

PMT3532 -



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



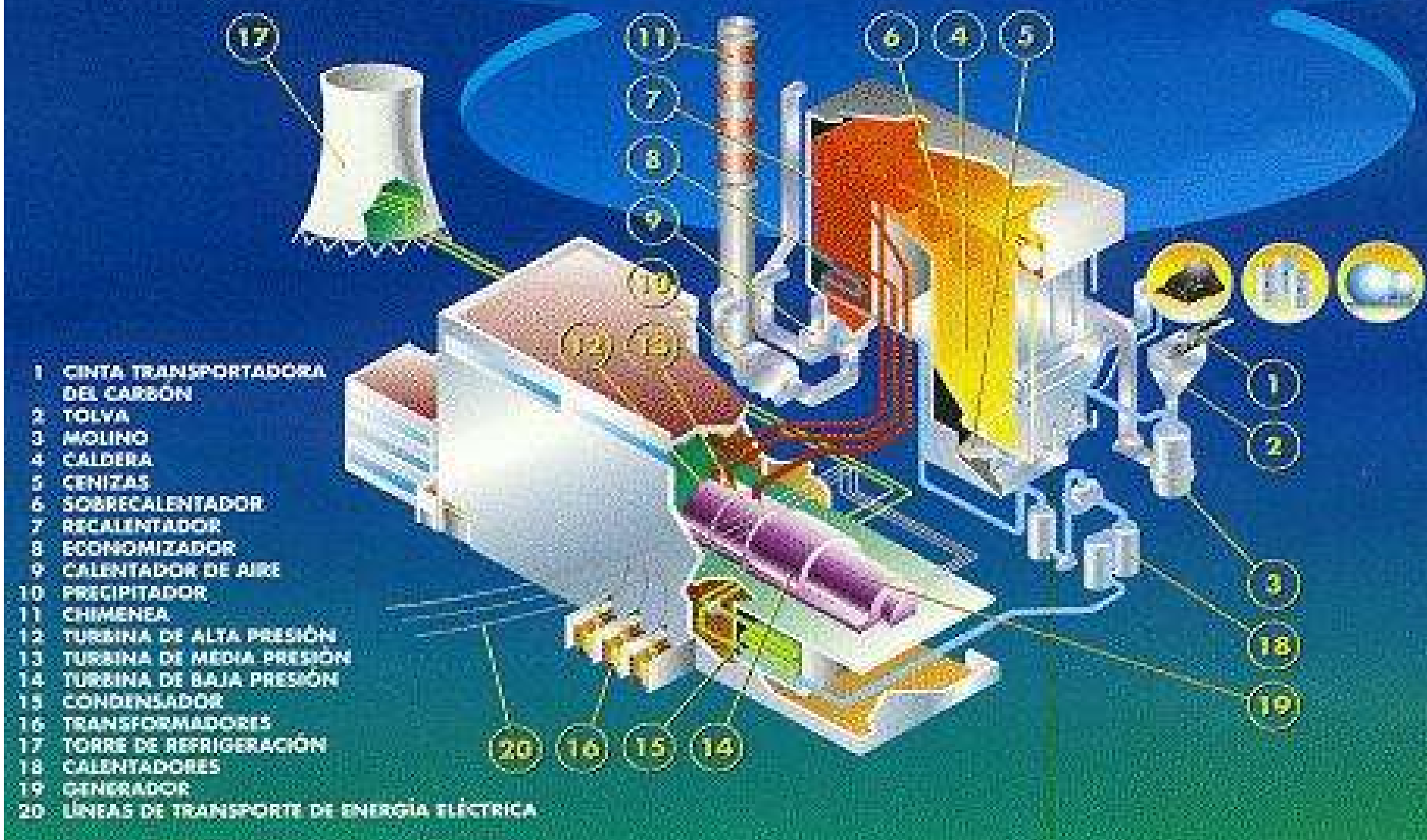
*Termohidráulica de Sistemas de
Geração de Potência I- Aula 04*



Prof. Dr. Alfredo Alvim
CEN- Centro Engenharia Nuclear
IPEN/CNEN- MCTIC

TERMOELETRICA - CICLO RANKINE

Central TERMOELÉCTRICA CARBÓN, FUEL O GAS



Termoeléctrica Nuclear – Ciclo Rankine

Components of Conventional Reactors

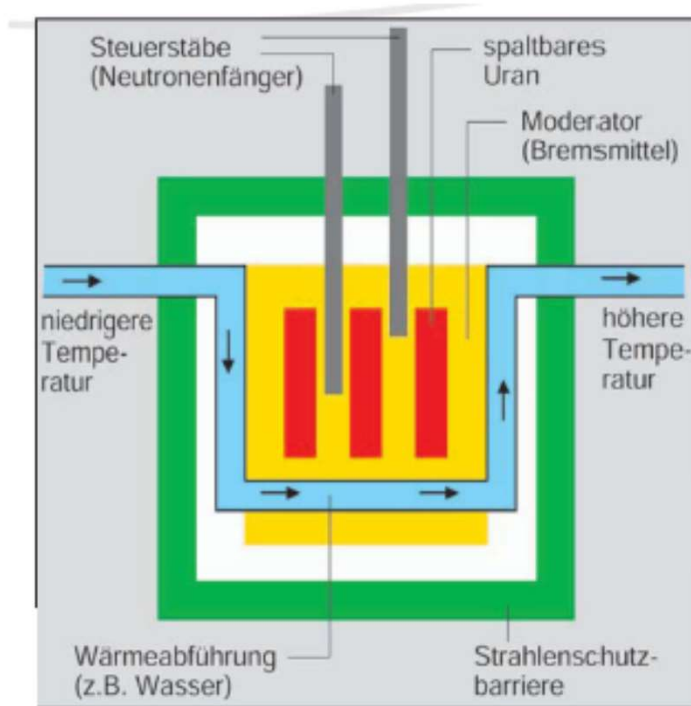
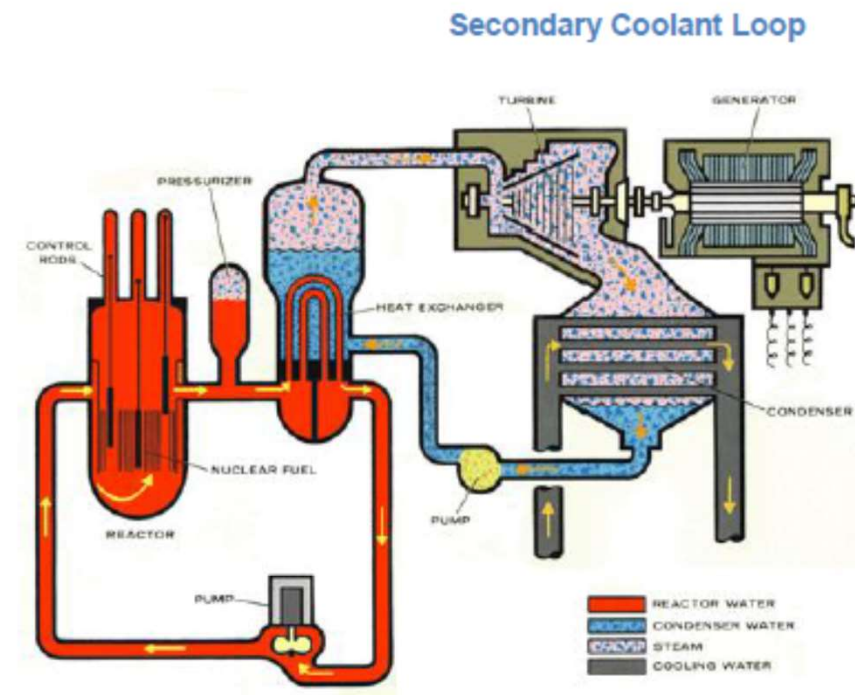


Abb. 5.1: Prinzip eines Kernreaktors

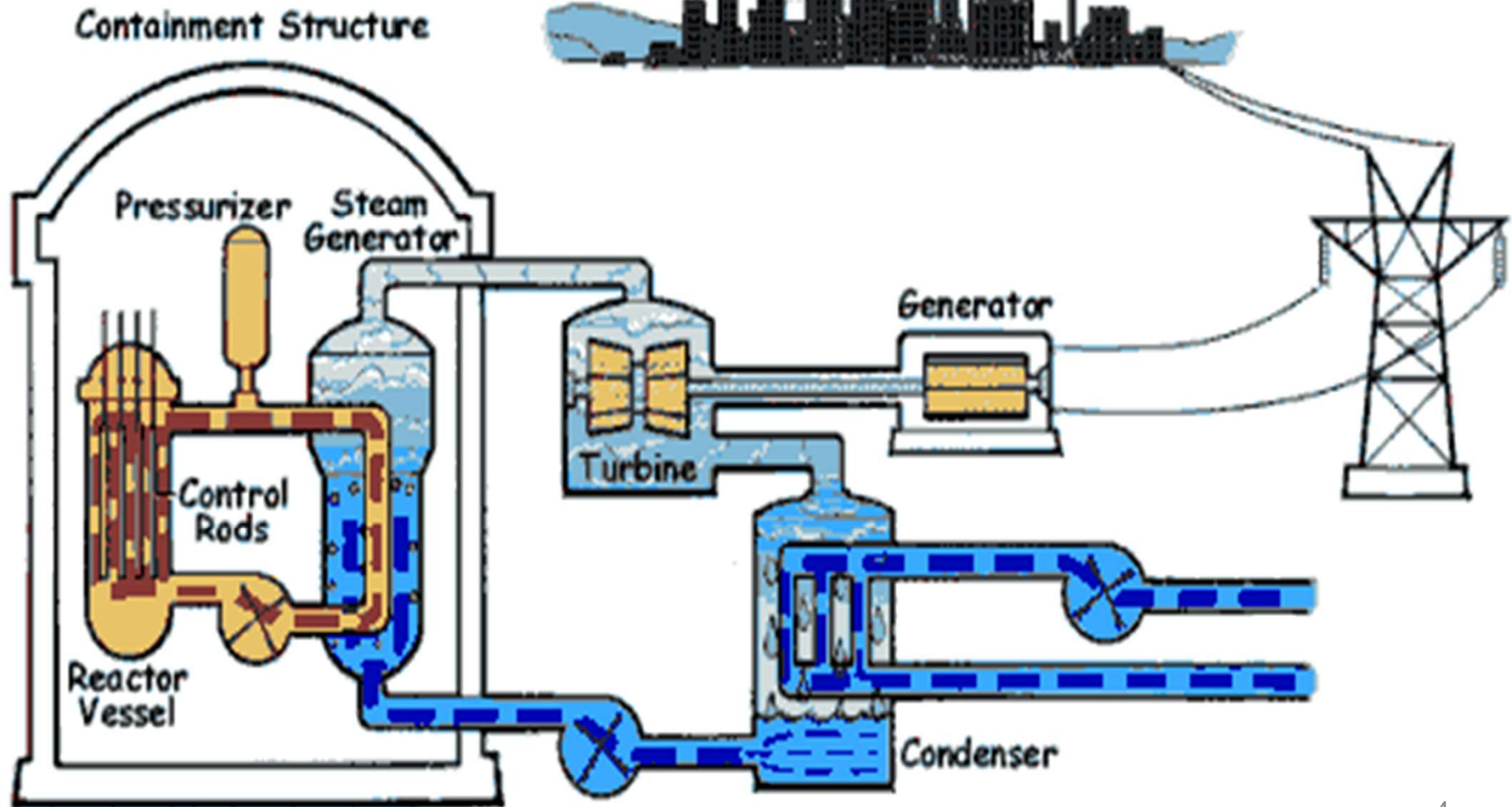


Primary Coolant Loop

Basic Scheme of a Nuclear Reactor

Termoeléctrica Nuclear – Ciclo Rankine

PWR



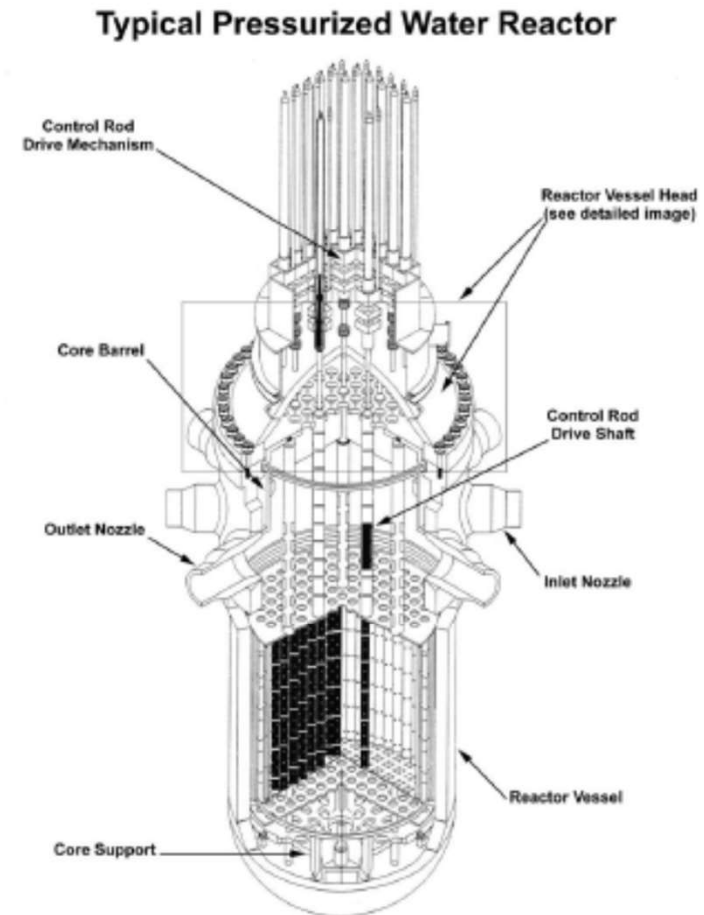
Termoeléctrica Nuclear -Rankine

The Pressurized Water Reactor (PWR)

PWR Reactor Pressure Vessel

- It contains the **Nuclear Core** and the mechanical support structures.
- It has:
 - Coolant inlet nozzles: “Cold” coolant.
 - Coolant exit nozzles: “Hot” coolant.
 - Penetrations in vessel head for control rods.
 - Lower head penetrations for instrumentation.
- The core is surrounded by a steel barrel and **reflector**.
- The coolant flows *downwards* in the **downcomer** and *upwards* in the core.
- Change in Temperature: $\sim 36^{\circ}\text{C}$.
 - Inlet temperature $T_{in} = 293^{\circ}\text{C}$.
 - Outlet temperature $T_{out} = 329^{\circ}\text{C}$.

$$T_{\text{sat}} (15\text{MPa}) = 342^{\circ}\text{C}$$



Termoeléctrica Nuclear -Rankine

The Pressurized Water Reactor (PWR)

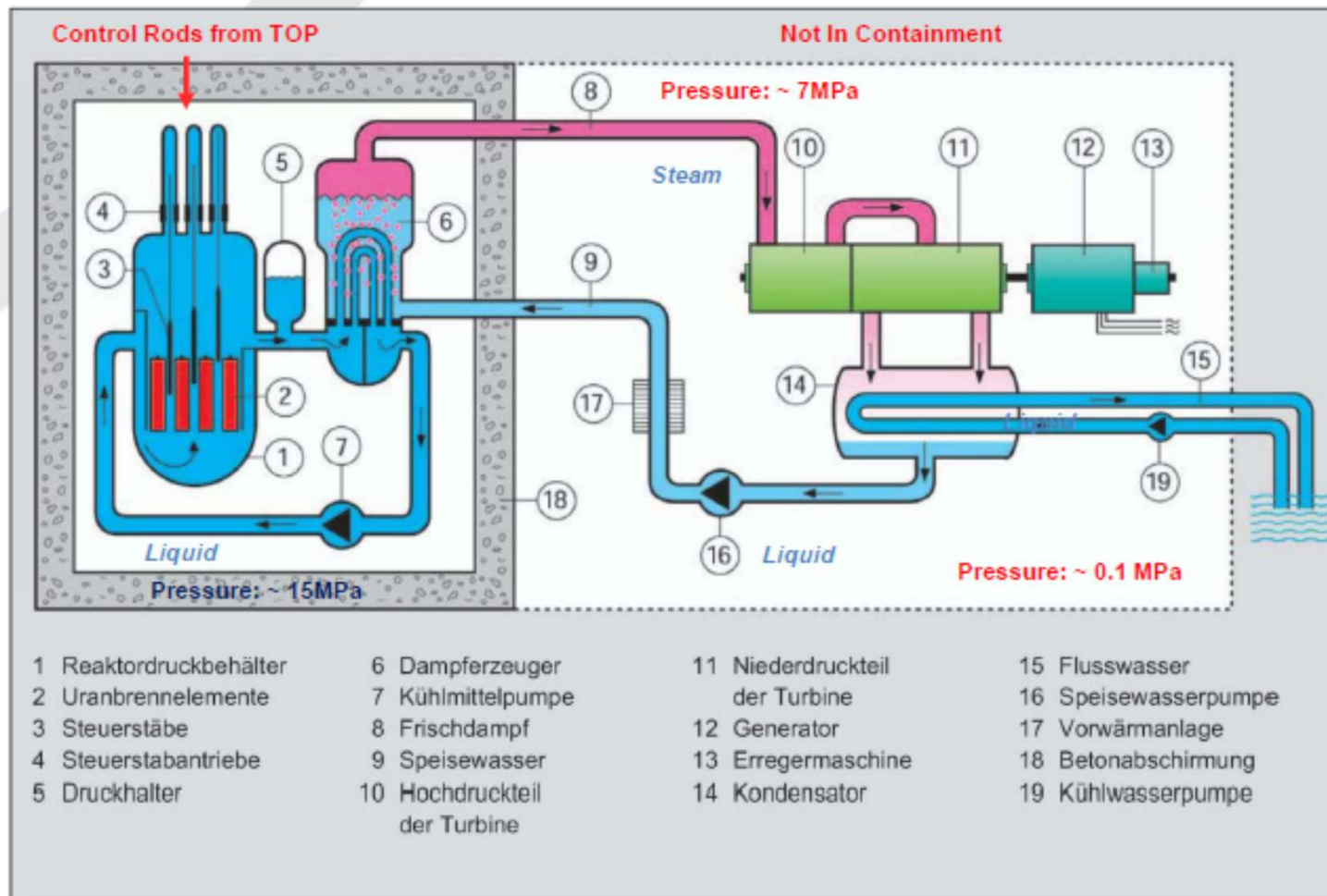
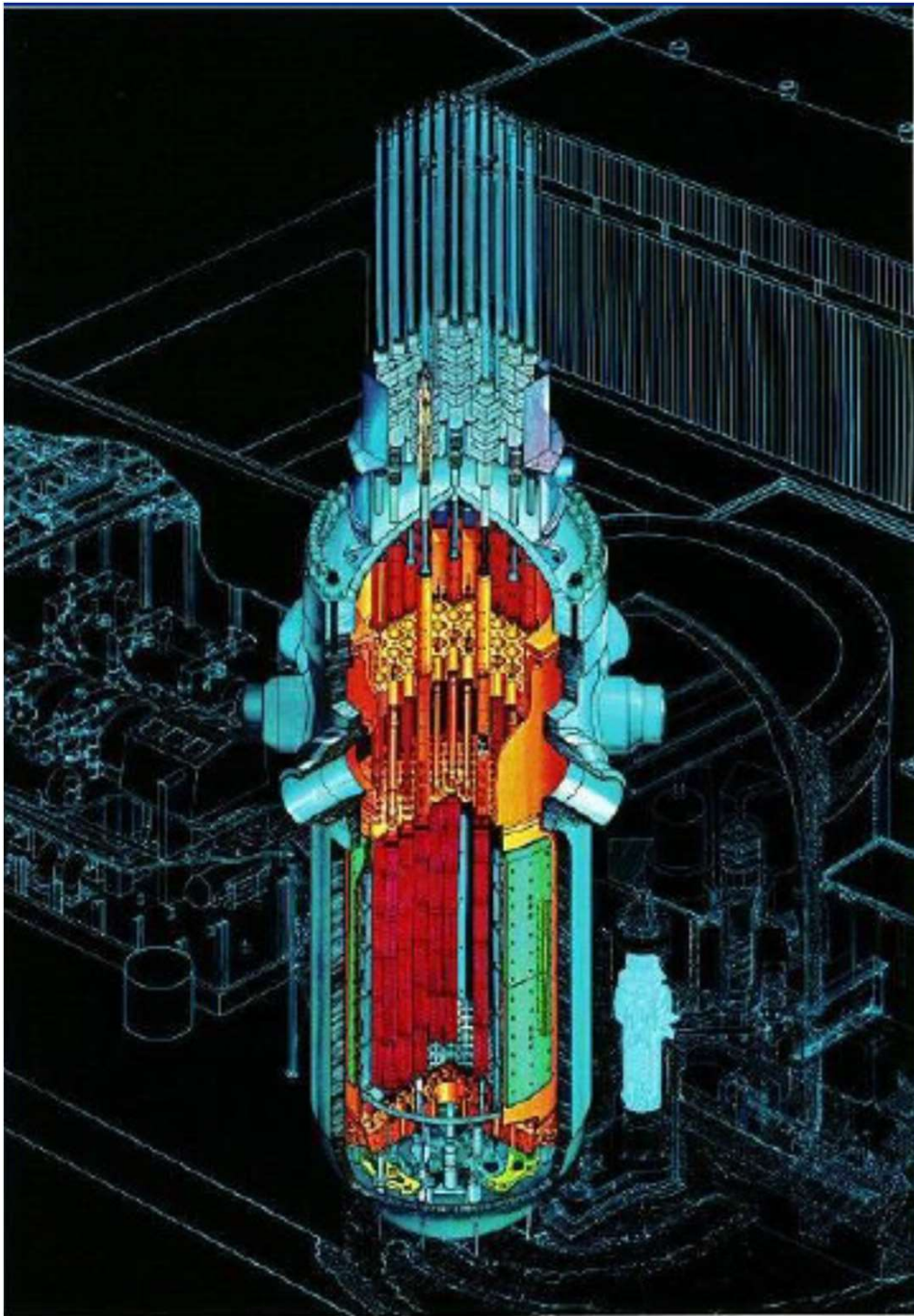


Abb. 6.2: Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor (vereinfachte Schemazeichnung)



