



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – Ensino Médio

## Análise Termodinâmica de Sistemas Térmicos – Ciclos de Potência e Refrigeração

**Alunos:**

Guilherme Alves dos Santos

Guilherme Henrique Cizenando

Rafael Júnior Mariano Carvalho

**Orientador:** Prof. Dr. José Vicente Hallak Dangelo



## 1 – Introdução

Ciclos termodinâmicos são utilizados em diversas indústrias químicas para produção de utilidades. Por meio destes ciclos, são obtidos vapor de processo (utilizado como fonte de calor), potência (utilizada para geração de energia elétrica), água gelada e fluidos de refrigeração (utilizados como fonte fria).

Os sistemas de energia envolvidos nestes ciclos precisam ser operados de forma eficiente, pois são grandes consumidores de energia e insumos. Neste projeto foram estudados os principais ciclos termodinâmicos utilizados em indústrias de processos, como por exemplo, ciclos de potência (Rankine e Brayton) e ciclos de refrigeração (compressão de vapor, absorção e cascata).

Este projeto de iniciação científica – ensino médio, teve como principais objetivos:

- estudar sistemas térmicos para produção de utilidades quentes e frias aplicadas a processos industriais, envolvendo ciclos de potência e refrigeração;
- realizar simulações desses sistemas térmicos, realizando uma análise paramétrica das variáveis operacionais envolvidas nos ciclos, visando melhorar sua eficiência termodinâmica, tendo sido utilizado o software Aspen Hysys® para fazer as simulações;
- avaliar o desempenho de diferentes configurações de ciclos, operando com diferentes fluidos de trabalho.

## 2 – Ciclos termodinâmicos estudados

Diversos ciclos termodinâmicos associados a sistemas térmicos para produção de utilidades frias e quentes e também produção de potência foram avaliados nesse projeto. Sendo eles:

- Ciclo de Rankine (potência);
- Ciclo de Brayton (potência);
- Ciclo de Compressão de Vapor (refrigeração);
- Ciclo de Absorção (refrigeração);
- Ciclo Cascata (refrigeração);
- Sistema de trigerção (combinação de geração de potência, calor na forma de vapor e frio).

## 3 – Metodologia

A metodologia consistiu em realizar as simulações dos ciclos apresentados no item 2, as quais foram validadas comparando os resultados obtidos com dados da literatura. Em seguida, utilizando-se a Primeira Lei da Termodinâmica, foram realizados balanços de energia nos componentes dos ciclos para obter as cargas térmicas e o trabalho realizado e com eles obter a eficiência termodinâmica dos ciclos. Em seguida, foi realizada uma análise paramétrica variando-se algumas das principais variáveis operacionais dos ciclos, verificando-se sua influência sobre a eficiência de cada ciclo. As eficiências foram definidas pelas equações apresentadas na Tabela 1.



Tabela 1 – Equações para cálculo dos índices de desempenho dos ciclos.

Ciclo	Índice de desempenho	Equação
Potência	Eficiência	$Eficiência = \frac{ \dot{W}_{turb}  -  \dot{W}_{bomb} }{ \dot{Q}_{cald} } * 100$
Refrigeração	COP (“coefficient of performance”)	$COP = \omega = \frac{ Q_{evap} }{ W_{comp} }$
Trigeração	Eficiência	$Eficiência = \frac{ \dot{W}_{utilBrayton}  +  \dot{Q}_{Gerador}  +  \dot{Q}_{Gás} }{- \dot{Q}_{Liberado} } * 100$

#### 4 – Resultados e discussões

Para cada ciclo foram definidos os casos base e a partir deles foi feita a análise paramétrica de algumas variáveis operacionais, avaliando sua influência sobre o parâmetro que mede a eficiência termodinâmica do ciclo, de acordo com as equações apresentadas na Tabela 1. Neste resumo do trabalho serão apresentados apenas os resultados da análise paramétrica para o ciclo de potência de Rankine.

A Figura 1 apresenta a configuração de um ciclo convencional de Rankine, o qual é composto de quatro elementos básicos: caldeira, turbina, condensador e bomba, cujo objetivo é gerar potência a partir da energia térmica contida no vapor, gerado por meio do consumo de um combustível na caldeira. Os estados físicos de cada corrente do processo também são apresentados na Figura 1.

