Gestão:

Reunião de Acompanhamento e Avaliação - RAA 2026

APROVEITAMENTO DO GÁS DE EXAUSTÃO DA FORNALHA DE UMA REFINARIA EM UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA COM CAPTURA DE CARBONO

Campos, E. B. [1]; da Silva, F. S. [2]; [1]Bolsista do PRH 12/UFPR, curso de Engenharia Mecânica, Curitiba – PR. E-mail: eduardobiasuz@ufpr.br; [2]Docente do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR. E-mail: fellipe.sartori@ufpr.br

Motivação e Aplicação no Setor de Petróleo e Energia

O refino de petróleo está entre as atividades industriais de maior consumo de energia e responde por parcela relevante das emissões de gases de efeito estufa, sendo um setor de difícil descarbonização (*hard to abate*). As fornalhas de refinaria liberam, junto aos gases de exaustão carregados de CO_2, grandes volumes de calor em uma faixa de temperatura pouco favorável aos ciclos a vapor, mas adequada ao Ciclo Rankine Orgânico (ORC).

A captura pós-combustão por aminas é uma das rotas mais consolidadas para fontes estacionárias, mas impõe demandas térmica e elétrica ao processo. Integrar as duas tecnologias sobre a mesma corrente de exaustão (Figura 1) permite que refinarias reaproveitem calor hoje descartado para gerar eletricidade e, ao mesmo tempo, reduzir suas emissões de CO_2, sem penalidade elétrica líquida à planta.

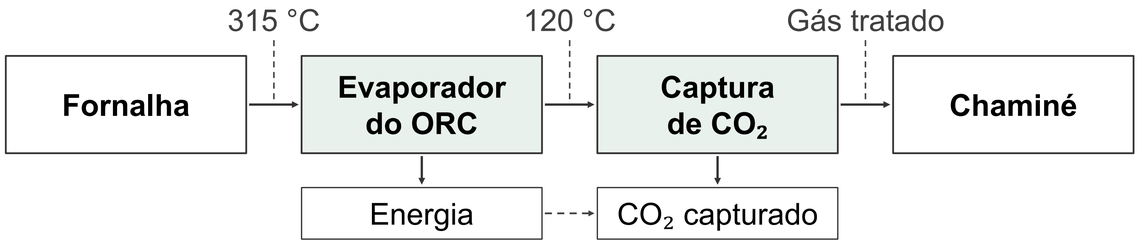


Figura 1 – Integração proposta entre ORC e captura de CO_2.

Objetivos

- Avaliar a viabilidade termodinâmica da integração entre um ORC e a captura pós-combustão de CO_2 por aminas, com dados operacionais de uma refinaria brasileira;
- Comparar fluidos orgânicos e quantificar a eletricidade gerada pelo ORC;
- Avaliar o efeito da concentração de MDEA e da adição de piperazina (PZ) sobre a remoção de CO_2 e as demandas térmica e elétrica;
- Verificar se a integração gera excedente elétrico e reduz as emissões.

Metodologia

Os dados operacionais da fornalha (gás de exaustão a 315 °C e 88,5 t/h, com 9,3% mol de CO_2) alimentaram dois modelos em regime permanente: o ORC, no *Engineering Equation Solver* (EES), e a unidade de captura, no Aspen HYSYS V14.

Ciclo Rankine Orgânico (ORC)

O ciclo subcrítico regenerativo (Figura 2) foi modelado por balanços de energia (Eq. 1) e de exergia (Eq. 2) em cada componente, com turbina e bomba adiabáticas e trocadores isobáricos. Entre R245fa, pentano, ciclohexano, benzeno e tolueno, selecionou-se o **tolueno**: fluido seco, com temperatura crítica (318,7 °C) compatível com a fonte e estável até 400 °C.

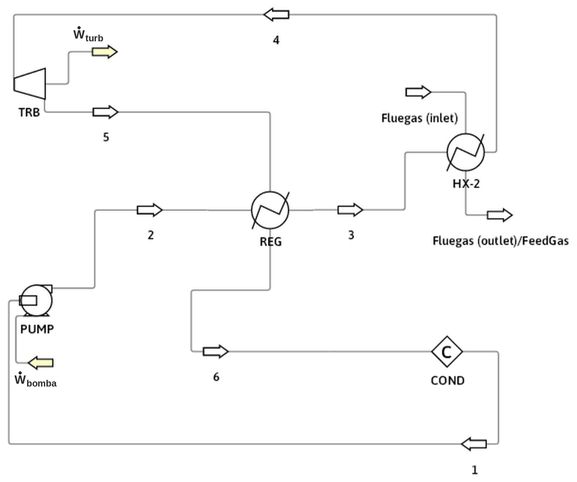


Figura 2 – Esquema do ORC.

Tabela 1 – Premissas do ORC.

Parâmetro	Valor
T_{evap}	270 °C
T_{cond}	35 °C
η_{turb}	0,80
η_{bomba}	0,85
$\varepsilon_{evap/rec}$	0,90
$T_{gás,saída}$	120 °C
$\Delta T_{reg} = T_5 - T_3$	20 °C

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_s h_s - \sum \dot{m}_e h_e \quad (1) \qquad \dot{I} = \sum \dot{E}x_e - \sum \dot{E}x_s \quad (2)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{gas}} \quad (3) \qquad \eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net}}{\Delta \dot{\Psi}_{gas}} \quad (4)$$

Captura de CO_2 (CCS)

A planta (Figura 3) foi simulada com o pacote *Acid Gas – Chemical Solvents*, com absorvedora a 1 bar e regeneradora a 2 bar. Compararam-se quatro solventes com a mesma vazão (185.500 kg/h, 40 °C e 1,2 bar): MDEA a 25% e 35% m/m, com e sem 8% m/m de PZ.