Westinghouse NUCLEAR REACTOR

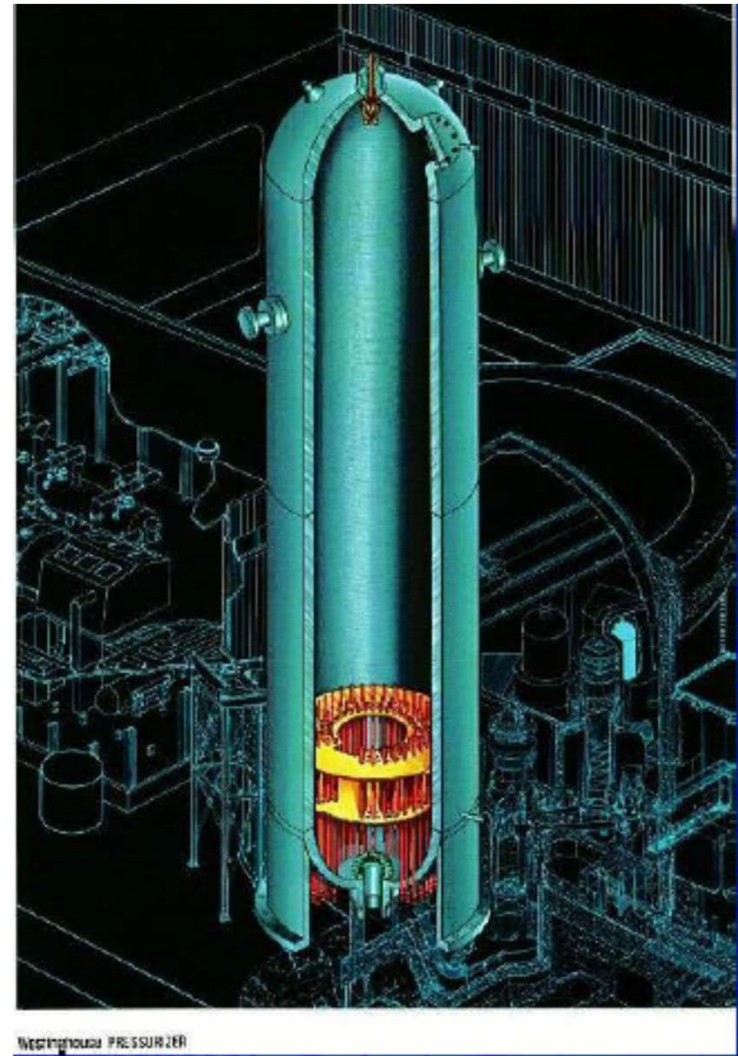
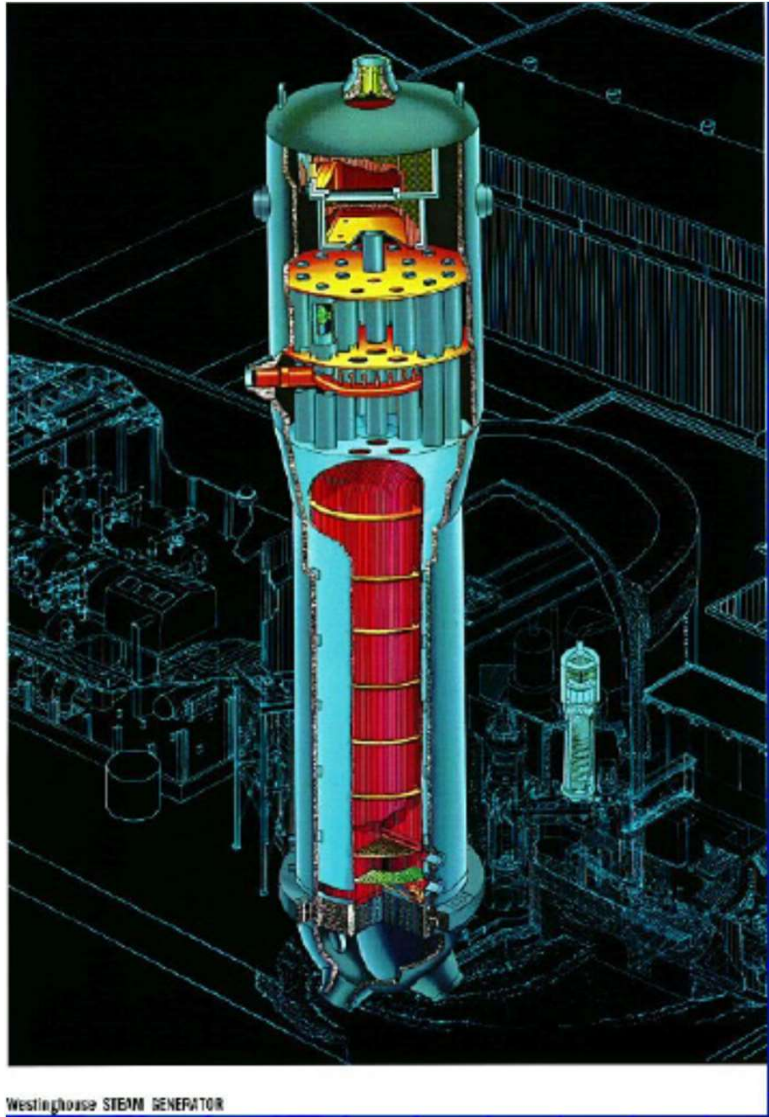


Turbina a Vapor/Gerador



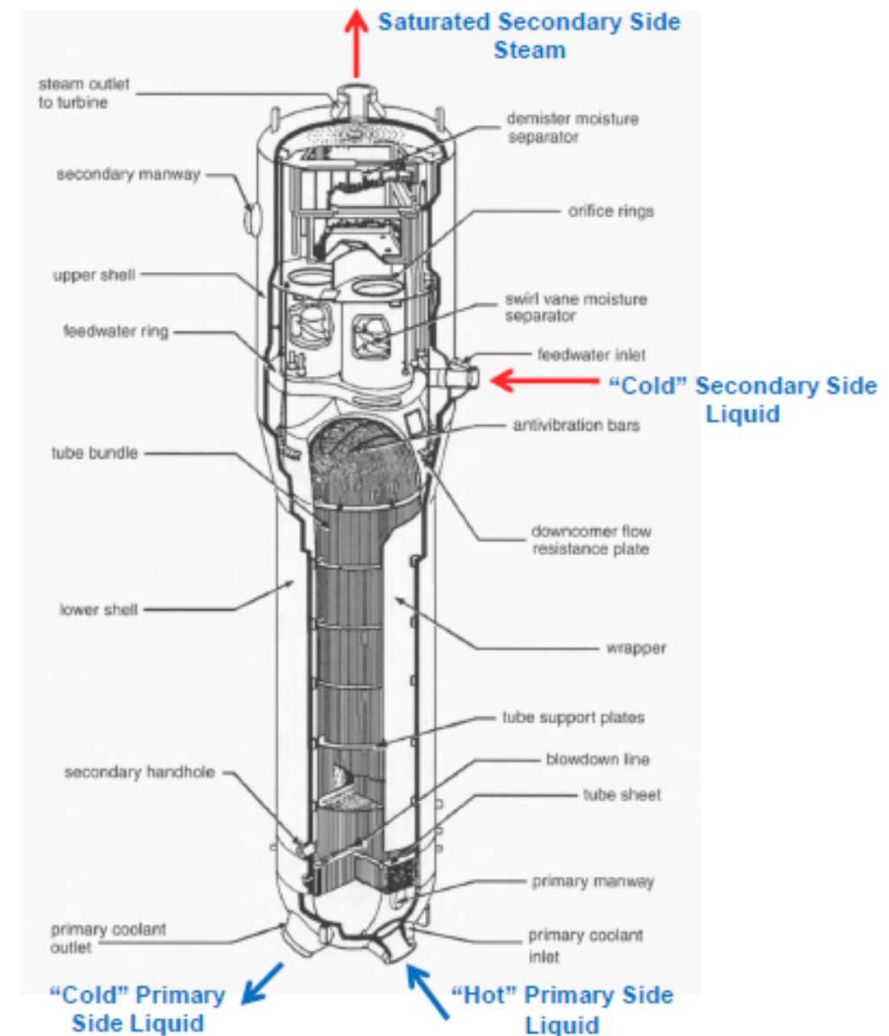
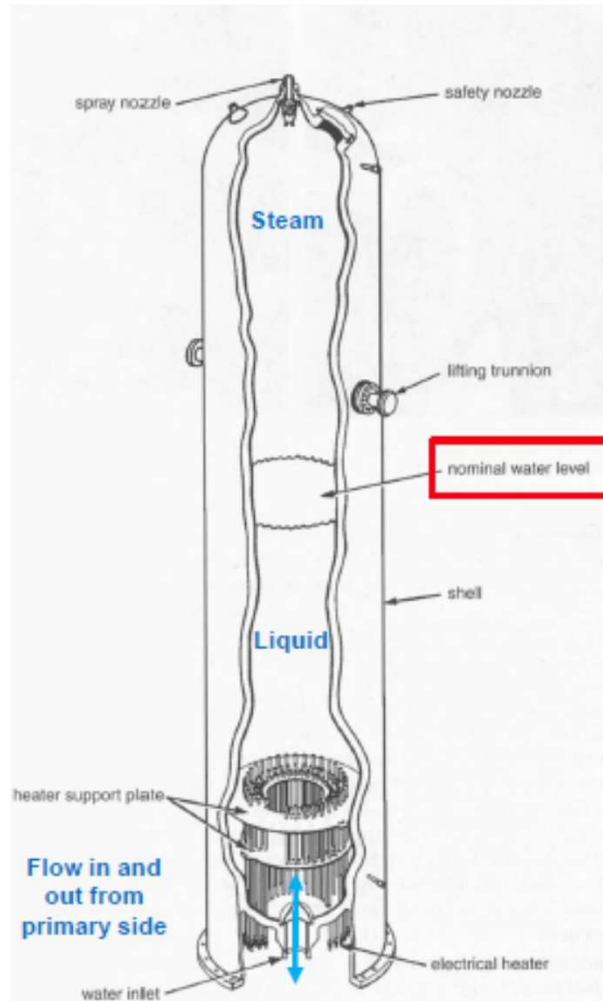
Turbine generators at Point Lepreau nuclear generating station.

Gerador de Vapor/ Pressurizador



Gerador de Vapor/ Pressurizador

Pressurized Water Reactor

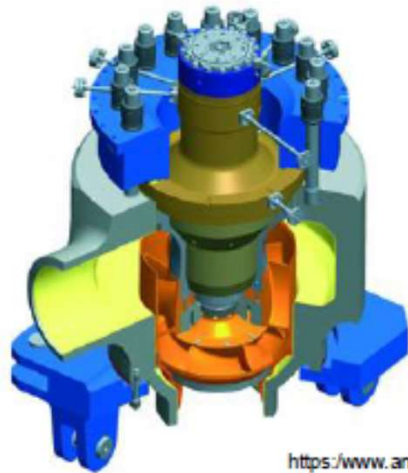


Bomba Blindada Primário

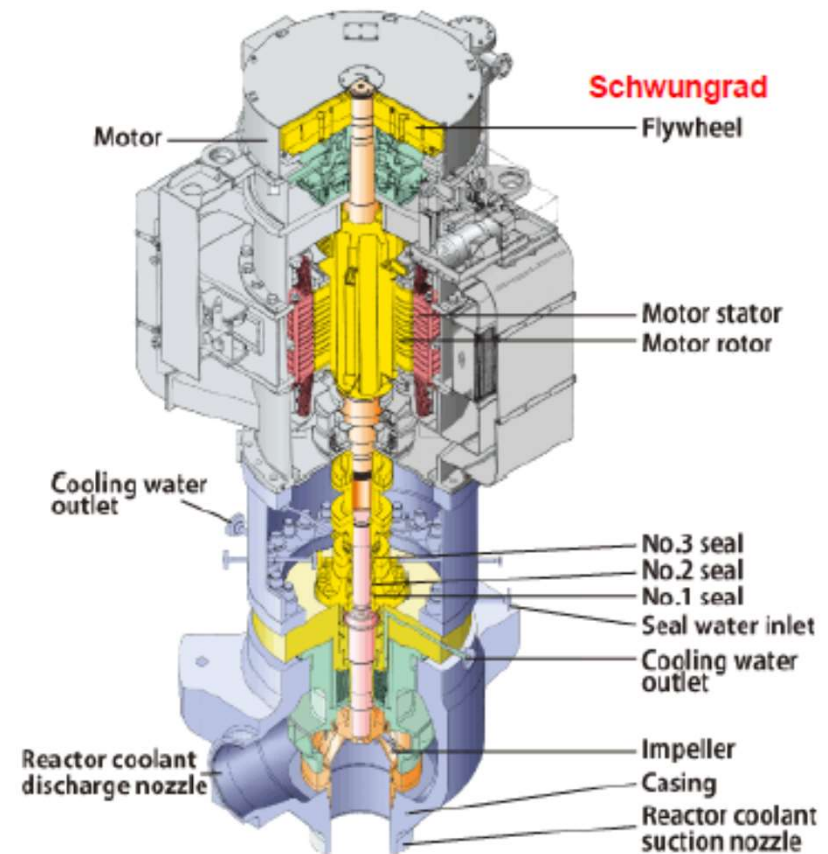
Pressurized Water Reactor

Main Coolant Pumps

- One in each primary loop.
- Vertical, single-stage centrifugal pumps
 - For four loop plant (~1000MWe): ~5000 kg/s per pump
 - Electrical Motor: 7000 HP (~6 MW ~ 2.5% plant power for 4 pumps)
 - Fly-wheel increases the rotation inertia which assures a slower loss of flow in the core when the pump stops: important for safety.
- Capable of operating for more than 40 years with minimal maintenance.
- All part sin contact with water are made of stainless steel.



<https://www.andritz.com>



http://www.mhl.co.jp/atom/hq/atome_e/products/pwr/image/equipment_06_02.gif

Propulsão Nuclear - Rankine

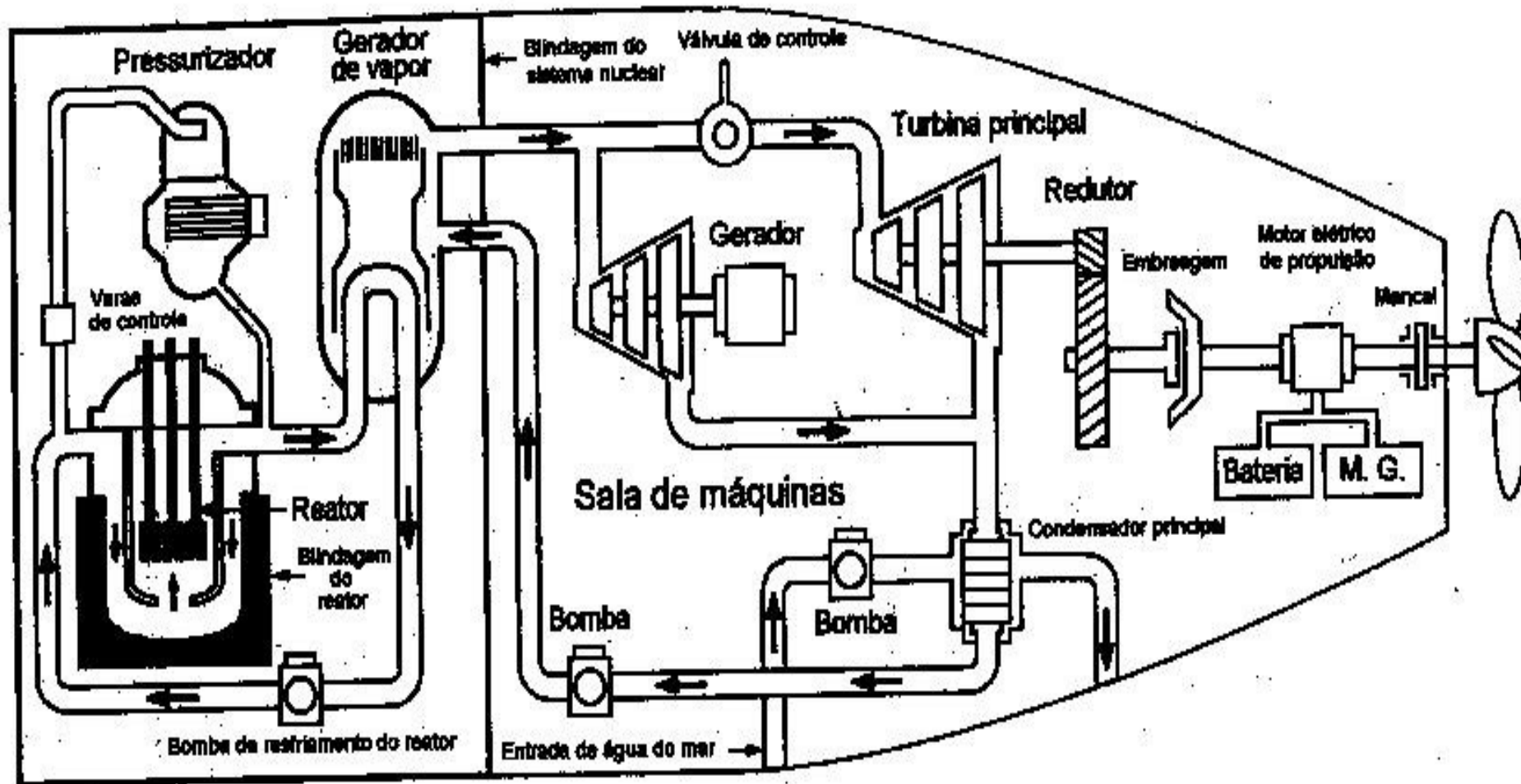
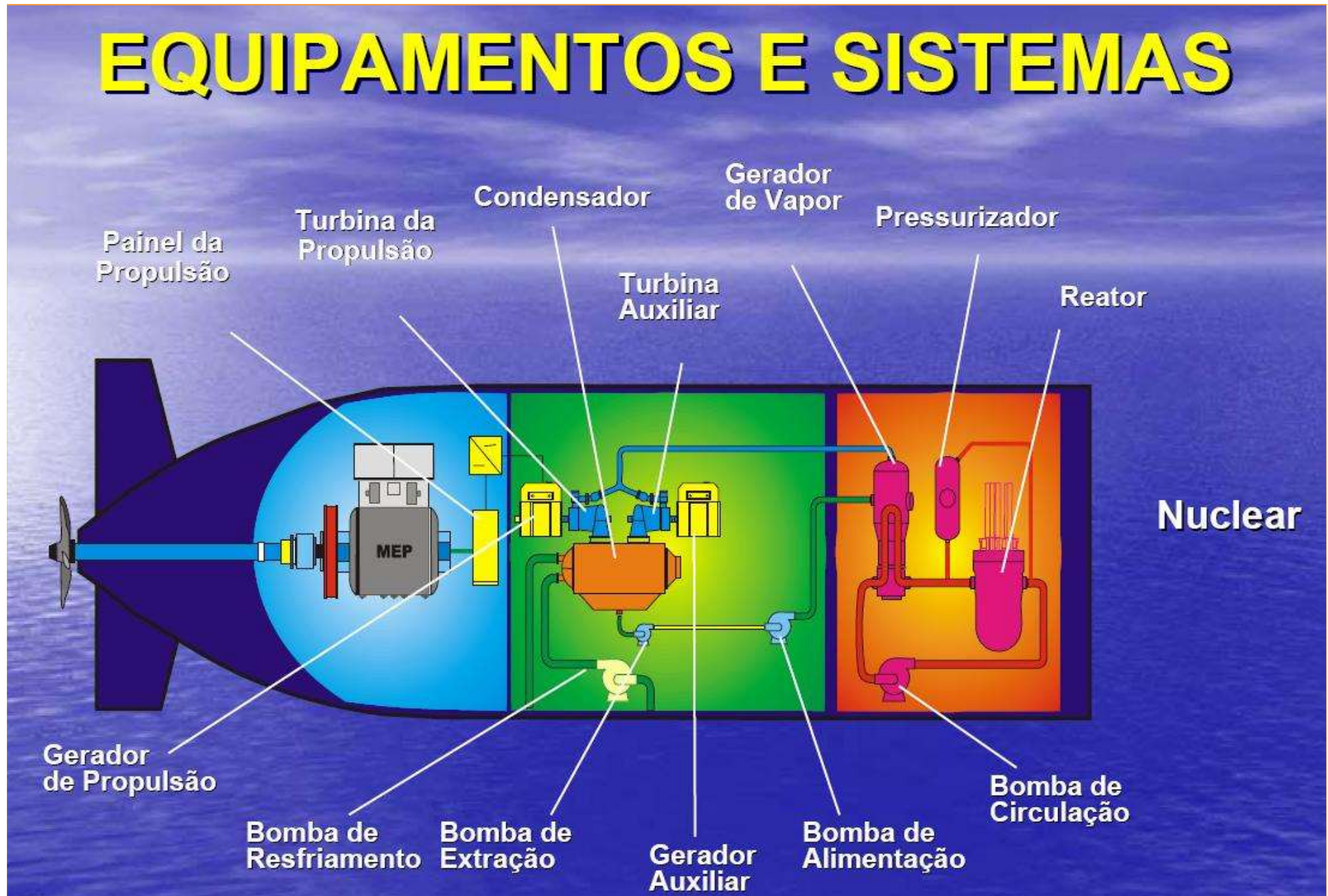


Figura 1.3 — Sistema nuclear de propulsão naval. (cortesia da Babcock and Wilcox Co.)

