

TERMODINÂMICA

CICLOS DE POTÊNCIA

R. Sobral

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

rodolfo.sobral@cefet-rj.br

Programa do Curso - Avaliação 02

- 3º Lei da Termodinâmica
- Geração de Entropia e Destruição de Exergia
- Ciclos de Potência
- Ciclos de Refrigeração
- Psicrometria
- Relações Termodinâmicas

Ementa

- 1 Ciclos de Potência
 - Vapor

Fluido de Trabalho

Vapor d'água é o mais comum fluido de trabalho utilizado nos ciclos de potência a vapor, devido suas características fundamentais como, baixo custo, disponibilidade e elevada entalpia de vaporização.

Classificação

As usinas a vapor são classificadas de acordo com o tipo de combustível utilizado no fornecimento de calor.

- Carvão
- Nuclear
- Gás natural

Ciclos Real, Ideal e de Carnot

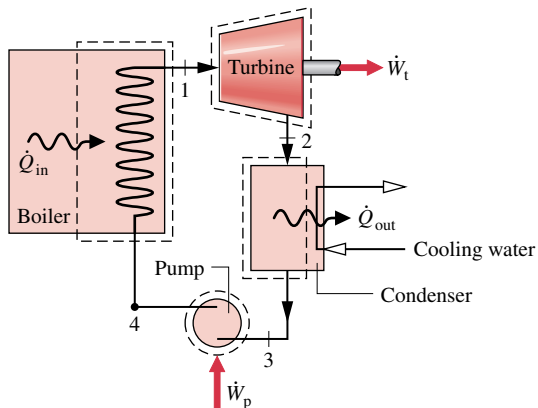
Ciclos ideais são internamente reversíveis, mas ao contrário do ciclo de Carnot, eles não são necessariamente externamente reversíveis. Ou seja, eles podem envolver irreversibilidades externas ao sistema, como transferência de calor com diferença finita de temperatura.

Para ciclos ideais os processos são considerados:

- sem atrito;
- quase estáticos;
- adiabáticos.

Ciclo de Potência a Vapor Real

Composto por quatro processos internamente e externamente irreversíveis.

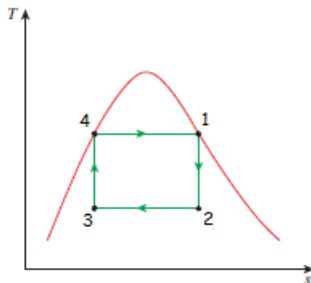


Ciclo de Carnot

Quatro processos totalmente reversíveis:

- 1-2 $\rightarrow$ expansão isentrópica;
- 2-3 $\rightarrow$ rejeição isotérmica de calor;
- 3-4 $\rightarrow$ compressão isentrópica;
- 4-1 $\rightarrow$ fornecimento isotérmico de calor.

Ciclo de Carnot

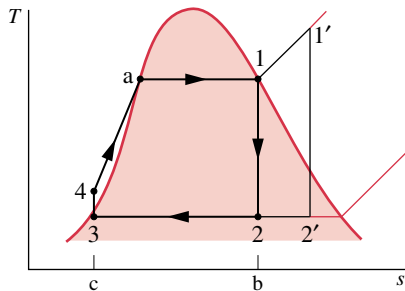


Ciclo de Potência a Vapor Ideal - Rankine

Consiste em quatro processos internamente reversíveis:

- 1-2 $\rightarrow$ expansão isentrópica;
- 2-3 $\rightarrow$ rejeição de calor a pressão constante;
- 3-4 $\rightarrow$ compressão isentrópica;
- 4-1 $\rightarrow$ fornecimento de calor a pressão constante.

Ciclo Rankine



Muitos problemas práticos de ciclos de potência a vapor podem ser eliminados superaquecendo o vapor d'água na caldeira e condensando-o completamente no condensador

