

# ESTUDO E RESOLUÇÃO DO CICLO DE RANKINE COM MODIFICAÇÕES

João Alex Arruda da Silva

Hanna Rodrigues Ferreira

Fevereiro, 2025

## Resumo

Este trabalho analisa o ciclo de Rankine, muito utilizado na geração de energia nas usinas termelétricas que operam com vapor. São abordados seus processos básicos e modificações que aumentam a eficiência térmica, como superaquecimento, reaquecimento, regeneração e entre outras. A metodologia inclui uma revisão teórica e um estudo de caso em que realizamos cálculos de eficiência térmica, trabalho das turbinas e bombas, vazão mássica e construção dos diagramas T-s. Além disso, é realizado uma análise paramétrica do desempenho do ciclo. Os resultados nos mostram que tais modificações melhoram a eficiência, mas que é necessário um estudo aprofundado.

**Palavras-chave:** Ciclo de Rankine. Eficiência térmica. Superaquecimento. Diagrama T-s.

## 1 Introdução

Segundo ([MORAN et al., 2018](#)), o ciclo de Rankine é a estrutura fundamental das usinas termelétricas que operam com vapor. Este é um dos principais ciclos termodinâmicos utilizados na engenharia mecânica para conversão de calor em trabalho, sendo a base para o funcionamento de usinas termelétricas e outras instalações de geração de energia. Esse ciclo opera com um fluido de trabalho, geralmente água, que passa por processos de aquecimento, expansão, resfriamento e compressão.

Para melhorar a eficiência do Ciclo de Rankine, diversas modificações são adotadas, como o superaquecimento, o reaquecimento e o uso de ciclos supercríticos. Essas modificações têm o objetivo de aumentar a eficiência térmica e reduzir perdas energéticas, tornando as plantas de geração mais sustentáveis e econômicas.

Este trabalho pretende analisar detalhadamente o ciclo de Rankine e suas variações, visando aprofundar o conhecimento sobre sistemas térmicos voltados à produção de energia.

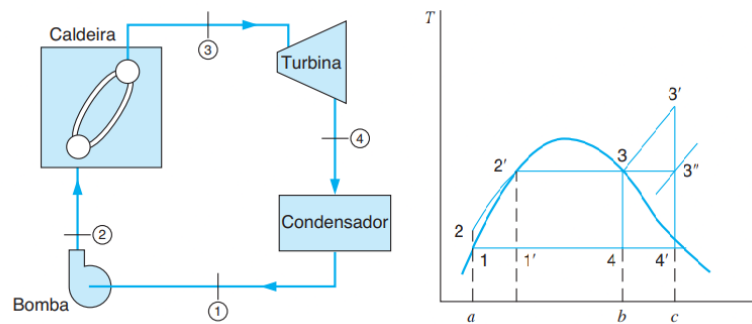
Para isso, será realizada uma revisão teórica robusta dos princípios termodinâmicos envolvidos, seguida da aplicação desses conceitos em um estudo de caso prático, que abordará técnicas como reaquecimento, expansão em dois estágios e regeneração térmica.

## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1 Definição do ciclo de Rankine

O Ciclo de Rankine é um ciclo termodinâmico idealizado que descreve o funcionamento de uma usina termelétrica convencional. Esse ciclo é composto por quatro processos termodinâmicos: compressão, aquecimento, expansão e resfriamento. A Figura 1 ilustra o diagrama de um ciclo de Rankine básico.

Figura 1 – Esquema simplificado e o diagrama T-S do ciclo Rankine



Fonte: Adaptado de (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020)

O fluido de trabalho fica sujeito à seguinte sequência de processos reversíveis internamente: (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020)

- **Processo 1-2:** Processo de bombeamento adiabático reversível na bomba.
- **Processo 2-3:** Transferência de calor a pressão constante na caldeira.
- **Processo 3-4:** Expansão adiabática reversível na turbina (ou em outra máquina motora, tal como a máquina a vapor).
- **Processo 4-1:** Transferência de calor a pressão constante no condensador.

Ao desconsiderar as variações de energia cinética e potencial, as trocas de calor e o trabalho líquido do sistema podem ser visualizados como áreas específicas no diagrama temperatura-entropia (T-s). O calor absorvido pelo fluido de trabalho corresponde à área delimitada pelos pontos a-2-2'-3-b-a, enquanto o calor rejeitado pelo fluido é representado pela área a-1-4-b-a. Aplicando a primeira lei da termodinâmica, conclui-se que o trabalho líquido é equivalente à diferença entre essas duas áreas, ou seja, corresponde à região 1-2-2'-3-4-1 no diagrama (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020).

Na análise do ciclo Rankine, é útil considerar que o rendimento depende da temperatura média na qual o calor é fornecido e da temperatura média na qual o calor é rejeitado. Qualquer variação que aumente a temperatura média na qual o calor é fornecido,

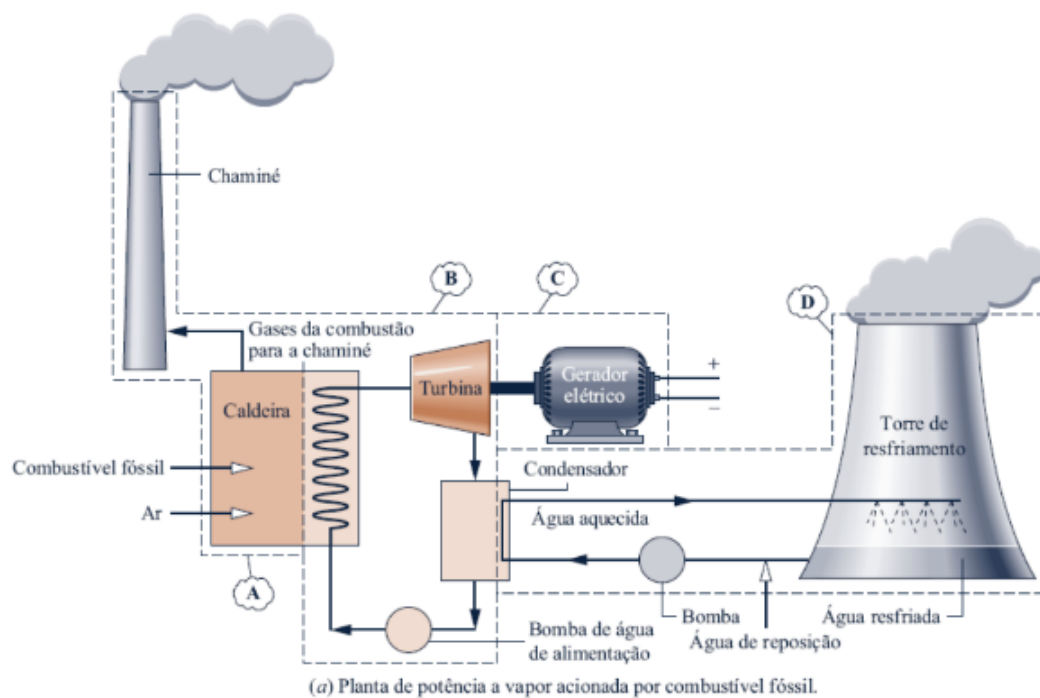
ou que diminua a temperatura média na qual o calor é rejeitado, aumentará o rendimento do ciclo Rankine.

