

Trabalho de AT086 - Termodinâmica no CyclePad

Fernando Almeida Negrini

17/06/2026

1. Introdução

O documento detalha os parâmetros e o balanço de energia do sistema termodinâmico proposto, ciclo de Rankine com reaquecimento e regenerativo, com quatro aquecedores de água de alimentação e cinco turbinas.

Durante o desenvolvimento da simulação, ocorreram dificuldades de ordem técnica relacionadas à compatibilidade de software. Como não utilizo o sistema operacional Microsoft Windows nativamente, o CyclePad precisou ser executado via emulação. Por se tratar de um software antigo (com versão datada de 2001), esse método de emulação acentuou problemas de obsolescência, gerando inconsistências gráficas e bugs nas caixas de diálogo do programa. No ambiente de simulação, me deparei com uma falha ao processar o balanço de massa iterativo em ciclos regenerativos complexos, resultando em frações de extração não computadas (*UNKNOWN*), como no caso do *Splitter 3*.

Porém, essa limitação me permitiu contornar o problema realizando os cálculos manualmente. As entalpias de cada nó foram extraídas de forma direta, assim como os resultados de eficiência, fluxos de massa, trabalhos e calores.

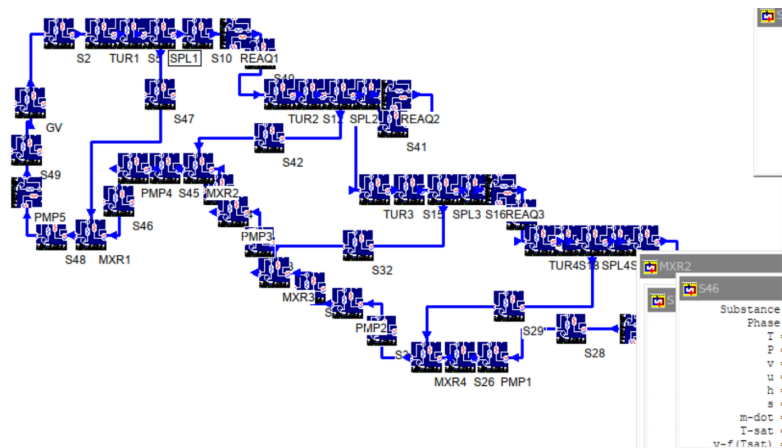


Figura 1: Problema visual encontrado

2. Resultados e Memória de Cálculo

Os cálculos do sistema foram realizados considerando um fluxo de massa de referência de 1,0000 kg/s na entrada do Gerador de Vapor.

2.1 Porcentagens de Massa (Aquecedores)

A massa extraída (y) em cada divisor de fluxo para os aquecedores de mistura foi calculada utilizando o balanço de energia nos misturadores ($E_{entra} = E_{sai}$):

- **Aquecedor 1 (MXR1 / 5000 kPa):**

$$y_1 \cdot 2927 + (1 - y_1) \cdot 888,5 = 1 \cdot 1154 \quad \Rightarrow \quad \boxed{y_1 = 13,04\%}$$

Massa remanescente: 0,8696 kg/s.

- **Aquecedor 2 (MXR2 / 1800 kPa):**

$$y_2 \cdot 2844 + (0,8696 - y_2) \cdot 722,3 = 0,8696 \cdot 884,7 \quad \Rightarrow \quad \boxed{y_2 = 6,66\%}$$

Massa remanescente: 0,8030 kg/s.

- **Aquecedor 3 (MXR3 / 800 kPa):**

$$y_3 \cdot 2750 + (0,8030 - y_3) \cdot 418,2 = 0,8030 \cdot 721,2 \quad \Rightarrow \quad \boxed{y_3 = 10,44\%}$$

Massa remanescente: 0,6986 kg/s.

- **Aquecedor 4 (MXR4 / 100 kPa):**

$$y_4 \cdot 2675 + (0,6986 - y_4) \cdot 192,0 = 0,6986 \cdot 417,5 \quad \Rightarrow \quad \boxed{y_4 = 6,35\%}$$

Massa direcionada ao condensador: 0,6351 kg/s.