Ciclo Rankine - Balanço de Energia

Observe que todos os processos são executados em dispositivos em regime permanente na presença de fluxo, desprezando as variações das energias cinética e potencial, o balanço de energia dos processos é expresso, por

$$(q_e - q_s) + (w_e - w_s) = h_s - h_e$$

Para caldeira e condensador não envolvendo nenhum trabalho, e bomba e turbina isentrópicas, vide primeira lei da termodinâmica

$$w_p = h_2 - h_1 = \nu (P_2 - P_1)$$

$$q_e = h_3 - h_2$$

$$w_T = h_3 - h_4$$

$$q_s = h_4 - h_1$$

Ciclo Rankine - Eficiência

Para o termo de eficiência tem-se

$$\eta = \frac{w_{liq}}{q_e} = 1 - \frac{q_s}{q_e}$$

sendo o trabalho líquido

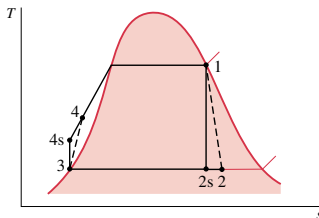
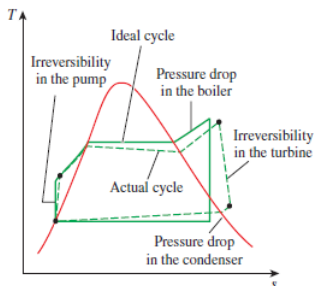
$$w_{liq} = q_e - q_s = w_T - w_p$$

A eficiência térmica também pode ser interpretada como a razão entre a área envolvida pelo ciclo em um diagrama $T - s$ e a área sob o processo de fornecimento de calor.

Efeito das Irreversibilidades

- Atrito do fluido e perda de carga
- Dissipação de calor para vizinhança
- Eficiências dos dispositivos

Efeito das Irreversibilidades



$$\eta_p = \frac{w_s}{w} \equiv \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3}$$

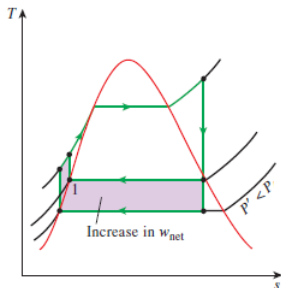
$$\eta_T = \frac{w}{w_s} \equiv \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

Estados 2 e 4 são estados de saída reais da turbina e bomba, e estados 2s e 4s estados correspondentes aos processos isentrópicos

Fatores de Eficiência

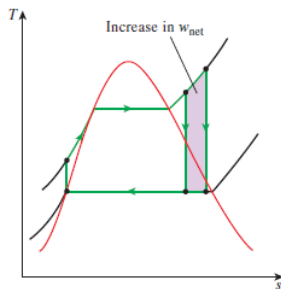
- Diminuição da pressão no condensador ($\downarrow T_L$)
- Superaquecimento do vapor ($\uparrow T_{H_{medio}}$)
- Aumentando a pressão na caldeira ($\uparrow T_H$)

Diminuição da Pressão no Condensador



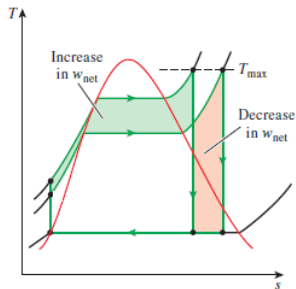
Para um eficaz aumento de eficiência térmica do ciclo, os condensadores costumam operar bem abaixo da pressão atmosférica. Porém, inconvenientes como infiltração do ar ambiente para o interior do condensador devido a elevada queda da pressão no condensador e também erosão das palhetas da turbina devido a diminuição do título do fluido de trabalho devem ser considerados

Superaquecimento do Vapor



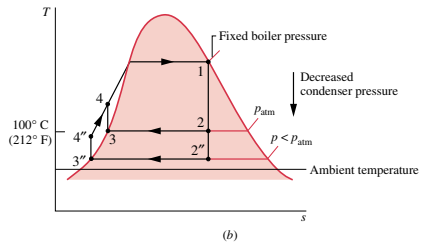
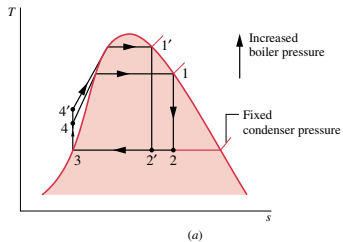
Fornece aumento real de eficiência do ciclo e trabalho líquido, além disso diminui a umidade na saída turbina, evitando erosão de palhetas, porém tal benesse é limitada por condições metalúrgicas construtivas das turbinas