## 2.2 Componentes Básicos

Independentemente de um modelo detalhado ou simplificado de usina a vapor baseada no ciclo Rankine, os fundamentos termodinâmicos (conservação de massa/energia, segunda lei e dados termodinâmicos) aplicam-se tanto aos componentes individuais (turbinas, bombas, trocadores de calor) quanto ao ciclo global.

Focando no subsistema mostrado na Figura 2, modelam-se os quatro componentes principais: turbina, condensador, bomba e caldeira, com água como fluido de trabalho. Usinas a combustíveis fósseis são analisadas como referência, mas os princípios valem para outros tipos.

Figura 2 – Planta de potência a vapor acionada por combustível fóssil



Fonte: citemoran-2018

No diagrama da Fig. 2, trabalho e calor são positivos conforme as setas, para simplificar a análise usamos algumas hipóteses frequentes, conforme descrito abaixo:

- R. P. em todos os componentes.
- Energia potencial e cinética desprezível.
- Perdas de pressão na caldeira e no condensador desprezíveis.
- Bombas e turbinas são consideradas isentrópicas.

Será mostrado a seguir a modelagem do ciclo para cada componente do ciclo Rankine, conforme é exibido por [Moran et al. \(2018\)](#)

### 2.2.1 Turbina

A turbina é o componente que converte a energia térmica do vapor em trabalho mecânico. O vapor entra na turbina com uma pressão e temperatura elevadas e sai com pressão e temperatura menores. O trabalho líquido da turbina é a diferença entre o trabalho de entrada e saída, conforme a equação 1.

$$\dot{W}_{\text{turbina}} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (1)$$

### 2.2.2 Condensador

O condensador é o componente que converte o vapor em água líquida, rejeitando calor para o ambiente. O calor rejeitado pelo condensador é a diferença entre o calor de entrada e saída, conforme a equação 2.

$$\dot{Q}_{\text{condensador}} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (2)$$

### 2.2.3 Bomba

A bomba é o componente que comprime a água líquida, aumentando sua pressão. O trabalho líquido da bomba é a diferença entre o trabalho de entrada e saída, conforme a equação 3.

$$\dot{W}_{\text{bomba}} = \dot{m}(h_4 - h_3) \quad (3)$$

### 2.2.4 Caldeira

A caldeira é o componente que converte a água líquida em vapor, absorvendo calor do ambiente. O calor absorvido pela caldeira é a diferença entre o calor de entrada e saída, conforme a equação 4.

$$\dot{Q}_{\text{caldeira}} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (4)$$

## 2.3 Parâmetros de Desempenho

### 2.3.1 Eficiência Térmica

A eficiência térmica do ciclo Rankine é dada pela razão entre o trabalho líquido produzido e o calor fornecido na caldeira, conforme a equação 5.

$$\eta = \frac{\dot{W}_{\text{turbina}}}{\dot{Q}_{\text{caldeira}}} \quad (5)$$

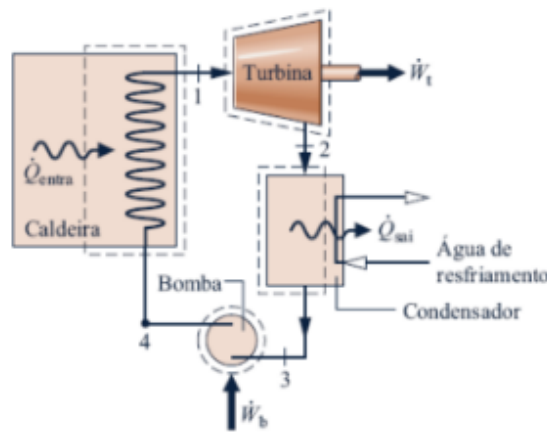
### 2.3.2 Taxa de Calor

A taxa de calor representa a quantidade de energia térmica fornecida ao sistema (geralmente medida em Btu) necessária para gerar uma unidade de trabalho útil produzido

pelo ciclo (normalmente expresso em kWh). Por isso, ela é definida como a razão entre a energia térmica consumida e o trabalho líquido gerado, com unidades de Btu/kWh. Essa taxa tem uma relação inversa com a eficiência termodinâmica do ciclo: quanto maior a eficiência, menor a quantidade de calor requerida para produzir a mesma quantidade de trabalho.

### 2.3.3 Back work ratio

Figura 3 – Planta de potência a vapor acionada por combustível fóssil



Fonte: (MORAN et al., 2018)

O back work ratio (bwr) é um parâmetro que quantifica a relação entre o trabalho consumido pela bomba e o trabalho gerado pela turbina no ciclo de potência. Para o sistema da Figura 3, usando as equações já definidas para o trabalho da bomba e da turbina, o bwr é calculado pela equação 6.

$$\text{bwr} = \frac{\dot{W}_{\text{bomba}}}{\dot{W}_{\text{turbina}}} \quad (6)$$

## 2.4 Aplicações do Ciclo de Rankine

Dentre os sete tipos de usinas de energia que operam com base em ciclos termodinâmicos, seis estão diretamente vinculadas ao ciclo de Rankine. Esse ciclo é o elemento fundamental das usinas termelétricas a vapor, servindo como modelo central para conversão de calor em trabalho mecânico ou elétrico. Sua versatilidade permite aplicações em sistemas que vão desde usinas nucleares e movidas a combustíveis fósseis até fontes renováveis, como geotérmica e solar térmica, consolidando-o como pilar da geração de energia em larga escala.

