Gestão:

Reunião de Acompanhamento e Avaliação - RAA 2026

IMPACTO DO GANHO DE ESCALA NA PRODUÇÃO DE H2 VERDE A PARTIR DE BIOGÁS DE VINHAÇA

DE ATAIDE, G.C.[1] ; SILVA, J.F.L.[2].
[1]Bolsista do PRH 29/UNICAMP, curso de Engenharia Química, Campinas – SP. E-mail: g224878@dac.unicamp.br
[2]Docente do curso de Engenharia Química da UNICAMP, Campinas – SP. E-mail: jeanf@unicamp.br

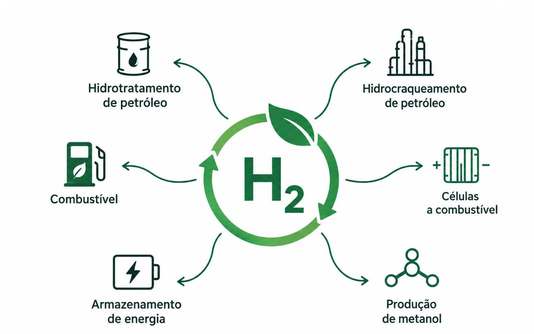
prh anp 29/UNICAMP

MOTIVAÇÕES

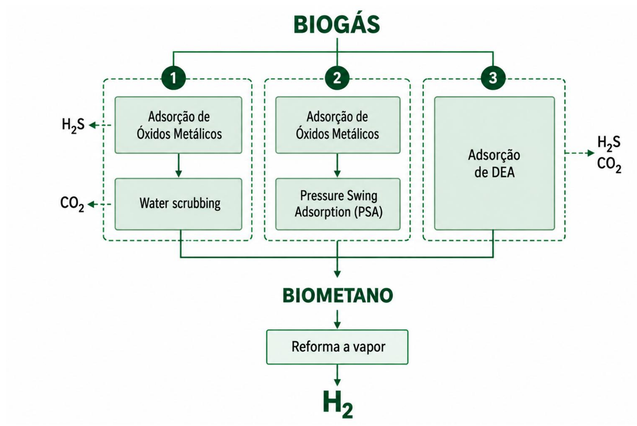
+350 BILHÕES DE LITROS [1]
Produção anual de vinhaça no Brasil

+2,5 BILHÕES DE tCO2e [2]
Emissão anual de GEEs no Brasil

Como reaproveitar resíduos e diversificar a matriz energética simultaneamente?



ROTAS PRODUTIVAS



$$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2 \quad \Delta H° = +206\ kJ{\cdot}mol^{-1}$$

$$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2 \quad \Delta H° = -41\ kJ{\cdot}mol^{-1}$$

OBJETIVOS

- Modelar a produção de H2 a partir do biogás de vinhaça, integrando a purificação e reforma a vapor;
- Avaliar o impacto da escala na viabilidade técnica, econômica e ambiental e na competitividade do H2;
- Avaliar e comparar a viabilidade técnica e econômica das tecnologias *Water Srubbing*, PSA e DEA

METODOLOGIA

- **Software**: Aspen Plus v14
- **Termodinâmica**: NRTL–RK e PRMVH2
- **Cenários**: i) 1 Mt/ano; ii) 5 Mt/ano; iii) 10 Mt/ano de cana-de-açúcar processadas
- **Composição vinhaça**: 93.0% água, 5.25% glicose e 1.75% enxofre [3]
- **Produção biogás**: Digestão anaeróbica em reator UASB [4]
- **CAPEX**: Estimativa Classe 5 baseada em custos da literature [5, 6]
- **OPEX**: Estimado a partir de insumos, utilidades e operação
- Análises de sensibilidade e Monte Carlo
- **BECCUS**: CO2 emitido

FLOWSHEET DOS PROCESSOS

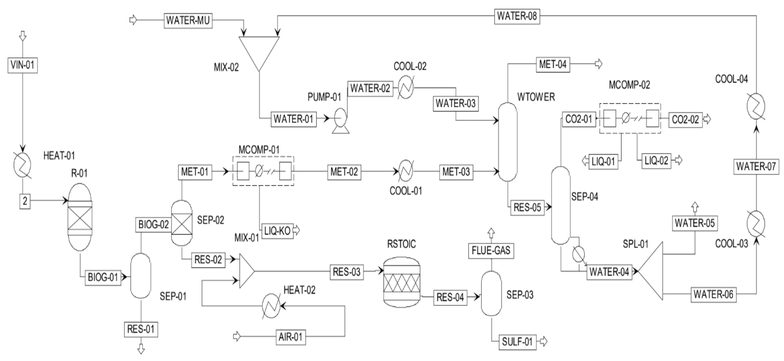


Figura 1. *Process flowsheet* da rota de *water scrubbing*.