Aumentando Pressão na Caldeira

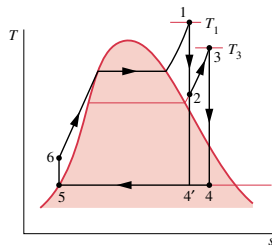
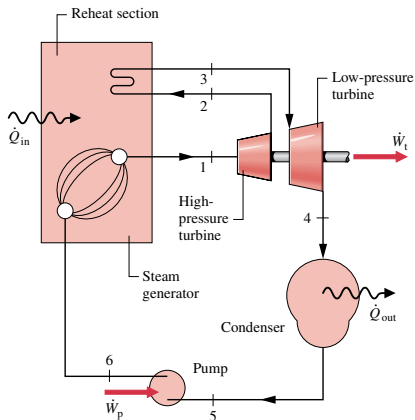


Há aumento de eficiência do ciclo, porém há também aumento da umidade do vapor na turbina

Aumento e Diminuição da Pressão



Rankine com Reaquecimento



Solução viável para os limites definidos pelo aumento da umidade decorrente do aumento de P_H e limites metalúrgicos acerca do aumento de T_1

Rankine com Reaquecimento

O fornecimento total de calor para o ciclo com reaquecimento

$$q_e = q_{\text{primário}} + q_{\text{reaquecimento}} = (h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)$$

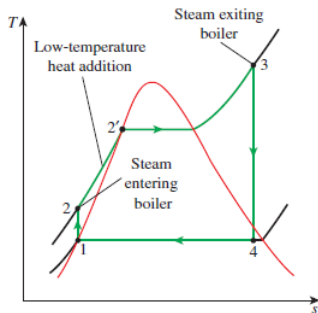
A produção total de trabalho nas turbinas

$$w_{\text{turbina}} = w_{\text{turbina}_H} + w_{\text{turbina}_L} = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)$$

Um único reaquecimento em uma usina moderna pode aumentar a eficiência do ciclo em 5%, pelo aumento da temperatura média na qual calor é transferido para o vapor

Rankine Regenerativo - Motivação

Verificou-se que calor T_4 era transferido para o fluido de trabalho a baixa temperatura, diminuindo a temperatura média do processo e portanto a eficiência do ciclo.



Rankine Regenerativo - Objetivo

Aumentar a temperatura do líquido que sai da bomba transferindo calor do vapor que está sendo expandido na turbina para água de alimentação.

Rankine Regenerativo - Prós

- Melhorar a eficiência do ciclo;
- Desaerar a água de alimentação;
- Controlar vazão volumétrica de vapor nos estágios da turbina.

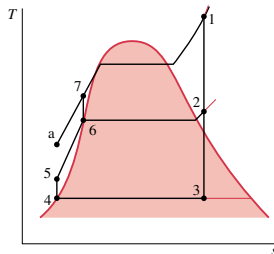
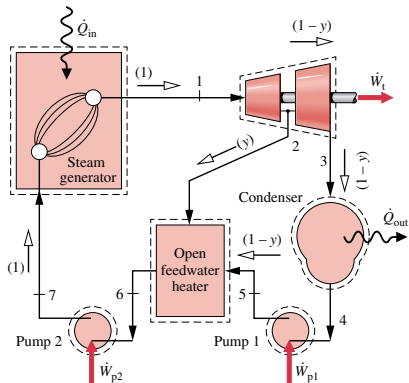
Remove o ar que se infiltra no condensador evitando corrosão na caldeira

Rankine Regenerativo

Aquecedores de água de alimentação podem ser:

- Abertos - calor é transferido do vapor para água de alimentação pela mistura de duas correntes de fluidos
- Fechados - calor é transferido do vapor para água de alimentação sem mistura de fluidos

Rankine Regenerativo Aberto



Rankine Regenerativo Aberto

Para cada 1 kg de vapor que sai da caldeira, $y\text{ kg}$ se expandem parcialmente na turbina e são extraídos no estado 2. Os $(1 - y)\text{ kg}$ restantes se expandem completamente até a pressão do condensador. Sendo os fluxos de massa diferentes para cada componente, na caldeira $\dot{m}$ no condensador $(1 - y)\dot{m}$.