Propulsão Nuclear - Rankine

EQUIPAMENTOS E SISTEMAS



Termoeléctrica Nuclear -Rankine

Boiling Water Reactor

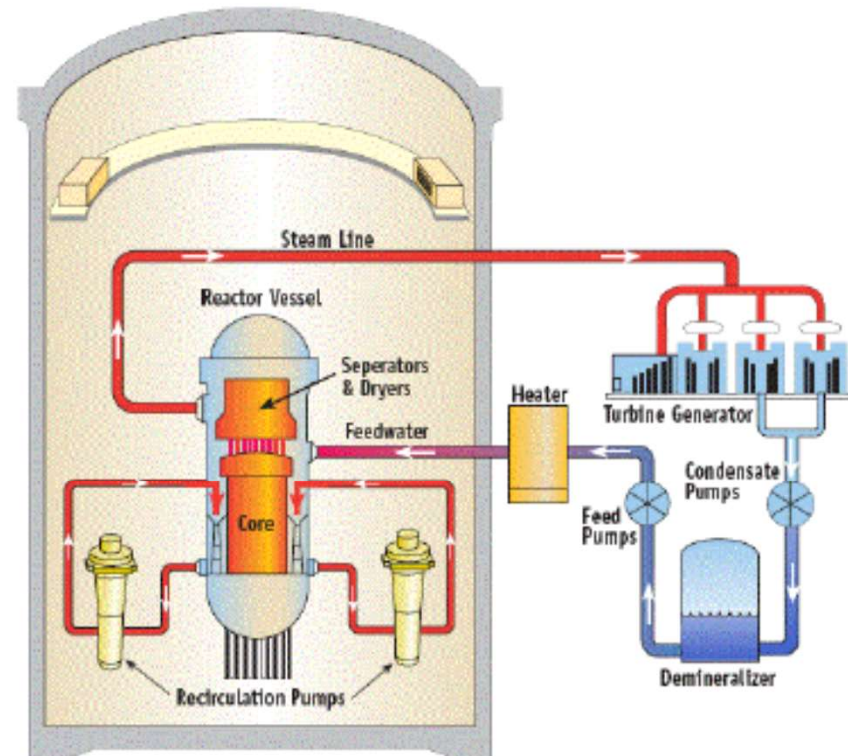
Steam Cycle

- **Single direct-cycle (Rankine) steam/water loop.**
 - Water is coolant and moderator
 - Temperatures: Feedwater inlet: 220°C, core outlet: 340°C.
 - Core flow rate: 14000 kg/s (1330 MWe)
 - Steam Flow rate: 2100 kg/s (~15% core flow)

• Process:

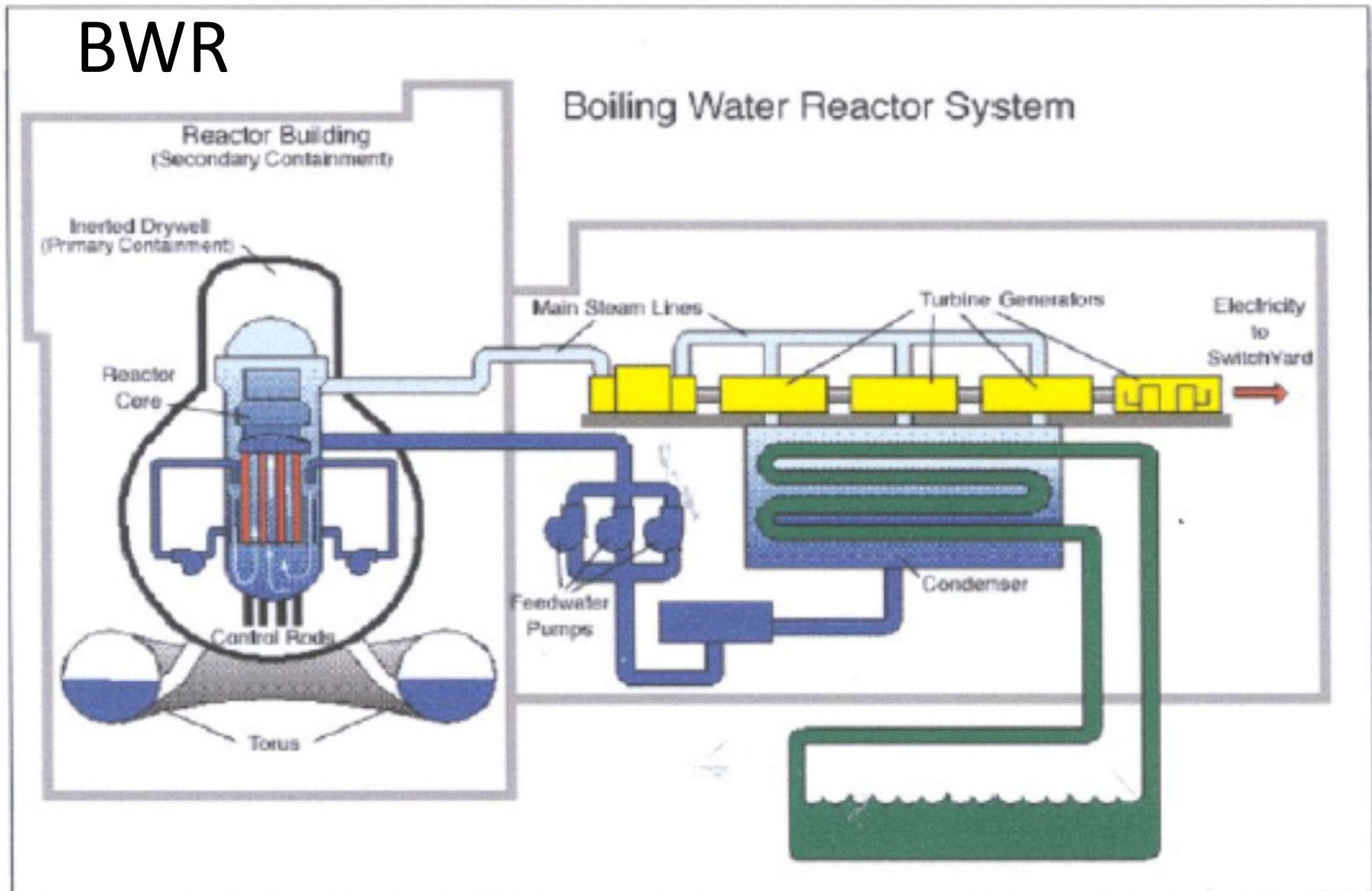
- Steam is produced in the core, separated and dried in the pressure vessel.
 - ☑ ~7.17 MPa saturated conditions at 290°C
- The steam flows along the main steam pipe to the turbine, expands and drives the electric generator.
- The condensed liquid is pumped back into the vessel by the feedwater pumps, and flows down the downcomer into the lower plenum and up into the core.
- Nuclear heat heats up the liquid until it reaches saturated conditions and starts to boil.

37% average vol steam in core.
75% vapor volume at core exit
100% vapor volume in steam line



Termoeléctrica Nuclear -Rankine

BWR



Termoeléctrica Nuclear -Rankine

Pressurized Channel BWR (RBMK)

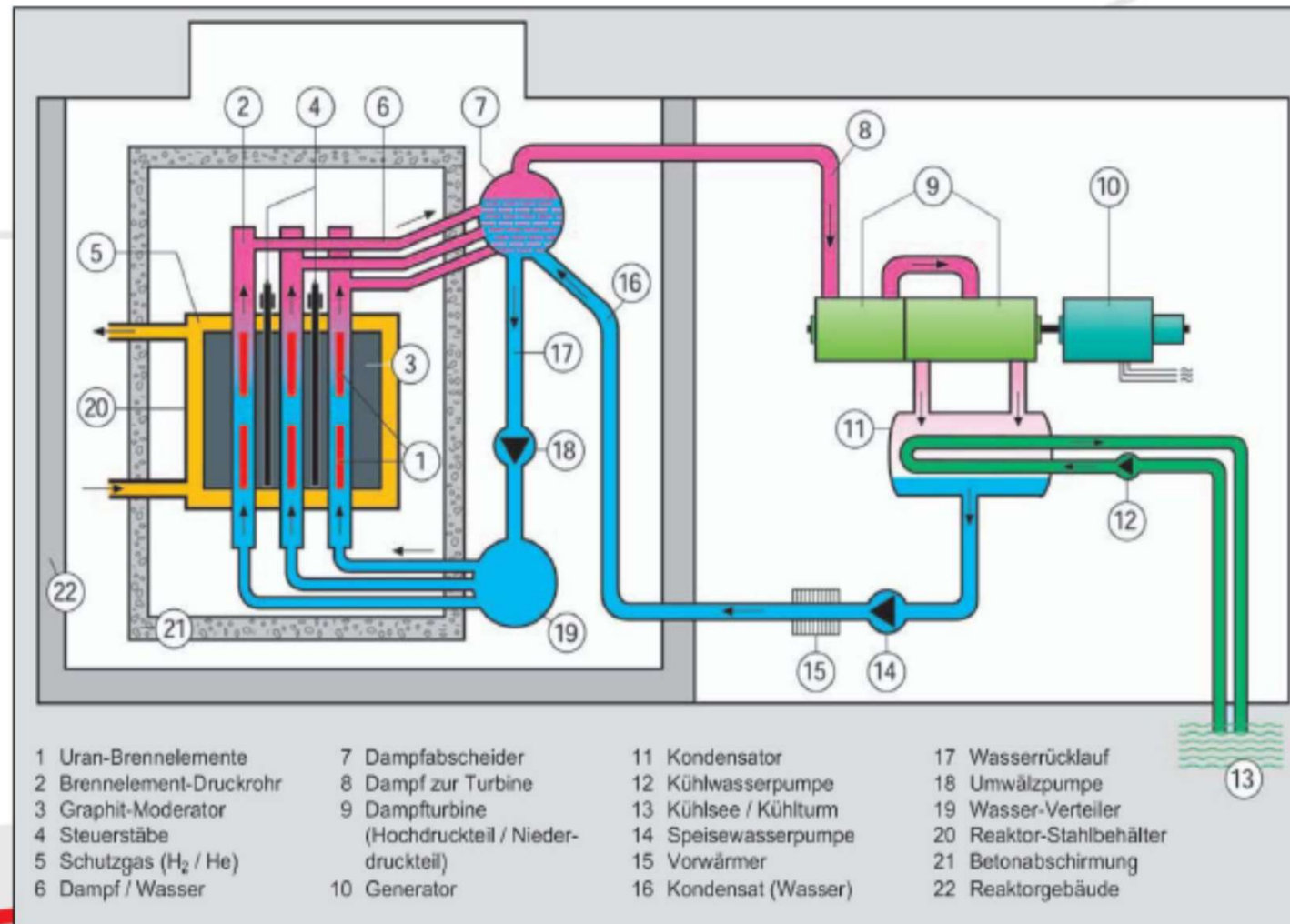


Abb. 6.6: Kernkraftwerk mit Siedewasser-Druckröhrenreaktor (RBMK 1000)

Termoeléctrica Nuclear -Rankine

The Boiling Water Reactor (BWR)

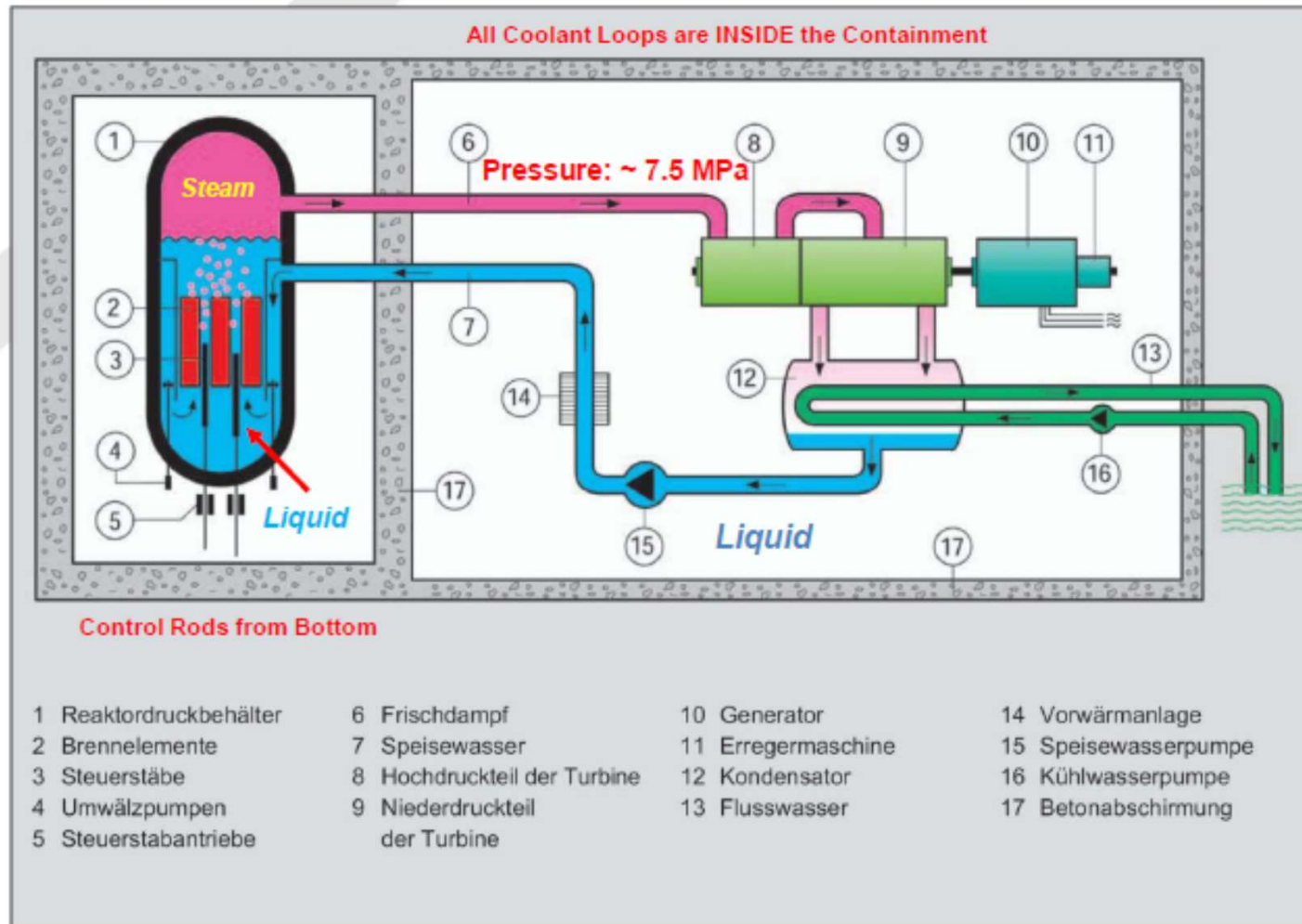


Abb. 6.1: Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor (vereinfachte Schemazeichnung)

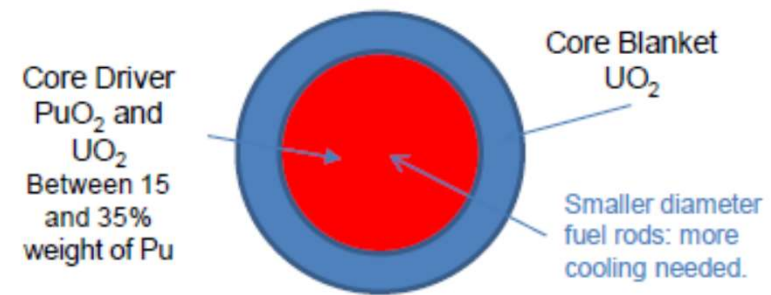
Termoeléctrica Nuclear -Rankine

Reactores Rápidos – LMFR

Liquid Metal Fast Breeder Reactor (LMFBR)

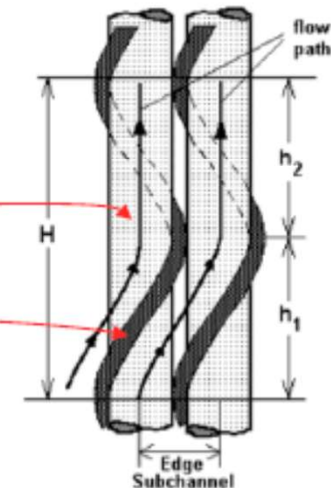
Main Characteristics

- Fast neutron spectrum.
- Breeder capability:
 - It operates with PuO_2 and UO_2 .
 - Fast spectrum „breeds“ ^{239}Pu from ^{238}U .
 - The Breeding Capability (dependent on η) increases with neutron energy.
 - **NO MODERATOR** can be used.
- Liquid Metal Coolant:
 - Most used Na, K, Pb-Bi.
 - Na has excellent heat transfer properties:
 - ☑ Higher Nuclear Power density.
 - ☑ Smaller cores for the same Nuclear Power.
 - High Boiling Point (1 atm 882°C)
 - ☑ High temperatures at low pressure.
 - ☑ Light vessel needed: „thin“ steel walls.
 - ☑ Higher plant efficiency (40%, $T_{\text{steam}} \sim 500^\circ\text{C}$).
 - Problems with Na leaks: N_2 atmosphere surrounds Reactor.



Scheme of a LMFR Core Regions
(Cylindrical Core seen from above)

- Fuel Characteristics:**
- MOX Pellets stacked inside stainless steel tubes.
 - Tubes Separated by hellycal spacers.
 - Tightly packed fuel lattices: **More compact cores.**



Termoeléctrica Nuclear - Rankine

Reactores Rápidos – LMFR

The Liquid Metal Fast Reactor

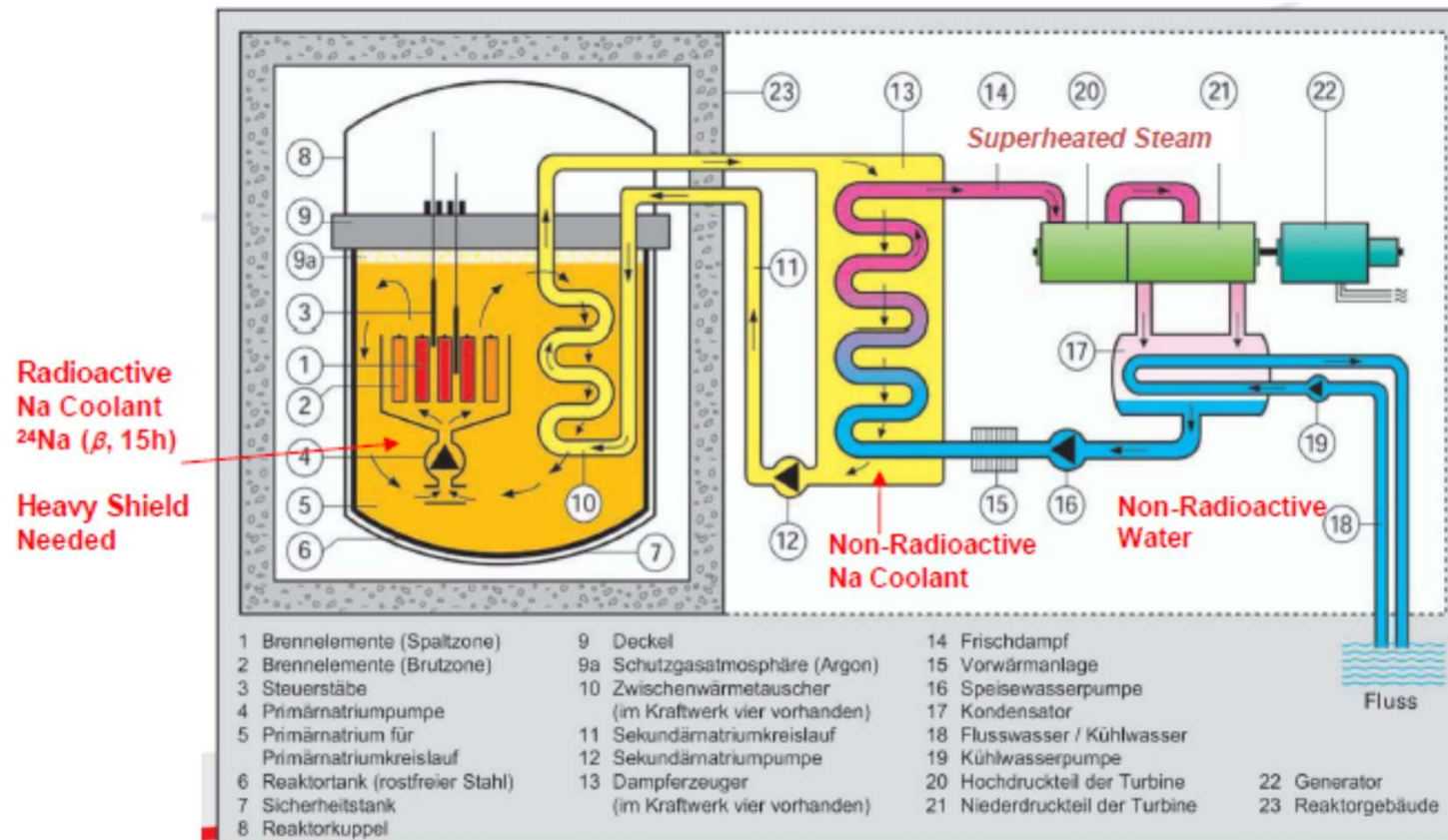
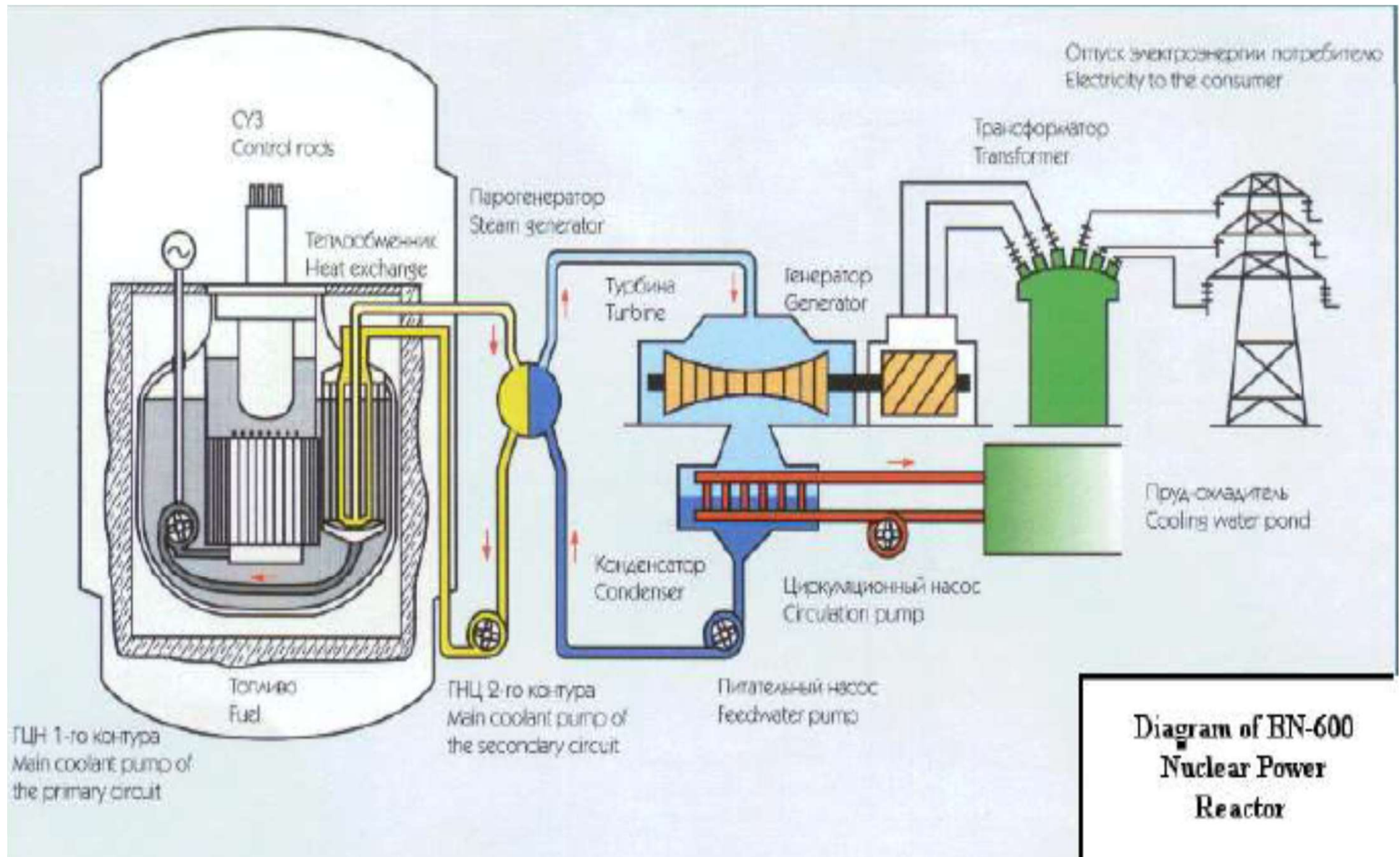


Abb. 6.3: Kernkraftwerk mit Schnellem Brutreaktor (vereinfachte Schemazeichnung)

