

Modelos dinâmicos para análise de estabilidade eletromecânica

1. Turbinas

I. Térmica (Vapor)

Turbina a Vapor (TV)

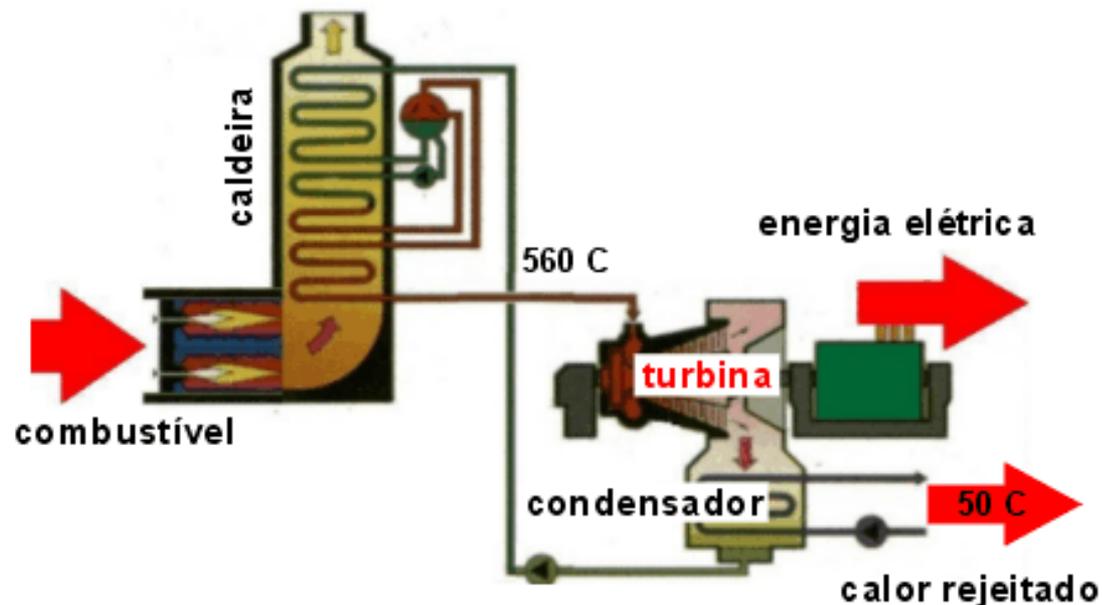
- Máquina a vapor: 1776 (motor a vapor, *steam engine*) – século XVIII, Inglaterra, James Watt, 1ª Revolução Industrial.
 - Pressão do vapor levemente superior à pressão atmosférica.
- Turbina a vapor: 1884 (*steam turbine*) – século XIX, Inglaterra, Charles Parsons, 2ª Revolução Industrial.
 - Vapor em altas pressões e temperaturas.
- Extrema relevância no contexto de geração de energia elétrica: mais de 90% da energia elétrica gerada no mundo é proveniente de turbinas a vapor: usinas a óleo, carvão, nucleares, biomassa (bagaço de cana) ([2]).
- Não confundir com turbinas a gás, utilizadas em algumas usinas supridas por gás natural (proveniente do petróleo, combustível fóssil).
- Turbinas a vapor são utilizadas também em outras aplicações industriais e de transportes que não envolvem necessariamente a geração de energia elétrica: bombas, centrífugas, moendas, locomotivas ferroviárias, navios, submarinos, etc.
- Turbinas a vapor: existem na faixa que vai das centenas de W até próximo aos 2 GW.