Análise Energética

As interações de trabalho e calor do ciclo regenerativo com aquecedor de água de alimentação expressa por unidade de massa de vapor que escoia através da caldeira

$$q_e = (h_1 - h_7)$$

$$q_s = (1 - y)(h_3 - h_4)$$

$$w_T = (h_1 - h_2) + (1 - y)(h_2 - h_3)$$

$$w_P = (1 - y) w_{P_1} + w_{P_2}$$

Análise Energética

para fração de vapor extraído

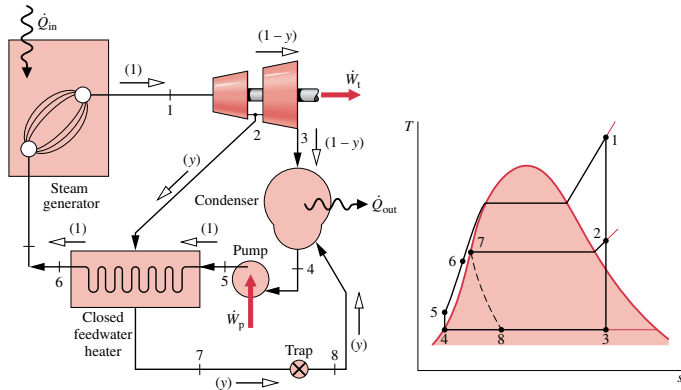
$$y = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}$$

$$W_{P_1} = \nu_1 (P_5 - P_4)$$

$$W_{P_2} = \nu_3 (P_7 - P_6)$$

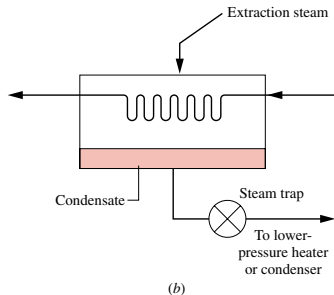
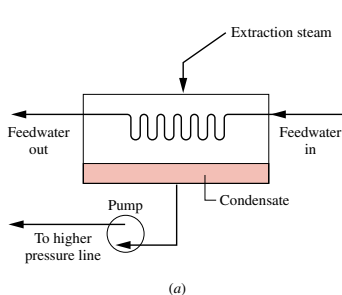
Procedimento utilizado para elevar a temperatura média, elevando a eficiência do ciclo. Grandes usinas utilizam até oito aquecedores de água de alimentação

Rankine Regenerativo Fechado



Presença de mecanismo purgatório

Aquecedores de Água de Alimentação Fechados



Análise Energética

Aplicando conservação da massa e energia para um volume de controle em torno do aquecedor fechado, assumindo que não há transferência de calor entre o aquecedor de água de alimentação e vizinhança, além de negligenciar energias cinética e potencial, a parcela referente representa a energia regenerada

$$0 = (h_2 - h_7) + (h_5 - h_6)$$

logo

$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_7}$$

Análise Exergética

As relações para exergia e destruição de exergia com escoamento em regime permanente

$$\dot{X}_{destruída} = T_0 \dot{S}_{ger} = T_0 (\dot{S}_s - \dot{S}_e) = T_0 \left(\sum_s \dot{m}s - \sum_e \dot{m}s - \frac{\dot{Q}_e}{T_{be}} + \frac{\dot{Q}_s}{T_{bs}} \right)$$

Dispositivo com uma entrada e uma saída

$$x_{destruída} = T_0 s_{ger} = T_0 \left(s_s - s_e - \frac{q_e}{T_{be}} + \frac{q_s}{T_{bs}} \right)$$

Análise Exergética

A destruição de exergia de um ciclo é a soma das destruições de exergia dos processos que compõem o ciclo, para um ciclo reversível ou real, os estados inicial e final são idênticos, logo a destruição de exergia de um ciclo depende apenas da magnitude da temperatura e transferência de calor

$$x_{destruída} = T_0 \left(\sum \frac{q_s}{T_{bs}} - \sum \frac{q_e}{T_{be}} \right)$$

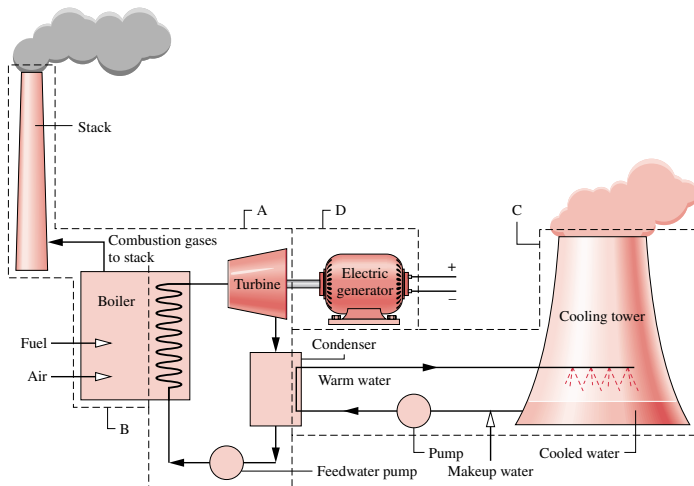
Para ciclo com apenas uma fonte T_H e um sumidouro T_L