Pool Type LMFR

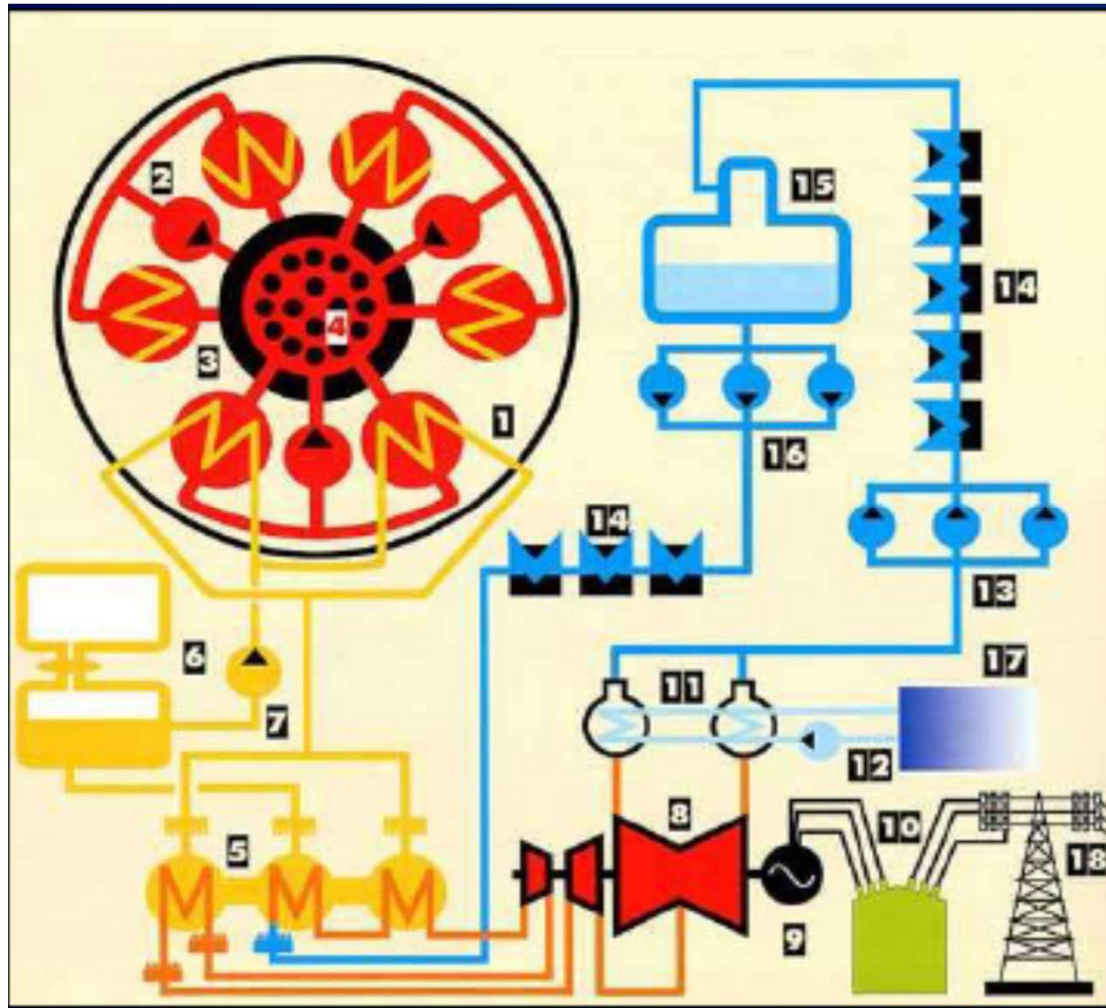
Termoeléctrica Nuclear -Rankine

Reactores Rápidos – LMFR



Termoelétrica Nuclear - Rankine

Reatores Rápidos – SBR



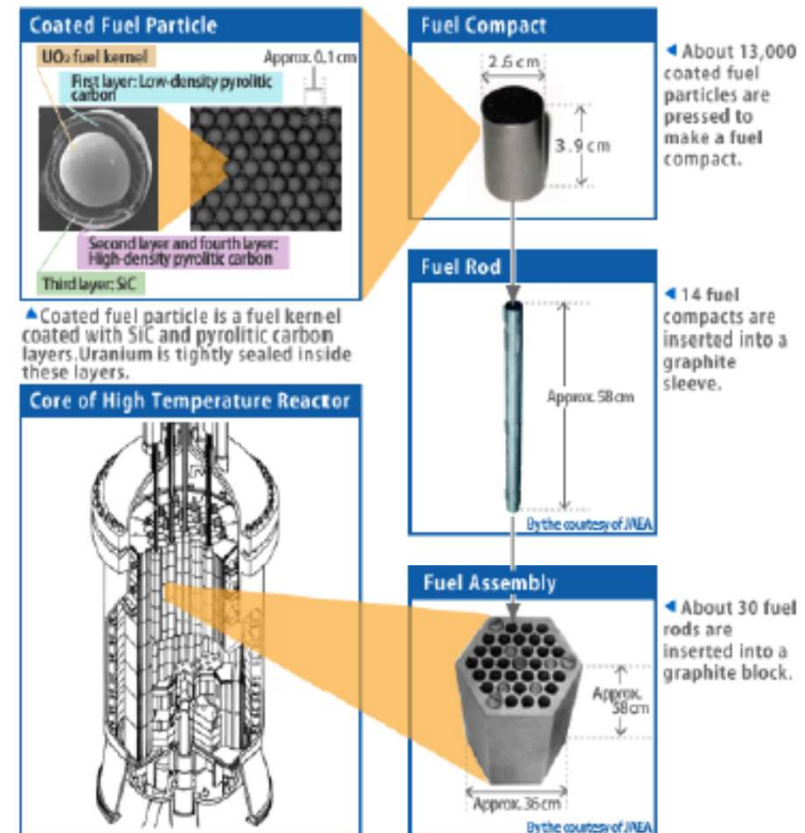
- 1.Reactor
- 2.Primary sodium pump
- 3.Intermediate heat exchanger
- 4.Fuel assemblies
- 5.Steam generator
- 6.Expansion tanks
- 7.Secondary sodium pump
- 8.Turbine
- 9.Generator
- 10.Transformer
- 11.Condensers
- 12.Cooling water pumps
- 13.Condensate pumps
- 14.Heaters
- 15.Deaerator
- 16.Feedwater pumps
- 17.Cooling water pond
- 18.Electricity to the consumer

Reator a Gás a Alta Temperatura

The High Temperature Gas Reactor (HTGR)

Characteristics:

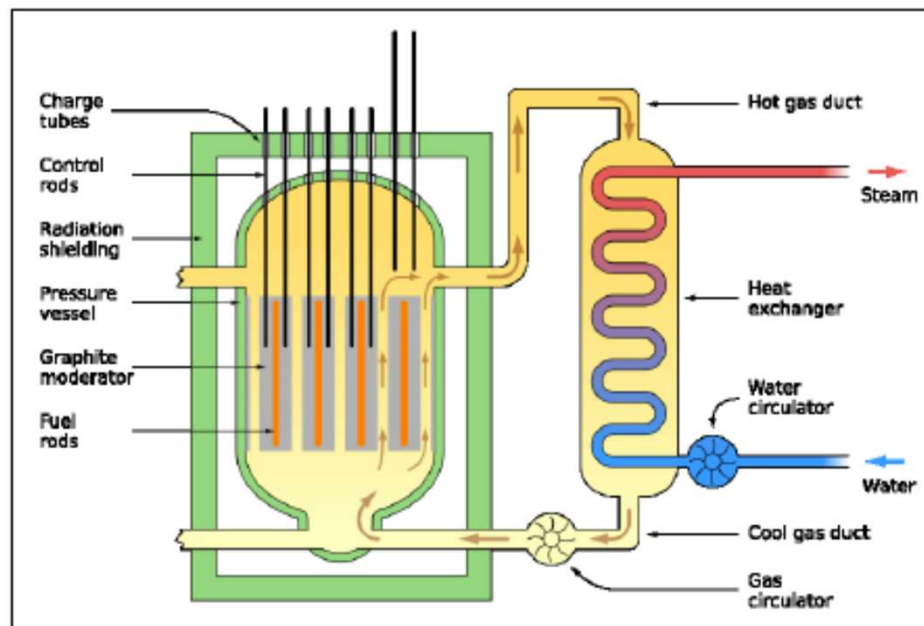
- Thermal reactors moderated by Graphite (C).
- Coolant:
 - Gas (CO_2 , He): need high coolant velocities because of the lower density of the gases.
 - Lower thermal heat transfer capability:
 - ☑ Low Nuclear Power Density: Large cores needed.
 - ☑ High Temperatures possible: 640°C , 4 MPa.
 - ☑ High Efficiency: $\sim 41\%$.
 - ☑ Not susceptible to accidents of the type possible with water cooled/moderated reactors.
- Fuel:
 - Uranium dioxide pellets, enriched to 2.5-3.5%, in stainless steel tubes.
 - Fuel utilization is less than in a LWR:
 - ☑ Discharged earlier (lower burn-ups).
 - ☑ Refueling on-line possible.



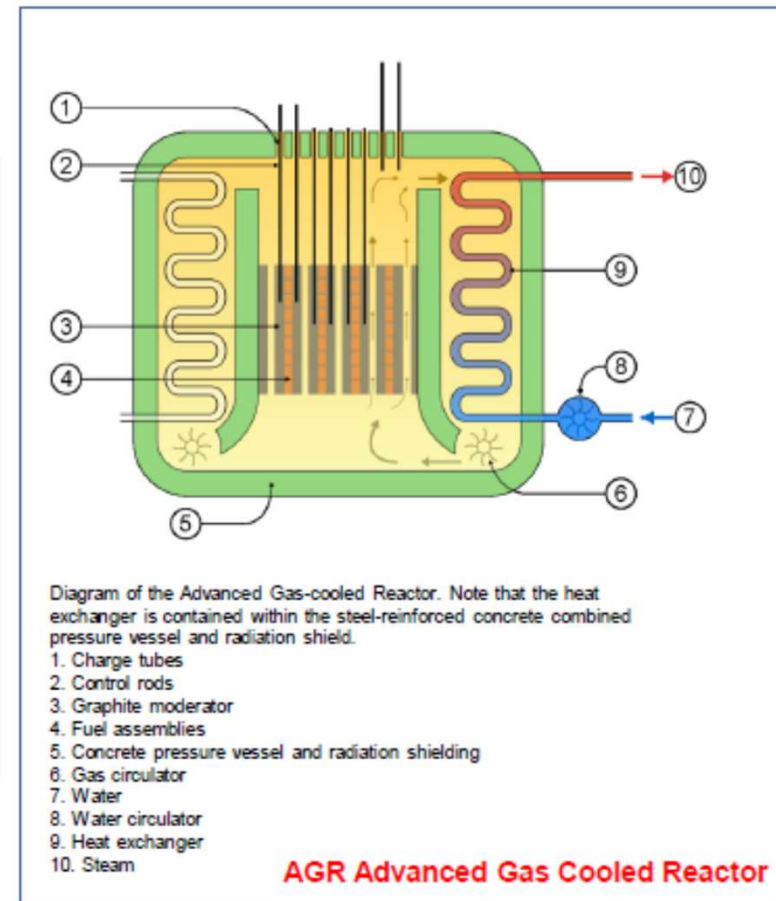
Reator a Gás a Alta Temperatura

Ciclo Rankine

The High Temperature Gas Reactor (HTGR)



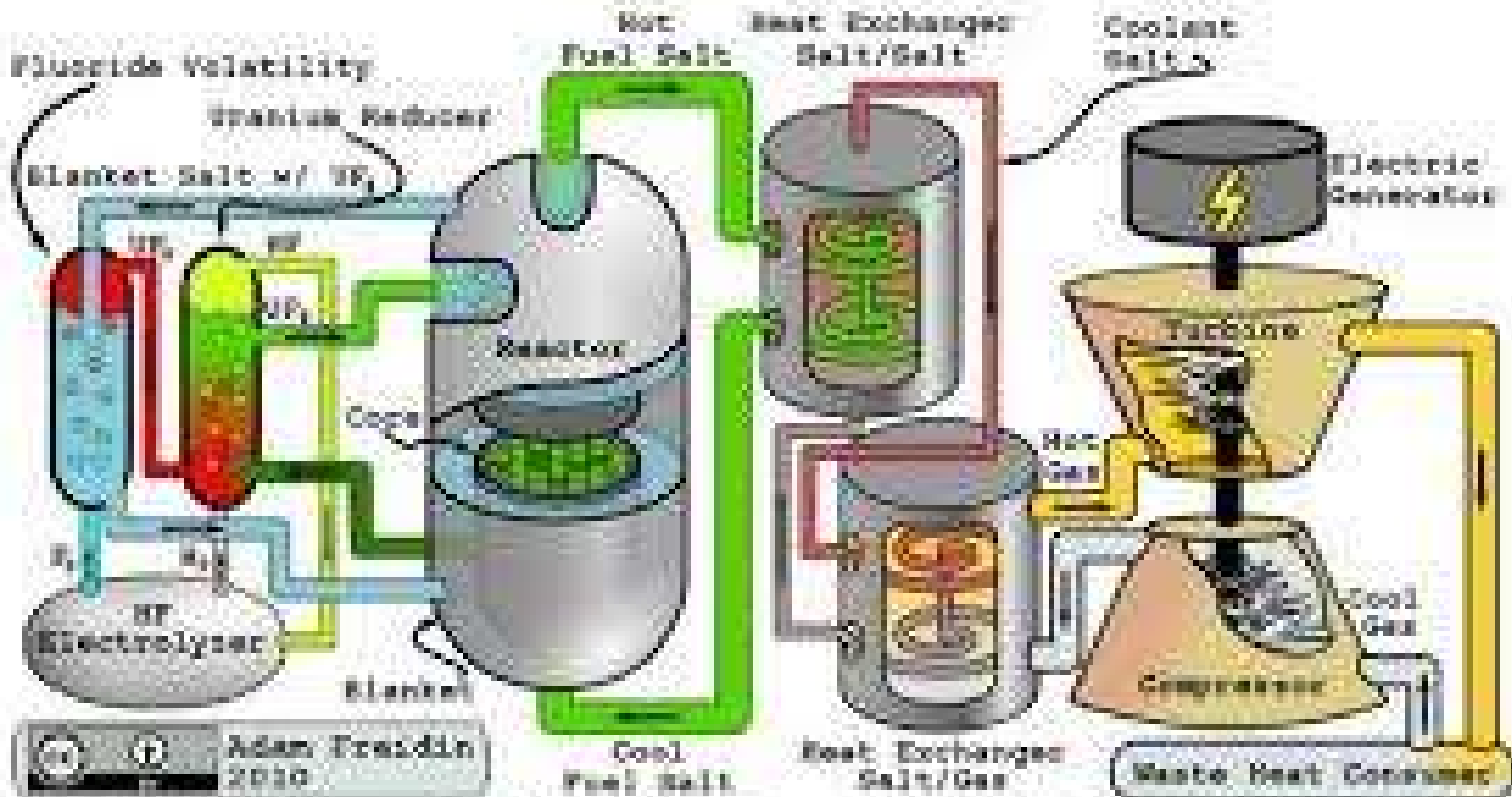
Magnox Gas Cooled Reactor



AGR Advanced Gas Cooled Reactor

Reator a Gás a Alta Temperatura Ciclo Brayton

High Temperature Superconducting coils.

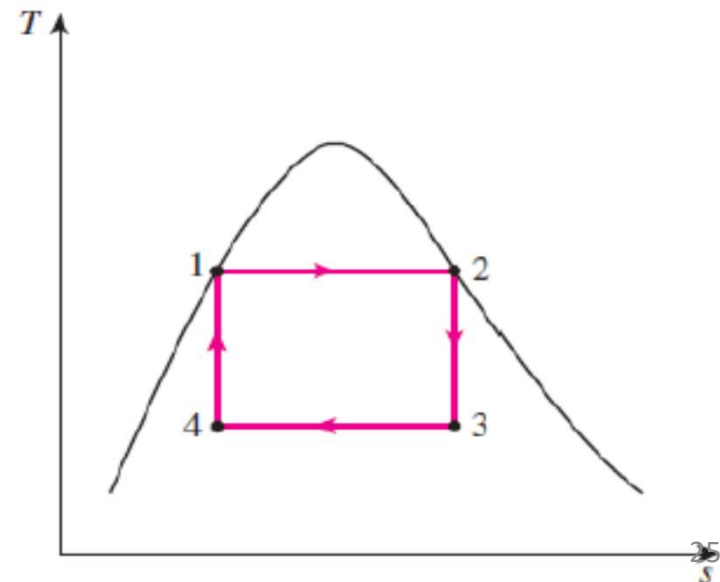


Thorium Molten Salt Breeder with Recycling.

Ciclo de Potência a Vapor- Rankine

CICLO DE POTÊNCIA A VAPOR

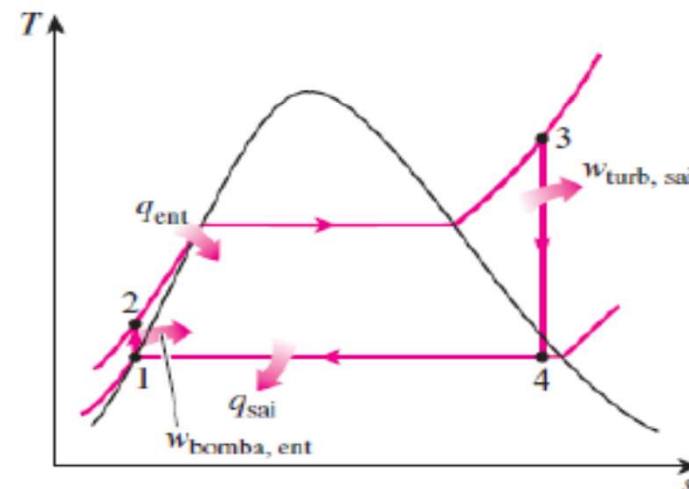
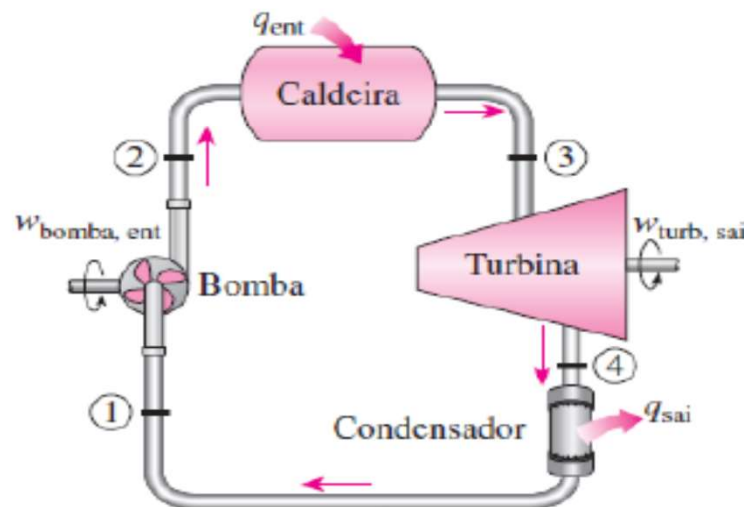
- Fluido de trabalho alternadamente vaporizado e condensado
- Máxima eficiência entre duas temperaturas: Ciclo de Carnot
- Duas isotérmicas e duas isentrópicas
- Limitações:
 - temperatura limitada pelo ponto crítico do fluido;
 - baixo título na turbina;
 - compressão bifásica



Ciclo de Potência a Vapor- Rankine

CICLO RANKINE – CICLO IDEAL DE POTÊNCIA A VAPOR

- Processos internamente reversíveis
 - Transferências de calor a pressão constante, compressão e expansão isentrópicas
- Área sob o diagrama T-s é o trabalho líquido



Ciclo de Potência a Vapor- Rankine

CICLO RANKINE – BALANÇO DE ENERGIA

- Quando há transferência de calor não há trabalho, e vice-versa=> diferença de entalpia
- Bomba

$$w_e = h_2 - h_1 \quad w_e \approx v_1(p_2 - p_1)$$

- Caldeira

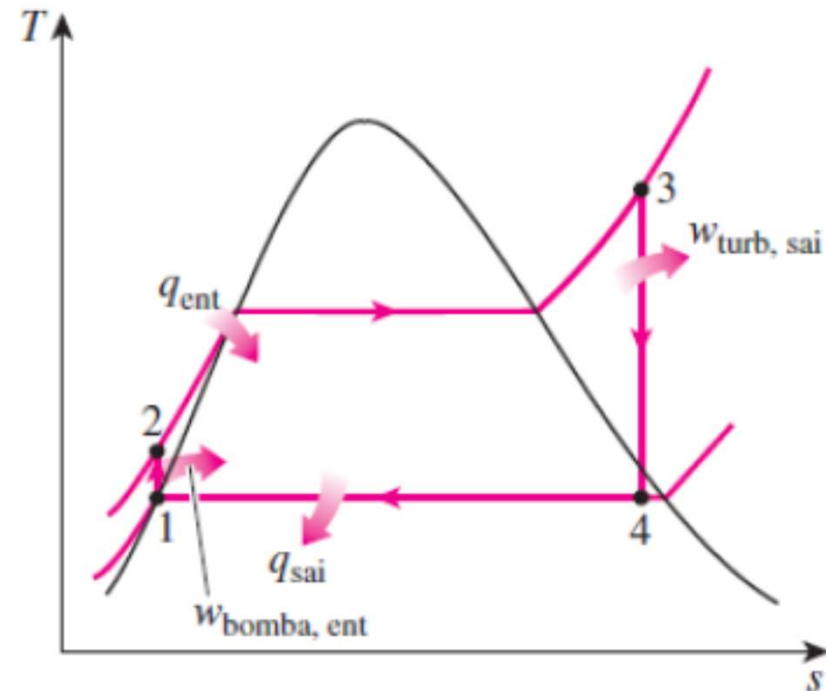
$$q_e = h_3 - h_2$$

- Turbina

$$w_s = h_3 - h_4$$

- Condensador

$$q_s = h_4 - h_1$$



Ciclo de Potência a Vapor- Rankine

CICLO RANKINE

- Trabalho Líquido

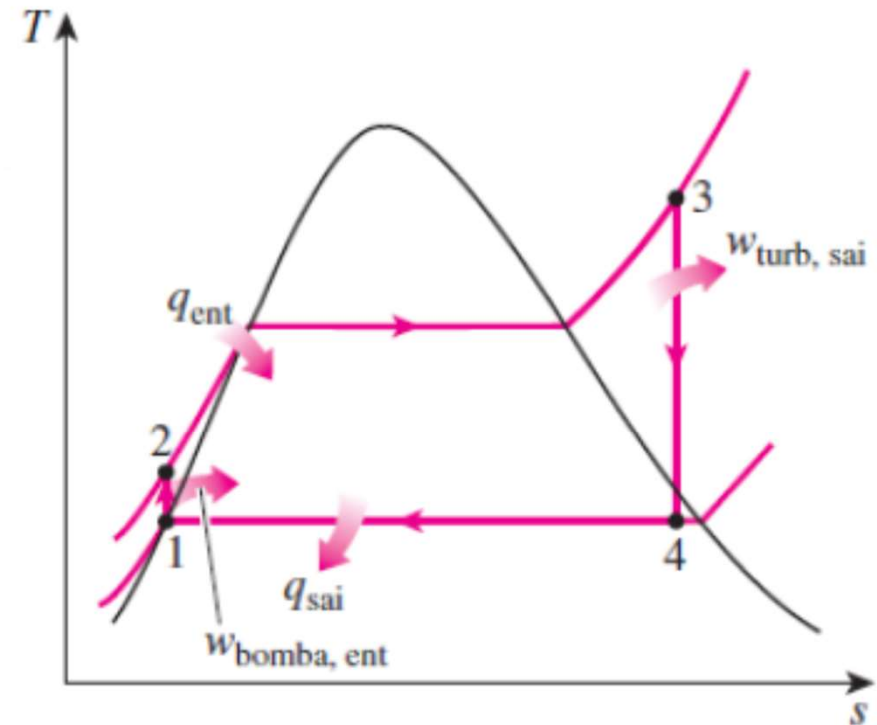
$$W_{liq} = W_s - W_e = q_e - q_s$$

- Eficiência térmica

$$\eta_{t,Rankine} = \frac{W_{liq}}{q_e} = 1 - \frac{q_s}{q_e}$$

- Razão de consumo de trabalho

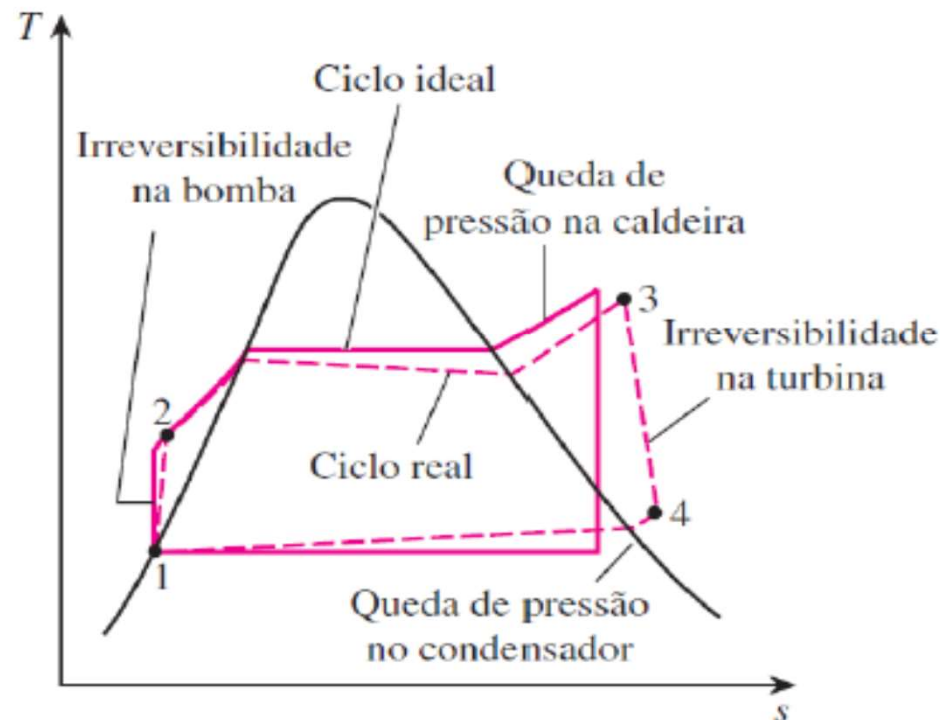
$$bwr_{Rankine} = \frac{W_e}{W_s} = \frac{W_B}{W_T}$$



