

Bolsista: Pedro Varandas Salgado Campos - [pedrovs.campos@gmail.com](mailto:pedrovs.campos@gmail.com)

Orientador: José Vicente H. d'Angelo - [dangelo@feq.unicamp.br](mailto:dangelo@feq.unicamp.br)

Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos – FEQ/UNICAMP  
 Agência Financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq  
 Palavras-chave: trigerção, refrigeração análise termodinâmica

## 1 - Introdução

Sistemas de Refrigeração são extrema necessidade e apresentam diversas aplicações:

- Indústria alimentícia: frigoríficos, congelamento e estocagem de alimentos.
- Indústria química: liquefação de gases, processos de separação; etc.
- Setor doméstico: condicionamento de ambientes.

### Problemas:

1-O sistema de refrigeração mais comumente utilizado é o de compressão de vapor com alto consumo de energia elétrica e uso de refrigerantes clorofluorcarbonados (CFCs).

2-A eficiência termodinâmica de plantas de geração de energia atuais é menor do que 40%.

### Motivação:

1-Ciclos de Refrigeração por absorção podem aproveitar rejeitos térmicos industriais como insumo energético e não utilizam fluidos prejudiciais ao meio ambiente.

2-Sistemas de Cogeração (produção simultânea de calor e energia) e Trigerção (produção simultânea de calor, energia e refrigeração) ajudam a atingir valores de 80% de eficiência.

### Objetivos:

Realizar uma análise termodinâmica de Ciclos de Refrigeração por absorção, por meio da avaliação do seu coeficiente de desempenho (COP), com aplicação desse ciclo a Sistemas de Trigerção de Energia.

## 2 - Metodologia

### Validação das simulações:

Ciclo de Refrigeração por Absorção → Abdelmessih (2006)<sup>[1]</sup>  
 Sistema de Cogeração e Trigerção de Energia → Martins (2012)<sup>[2]</sup>

### Simulador de processos :

Aspen Hysys® da Aspen Technology versão 7.3 com as equações do pacote termodinâmico PRSV (Peng-Robinson-Stryjek-Vera).