A Figura 4 mostra a turbina de Angra 2, uma usina nuclear que opera com base no ciclo de Rankine. A usina é composta por um reator nuclear, que gera calor, e uma turbina a vapor, que converte esse calor em energia elétrica. O ciclo de Rankine é responsável por transferir o calor do reator para a turbina, garantindo a eficiência do processo.

A large industrial facility, likely a power plant, featuring a massive green cylindrical component (possibly a turbine or generator) and various pipes and structural elements. The image shows a vast interior space with high ceilings, concrete pillars, and a complex network of pipes and machinery. The green cylinder is the central focus, with several smaller components and pipes connected to it. The floor is made of large concrete tiles, and there are yellow safety markings on the ground. The overall atmosphere is one of a large-scale industrial operation.

6

### 3.2.1 Efeito do Superaquecimento do Vapor

Na Figura 6, é mostrado o efeito do superaquecimento do vapor. O trabalho líquido aumenta correspondendo à área  $3-3'-4'-4-3$ , e o calor transferido na caldeira aumenta com a área  $3-3'-b'-b-3$ . Como a relação entre essas áreas é maior que a relação entre o trabalho líquido e o calor fornecido no restante do ciclo, o superaquecimento do vapor resulta em um aumento do rendimento do ciclo Rankine. O superaquecimento aumenta a temperatura média de transferência de calor e melhora o título do vapor na saída da turbina (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020).

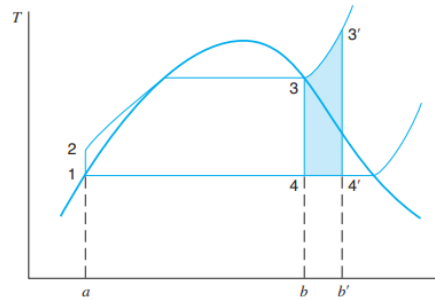


Figura 6 – Efeito do superaquecimento do vapor sobre o rendimento do ciclo Rankine

Fonte: (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020)

### 3.2.2 Efeito da Pressão Máxima do Vapor

A Figura 7 ilustra o impacto do aumento da pressão máxima do vapor. Mantendo-se constantes a temperatura máxima e a pressão de saída da turbina, o calor rejeitado diminui com a área  $b'-4'-4-b-b'$ . O trabalho líquido aumenta com a área hachurada simples e diminui com a área duplamente hachurada. O rendimento do ciclo aumenta com o aumento da pressão, pois o calor rejeitado diminui e a temperatura média de fornecimento de calor aumenta.

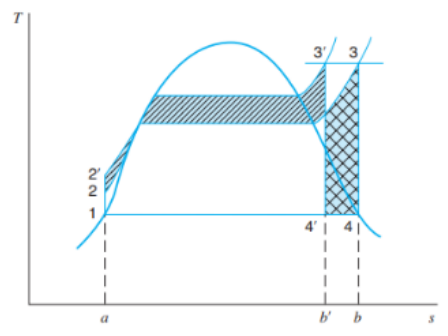


Figura 7 – Efeito da pressão máxima do vapor sobre o rendimento do ciclo Rankine

Fonte: (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020)

A Figura 8 mostra como a pressão e a temperatura afetam o trabalho do ciclo Rankine. Já a Figura 9 apresenta a influência dessas variáveis na eficiência do ciclo. Ambas destacam os efeitos combinados das variáveis.

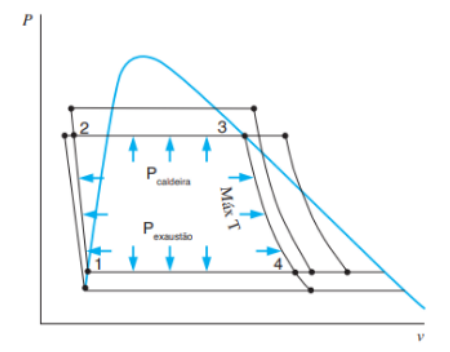


Figura 8 – Efeito da pressão e da temperatura no trabalho do ciclo Rankine

Fonte: (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020)

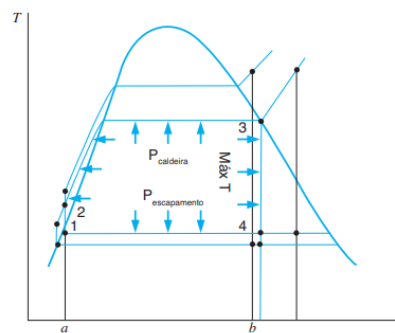


Figura 9 – Efeito da pressão e da temperatura na eficiência do ciclo Rankine

Fonte: (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020)

Esses três fatores combinados podem otimizar o ciclo Rankine, desde que o projeto evite problemas como erosão das palhetas da turbina devido a altos níveis de umidade. Além dessas considerações, observamos que o ciclo é representado por quatro processos conhecidos (dois isobáricos e dois isentrópicos) que se desenrolam entre os quatro estados, abrangendo um total de oito características. Assumindo que o estado 1 seja um estado líquido saturado ( $x_1 = 0$ ), precisamos definir três parâmetros (8-4-1). A pressão operacional é controlada fisicamente pela alta pressão produzida pela bomba,  $P_2 = P_3$ , o superaquecimento para  $T_3$  (ou  $x_3 = 1$ , se não houver superaquecimento) e a temperatura do condensador  $T_1$ , que é o resultado da transferência de calor que acontece (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020).

### 3.3 Interpretação Dos Efeito Das Pressões Da Caldeira E Do Condensador

A Figura 10 exibe dois ciclos ideais submetidos à mesma pressão. Contudo, com pressões distintas na caldeira. Conforme a análise, a temperatura média do calor adicionado é maior no ciclo de pressão mais elevada  $1' - 2' - 3' - 4' - 1'$  do que no ciclo  $1 - 2 - 3 - 4 - 1$ . Portanto, o aumento da pressão na caldeira do ciclo ideal de Rankine tende a eficiência térmica.

