



Universidade de Brasília

ENM0068 - Termodinâmica – 2025.2

Relatório Técnico

Modelagem e Análise de Ciclos Brayton, Rankine
e Ciclo Combinado Brayton–Rankine

Integrantes do Grupo:

Mariana Solano de Brito Elias – 232014745

Brasília
2025

Sumário

1	Introdução	2
2	Fundamentação Teórica	2
2.1	Propriedades Termodinâmicas	2
2.2	Ciclo Rankine	3
2.3	Ciclo Brayton	3
2.4	Ciclo Combinado Brayton–Rankine	3
3	Metodologia	4
4	Resultados	4
5	Comparação com o Trabalho da UFRJ	4
6	Conclusão	5
7	Referências	5

1 Introdução

Os ciclos de potência térmica desempenham papel fundamental na geração de energia elétrica em sistemas industriais e usinas termelétricas. Entre os ciclos mais utilizados destacam-se o ciclo Brayton, amplamente empregado em turbinas a gás, e o ciclo Rankine, típico de usinas a vapor.

Uma forma eficiente de aumentar o aproveitamento energético consiste na integração desses ciclos em um *ciclo combinado*, no qual o calor residual rejeitado pelo ciclo Brayton é utilizado para alimentar um ciclo Rankine, reduzindo perdas térmicas e elevando a eficiência global do sistema.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um código computacional capaz de:

- Consultar propriedades termodinâmicas da água e do ar
- Resolver os ciclos Brayton e Rankine
- Modelar e analisar um ciclo combinado Brayton–Rankine

Os resultados obtidos são comparados com valores apresentados na literatura técnica, em especial o trabalho de referência da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

2 Fundamentação Teórica

2.1 Propriedades Termodinâmicas

O estado termodinâmico de uma substância simples compressível pode ser definido por duas propriedades intensivas independentes. Para a água, diferentes regiões devem ser consideradas:

- Líquido comprimido
- Mistura líquido–vapor saturada
- Vapor superaquecido

As propriedades de interesse incluem temperatura, pressão, volume específico, energia interna, entalpia, entropia e título, quando aplicável.

Para o ar, adotou-se o modelo de gás ideal, no qual as propriedades termodinâmicas dependem exclusivamente da temperatura.

2.2 Ciclo Rankine

O ciclo Rankine ideal é composto por quatro processos principais:

1. Compressão isentrópica na bomba
2. Aquecimento a pressão constante na caldeira
3. Expansão isentrópica na turbina
4. Condensação a pressão constante no condensador

A eficiência térmica do ciclo é dada por:

$$\eta_R = \frac{W_{\text{turbina}} - W_{\text{bomba}}}{Q_{\text{caldeira}}} \quad (1)$$

2.3 Ciclo Brayton

O ciclo Brayton ideal é composto por:

1. Compressão isentrópica no compressor
2. Aquecimento a pressão constante na câmara de combustão
3. Expansão isentrópica na turbina
4. Rejeição de calor a pressão constante

A eficiência térmica é expressa por:

$$\eta_B = \frac{W_{\text{turbina}} - W_{\text{compressor}}}{Q_{\text{entrada}}} \quad (2)$$

2.4 Ciclo Combinado Brayton–Rankine

No ciclo combinado, o calor rejeitado pelo ciclo Brayton é utilizado para gerar vapor em um gerador de vapor de recuperação de calor (HRSG), alimentando um ciclo Rankine.

A eficiência global é definida por:

$$\eta_{\text{global}} = \frac{W_B + W_R}{Q_{\text{externo}}} \quad (3)$$

onde o calor externo é fornecido exclusivamente ao ciclo Brayton.

3 Metodologia

O código foi desenvolvido na linguagem Python, utilizando tabelas termodinâmicas clássicas para obtenção das propriedades da água e relações analíticas para o ar como gás ideal.

Quando necessário, foi aplicada interpolação linear de primeira ordem para estimar propriedades fora dos pontos tabelados.

As seguintes hipóteses foram adotadas:

- Regime permanente
- Processos ideais
- Turbinas e compressores isentrópicos
- Ausência de perdas térmicas no HRSG

4 Resultados

Para fins de análise, consideraram-se os seguintes parâmetros:

- Ciclo Brayton: razão de pressão igual a 10 e temperatura máxima de 1400 K
- Ciclo Rankine: pressão da caldeira de 8 MPa e pressão do condensador de 0,1 MPa

Os resultados obtidos indicaram:

- Eficiência do ciclo Brayton da ordem de 48%
- Eficiência do ciclo Rankine da ordem de 34%
- Eficiência global do ciclo combinado superior a 65%

Esses valores estão de acordo com faixas típicas encontradas em usinas termelétricas modernas.

5 Comparação com o Trabalho da UFRJ

O artigo de referência da UFRJ apresenta um modelo de ciclo combinado Brayton–Rankine com recuperação de calor por meio de um HRSG.

Ao comparar os resultados obtidos neste trabalho com os apresentados na literatura, observa-se boa concordância quanto à ordem de grandeza das eficiências térmicas e da distribuição de potência entre os ciclos.

As pequenas diferenças observadas podem ser atribuídas às seguintes simplificações:

- Consideração de processos ideais
- Ausência de perdas mecânicas e térmicas
- Propriedades médias para o ar

Apesar dessas simplificações, o comportamento físico do sistema foi corretamente reproduzido.

6 Conclusão

O código desenvolvido atendeu integralmente aos objetivos propostos, permitindo a análise detalhada de estados termodinâmicos e de ciclos de potência simples e combinados.

Os resultados obtidos são fisicamente coerentes e compatíveis com valores reportados na literatura técnica, demonstrando a eficiência do ciclo combinado Brayton–Rankine como alternativa para aumento do rendimento energético.

O programa pode ser facilmente estendido para a inclusão de efeitos reais, como eficiências isentrópicas não ideais, regeneração e reaquecimento.

7 Referências

- Çengel, Y. A.; Boles, M. A. *Termodinâmica*. McGraw-Hill.
- Moran, M. J.; Shapiro, H. N. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*.
- Universidade Federal do Rio de Janeiro. *Modelagem e Análise de um Ciclo Combinado Brayton–Rankine*.