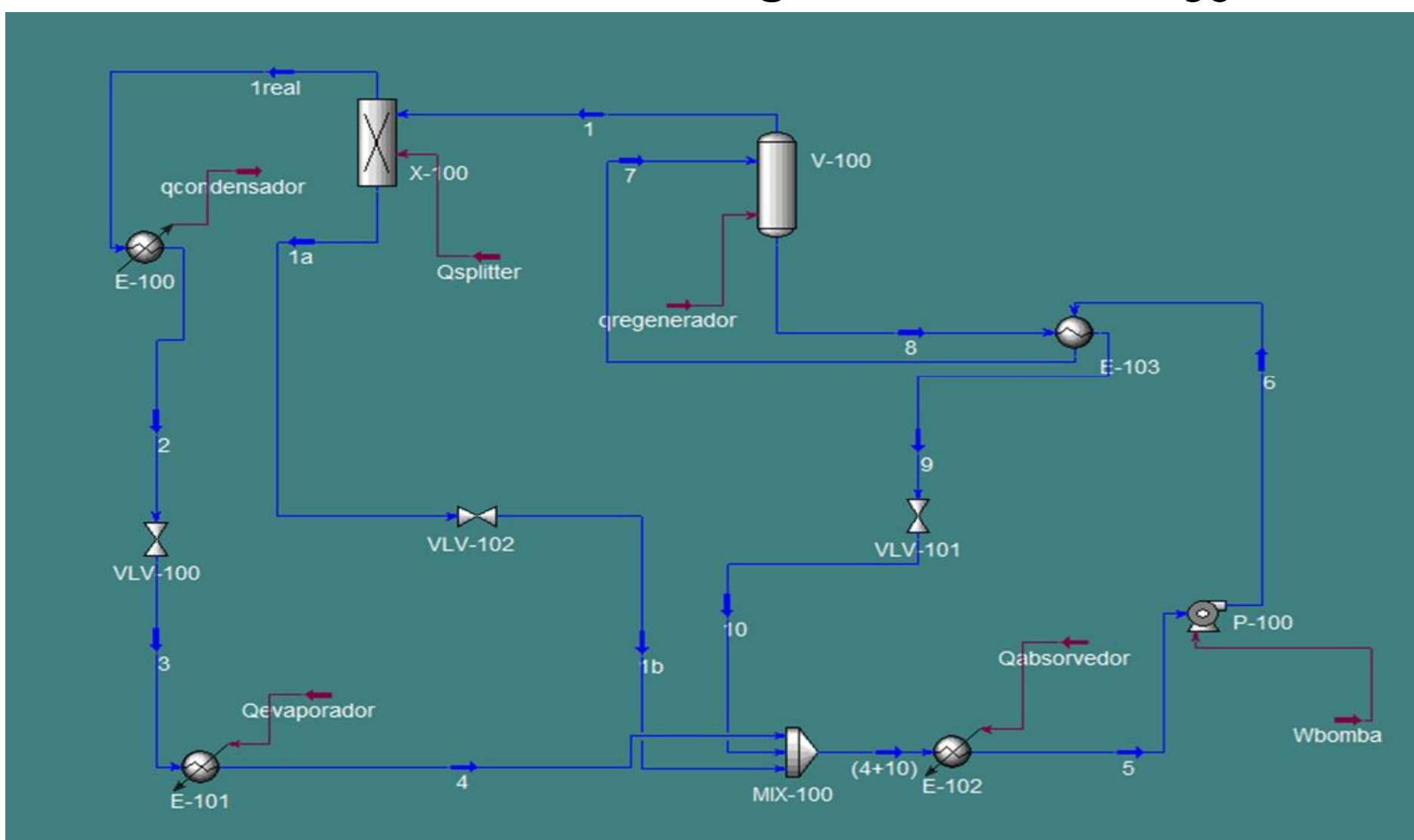


Figura 1: Simulação do ciclo de refrigeração

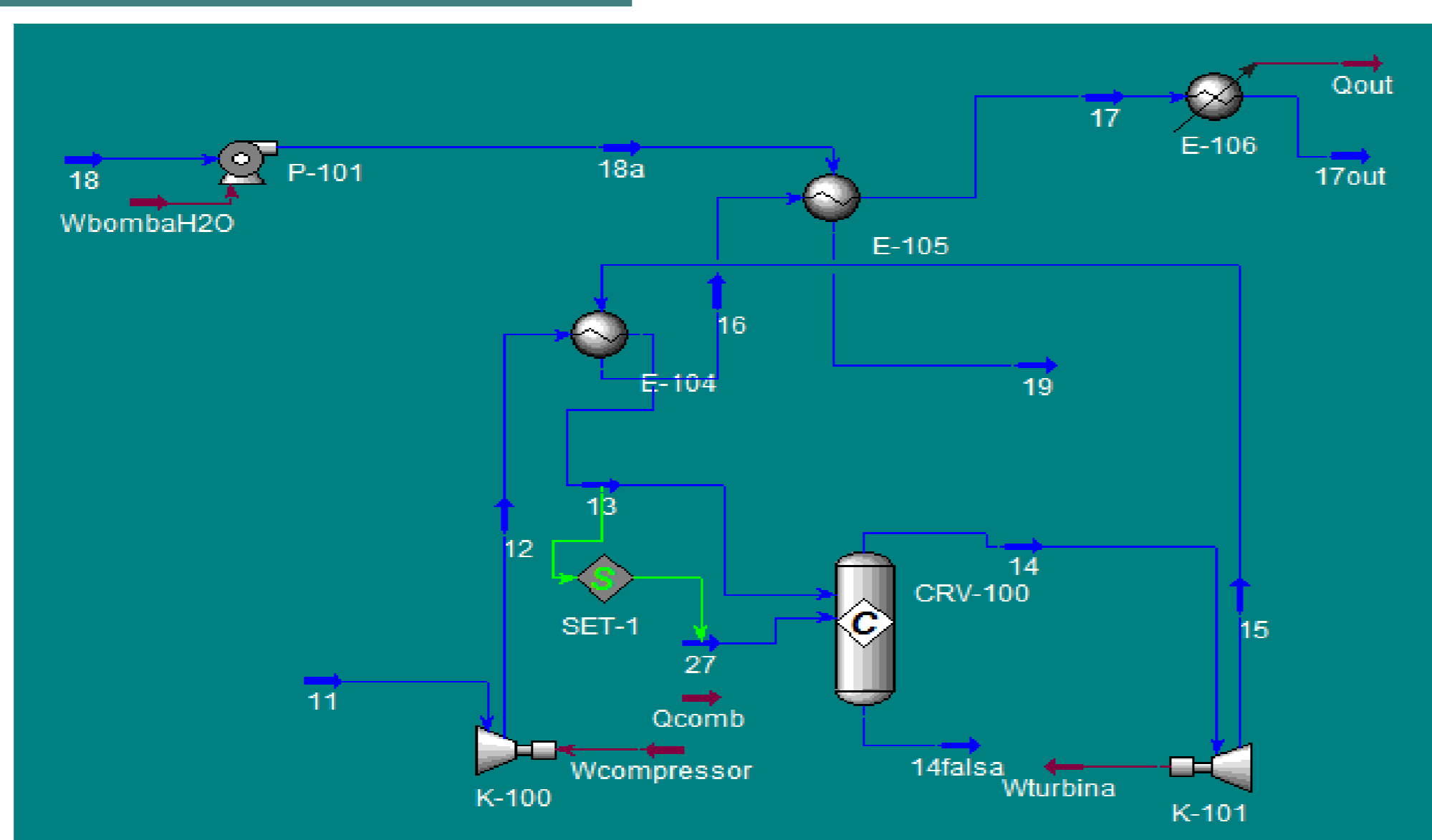


Figura 2: Simulação do ciclo de cogeração

## 3 - Resultados

- Temperatura e Pressão das correntes.
- % de O<sub>2</sub> em excesso.
- Composição do gás natural na alimentação.