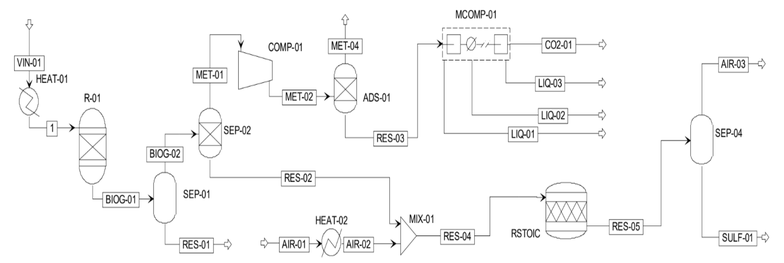


Figura 2. *Process flowsheet* da rota de PSA.

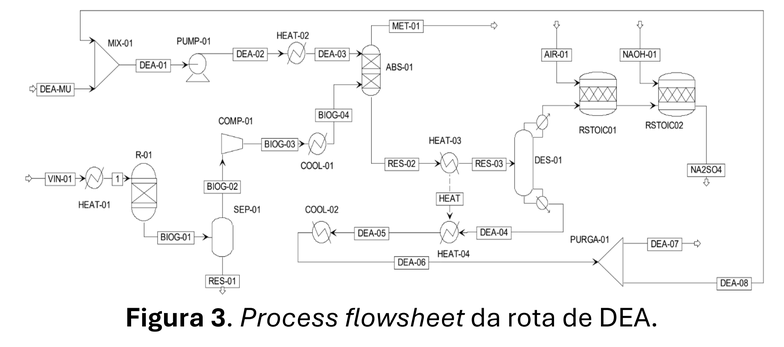


Figura 3. *Process flowsheet* da rota de DEA.

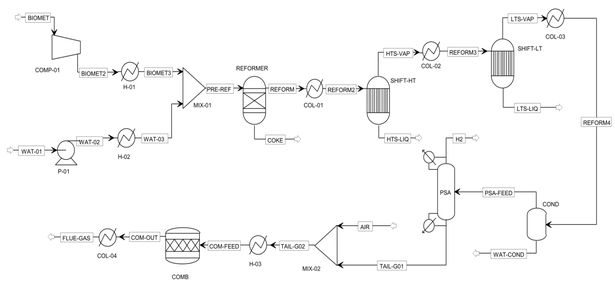


Figura 4. *Process flowsheet* da reforma a vapor.

RESULTADOS OBTIDOS

- Fermentação anaeróbica produziu biogás condizente com a literatura [7].

Tabela 1. Composição do biometano produzido por cada rota.

Componente	Concentração do biometano por rota			Exigências ANP
	Water Scrubbing	*PSA*	*DEA*	
CH_4 (% mol)	96,90	97,00	95,99	90,00 (min)
CO_2 (% mol)	2,95	2,99	2,85	3,00 (máx)
H_2O (% mol)	0,06	0,00	1,15	--
O_2 (% mol)	0,00	0,00	0,00	0,80 (máx)
H_2S (mg/m³)	1,22 10^{-3}	0,03	6,09 10^{-4}	10,00 (máx)

Tabela 2. Performance técnica das rotas de purificação.