$$x_{destruída} = T_0 \left(\frac{q_s}{T_L} - \frac{q_e}{T_H} \right)$$

A exergia de uma corrente de fluido ψ

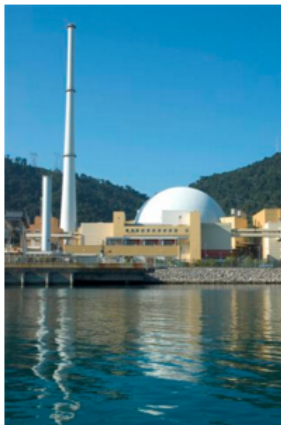
$$\psi = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz$$

Usina Termelétrica a Vapor - Vídeo 06



Nos motores

Usina de Angra II

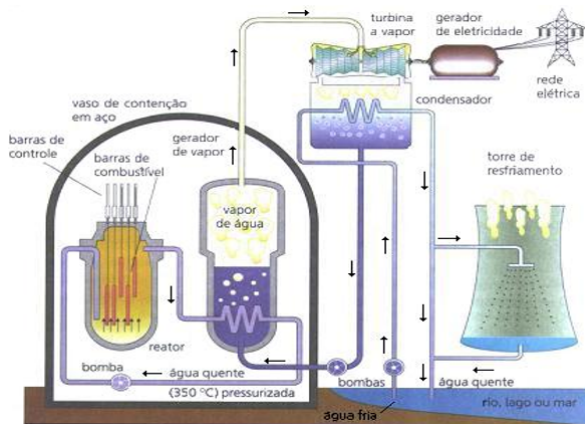


Note que usinas termelétricas a vapor geralmente encontram-se próximas a lagos, rios e mares, afim de que o processo de rejeição de calor seja otimizado, porém em algumas regiões o processo de resfriamento é obtido pelo ar, sendo denominadas usinas de resfriamento a ar

Usina Fernando Gasparian



Geração Termelétrica a Vapor - Nuclear



Nuclear

https://www.youtube.com/watch?v=_UwexvaCMWA

Cogeração

Aproveitamento simultâneo de energia térmica e mecânica, a partir de uma mesma fonte primária de energia. Esse tipo de tecnologia vem ganhando cada vez mais aceitação na indústria em geral, principalmente pelo aumento de eficiência energética que proporciona.

Cogeração

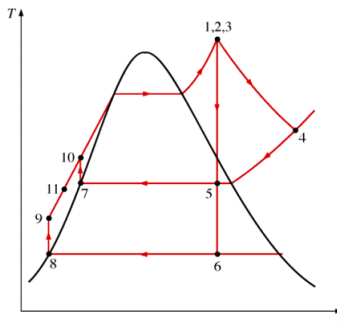
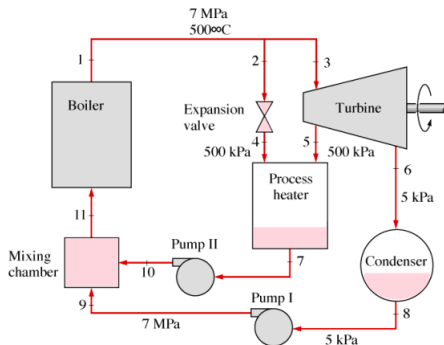
Os produtos de combustão a alta temperatura possuem uma grande disponibilidade para a conversão de sua energia interna em trabalho. Quando se utiliza essa energia em baixas temperaturas, como em calor de processo, esta disponibilidade é reduzida. A cogeração visa o aproveitamento deste potencial, obtendo uma forma de energia de maior qualidade termodinâmica, baixando a temperatura dos produtos de combustão e fornecendo calor de processo.

Cogeração

Do ponto de vista termodinâmico, a geração é perfeitamente justificável. A viabilidade econômica da cogeração deve ser verificada através da análise técnico econômica para uma determinada aplicação, considerando os custos dos equipamentos e os retornos e gastos durante a vida útil da usina, fator de capacidade da instalação entre outros fatores.

Ciclo Rankine com Cogeração

A fração de energia que é utilizada para cada processo de geração de calor ou de trabalho é chamada de fator de utilização (utilization factor) da instalação de cogeração.