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{regen}}$$

$$\eta = \frac{W_T - W_C + Q_{out}}{\sum_{n=1}^i \Delta H_{Ci} n_i}$$

Temp (°C)	Q <sub>evap</sub> (kJ/h)	Q <sub>regen</sub> (kJ/h)	COP
52	346,7	1068,0	0,3246
51	346,7	645,3	0,5372
50	346,7	637,4	0,5439
45	346,7	598,0	0,5797
40	346,7	558,9	0,6203
35	346,7	519,8	0,6669
25	346,7	442,3	0,7838
15	346,7	365,4	0,9488

Tabela 1: COP para variações de temperatura na corrente [9].

Pressão (kPa)	Q <sub>evaporador</sub> (kJ/h)	Q <sub>regenerador</sub> (kJ/h)	COP
10	346,7	637,4	0,5439
9	1119,0	1406,0	0,7958
8	1603,0	1891,0	0,8477
5	2385,0	2696,0	0,8846
3	2670,0	3040,0	0,8782

Tabela 2: COP para variações na pressão de [6].

Linha	[11]		[27]		[27]		[27]	
	Ar		Martins (2012)		Congas		GásLocal	
Comp. utilizada	Fração Molar (%)	Vaz Molar (kgmol/h)	Fração Molar (%)	Vaz Molar (kgmol/h)	Fração Molar (%)	Vaz Molar (kgmol/h)	Fração Molar (%)	Vaz Molar (kgmol/h)
Metano			0,888	2,181	0,943	2,317	0,907	2,228
Propano			0,006	0,014	0,007	0,017	0,068	0,167
O <sub>2</sub>	0,210	17,703	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,032
N <sub>2</sub>	0,790	66,597	0,016	0,040	0,004	0,010	0,003	0,007
CO <sub>2</sub>			0,006	0,015	0,006	0,014	0,007	0,017
Etano			0,084	0,207	0,040	0,097	0,002	0,005
<b>O<sub>2</sub> mínimo (kgmol/h)</b>			5,153302		5,0591144		5,307416	
<b>O<sub>2</sub> excesso (kgmol/h)</b>			12,550		12,644		12,396	
<b>% O<sub>2</sub> excesso</b>			243,53%		249,92%		233,55%	

Tabela 3: Composições e % de O<sub>2</sub> em excesso para diferentes alimentações de gás natural.

% O <sub>2</sub> excesso	Vaz molar [11] kgmol/h	η	Q <sub>out</sub>	Gás Natural	Q <sub>out</sub> (kJ/h)	η
0,26	24,6	341,4328	67309,73	Martins (2012)	206052,3	451,44
50,80	37,0	373,7900	96153,45	Congas	206409,5	459,04
101,75	49,5	397,5200	125231,20	GasLocal	206399,7	448,82
152,70	62,0	418,1300	154309,60	CH <sub>4</sub> puro	-	-
201,61	74,0	436,4300	182225,10			
243,59	84,3	451,4354	206180,50			
307,58	100,0	473,5000	242709,20			
425,78	129,0	512,6881	310172,70			

Tabela 4: Rendimento para diferentes % de O<sub>2</sub> em excesso.

## 4 - Conclusões

- Para se otimizar o valor do COP no Ciclo de Refrigeração por Absorção a combinação mais eficiente encontrada foi diminuir a temperatura da corrente [9] e diminuir a pressão na corrente [6].

- No caso do rendimento do Sistema de Cogeração, a melhor alternativa foi utilizar o gás natural da Congas com a maior porcentagem de oxigênio em excesso possível.

- Não foi possível juntar as duas simulações para se formar um único Ciclo de Trigerção. Para isso, necessitar-se-ia de mais tempo para estudos termodinâmicos e de utilização do software.

- Tornou-se evidente a importância de estudos e simulações para a viabilização e implementação de projetos na indústria antes de serem construídos.

- Percebeu-se a importância da área da informática no ramo da engenharia. Sem a utilização de softwares adequados muitos cálculos demandariam um tempo inviável.

<sup>[1]</sup> Abdelmessih, A. N.; Abbas, M.; Al-Hashem, A.; Munson, J.; *Ethylene glycol/water as working fluids for an experimental absorption cycle*; Mechanical Engineering Department, Saint Martin's University, Lacey, Washington, USA; 2006.

<sup>[2]</sup> Martins, Lucas do Nascimento.; *Análise da influência de variáveis operacionais de um sistema de trigerção sobre o desempenho termodinâmico e a distribuição das utilidades*. Campinas, SP: [s.n.], 2012.