Rota	Vazão(t/ano)	Energia (MMBtu/a)	Rend. (%)
Water Scrubbing	35.947	1.254.459	96,6
PSA	36.519	1.274.442	98,0
DEA	35.590	1.242.034	94,6

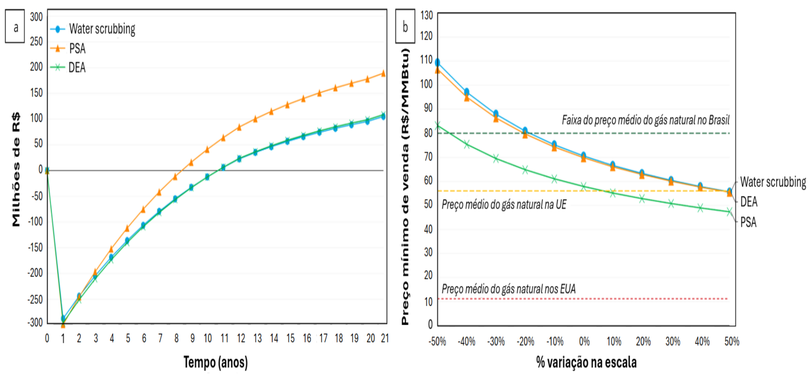


Figura 5. *a) Fluxo de caixa descontado durante 20 anos. b) Sensibilidade do PMV do biometano à escala*

Tabela 3. Parâmetros econômicos do ganho de escala.

Parâmetros	1 Mt/a	5 Mt/a	10 Mt/a
Produção H_2 (t/ano)	2.518,48	12.592,42	25.184,84
CAPEX (R$ milhões)	308,55	810,42	1.228,37
OPEX (R$ milhões/ano)	29,21	76,72	116,29
Receita (R$ milhões/ano)	62,96	314,81	629,62
LCOH (R$/kg H_2)	25,99	13,65	10,35
Payback simples (anos)	11,66	3,70	2,54
Payback descont. (anos)	>20	4,86	3,07
TIR (% a.a.)	5,79%	26,78%	39,37%
VPL a 10% (R$ milhões)	-83,35	1.053,29	2.894,45

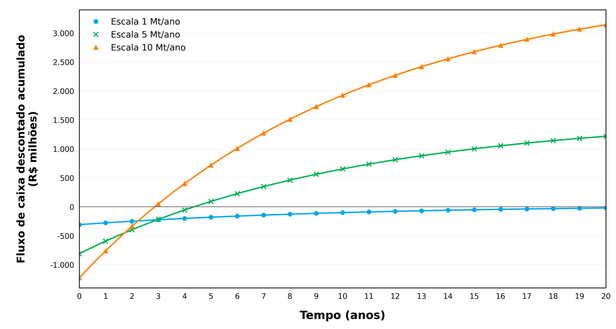


Figura 6. Fluxo de caixa descontado para as três escalas.

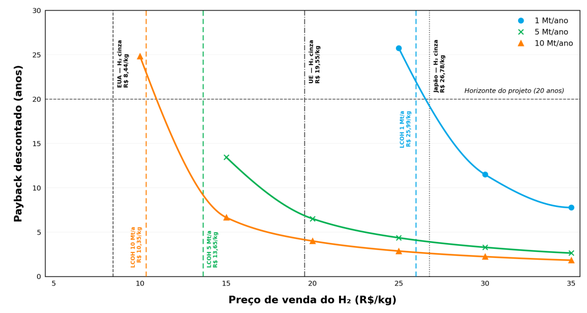


Figura 7. Payback descontado versus o preço de venda do H_2.[8, 9]

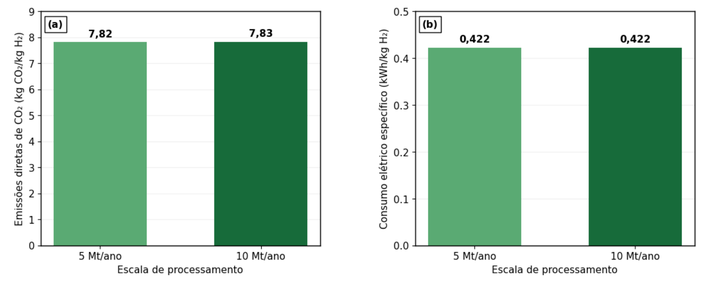


Figura 8. a) Emissões diretas específicas de CO_2. b) Consumo elétrico de H_2.

CONCLUSÕES

- As três rotas de purificação mostraram-se viáveis, com o PSA apresentando o melhor desempenho técnico-econômico.
- O ganho de escala reduziu os custos de produção, aumentando a competitividade do H_2 frente às rotas convencionais.
- Trabalhos futuros: avaliar a codigestão com glicerol, realizar ACV e a otimização da integração energética.

REFERÊNCIAS

AGRADECIMENTOS

UNICAMP
eqs
FAPESP
Número do processo: 2025/19808-5
prh anp