A Figura 11 ilustra dois ciclos com pressões idênticas na caldeira, mas com duas pressões distintas no condensador. Um condensador funciona sob a pressão atmosférica,



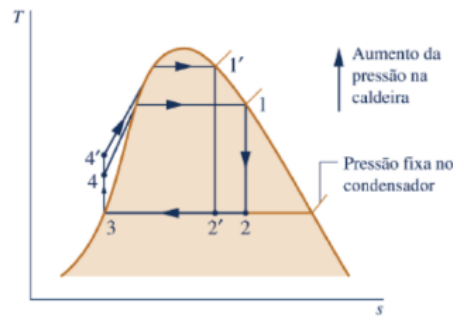


Figura 10 – Efeitos da variação das pressões de operação do ciclo ideal Rankine na caldeira

Fonte: (MORAN et al., 2018)

enquanto o outro opera sob uma pressão inferior à atmosfera. Para os ciclos 1-2-3-4-1 que condensam sob pressão atmosférica, a temperatura de rejeição de calor é de 100 °C (212 °F). A temperatura do calor devolvido para o ciclo de pressão mais baixa 1 - 2- 3- 4- 1 é menor, resultando em uma maior eficiência térmica para este ciclo. Portanto, conclui-se que a redução da pressão no compressor tende a incrementar a eficiência térmica.

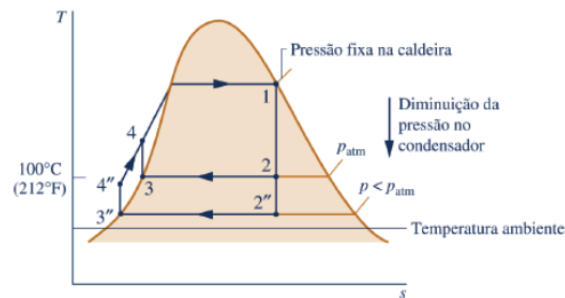


Figura 11 – Efeitos da variação das pressões de operação do ciclo ideal Rankine no condensador

Fonte: (MORAN et al., 2018)

O condensador opera com a pressão de saturação equivalente à temperatura ambiente, pois esta é a temperatura ideal para a dissipação de calor para as proximidades. A finalidade de manter a pressão de exaustão mais baixa possível na turbina é a principal razão para a inclusão do condensador em uma instalação de potência. A caldeira poderia ser abastecida com água líquida à pressão atmosférica por meio da bomba, enquanto o vapor poderia ser liberado diretamente no ar ao sair da turbina. No entanto, ao incorporar um condensador, que opera a vapor a uma pressão inferior à atmosférica, a turbina terá uma área de pressão mais baixa onde será feita a descarga, o que resultará em um aumento do trabalho líquido da eficiência térmica. Incorporando um condensador adicional, o fluido de trabalho funcionará em circuito fechado, garantindo uma circulação constante do fluido de trabalho.

### 3.4 Efeito da temperatura na eficiência térmica

Basicamente o ciclo ideal Rankine consiste em processos onde existem reversibilidades internas, o que nos possibilita obter uma expressão para eficiência térmica em função das temperaturas médias durante o processo de interação térmica. A eficiência térmica do ciclo ideal Rankine é expressa pela equação 7.

$$\eta_{ideal} = 1 - \frac{T_{sai}}{T_{ent}} \quad (7)$$

Pode-se concluir que a eficiência térmica do ciclo ideal tende a aumentar quando a temperatura média pela qual a energia é adicionada por transferência de calor aumenta ou a temperatura pela qual a energia rejeitada diminui.

## 4 Ciclos de Rankine Modificados

### 4.1 Tipos de modificações

O ciclo de Rankine pode ser modificado de várias maneiras para melhorar sua eficiência e desempenho. As modificações mais comuns incluem o superaquecimento, o reaquecimento e a regeneração térmica. Cada uma dessas técnicas tem o objetivo de aumentar a eficiência térmica do ciclo, reduzindo as perdas de calor e melhorando a qualidade do vapor na saída da turbina.

#### 4.1.1 Reaquecimento

O ciclo Rankine com reaquecimento foi projetado para aproveitar o aumento de rendimento proporcionado por pressões mais altas, evitando umidade excessiva nos estágios de baixa pressão da turbina. Conforme ilustrado na Figura 12, o vapor inicialmente se expande até uma pressão intermediária na turbina, sendo reaquecido na caldeira antes de expandir novamente até a pressão de saída. Embora o diagrama T-s demonstre que o reaquecimento proporciona um pequeno ganho de rendimento devido à pequena variação na temperatura média de fornecimento de calor, sua principal vantagem reside na redução da umidade nos estágios finais da turbina. O autor destaca ainda que, caso os metais permitam um superaquecimento adequado do vapor até 3', o ciclo Rankine simples seria mais eficiente que o ciclo com reaquecimento, tornando este último desnecessário (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020).

#### 4.1.2 Regeneração

O ciclo Rankine regenerativo é uma importante variação que utiliza aquecedores da água de alimentação para melhorar a eficiência do sistema. Como mostrado na Figura 13, no ciclo sem superaquecimento, o fluido de trabalho é aquecido na fase líquida entre os estados 2 e 2', com uma temperatura média significativamente menor em comparação ao processo de vaporização (2'-3). Isso resulta em uma temperatura média de transferência de calor inferior à do ciclo de Carnot (1'-2'-3-4-1), acarretando um rendimento menor. No ciclo regenerativo, o fluido entra na caldeira em um estado intermediário entre 2 e 2', aumentando a temperatura média de fornecimento de calor e, consequentemente, o rendimento do ciclo (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020).