Ciclo de Potência a Vapor- Rankine

DESVIOS DO CICLO IDEAL

- Perda de carga na caldeira, no condensador e nas tubulações intermediárias
- Tubulações não-isoladas: transferência entre VC e vizinhança



Ciclo de Potência a Vapor- Rankine

DESVIOS DO CICLO IDEAL

- Irreversibilidades na bomba e na turbina

$$\eta_{B,ise} = \frac{W_{ise}}{W_{real}} = \frac{(h_{2,ise} - h_1)}{(h_{2,real} - h_1)} \quad \eta_{T,ise} = \frac{W_{real}}{W_{ise}} = \frac{(h_3 - h_{4,real})}{(h_3 - h_{4,ise})}$$

- Eficiência da caldeira

$$\eta_{caldeira} = \frac{\dot{m}q_e}{\dot{m}_{comb} PCI}$$

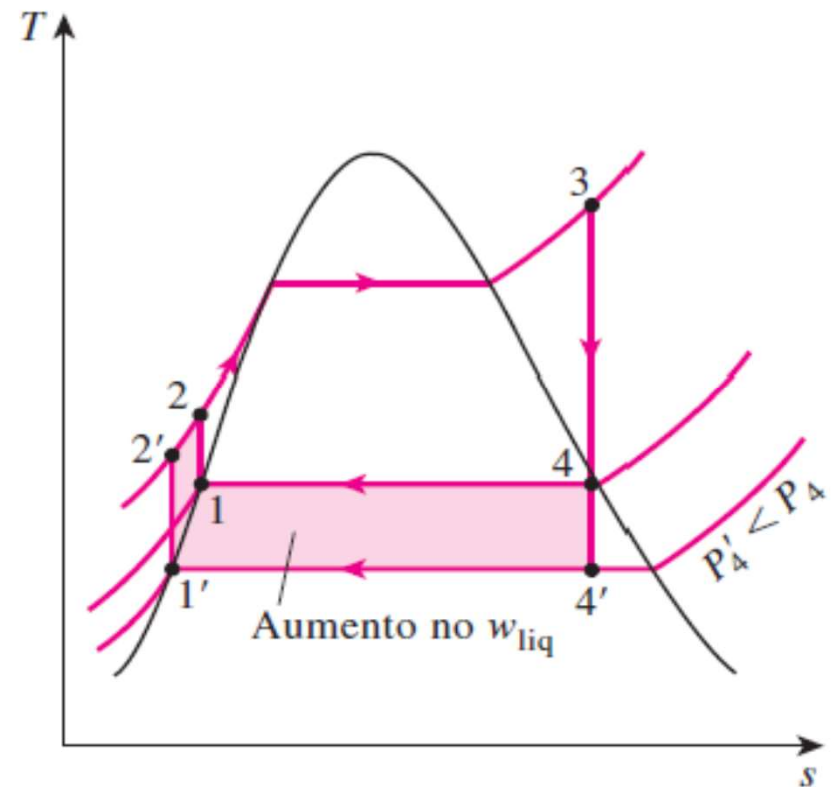
Combustível	PCI [MJ/kg]
Biomassa	4,44
Etanol	24,8
Carvão	25,44
Óleo combustível	41,67
Diesel	42,35
Gás natural	47,33
Nuclear	4193617



Ciclo de Potência a Vapor- Rankine

AUMENTO DE EFICIÊNCIA

- Aumentar a temperatura da fonte quente ou reduzir a da fonte fria
- Redução da pressão no condensador
 - Pressão pode estar abaixo da atmosférica: limitada pela pressão de saturação do fluido de resfriamento
 - Problemas: aumento do calor fornecido; redução do título na turbina; mais propenso a infiltração

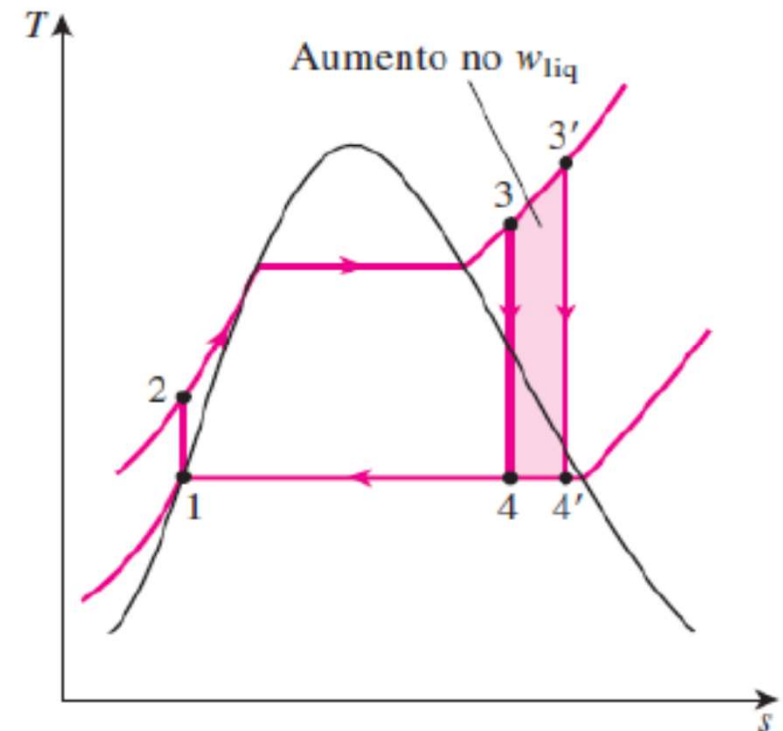


Ciclo de Potência a Vapor- Rankine

AUMENTO DE EFICIÊNCIA

- Superaquecimento do vapor: soluciona o problema do baixo título na turbina

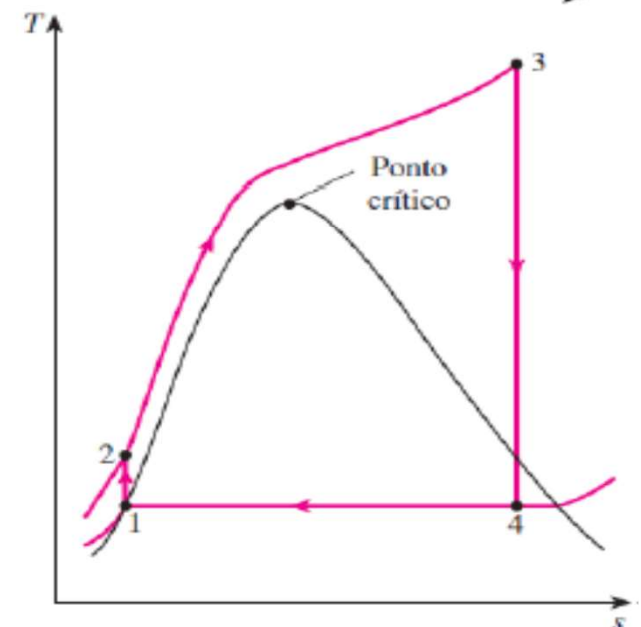
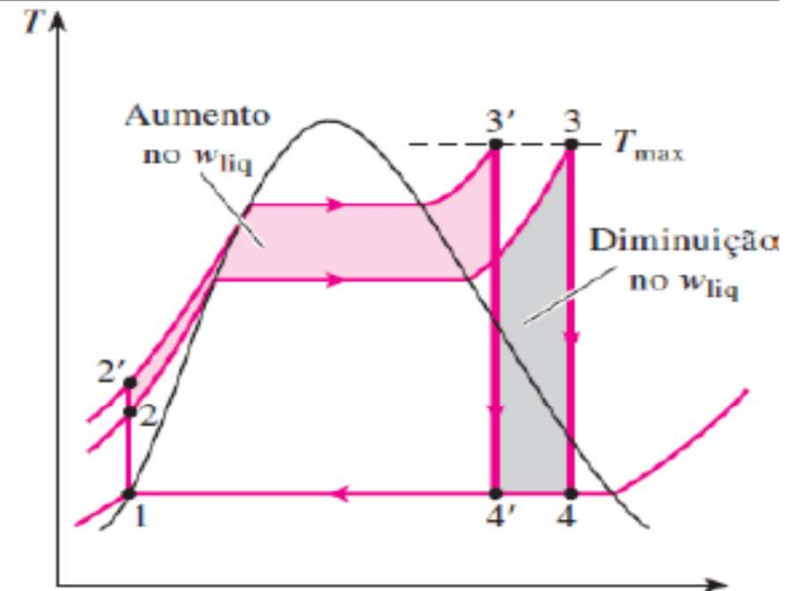
- Aumenta o calor fornecido
- Temperatura máxima limitada por questões metalúrgicas: aproximadamente $620\text{ }^{\circ}\text{C}$



Ciclo de Potência a Vapor- Rankine

AUMENTO DE EFICIÊNCIA

- Aumento da pressão na caldeira
 - Aumenta o fornecimento de calor
 - Limitado à temperatura máxima
 - Pode ser acima do ponto crítico, dependendo da temperatura
 - Reduz o título na turbina

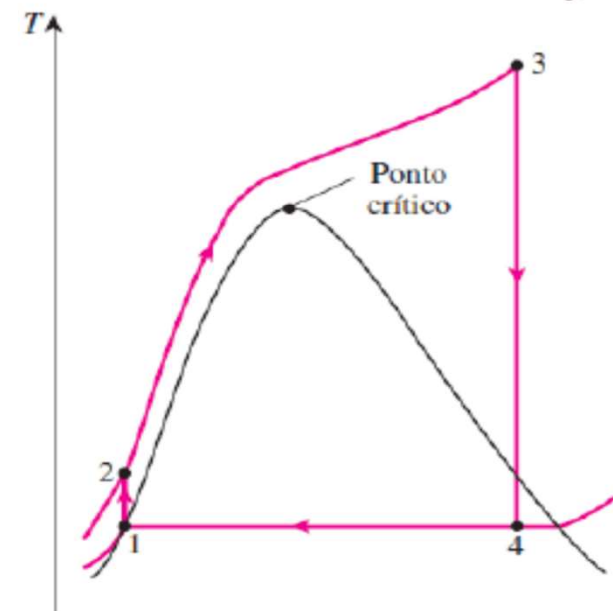
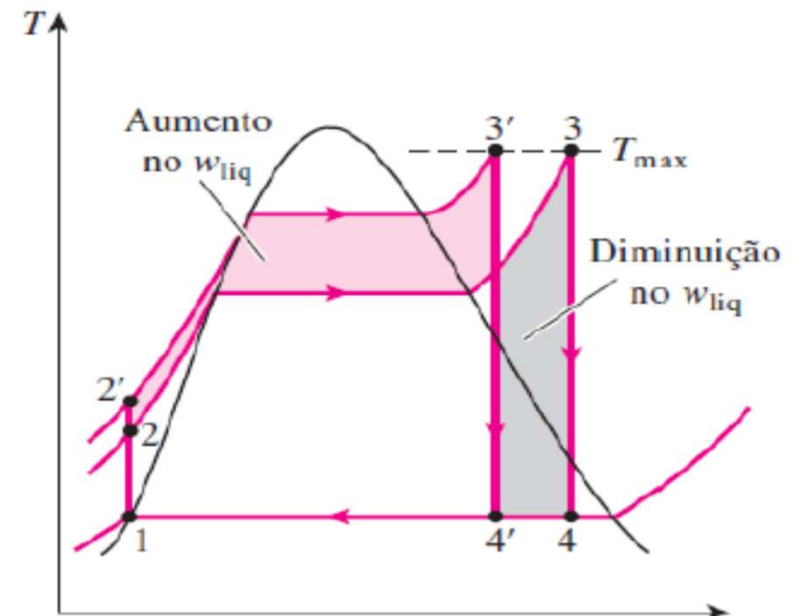


Ciclo de Potência a Vapor-Rankine

RELEMBRANDO...

- Aumento da pressão na caldeira
 - Aumenta o fornecimento de calor
 - Limitado à temperatura máxima
 - Pode ser acima do ponto crítico, dependendo da temperatura
 - **Reduz o título na turbina**

Este problema pode ser solucionado



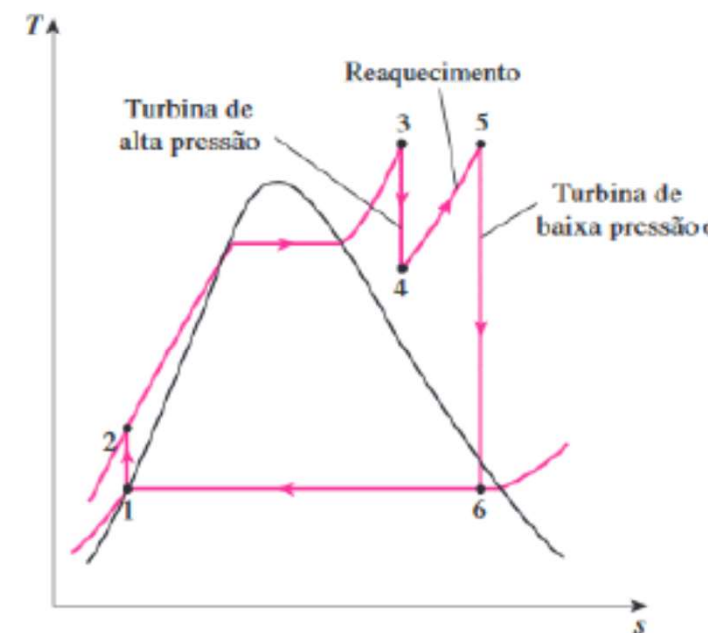
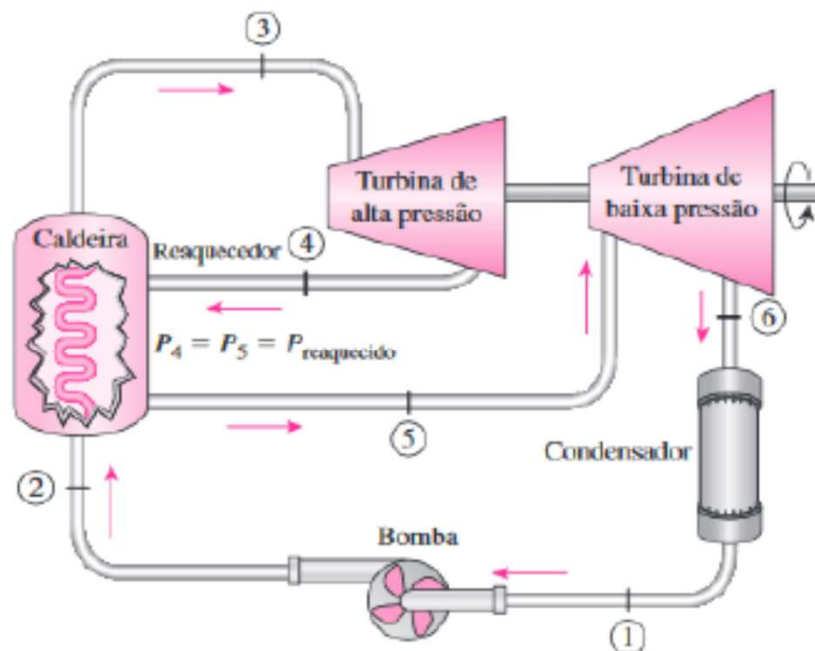
Ciclo de Potência a Vapor-Rankine

CICLO RANKINE COM REAQUECIMENTO

- Expansão em dois ou mais estágios com reaquecimento intermediário

$$q_e = q_{2,3} + q_{4,5} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$$

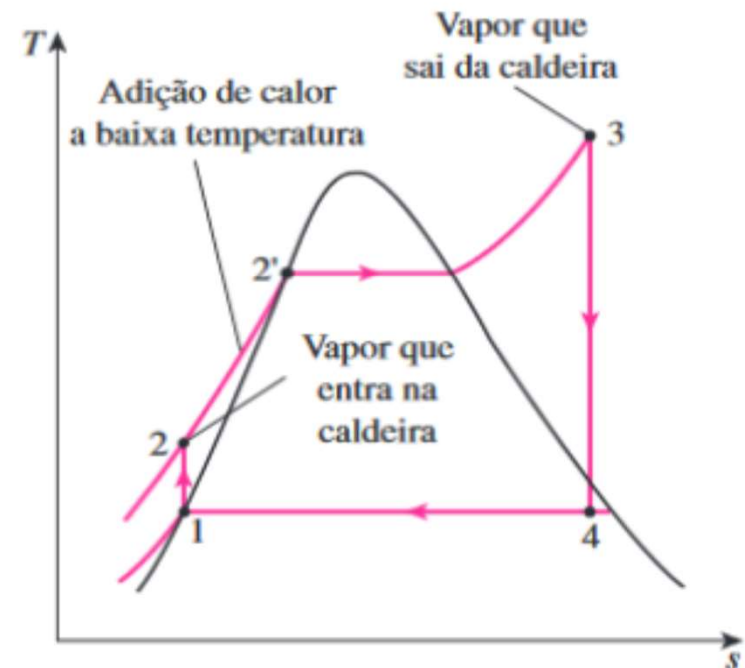
$$w_s = w_{T,I} + w_{T,II} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$$



Ciclo de Potência a Vapor- Rankine

CICLO RANKINE REGENERATIVO

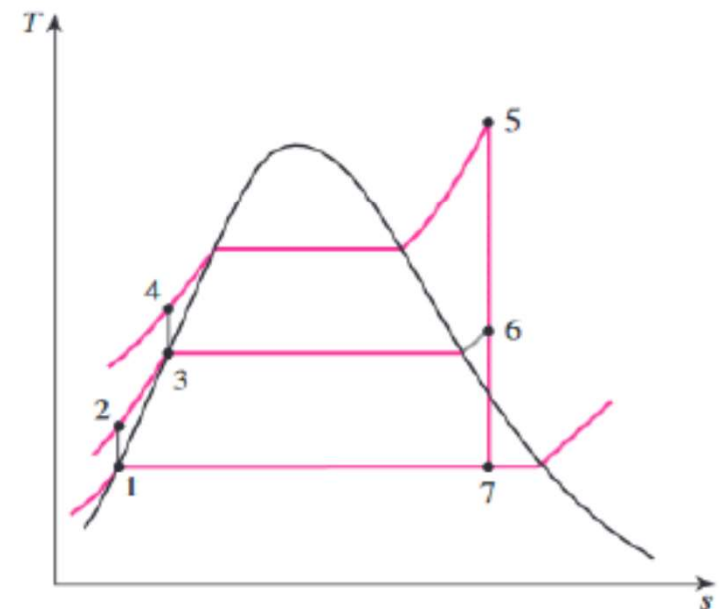
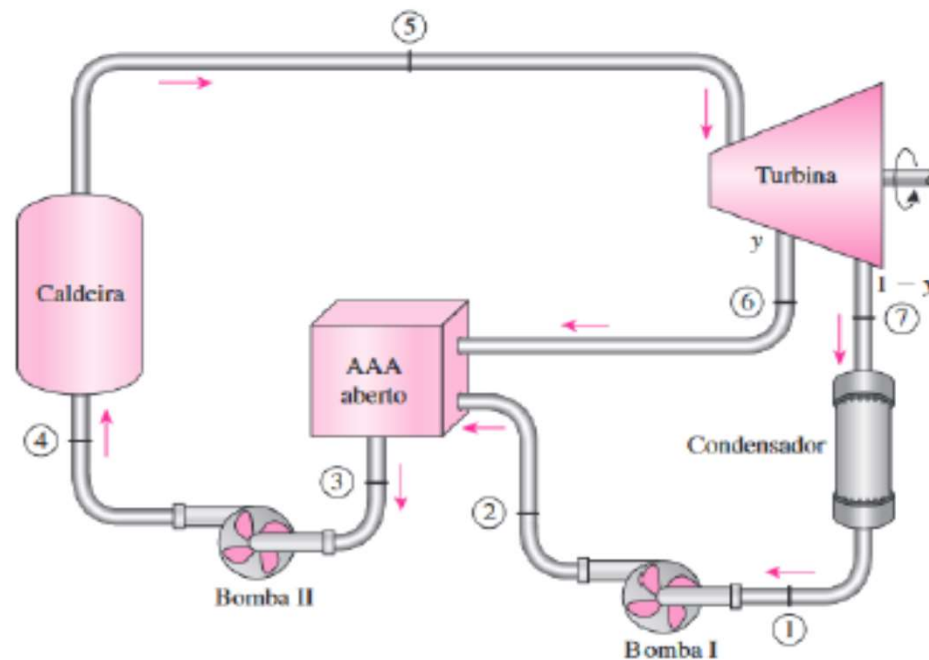
- A primeira fase do aquecimento na caldeira ocorre a baixa temperatura => reduz a temperatura média e a eficiência
- Solução: pré-aquecer a água de alimentação
- Como? Trocando calor com vapor extraído da turbina