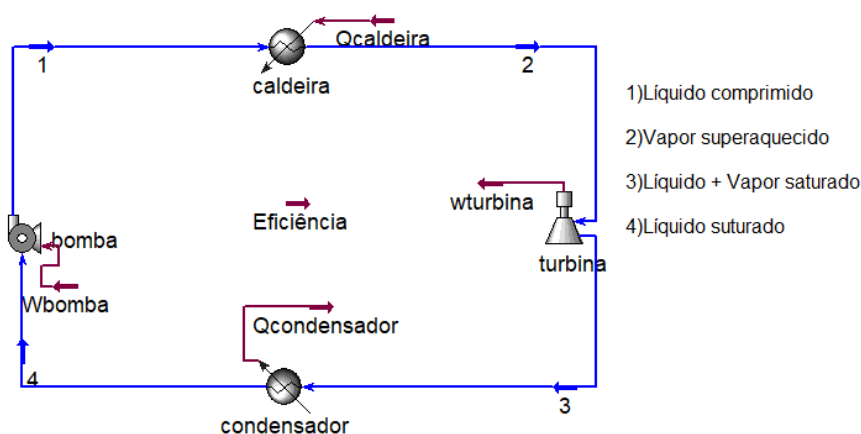
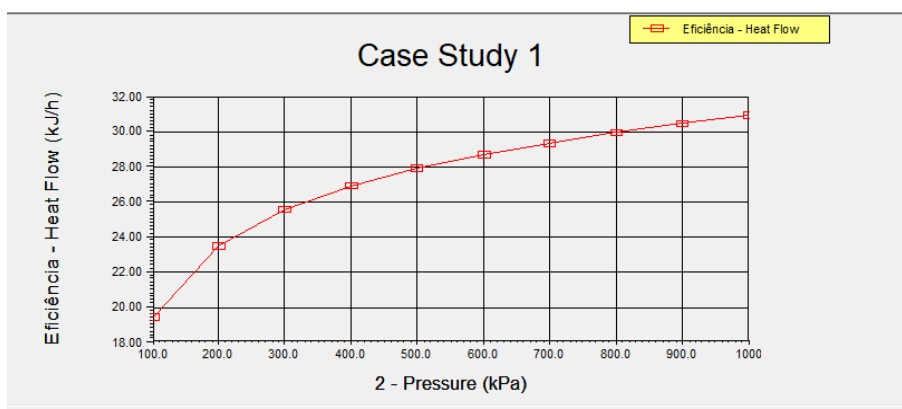


Figura 1 – Configuração do ciclo de Rankine convencional (tela do simulador Aspen Hysys®).

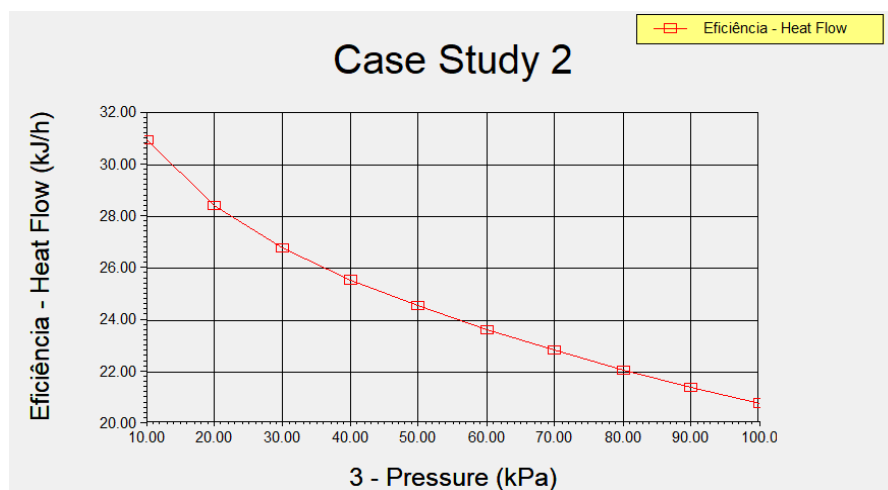


A Figura 2 apresenta um estudo da influência da pressão da corrente de entrada na turbina sobre a eficiência do ciclo. Observa-se que para a faixa analisada e mantidas constantes as demais variáveis do caso base, a eficiência do ciclo aumenta com o aumento da pressão de entrada na turbina.