O ciclo regenerativo ideal, como ilustrado na Figura 14, apresenta uma característica singular em comparação ao ciclo Rankine. Após a saída da bomba, o líquido circula ao

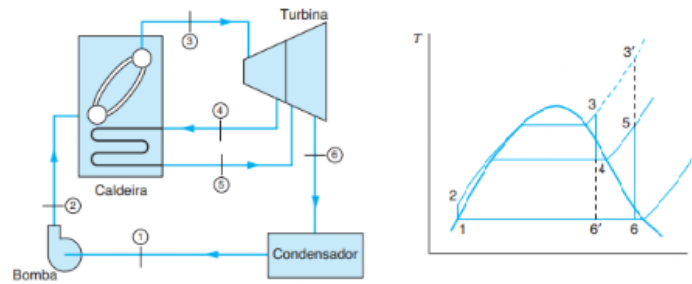


Figura 12 – Ciclo Rankine com reaquecimento

Fonte: (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020)

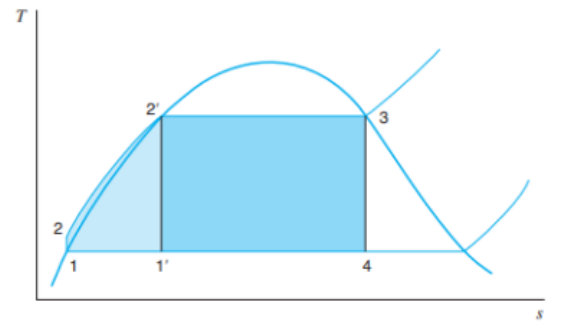


Figura 13 – Diagrama T-s que mostra a relação entre os rendimentos dos ciclos de Carnot e Rankine.

Fonte: (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020)

redor da carcaça da turbina em sentido contrário ao do vapor, permitindo a transferência de calor do vapor para o líquido de forma teoricamente reversível. Nesse cenário ideal, a linha 4-5 no diagrama T-s, que representa o escoamento do vapor pela turbina, é paralela à linha 1-2-3, que indica o processo de bombeamento e o escoamento do líquido ao redor da turbina. As áreas 2-3-b-a-2 e 5-4-d-c-5 são congruentes e representam o calor transferido entre vapor e líquido. Esse ciclo apresenta rendimento térmico equivalente ao do ciclo de Carnot, já que a área 1-5-c-a-1 é igual à área de calor rejeitado do ciclo de Carnot (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020).

Na prática, no entanto, a implementação desse ciclo ideal é inviável devido à dificuldade de realizar uma transferência de calor eficiente na turbina e ao aumento significativo da umidade do vapor na saída. O ciclo regenerativo real, mostrado na Figura 15, resolve essa limitação com a extração de parte do vapor parcialmente expandido na turbina, que é direcionado a aquecedores da água de alimentação. O líquido condensado é bombeado para se misturar ao vapor extraído, resultando em uma mistura saturada no estado 3. Para atingir a pressão da caldeira, uma segunda bomba é necessária. A vantagem principal desse ciclo é o aumento da temperatura média na qual o calor é fornecido ao fluido de trabalho, melhorando a eficiência térmica em comparação ao ciclo Rankine convencional (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020).

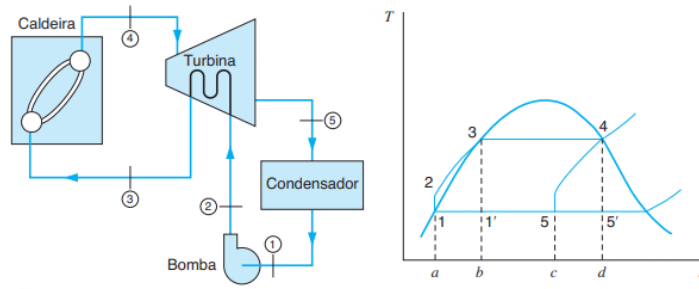


Figura 14 – Ciclo Rankine regenerativo ideal

Fonte: (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020)

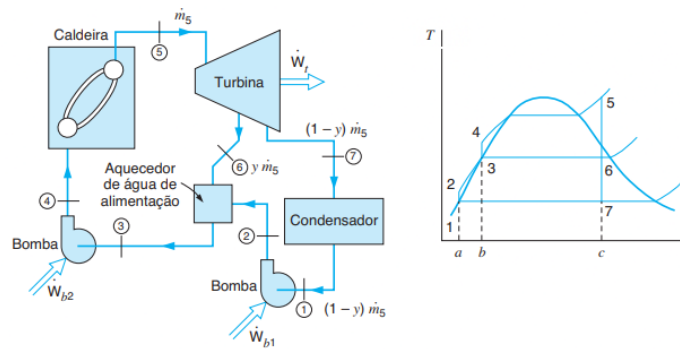


Figura 15 – Ciclo regenerativo com aquecedor de água de alimentação de mistura

Fonte: (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020)

#### 4.1.3 Cogeração

A cogeração é uma aplicação industrial do ciclo de potência a vapor que combina a geração de eletricidade com o suprimento de energia térmica para processos produtivos. Como mostrado na Figura 16, o vapor expandido até uma pressão intermediária na turbina de alta pressão é utilizado como fonte de energia para o processo produtivo, eliminando a necessidade de uma segunda caldeira dedicada. Esse vapor pode atender demandas específicas, como aquecer ambientes ou fornecer vapor para processos industriais (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020).

A cogeração pode operar em diferentes arranjos: em algumas instalações, o vapor é o produto principal e a eletricidade é um subproduto, típico de fábricas e pequenas unidades; em outros casos, como em empresas de geração elétrica, a eletricidade é o foco principal, com o vapor como subproduto. Exemplos incluem plantas que fornecem eletricidade para a rede e água quente para aquecimento domiciliar, desde que a densidade populacional e as distâncias de distribuição sejam favoráveis. A cogeração de energia pode ser amplamente aplicada na indústria alimentícia, oferecendo múltiplos benefícios por meio da integração de processos. Por exemplo, sistemas de cogeração permitem gerar eletricidade para alimentar equipamentos, reduzindo a dependência da rede externa e garantindo estabilidade energética, enquanto subprodutos como vapor são aproveitados em etapas de cozimento, esterilização ou secagem de alimentos. Além disso, a água quente