Ciclo de Potência a Vapor-Rankine

CICLO RANKINE REGENERATIVO ABERTO

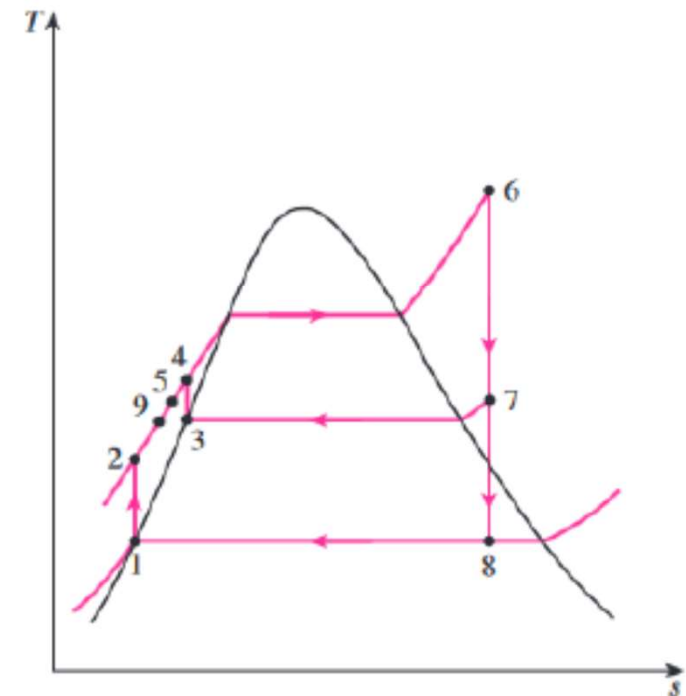
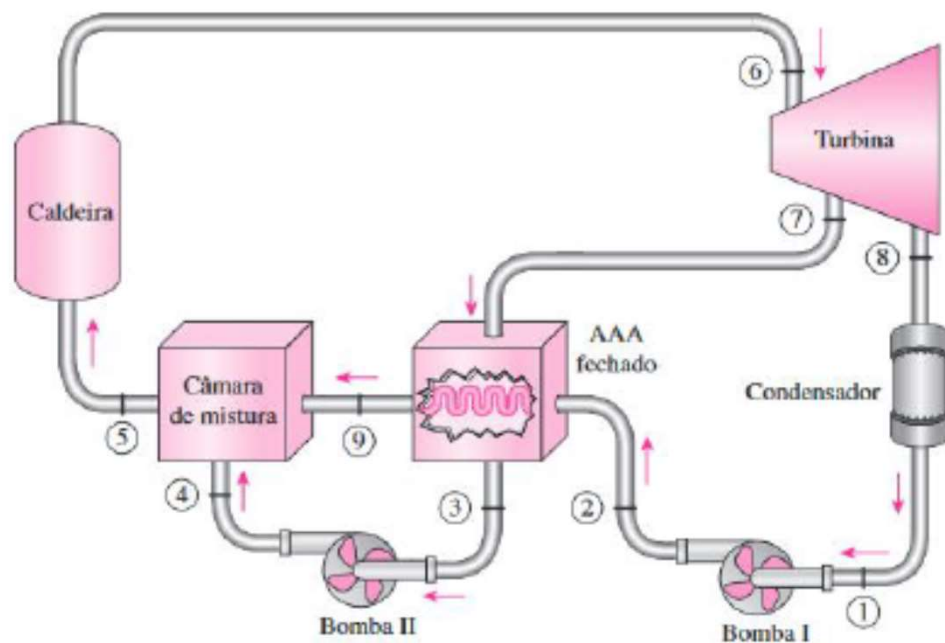
- Aquecedor de água de alimentação aberto ou de contato direto
- $P_6 = P_2 = P_3$
- Mistura \Rightarrow Líquido saturado a T_3



Ciclo de Potência a Vapor- Rankine

CICLO RANKINE REGENERATIVO FECHADO

- Trocador de calor seguido de uma câmara de mistura
- $P_7 = P_3$
- $P_2 = P_9 = P_5 = P_4$
- Ideal $\Rightarrow T_9 = T_7$



Ciclo de Potência a Vapor- Rankine

CICLO RANKINE REGENERATIVO FECHADO

$$q_e = h_6 - h_5$$

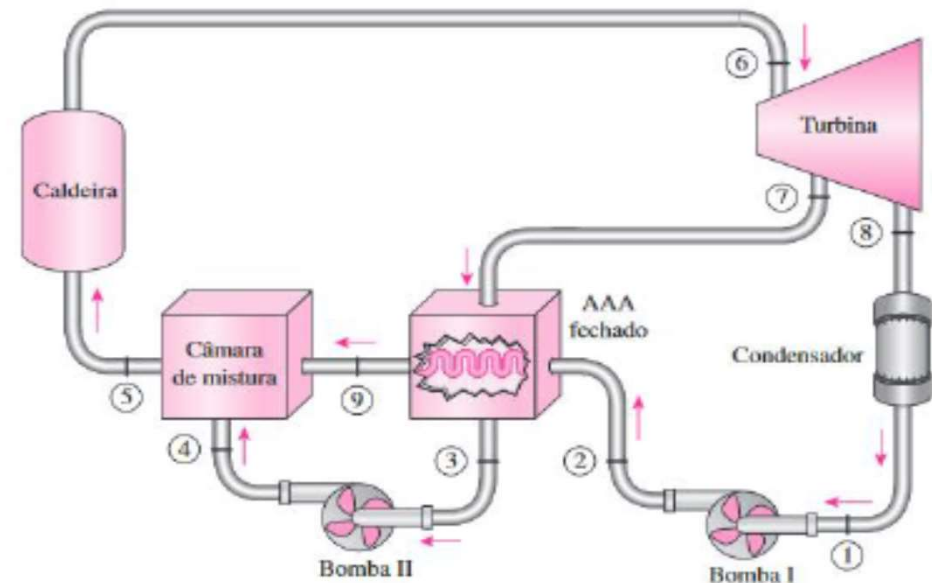
$$q_s = (1 - y)(h_8 - h_1)$$

$$w_s = (h_6 - h_7) + (1 - y)(h_7 - h_8) = h_6 - yh_7 - (1 - y)h_8$$

$$w_e = (1 - y)(h_2 - h_1) + y(h_4 - h_3)$$

$$w_e = (1 - y)v_1(P_2 - P_1) + y[v_3(P_4 - P_3)]$$

$$y = \frac{\dot{m}_7}{\dot{m}_6}$$

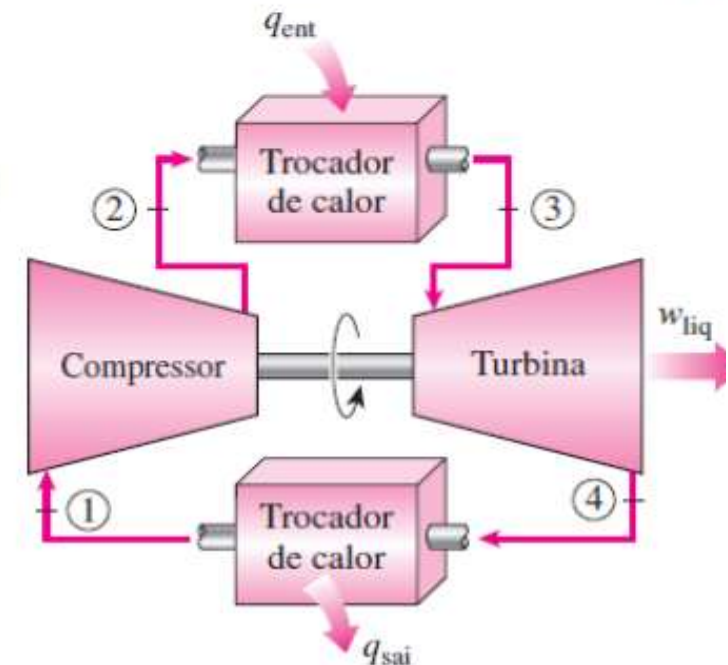


Ciclo Potência a Gás - Brayton

CICLO BRAYTON – TURBINAS A GÁS

- Ciclo ideal => fechado a ar padrão
 - Compressão isentrópica
 - Fornecimento de calor a pressão constante
 - Expansão isentrópica
 - Rejeição de calor a pressão constante
- Regime permanente desprezando perdas de energia potencial e cinética
- Análise de volume de controle para cada componente do ciclo

$$q_e + w_e + h_e = q_s + w_s + h_s$$



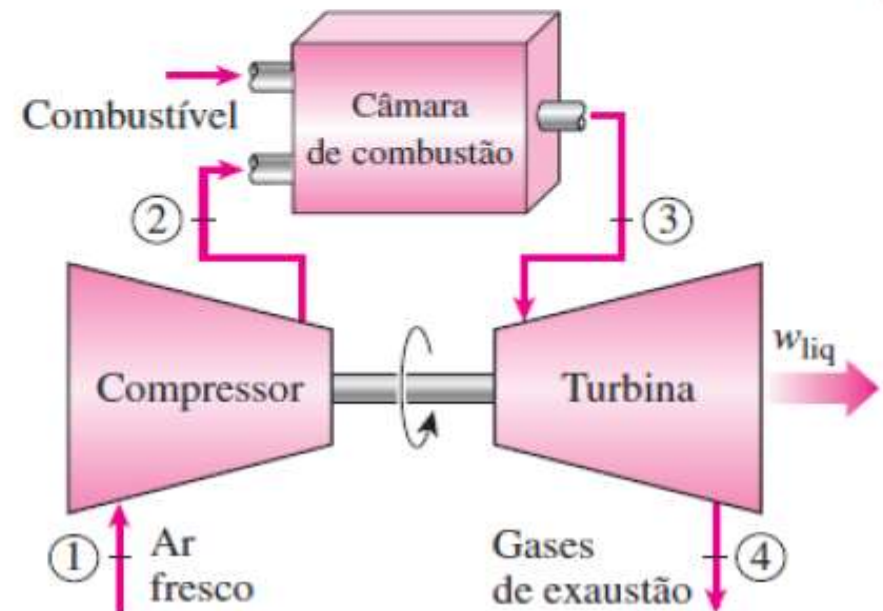
Ciclo Potência a Gás - Brayton

CICLO BRAYTON – TURBINAS A GÁS

- Ciclo real => aberto

- Ar tem pressão e temperatura aumentados no compressor
- Mistura ar+combustível é queimada na câmara
- Gases da combustão vão para a turbina para obtenção de potência
- Exaustão dos gases para o ambiente

- Gases não recirculam, por isso o ciclo é aberto



Ciclo Potência a Gás - Brayton

CICLO BRAYTON – TURBINAS A GÁS

- Quando há transferência de calor não há trabalho, e vice-versa=> diferença de entalpia

$$w_e = h_2 - h_1$$

$$w_s = h_3 - h_4$$

$$q_e = h_3 - h_2$$

$$q_s = h_4 - h_1$$

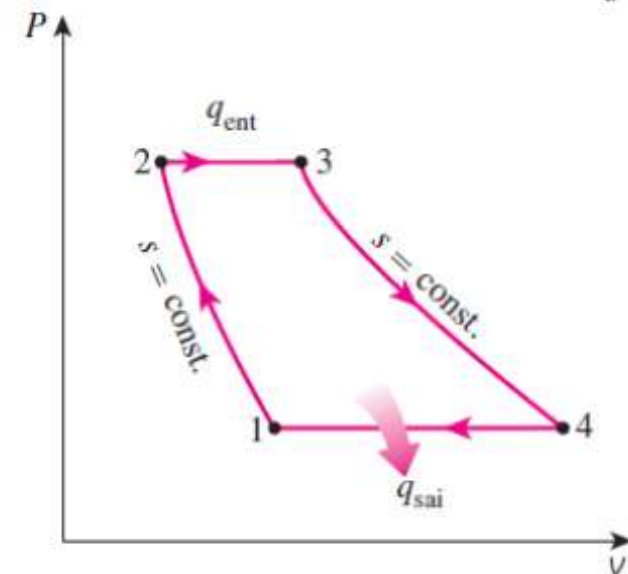
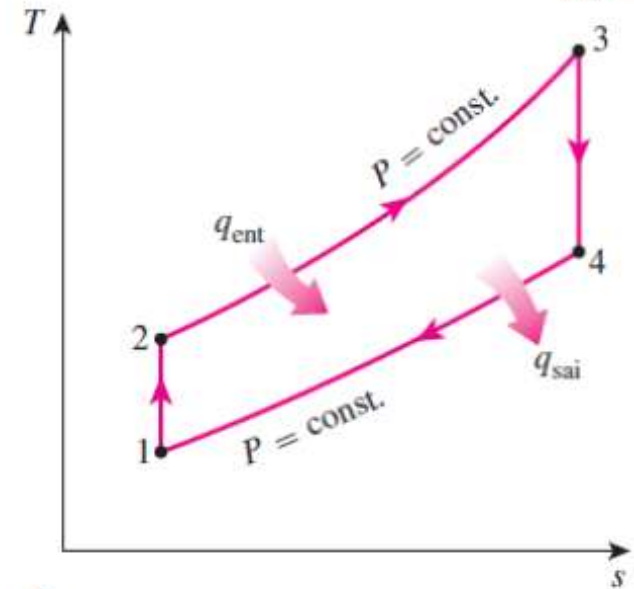
- Calor específico constante

$$q_e = c_p (T_3 - T_2)$$

$$q_s = c_p (T_4 - T_1)$$

- Eficiência térmica

$$\eta_{t,Brayton} = \frac{W_{liq}}{q_e} = 1 - \frac{q_s}{q_e}$$



Ciclo Potência a Gás - Brayton

CICLO BRAYTON – TURBINAS A GÁS

- Calor específico constante

$$\eta_{t,Brayton} = 1 - \frac{c_p (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

- Aplicando as relações do processo politrópico isentrópico

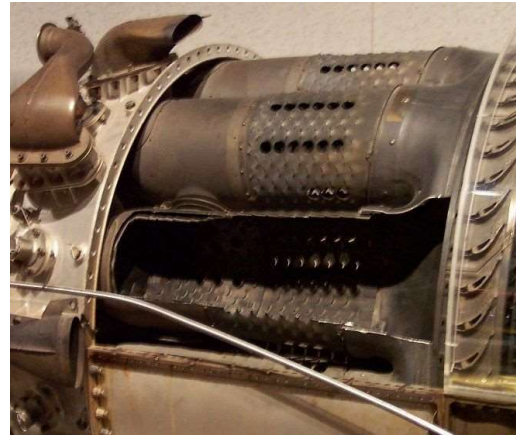
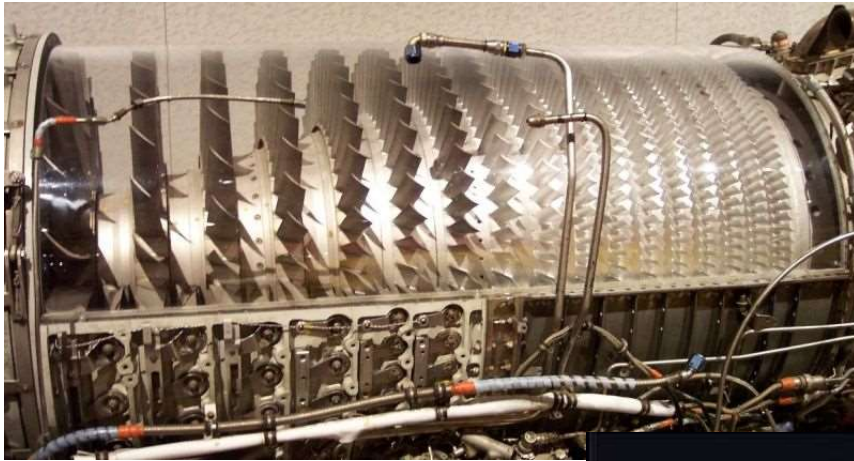
$$\eta_{t,Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

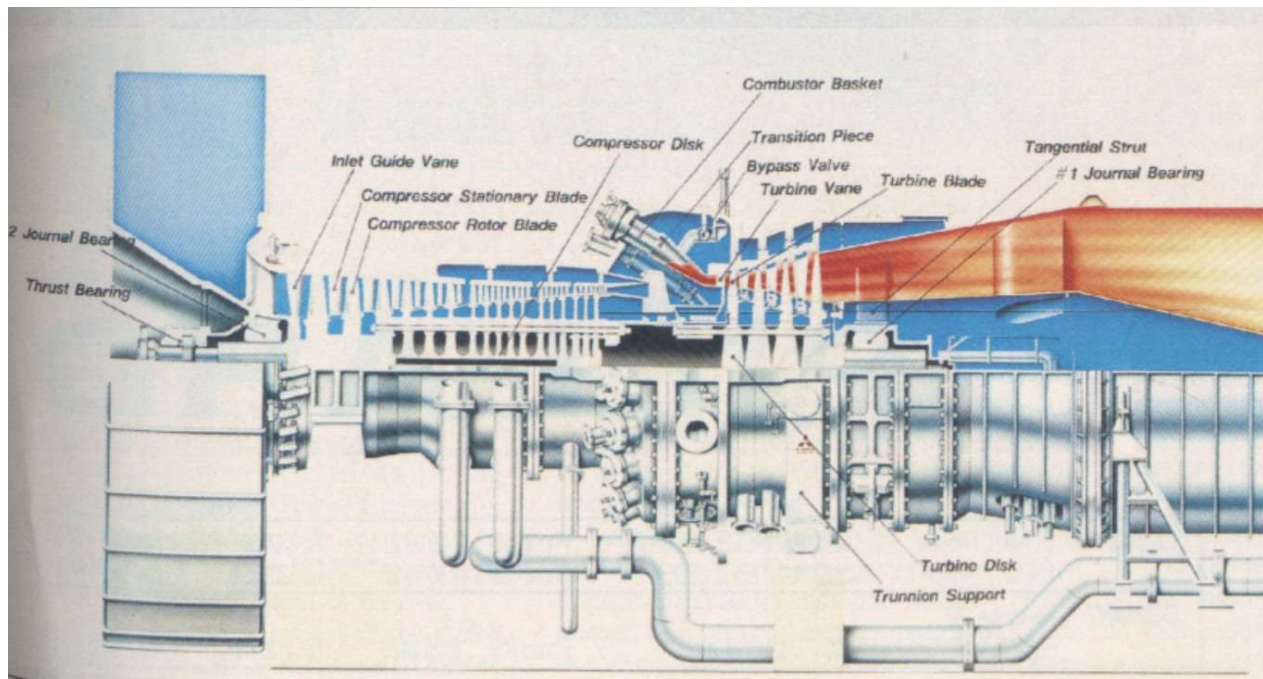
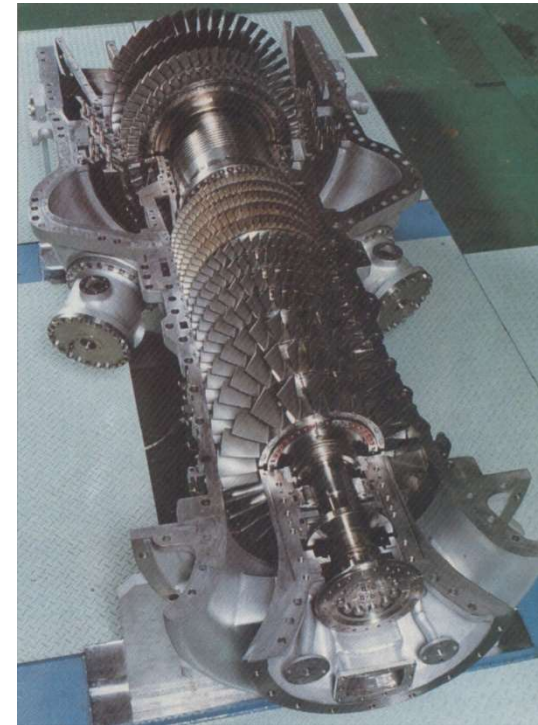
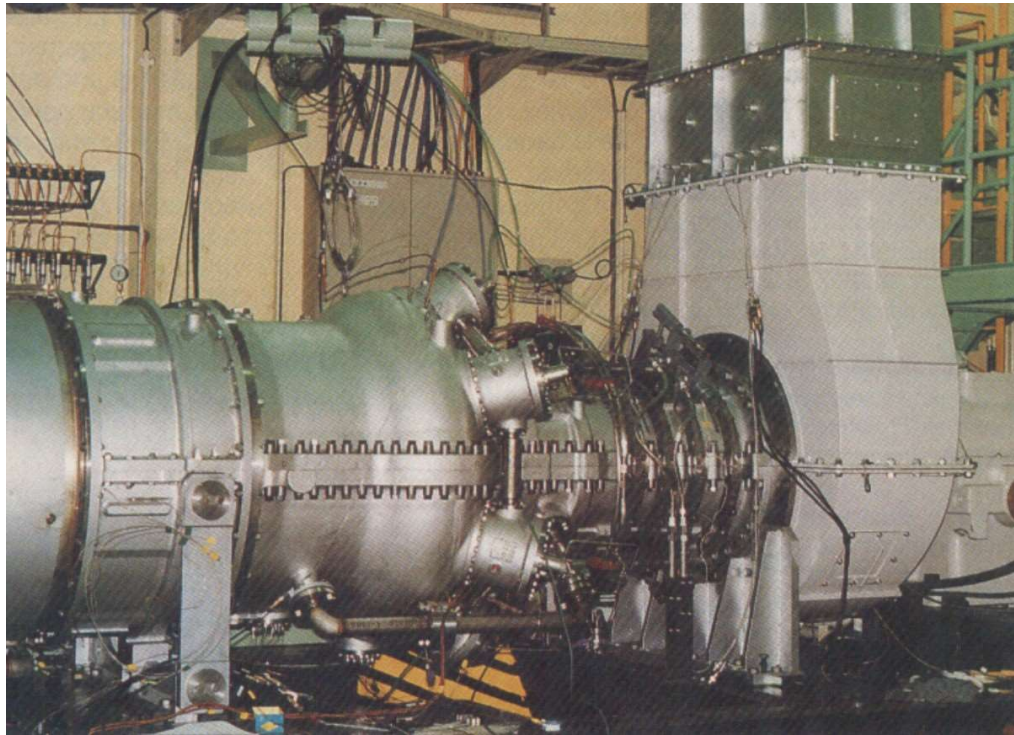
- Onde r_p é a razão entre as duas pressões de operação

$$r_p = \frac{p_2}{p_1}$$



Turbina a gás



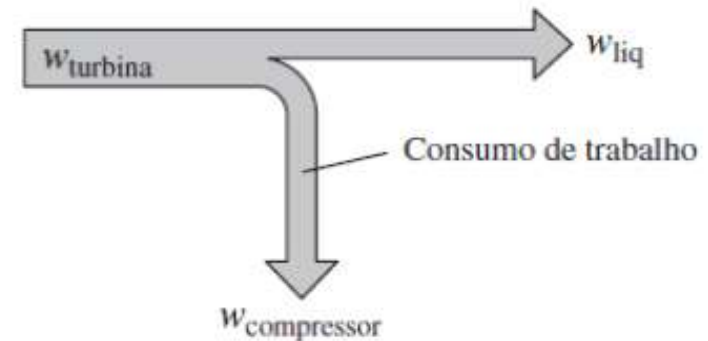


Ciclo Potência a Gás - Brayton

CICLO BRAYTON – TURBINAS A GÁS

- Parte da potência gerada pela turbina é utilizada no compressor => razão de consumo de trabalho (back work ratio)

$$bwr = \frac{W_e}{W_s} = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_3 - h_4)}$$