Fator de Utilização

$$\epsilon = \frac{\text{Trabalho líquido produzido} + \text{Calor entregue ao processo}}{\text{Calor total fornecido}} = \frac{\dot{W}_{liq} + \dot{Q}_P}{\dot{Q}_e}$$

$$\epsilon = 1 - \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}_e}$$

Ciclos reais Rankine com cogeração operam com fatores de utilização na faixa de 80%

Análise Energética

As taxas de fornecimento de calor, de rejeição de calor e de calor de processo, bem como a potência produzida por essa usina de cogeração, podem ser expressas como

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_3 (h_4 - h_3)$$

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_7 (h_7 - h_1)$$

$$\dot{Q}_P = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_8 h_8$$

$$\dot{W}_T = (\dot{m}_4 - \dot{m}_5) (h_4 - h_6) + \dot{m}_7 (h_6 - h_7)$$

Ciclo Rankine com Cogeração

Usinas de cogeração ideais com turbina a vapor não possuem condensadores, assim nenhum calor é rejeitado dessa usina como calor indisponível, toda energia transferida para o vapor da caldeira é utilizada como calor de processo ou energia elétrica.

Ciclos Combinados

A incansável busca por eficiências mais altas em ciclos de potência, resultou na combinação do ciclo de turbina a gás no topo de um ciclo de turbina a vapor, apresentando eficiência térmica mais alta que qualquer um destes ciclo executados individualmente.

Ciclos Combinados

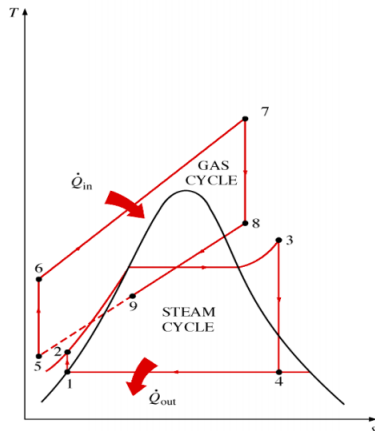
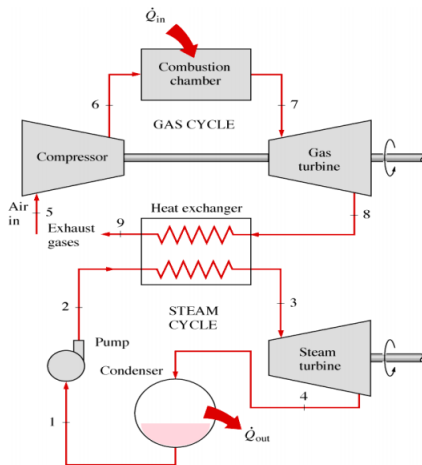
Os ciclos de potência combinados podem ser:

- Topping
- Bottoming
- Kalina

Ciclo Bottoming

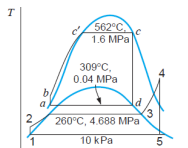
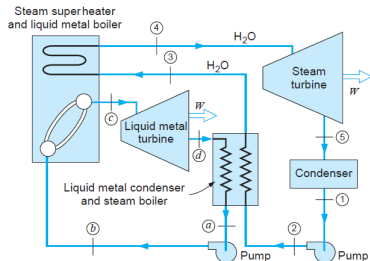
Levando-se em consideração que ciclos de turbina a gás, em geral, operam em temperaturas bem mais elevadas que os ciclos a vapor d'água, o aproveitamento dos gases de exaustão da turbina a gás como fonte de energia para o ciclo de turbina a vapor é justificável.

Ciclo Bottoming



Energia é recuperada dos gases de exaustão transferindo-a para o vapor em trocador de calor que faz papel da caldeira. Eficiências de ciclos combinados podem atingir patamares acima de 60%

Ciclo Topping



Vantagem na baixa pressão do metal líquido referente a água, sendo possível processo isotérmico de aquecimento do metal a altas temperaturas, proporcionando elevada eficiência térmica

Ciclo Kalina

Utilização de mistura no fluido de trabalho do ciclo de turbina a vapor, amônia e água são utilizadas como fluido de trabalho. Propriedades referentes a amônia geram maiores eficiências desde que as diferenças de temperatura sejam controladas durante todo o ciclo.

Combined Cycles

<https://www.youtube.com/watch?v=W1hSFLXADQ0>

Outros

<https://www.youtube.com/watch?v=IdPTuwKEfma>

"Someone's sitting in the shade today because someone planted a tree a long time ago"

Warren Buffett