonte: FAPESP <http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/10/11/entre-acucares-e-genes/>. Acesso em: 02 maio 2013.