- Processos reais => rendimentos isentrópicos

$$\eta_{c,ise} = \frac{W_{ise}}{W_{real}} = \frac{(h_{2,ise} - h_1)}{(h_{2,real} - h_1)}$$

$$\eta_{T,ise} = \frac{W_{real}}{W_{ise}} = \frac{(h_3 - h_{4,real})}{(h_3 - h_{4,ise})}$$



CICLO COMBINADO – BRAYTON+RANKINE

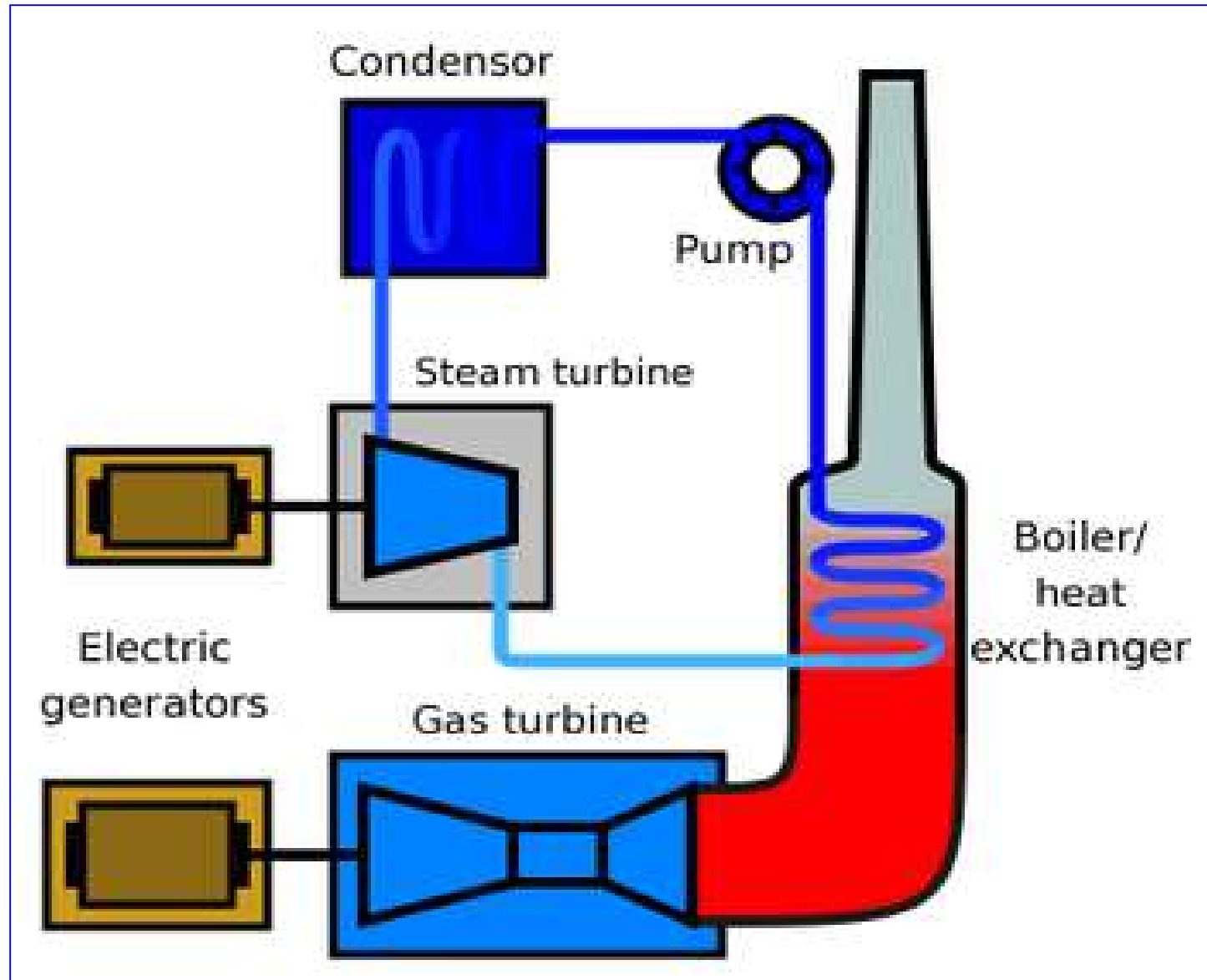
-Aproveitamento do calor residual dos gases de escape.

CICLO COMBINADO GÁS-VAPOR

- Ciclos Brayton operam a temperaturas superiores que os ciclos Rankine
- Turbinas a gás suportam temperaturas mais altas => 1400 °C vs 600 °C das turbinas a vapor
- Gases de exaustão a altas temperaturas => rejeição de calor do ciclo Brayton pode operar como fornecimento de calor do Rankine

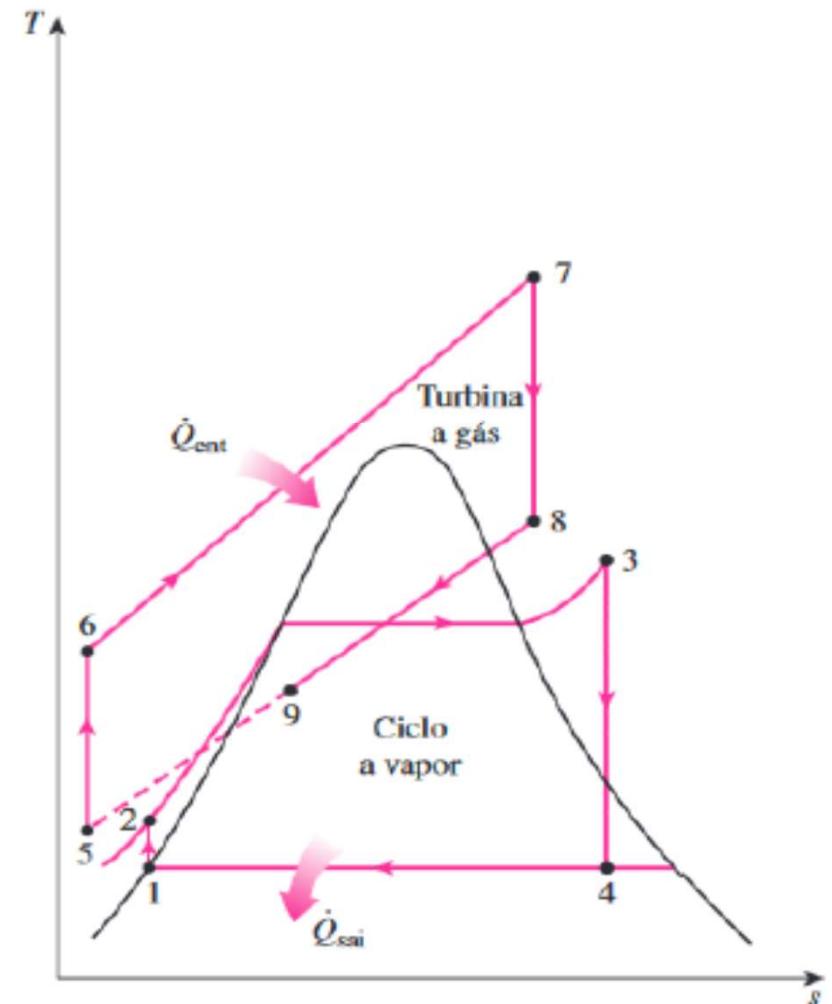
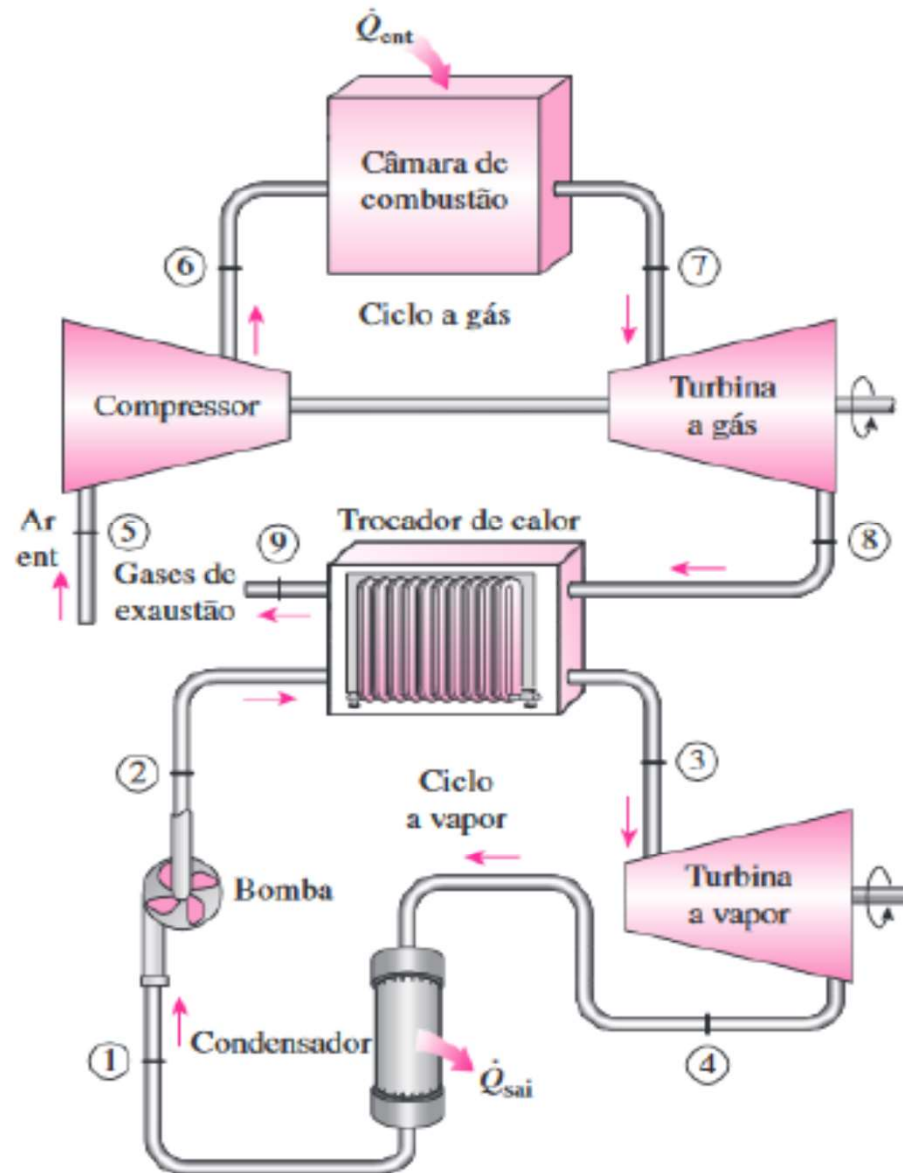
CICLO COMBINADO – BRAYTON+RANKINE

-Aproveitamento do calor residual dos gases de escape.



CICLO COMBINADO – BRAYTON+RANKINE

CICLO COMBINADO GÁS-VAPOR



CICLO COMBINADO – BRAYTON+RANKINE

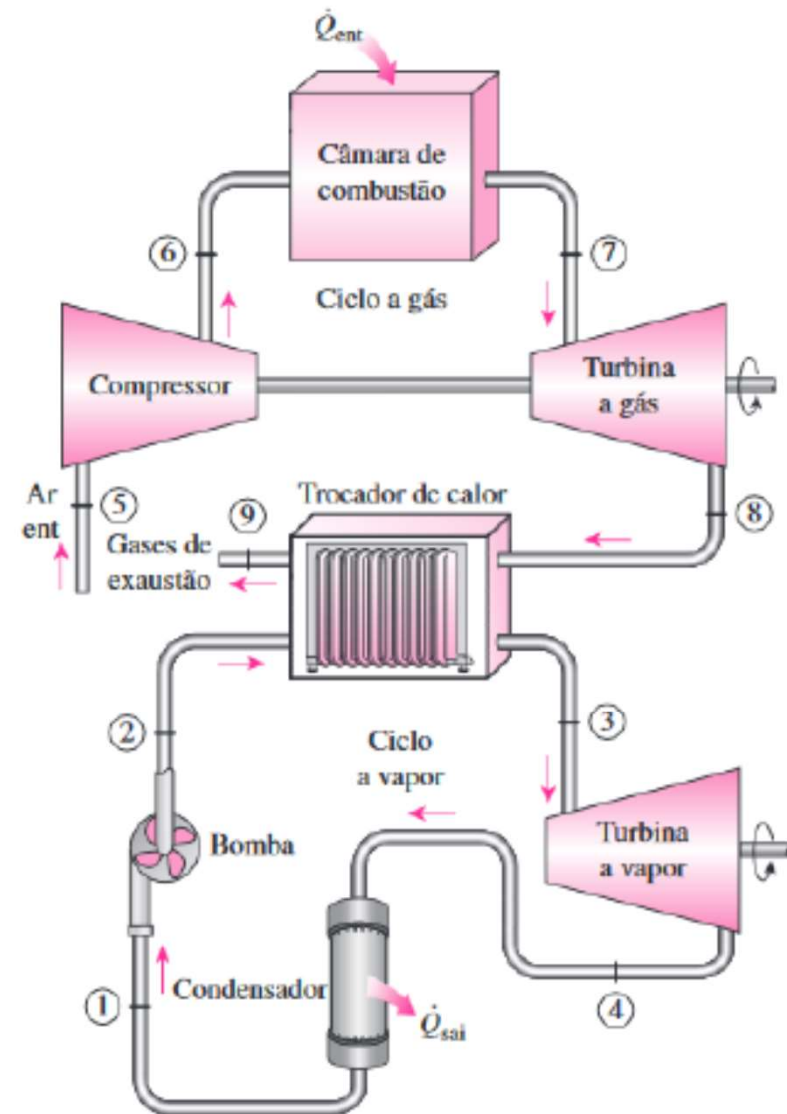
CICLO COMBINADO GÁS-VAPOR

- Eficiência do ciclo combinado

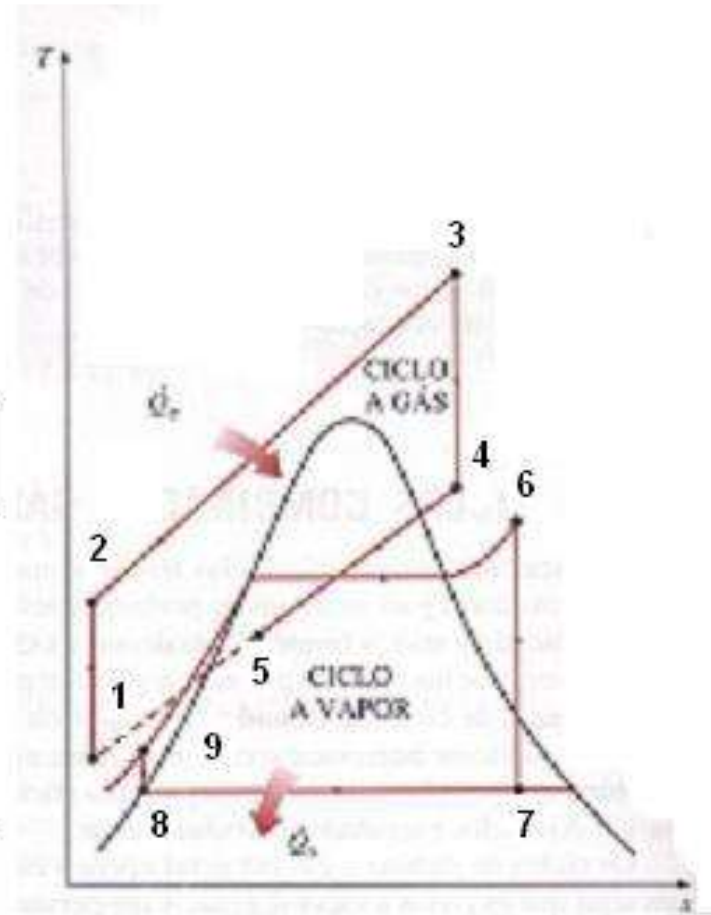
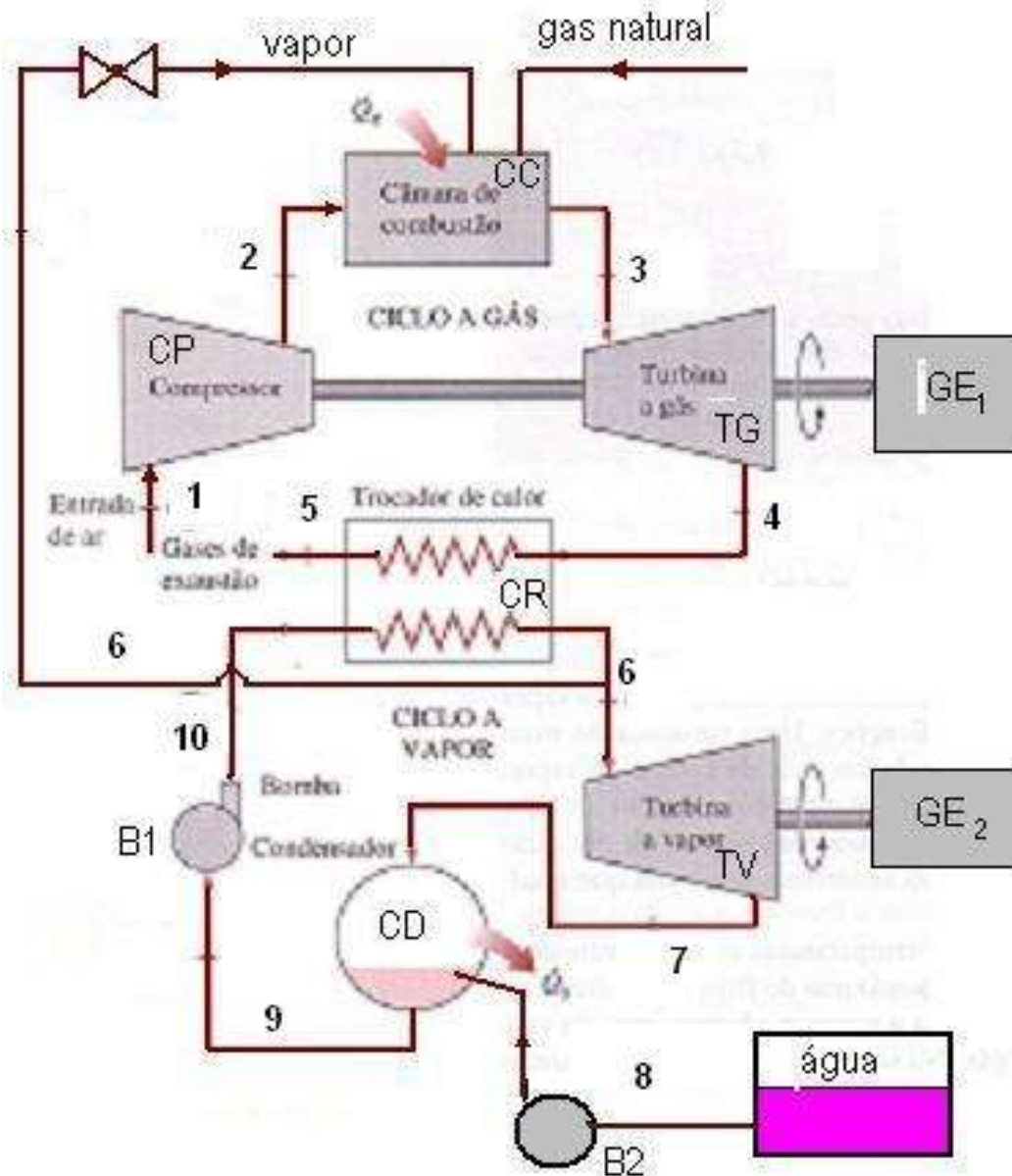
$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{liq,gás} + \dot{W}_{liq,vapor}}{\dot{Q}_{e,gás}}$$

- Se houver superaquecedor após o trocador

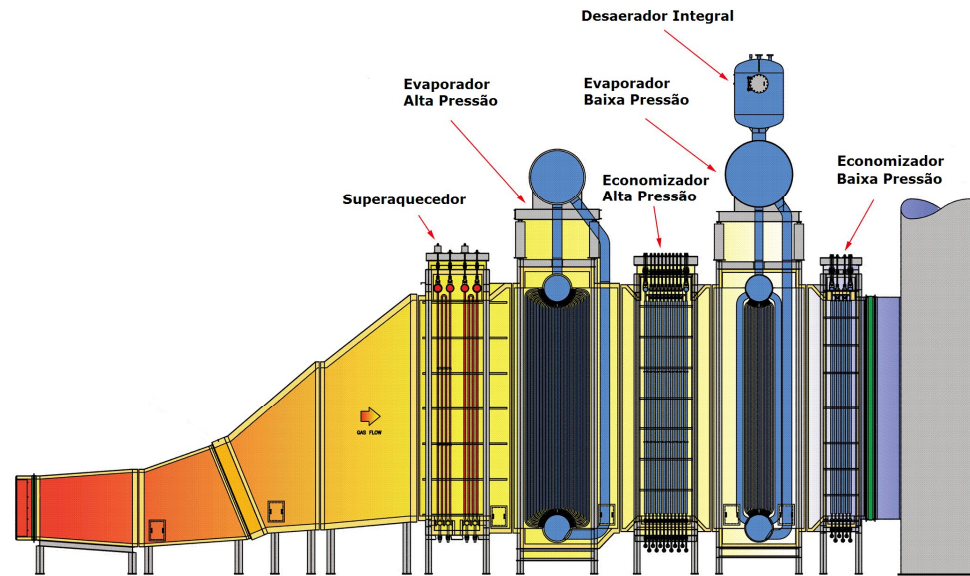
$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{liq,gás} + \dot{W}_{liq,vapor}}{\dot{Q}_{e,gás} + \dot{Q}_{e,vapor}}$$