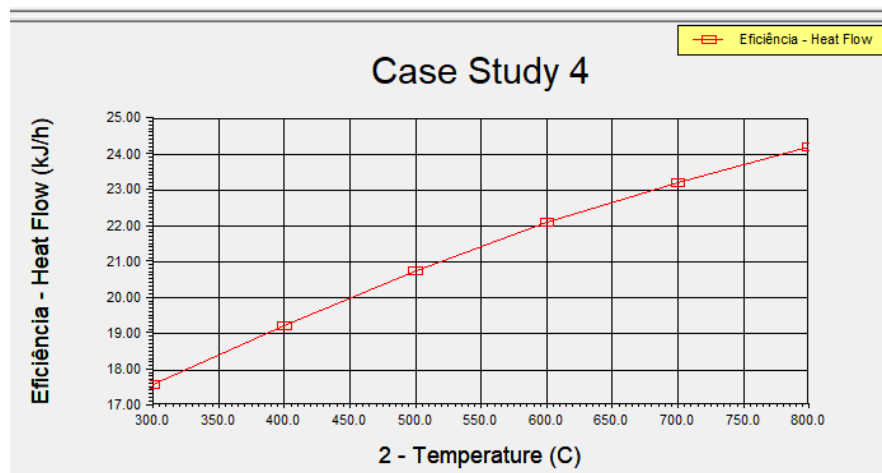
**Figura 2 – Influência da pressão de entrada da turbina sobre a eficiência do ciclo de Rankine.**

A Figura 3 apresenta um estudo da influência da pressão da corrente de saída na turbina sobre a eficiência do ciclo. Observa-se que para a faixa analisada e mantidas constantes as demais variáveis do caso base, a eficiência do ciclo diminui com o aumento da pressão.



**Figura 3 – Influência da pressão de saída da turbina sobre a eficiência do ciclo de Rankine.**

A Figura 4 apresenta um estudo da influência da temperatura do vapor superaquecido sobre a eficiência do ciclo. Observa-se que para a faixa analisada e mantidas constantes as demais variáveis do caso base, a eficiência do ciclo aumenta com o aumento da temperatura.



**Figura 4 – Influência da temperatura do vapor superaquecido sobre a eficiência do ciclo de Rankine.**

Análises semelhantes foram feitas para todos os demais ciclos estudados neste projeto, sendo possível avaliar como as variáveis operacionais influenciam a eficiência desses ciclos.

## 5 – Conclusões

O estudo realizado mostrou diferentes resultados, nos quais é possível analisar as melhores eficiências considerando-se diferentes variáveis operacionais. Cada ciclo mostrou sua particularidade, sendo possível observar de forma crítica as condições que favoreciam uma melhor eficiência. Foi possível desenvolver uma visão crítica com relação aos diferentes sistemas térmicos existentes para a produção de utilidades frias e quentes e de potência e de como suas variáveis operacionais afetam sua eficiência. Dessa forma, pôde-se concluir a importância do trabalho de um engenheiro no sentido de desenvolver projetos eficientes, que operem em condições ideais e que também levem em considerações as questões ambientais.

## Referências

- Moran, M.J. e Shapiro, H.N.; “Princípios de Termodinâmica para Engenharia”, 6ª edição, LTC Editora, 2008.
- Smith, J.M., Van Ness, H.C., Abbott, M.M., Swihart, M.T.; “Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química”, 8ª edição, LTC Editora, 2020.
- Carlos Boabaid Neto, M. Eng. Mec.; “Termodinâmica Aplicada”, volume II, Instituto Federal, 2013.
- Dinçer, I. e Kanoglu, M. “Refrigeration Systems and Applications”, 2ª edição, John Wiley and Sons, 2010.