2.2 Trabalhos das Turbinas e Bombas (W)

Os trabalhos específicos foram ajustados pela respectiva fração de fluxo de massa passante em cada estágio ($W = m \cdot \Delta h$):

Trabalho Gerado (Turbinas):

$$W_{TUR1} = 1,0000 \cdot (3157 - 2927) = 230,0 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{TUR2} = 0,8696 \cdot (3094 - 2844) = 217,4 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{TUR3} = 0,8030 \cdot (2910 - 2750) = 128,5 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{TUR4} = 0,6986 \cdot (2816 - 2675) = 98,5 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{TUR5} = 0,6351 \cdot (2675 - 2332) = 217,8 \text{ kJ/kg}$$

Trabalho Total das Turbinas (W_{turb}): 892,2 kJ/kg

Trabalho Consumido (Bombas):

$$W_{PMP1} = 0,6351 \cdot (192,0 - 191,8) = 0,13 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{PMP2} = 0,6986 \cdot (418,2 - 417,5) = 0,49 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{PMP3} = 0,8030 \cdot (722,3 - 721,2) = 0,88 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{PMP4} = 0,8696 \cdot (888,5 - 884,7) = 3,30 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{PMP5} = 1,0000 \cdot (1167 - 1154) = 13,00 \text{ kJ/kg}$$

Trabalho Total das Bombas (W_{pmp}): 17,8 kJ/kg

Trabalho Líquido do Ciclo ($W_{liq} = W_{turb} - W_{pmp}$): 874,4 kJ/kg

2.3 Calores Trocados (Q)

As trocas de calor externas do sistema ($Q = m \cdot \Delta h$):

Calor Adicionado (Entrada):

$$Q_{GeradorVapor} = 1,0000 \cdot (3157 - 1167) = 1990,0 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{Reaquecedor1} = 0,8696 \cdot (3094 - 2927) = 145,2 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{Reaquecedor2} = 0,8030 \cdot (2910 - 2844) = 53,0 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{Reaquecedor3} = 0,6986 \cdot (2816 - 2750) = 46,1 \text{ kJ/kg}$$

Calor Total Adicionado (Q_{in}): 2234,3 kJ/kg

Calor Rejeitado (Saída):

$$Q_{Condensador} = 0,6351 \cdot (2332 - 191,8) = 1359,2 \text{ kJ/kg}$$

2.4 Eficiência Térmica do Ciclo (η_{th})

Com base no balanço de energia global, a eficiência térmica do sistema é determinada pela razão entre o trabalho líquido produzido e o calor total fornecido:

$$\eta_{th} = \frac{W_{liq}}{Q_{in}} = \frac{874,4}{2234,3} = 0,3913 \quad (1)$$

Rendimento Térmico Final (η_{th}): 39,13%

3. Conclusão

Em termos práticos, a eficiência térmica obtida de $\boxed{39,13\%}$ representa um excelente resultado para ciclos de potência a vapor reais. Em instalações comerciais de grande porte, operar com rendimentos operacionais próximos a 40% denota um arranjo de alto desempenho, demonstrando que as perdas energéticas foram minimizadas e que a conversão de energia térmica em trabalho mecânico foi otimizada pela configuração adotada.

Ao comparar o desempenho do sistema com o limite termodinâmico ideal, observa-se que a eficiência de Carnot estabelecida para as temperaturas extremas de operação (450°C no gerador de vapor e 45,82°C no condensador) é de 55,89%. O ciclo real atinge, portanto, aproximadamente 70% do limite teórico máximo de Carnot.

A eficiência é consequência direta da combinação entre os processos de regeneração e reaquecimento. O uso de quatro aquecedores regenerativos de mistura mostrou-se fundamental para elevar a temperatura média de adição de calor no gerador de vapor, reduzindo a necessidade de fornecimento de calor externo para o aquecimento do líquido e aumentando significativamente a eficiência térmica global.

Por fim, a execução deste trabalho proporcionou uma excelente oportunidade para utilizar a linguagem $\text{\LaTeX}$ na formatação deste documento técnico. A necessidade de contornar as limitações computacionais do simulador exigiu um aprofundamento nos cálculos de balanço de massa e energia. Esse processo de validação acabou por facilitar e consolidar a compreensão do processo termodinâmico envolvido, transformando um obstáculo operacional em uma experiência de aprendizado.

4. Referências Bibliográficas

- [1] NORTHWESTERN UNIVERSITY. Qualitative Reasoning Group. **Tutorial for Students: Example Problem Setup and Solution Using Cyclepad.** Evanston, [s.d.]. Disponível em: <https://www.qrg.northwestern.edu/software/cyclepad/tutorial/tutorial.htm>. Acesso em: 15 jun. 2026.
- [2] VAN WYLEN, Gordon J.; SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus. *Fundamentos da Termodinâmica*. 7. ed. São Paulo: Blucher, 2009.
- [3] OVERLEAF. **Online LaTeX Editor.** London, [s.d.]. Disponível em: <https://www.overleaf.com>. Acesso em: 17 jun. 2026.
- [4] LATEX PROJECT. **LaTeX Documentation.** [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.latex-project.org/help/documentation/>. Acesso em: 17 jun. 2026.