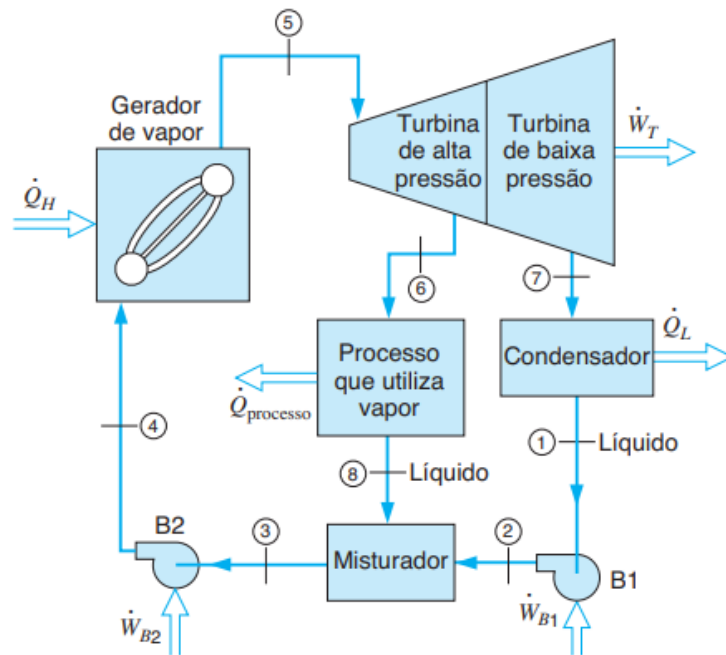


Figura 16 – Ciclo Rankine com cogeração

Fonte: (BORGNAKKE; SONNTAG, 2020)

produzida pelo sistema atende a demandas de limpeza e sanitização, e a água gelada, gerada por chillers de absorção a partir de 5°C, é empregada no resfriamento de produtos e climatização. O ar quente derivado do processo auxilia em etapas como secagem, e até mesmo a produção de  $CO_2$  de alta pureza para bebidas é viabilizada com custos reduzidos. Dessa forma, a cogeração otimiza recursos, diminui despesas com energia e aumenta a eficiência operacional, integrando necessidades térmicas, elétricas e industriais em um único sistema sustentável (Ecogen Brasil, 2025).

#### 4.1.4 Superaquecimento

No processo de superaquecimento não existe limitação quanto à presença de vapor saturado na entrada da turbina, possibilitando adicionar mais energia ao vapor através da transferência de calor, fazendo com que a condição de vapor superaquecido eleve antes de entrar na turbina. O equipamento chamado de superaquecedor que gera essa energia extra que trabalha em conjunto com a caldeira, formando o gerador de vapor. Na Figura 17, é mostrado um ciclo ideal de Rankine com vapor superaquecido na entrada da turbina, representado pelo ciclo 1'-2'-3-4-1' que em comparação ao ciclo sem superaquecimento (ciclo 1-2-3-4-1) possui uma temperatura média mais elevada durante a adição de calor, o que aumenta a eficiência térmica do sistema. Outra vantagem é que o título do vapor no estado 2' (saída da turbina) é maior do que no estado 2 (sem superaquecimento). Isso reduz o problema associado ao baixo título do vapor na saída da turbina, comum em ciclos sem superaquecimento. Com isso, um controle adequado do superaquecimento, é possível até mesmo garantir que o vapor na saída da turbina permaneça na região de vapor superaquecido.

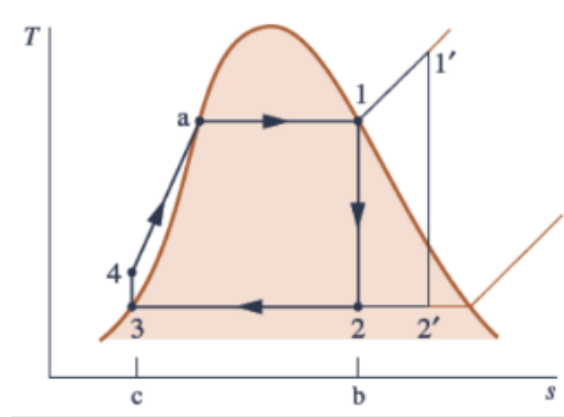


Figura 17 – Ciclo Rankine com superaquecimento

Fonte: (MORAN et al., 2018)

#### 4.1.5 Ciclo Supercrítico

Segundo Moran et al. (2018), a temperatura e a pressão do vapor em turbinas são limitadas pelas propriedades dos materiais empregados em componentes como superaquecedores, reaquecedores e nas próprias turbinas. Pressões elevadas demandam tubulações capazes de suportar altas tensões e temperaturas. Avanços em materiais e métodos de fabricação permitiram elevar esses limites, aumentando a eficiência térmica dos ciclos de geração de energia, reduzindo o consumo de combustível e os impactos ambientais. Conforme ilustrado na Figura 18, que representa um ciclo ideal de reaquecimento, em plantas supercríticas, a geração de vapor ocorre acima da pressão crítica da água (22,1 MPa), sem transição brusca entre líquido e vapor, como destacado no Processo 6-1. Nesses sistemas, a água é aquecida gradualmente em tubulações, sem o processo convencional de ebulição, utilizando carvão pulverizado como fonte de energia.

Plantas supercríticas modernas operam com pressões próximas a 30 MPa e temperaturas de 600 °C, alcançando eficiências térmicas de até 47%. Com o desenvolvimento de superligas resistentes à corrosão e altas temperaturas, plantas ultrassupercríticas atingem 35 MPa e 750 °C, superando 50% de eficiência. Em contraste, usinas subcríticas têm eficiência máxima de cerca de 40%. Embora o custo inicial das plantas supercríticas seja maior, o menor consumo de combustível compensa economicamente a longo prazo. Além disso, a redução no uso de combustível diminui emissões de  $CO_2$ , outros poluentes e resíduos sólidos, tornando essas tecnologias mais sustentáveis. Esse avanço, exemplificado pelas figuras mencionadas, demonstra como inovações técnicas promovem eficiência energética, economia de recursos e menor impacto ambiental (MORAN et al., 2018).

## 4.2 Desempenho dos ciclos modificados

Os ciclos de potência a vapor desempenham um papel fundamental na conversão de energia térmica em trabalho útil. O ciclo de Rankine simples é amplamente utilizado, mas sua eficiência pode ser melhorada por modificações. A seguir três formas de realizar isso para o ciclo de Rankine simples ideal (ÇENGEL; BOLES, 2008).