CICLO COMBINADO – BRAYTON+RANKINE



CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO

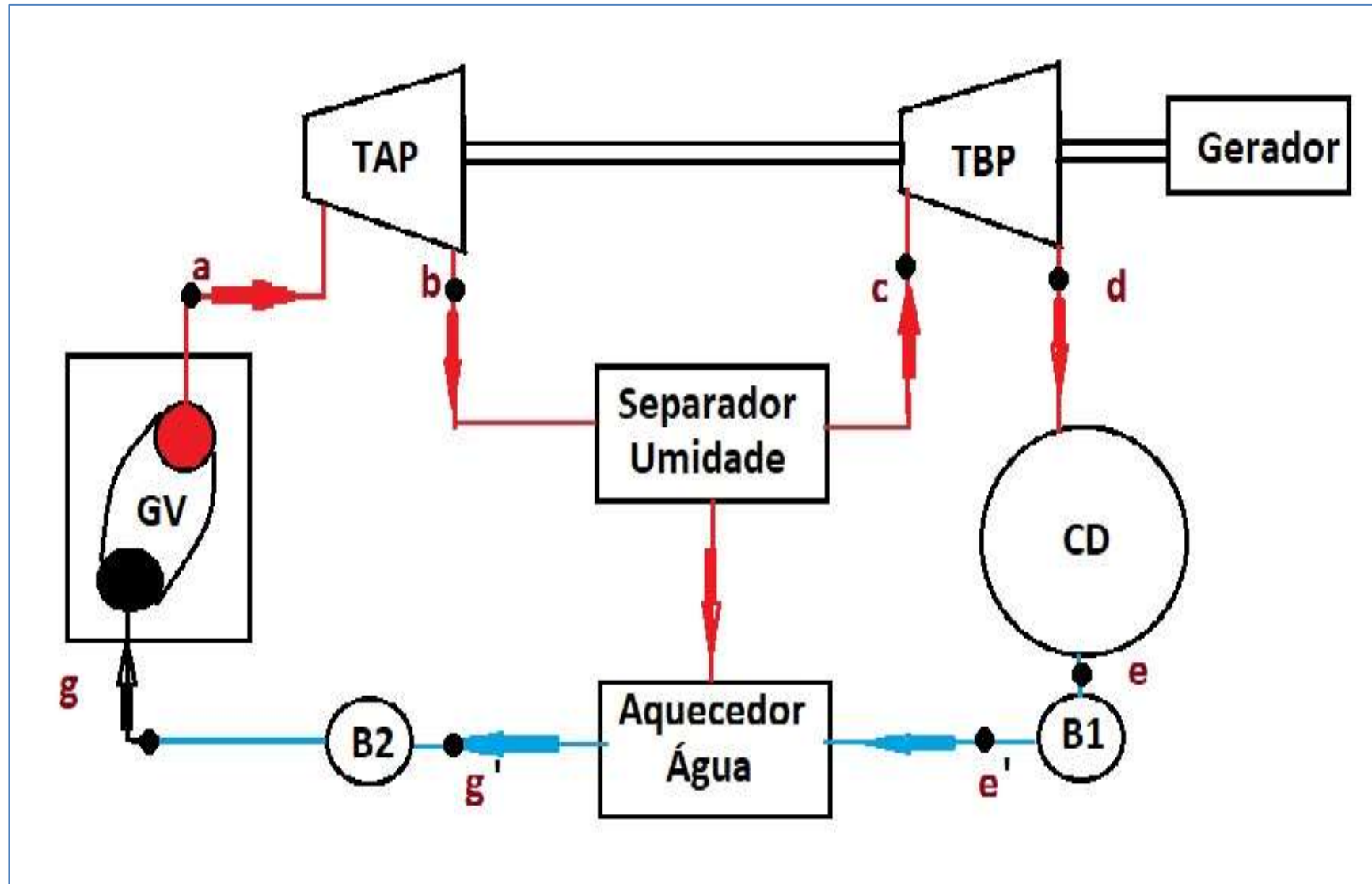


Termelétrica a Gás



Exemplos / Exercícios

Exercício 1- MIT



Exercício 1- MIT

- Dados:
 - Condições na entrada TAP : vapor saturado 600 psia.
 - Pressão saída TAP= 80 psia.
 - Pressão no Condensador = 2" Hg.
 - Não há subresfriamento no condensador.
 - Trabalho de bomba desprezível.
 - Eficiência Gerador elétrico= 98%.
- Calcule a eficiência do ciclo e a taxa de vazão de vapor para as condições de:
 - Turbina com eficiência isoentrópica de 100% e correntes de líquido e vapor saturados no separador de umidade, na pressão de entrada.
 - Faça o Diagrama T x s. Indique de onde surgem todos os dados e utilize os índices de acordo com a figura anterior.

(2)

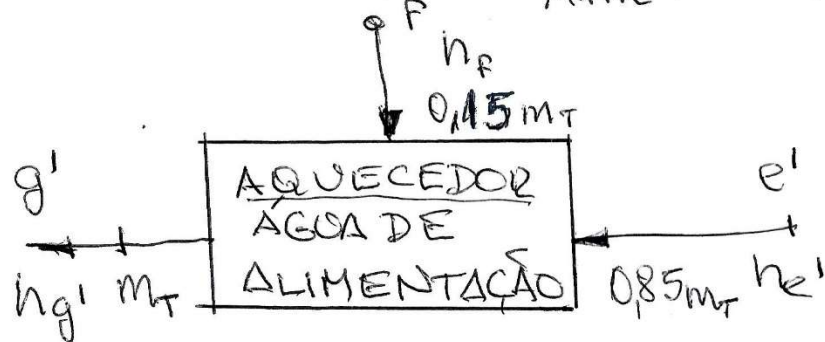
$$P_d = 2'' \text{ Hg} = 50,8 \text{ mmHg} = 0,98 \text{ psia} \rightarrow T_d = 101,14 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$s_d = s_c = 1,6214 \text{ BTU/lbm} \cdot R \rightarrow \kappa_d = \frac{s_d - s_L}{s_{LV}} = \frac{1,624 - 0,1316}{1,8481} = 0,806$$

$$h_d = h_L + \kappa_d (h_{LV}) = 69,10 + 0,806 \times (1036,6) = 904,1 \text{ BTU/lbm}$$

$$h_e = 69,10 \text{ BTU/lbm} (x=0)$$

Desprezando o trabalho de bomba $\rightarrow h_{e'} = h_e, h_{g'} = h_g$



Do balanço de calor no Aquecedor obtemos:

$$h_{g'} = 0,15 h_f + 0,85 h_e = 0,15 \cdot (282,12) + 0,85 \cdot (69,1)$$

$$h_{g'} = 101,0 \text{ BTU/lbm}$$

Eficiência do ciclo

$$\eta_T = \frac{W_T}{Q_e} \quad \eta_e = \frac{\text{Trabalho líquido saindo}}{\text{Calor total fornecido}}$$

$$\eta_T = \frac{\eta_g \left((h_a - h_b) m_T + (h_c - h_d) 0,85 m_T \right)}{m_T (h_a - h_g)} \quad \eta_g \text{ eficiência gerador elétrico} \quad (3)$$

$$\eta_T = \frac{0,98 \left((1.204,1 - 1.048,4) + (1.183,6 - 904,1)(0,85) \right)}{(1.204,1 - 101,0)} = 0,349$$

$$\text{Trabalho líquido por lbm de vapor} = \frac{\eta_g (m_T (h_a - h_b) + 0,85 m_T (h_c - h_d))}{m_T}$$

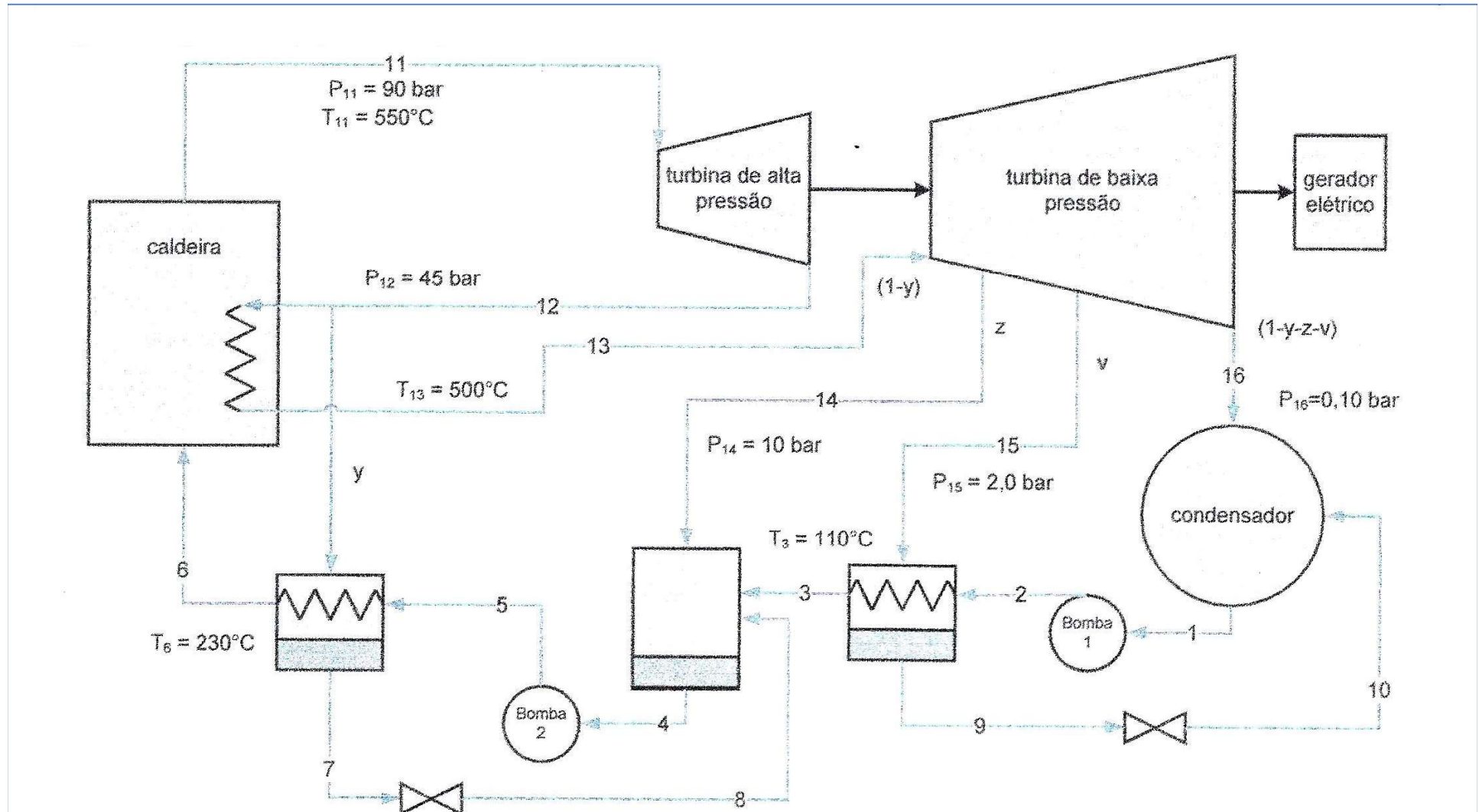
$$W_{\text{liq}} = 385,4 \text{ BTU/lbm vapor}$$

$$1 \text{ kWh} = 3.413 \text{ BTU}$$

$$\text{Vazão de Vapor} \quad m \left(\frac{\text{lbm vapor}}{\text{kWh(e)}} \right) = \frac{3.413 \text{ BTU/kWh}}{W_{\text{liq}}} = \frac{3.413}{385,4}$$

$$m = 8,856 \frac{\text{lbm vapor}}{\text{kWh(e)}}$$

Exercício 2- Çengel



Exercício 2- Cenario

Uma usina de potência a vapor opera no ciclo de Rankine com regeneração com três aquecedores de água de alimentação, conforme desenho esquemático acima. A tabela abaixo apresenta as entalpias (reais) em cada um dos pontos representados no diagrama. A potência elétrica fornecida pelo gerador elétrico acoplado às turbinas é de 100 MW. Considerando a eficiência isentrópica de 85% para as turbinas e bombas, determine:

- as entalpias que estão faltando na tabela (em kJ/kg)
- a vazão de vapor (em kg/h)
- a vazão de combustível que deve ser queimada no gerador de vapor (em kg/h)
- o calor rejeitado no condensador (em kJ/s)
- a eficiência da instalação (real) (%)

Dados: Rendimento do gerador de vapor: 75%
 PCI do combustível: 46.000 kJ/kg

Rendimento do gerador elétrico: 95%
 Rendimento dos motores elétricos: 85%

ponto	Entalpia (kJ/kg)
1	191,8
2	193,0
3	462,0
4	762,9
5	
6	991,3
7	1121,9
8	1121,9
9	504,8
10	504,8
11	3511,0
12	3314,7
13	3439,7
14	3065,2
15	2784,1
16	

a) $h_5=773,5$ kJ/kg $h_{16}=2409,1$ kJ/kg

b) 368.100 kg/h

c) 28100 kg/h

d) 165.100 kJ/s

e) 27,5%

Exercício 3- Série Van Wylen

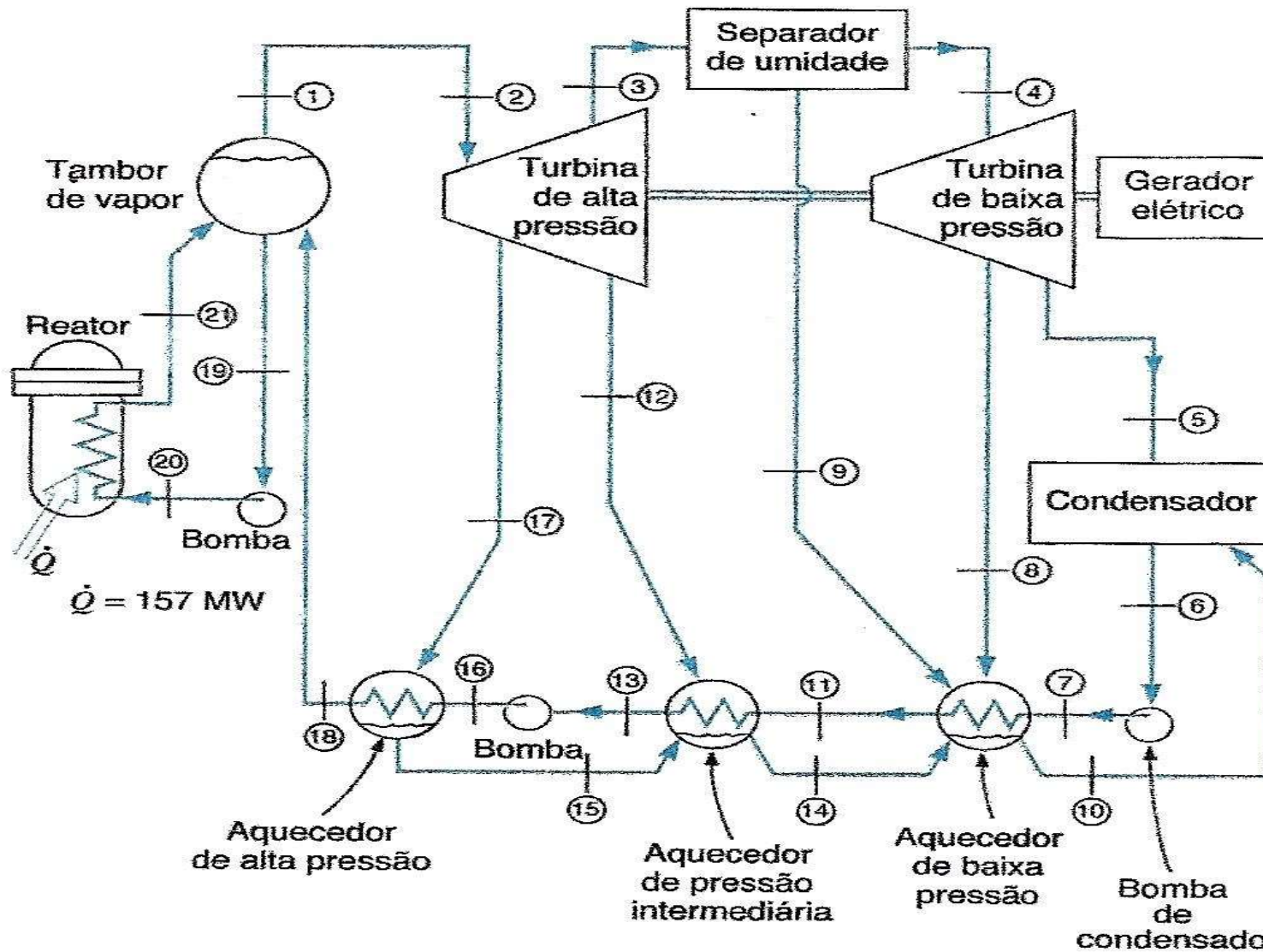


Figura P6.106

Exercício 3- Série Van Wylen

6.106 A Figura P6.106 mostra o diagrama simplificado de uma usina nuclear de potência. A tabela seguinte mostra as vazões mássicas e os estados da água em vários pontos do ciclo.

Ponto	\dot{m} , kg/s	P , kPa	T , °C	h , kJ/kg
1	75,6	7240	vap sat	
2	75,6	6900		2765
3	62,874	345		2517
4		310		
5		7		2279
6	75,6	7	33	138
7		415		140
8	2,772	35		2459
9	4,662	310		558
10		35	34	142
11	75,6	380	68	285
12	8,064	345		2517
13	75,6	330		
14				349
15	4,662	965	139	584
16	75,6	7930		565
17	4,662	965		2593
18	75,6	7580		688
19	1386	7240	277	1220
20	1386	7410		1221
21	1386	7310		

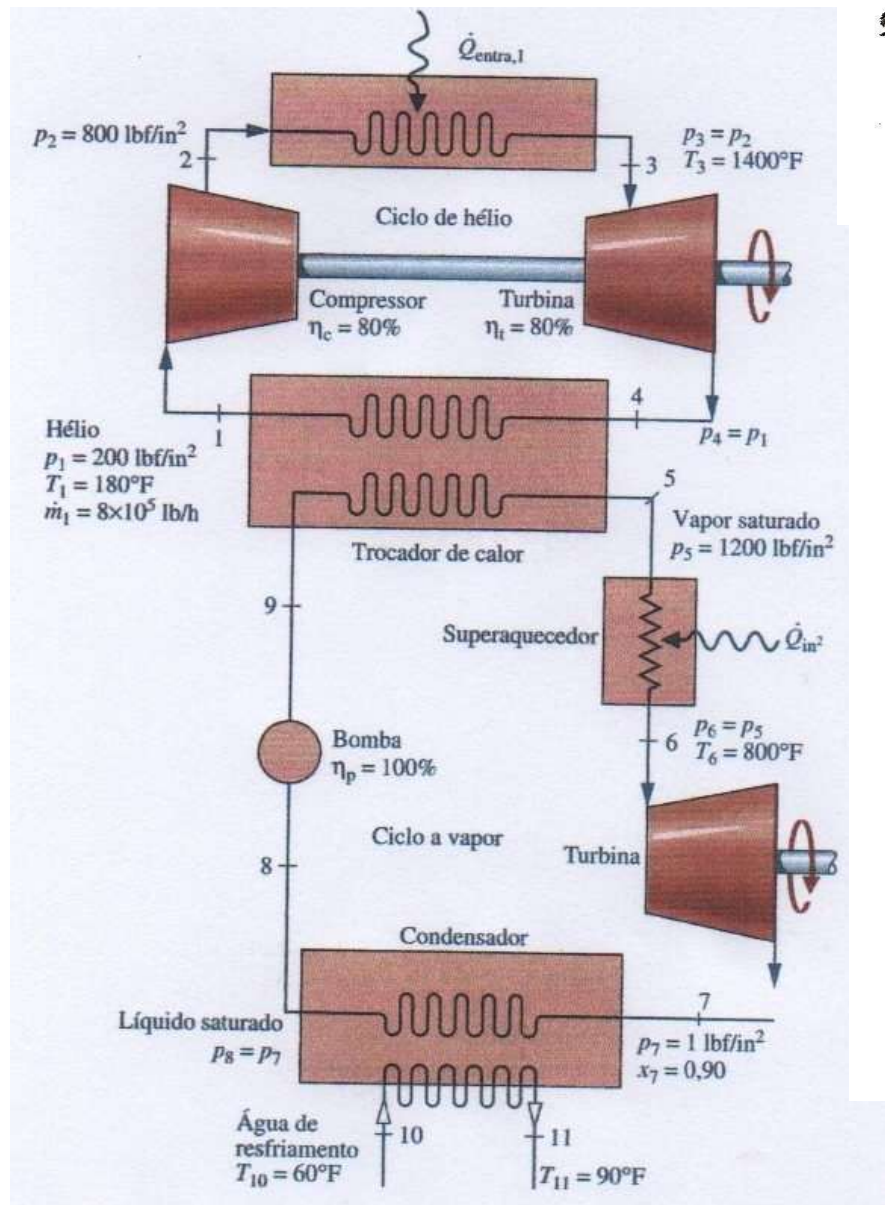
Esse ciclo envolve diversos “aquecedores”, nos quais calor é transferido das correntes de vapor d’água, que saem das turbinas a determinadas pressões intermediárias, para a água na fase líquida, que é bombeada do condensador ao tambor de vapor. A taxa de transferência de calor para a água no reator é igual a 157 MW e pode-se admitir que não haja transferência de calor nas turbinas.

- Admitindo que não haja transferência de calor do separador de umidade, determine a entalpia h_4 e o título x_4 .
- Determine a potência fornecida pela turbina de baixa pressão.
- Determine a potência fornecida pela turbina de alta pressão.
- Qual é a razão entre a potência total fornecida pelas duas turbinas e a taxa de transferência de calor transferida para a água no reator?

6.107 Considere o ciclo de potência descrito no problema anterior.

- Determine o título do vapor que sai do reator.
- Determine a potência necessária para operar a bomba de alimentação do reator.

Exercício 4- Shapiro



9.93 Utiliza-se hélio no ciclo combinado de uma usina de potência como o fluido de trabalho em uma turbina a gás simples e fechada, que é utilizada para o ciclo superior de um ciclo de potência a vapor. Um reator nuclear é a fonte de entrada de energia para o hélio. A Fig. P9.93 fornece dados operacionais em regime permanente. O hélio entra no compressor

da turbina a gás a 200 lbf/in^2 ($1,4 \text{ MPa}$) e 180°F ($82,2^\circ\text{C}$), apresentando uma vazão mássica de $8 \times 10^5 \text{ lb/h}$ ($100,8 \text{ kg/s}$), e é comprimido para 800 lbf/in^2 ($5,5 \text{ MPa}$). A eficiência isentrópica do compressor é de 80%. O hélio então passa pelo reator com uma perda de carga desprezível, saindo a 1400°F ($760,0^\circ\text{C}$). Em seguida, o hélio se expande para uma pressão de 200 lbf/in^2 ao longo da turbina com uma eficiência isentrópica de 80%. Então, o hélio passa pelo trocador de calor interconectado. Um fluxo distinto de água líquida entra no trocador de calor e sai como vapor saturado a 1200 lbf/in^2 ($8,3 \text{ MPa}$). O vapor é superaquecido para 800°F ($426,7^\circ\text{C}$), 1200 lbf/in^2 , antes de entrar na turbina. O vapor se expande ao longo da turbina para 1 lbf/in^2 ($6,9 \text{ kPa}$) e um título de 0,9. Na saída do condensador tem-se líquido saturado a 1 lbf/in^2 . A água de resfriamento que atravessa o condensador sofre um aumento de temperatura de 60 para 90°F ($15,6$ para $32,2^\circ\text{C}$). A eficiência isentrópica da bomba é 100%. Os efeitos relativos à perda de calor e às energias cinética e potencial podem ser ignorados. Determine

- as vazões mássicas do vapor e da água de resfriamento, ambas em lb/h.
- a potência líquida desenvolvida pelos ciclos de turbina a gás e a vapor, todos em Btu/h.
- a eficiência térmica do ciclo combinado.

FIM 4ª AULA

até semana que vem se cuidem