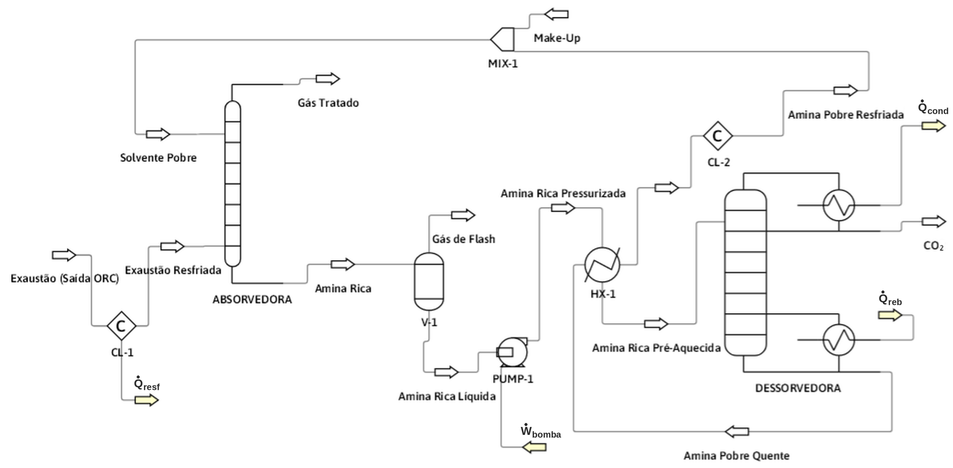


Figura 3 – Unidade de captura no Aspen HYSYS V14.

$$\dot{m}_{CO_2,total} = (\dot{m}_{CO_2,in} - \dot{m}_{CO_2,out}) + \dot{m}_{CO_2,evit} \quad (5) \qquad \dot{m}_{CO_2,evit} = \frac{\dot{W}_{net}\, EF}{\eta_{ref}\, PCI} \quad (6)$$

Resultados Obtidos

Desempenho do ORC. O ciclo gera 1.576 kW líquidos, com eficiência térmica de 27,56% (limite de Carnot de 43,28%), eficiência exergética de 64,63% e índice de sustentabilidade de 2,828. A turbina concentra 54% da irreversibilidade total (529,1 kW), seguida pelo evaporador, com 39% (Figura 4).

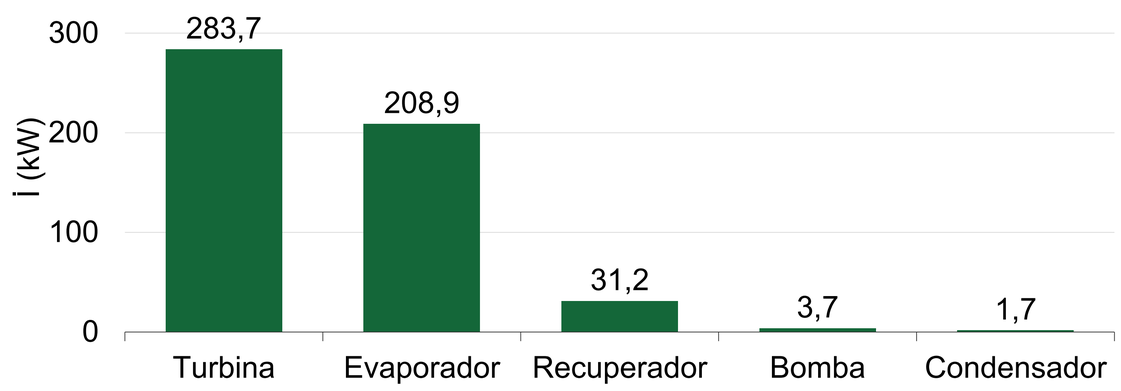


Figura 4 – Irreversibilidade por componente do ORC.

Captura de CO_2. Sem PZ, elevar a MDEA de 25% para 35% reduziu o q_{reb} de 4,58 para 3,65 MJ/kg CO_2. Com 8% de PZ, a MDEA a 25% já atinge 99,3% de remoção e 3,52 MJ/kg CO_2 (Tabela 2).

Tabela 2 – Desempenho da captura (MDEA/PZ, % m/m).

Parâmetro	25/0	35/0	25/8	35/8
Remoção de CO_2 (%)	89,5	94,0	99,3	98,4
CO_2 capturado (t/h)	11,50	12,14	12,82	12,69
CO_2 no gás tratado (t/h)	1,41	0,77	0,09	0,22
Refervedor (MW)	14,62	12,31	12,55	12,49
q_{reb} (MJ/kg CO_2)	4,58	3,65	3,52	3,54
Bomba (kW)	12,7	12,6	12,6	12,4

Balanço integrado. Com MDEA 25% + PZ 8%, a bomba de solvente consome 12,6 kW, e restam **1,56 MW** de excedente elétrico. Somando a captura direta (12,82 t/h) às emissões evitadas pela eletricidade gerada (1,115 t/h), a mitigação total é de **13,93 t CO_2/h (122 kt/ano)**. O refervedor, porém, ainda demanda 12,55 MW de calor, a ser incorporado ao balanço da planta.

Conclusão

- O ORC regenerativo com tolueno converte o calor rejeitado pela fornalha em 1,576 MW, com eficiência térmica de 27,56% e exergética de 64,63%.
- Com 8% de PZ, a MDEA a 25% já atinge 99,3% de remoção de CO_2 e a menor energia de regeneração (3,52 MJ/kg CO_2).
- A integração não impõe penalidade elétrica líquida à planta; estudos futuros devem integrar o suprimento térmico do refervedor e avaliar a viabilidade econômica.

Agradecimentos

Agradecemos ao apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - PRH-ANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo n° 2025/02686-4.