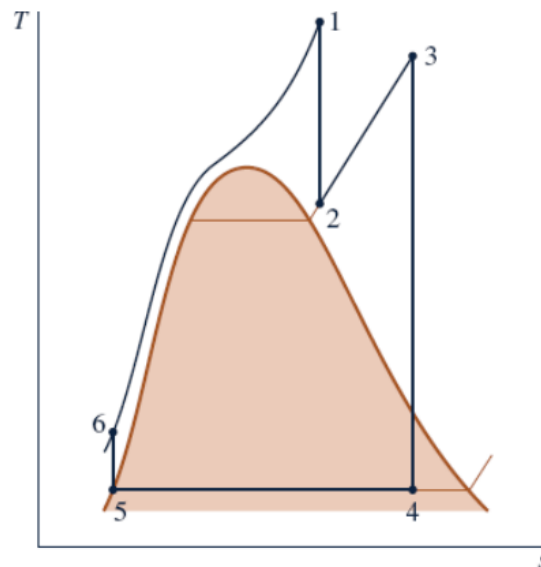


Figura 18 – Ciclo Rankine supercrítico

Fonte: (MORAN et al., 2018)

#### 4.2.1 Comparação da Eficiência dos Ciclos Modificados com o Ciclo Simples

A eficiência térmica do ciclo de Rankine pode ser aumentada por três principais modificações:

##### 4.2.1.1 Redução da pressão no condensador

Como ilustrado na Figura 19, o efeito da diminuição da pressão no condensador sobre a eficiência do ciclo de Rankine, o estado de entrada na turbina é mantido o mesmo. A área colorida desse diagrama representa o aumento do trabalho líquido devido à diminuição da pressão do condensador de  $P_4$  para  $P_4'$ . O consumo de calor também aumenta (área sob a curva  $2'-2$ ), mas o aumento é muito pequeno. Deste modo, o efeito global da diminuição da pressão no condensador é um aumento na eficiência térmica do ciclo.

##### 4.2.1.2 Superaquecimento do vapor

O superaquecimento do vapor permite aumentar a temperatura média de adição de calor sem elevar a pressão da caldeira, melhorando a eficiência dos ciclos de potência a vapor. No diagrama T-s, conforme Figura 20, isso se reflete no aumento do trabalho líquido e do calor fornecido. Além disso, temperaturas mais altas reduzem a umidade do vapor na saída da turbina, como mostra o maior título no estado  $4'$  em relação ao estado 4.

##### 4.2.1.3 Aumento da pressão na caldeira

O efeito do aumento da pressão da caldeira sobre o desempenho dos ciclos de potência a vapor é visto no diagrama T-s exibido na Figura 21, observe que para uma temperatura fixa na entrada da turbina, o ciclo se desloca para a esquerda e o conteúdo de

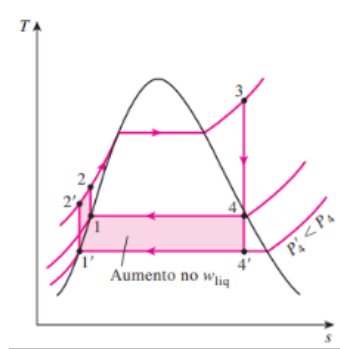


Figura 19 – Efeito da redução da pressão no condensador sobre a eficiência do ciclo de Rankine

Fonte: (ÇENGEL; BOLES, 2008)

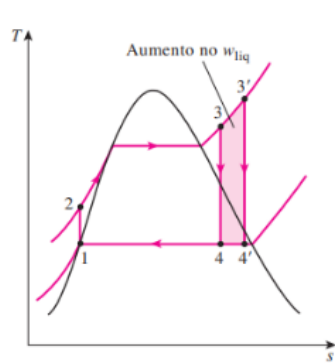


Figura 20 – O efeito do superaquecimento do vapor a temperaturas mais altas no ciclo de Rankine ideal

Fonte: (ÇENGEL; BOLES, 2008)

umidade do vapor na saída da turbina aumenta. Esse efeito colateral indesejado pode ser corrigido pelo reaquecimento do vapor.

Os efeitos da redução da pressão no condensador, do superaquecimento do vapor a temperaturas mais altas e do aumento da pressão da caldeira sobre a eficiência térmica do ciclo Rankine é mostrado no diagrama T-s contido na Figura 22, resultado de um exemplo resolvido do livro (ÇENGEL; BOLES, 2008).

O exemplo analisa os efeitos das alterações na pressão da caldeira e na temperatura de superaquecimento sobre a eficiência térmica de uma usina operando no ciclo de Rankine ideal, onde vapor entra na turbina a 3 MPa e 350 °C e é condensado no condensador à pressão de 10 kPa. Na Figura 22 (a), a redução da pressão no condensador de 75 kPa para 10 kPa eleva a eficiência térmica de 26% para 33,4%. No entanto, essa mudança também aumenta a umidade do vapor na saída da turbina, passando de 11,4% para 18,7%, o que pode causar danos às pás da turbina. Na Figura 22 (b), considera o superaquecimento do vapor, comparando temperaturas de 350 °C e 600 °C a 3 MPa. Com essa alteração, a eficiência térmica sobe para 37,3%, além de reduzir a umidade do vapor para 8,5%, minimizando o risco de erosão nas pás da turbina. Na Figura 22 (c), o aumento da pressão



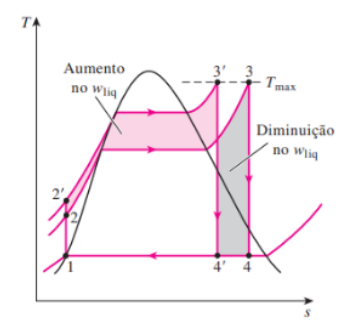


Figura 21 – Efeito do aumento da pressão da caldeira sobre o desempenho dos ciclos de potência a vapor

Fonte: (ÇENGEL; BOLES, 2008)

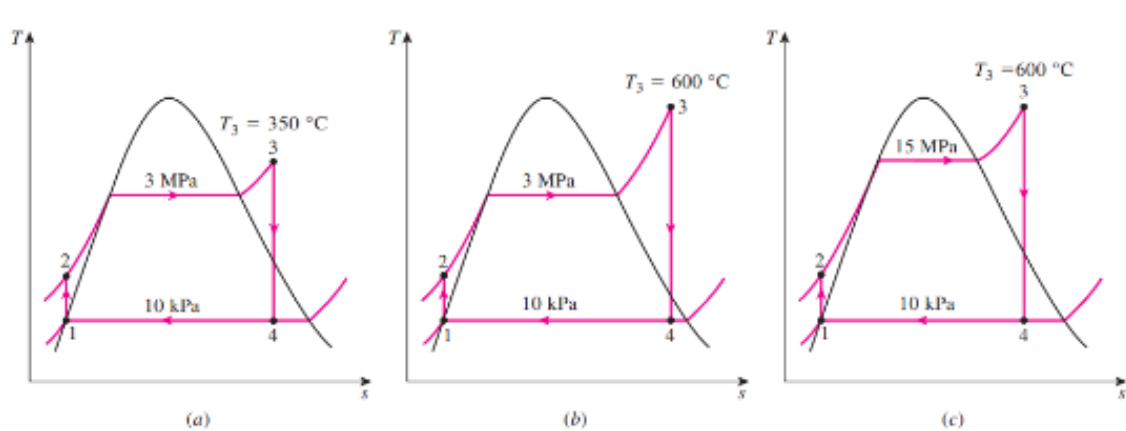


Figura 22 – Diagramas T-s dos três ciclos de potência a vapor

Fonte: (ÇENGEL; BOLES, 2008)

da caldeira de 3 MPa para 15 MPa, mantendo a temperatura fixa em 600 °C, faz a eficiência térmica atingir 43%, um valor próximo ao limite teórico. Entretanto, essa mudança eleva novamente a umidade do vapor na saída da turbina para 19,6%, tornando necessário o uso de técnicas como reaquecimento para mitigar esse efeito.

## 5 Modelo Matemático

### 5.1 Detalhamento do Problema

O problema proposto consiste na análise de um ciclo termodinâmico de potência, representado pela Figura 23, que mostra um esquema composto por múltiplos equipamentos que operam o ciclo.

As seguintes hipóteses serão adotadas no desenvolvimento do problema:

- Fluido de trabalho: vapor d'água.
- Perda de carga desprezível nos equipamentos de troca térmica.

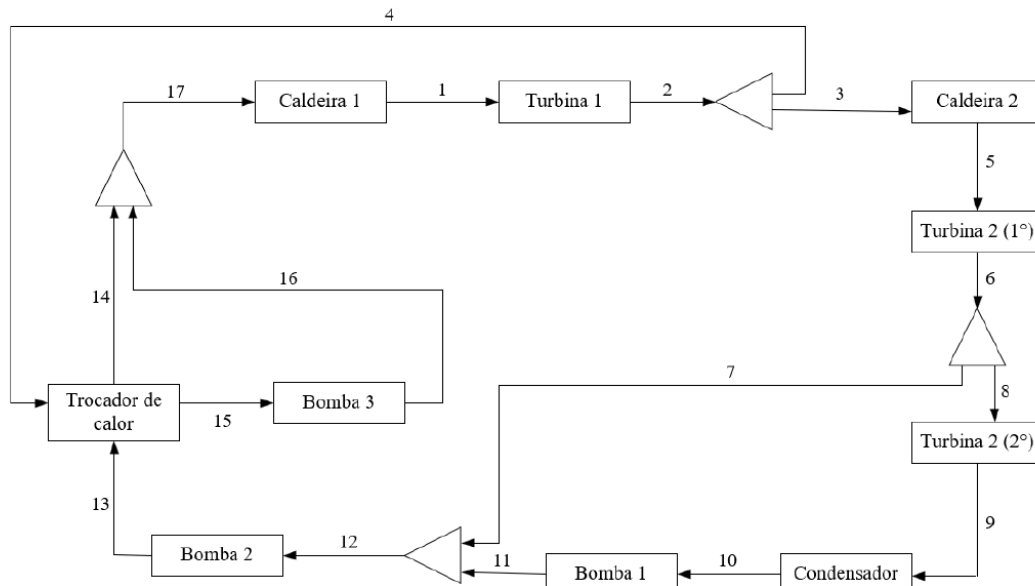


Figura 23 – Esquema do ciclo termodinâmico de potência

- Operação isentrópica das turbinas e das bombas.
- Vazão mássica ( $\dot{m}$ ) da corrente 1 fixa em 10.000 kg/h.
- Saída do condensador (corrente 10): líquido saturado.

1. Determinar a eficiência térmica do sistema modificado proposto.
2. Obter a taxa de trabalho realizado em cada turbina; a taxa de calor fornecido nas caldeiras; a taxa de trabalho consumida em cada bomba.
3. Determinar a vazão mássica de água de resfriamento empregada no condensador.
4. Construir o diagrama T x s do sistema.
5. Realizar análise paramétrica no desempenho do ciclo considerando a variação das pressões de descargas das turbinas; e a temperatura de saída da caldeira 1.

## 6 Considerações finais

## Referências

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 9. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Brasil, 2020. ISBN 9788522121581. Citado 8 vezes nas páginas 2, 6, 7, 8, 10, 11, 12 e 13.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica: Abordagem da Engenharia**. 6. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Brasil, 2008. ISBN 9788586804841. Citado 3 vezes nas páginas 14, 16 e 17.

Ecogen Brasil. **Cogeração de Energia e Utilidades para Indústrias**. 2025. Acessado em: 13 fev. 2025. Disponível em: <<https://www.ecogenbrasil.com.br/cogeracao-de-energia-e-utilidades-para-industrias/>>. Citado na página 13.

Eletronuclear. **Angra - Capital da Energia Nuclear**. 2024. Acessado em: 13 fev. 2025. Disponível em: <<https://www.eletronuclear.gov.br/GaleriaImagens/Angra%20Capital%20da%20energia%20nuclear/26ecf542-d755-48b4-9043-3ab70aea9996.png>>. Citado na página 6.

MORAN, M. J. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 8. ed. [S.l.]: LTC, 2018. ISBN 9788521635041. Citado 6 vezes nas páginas 1, 4, 5, 9, 14 e 15.