TV – combustíveis

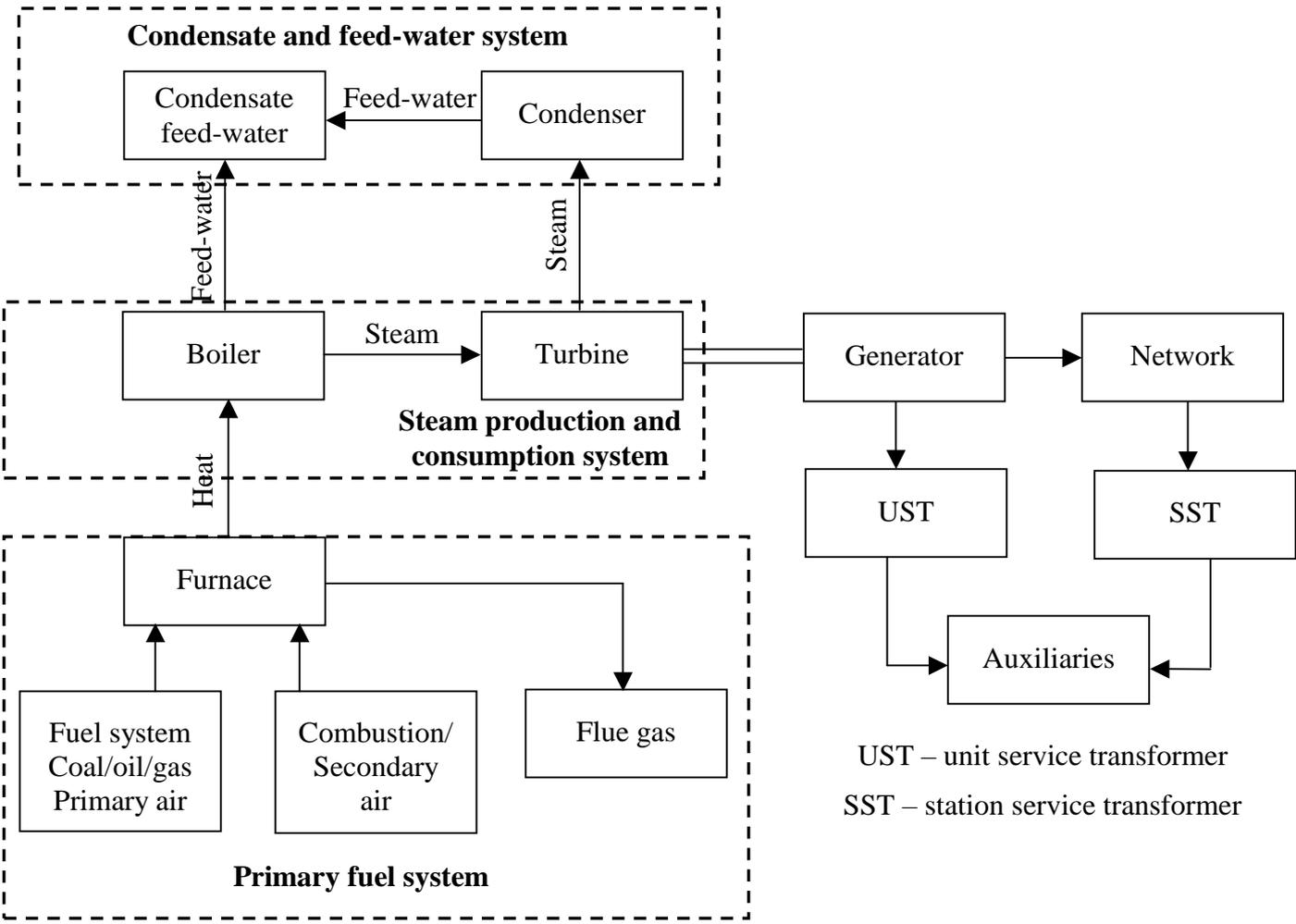
- Máquinas termodinâmicas (ou máquinas térmicas): utilizam um **ciclo termodinâmico** de um **fluido de trabalho** para extrair energia (química, nuclear) de um combustível e convertê-la em trabalho mecânico (no caso de geração de energia elétrica, convertê-la em torque/potência em um eixo mecânico rotacional).
- As turbinas a vapor são máquinas termodinâmicas de **combustão externa**: os gases resultantes da queima do combustível não entram em contato com o fluido de trabalho que escoar no interior da máquina e realiza os processos de conversão da energia do combustível em potência de eixo.
- Máquinas termodinâmicas nas quais os gases resultantes da queima do combustível entram em contato com o fluido de trabalho são ditas de **combustão interna** (motor do carro, turbina a gás, turbina de aviões a jato, etc.)
- Portanto, apresentam **flexibilidade em relação ao combustível** a ser utilizado:
 - podem utilizar combustíveis que produzem resíduos sólidos (cinzas) durante a queima, como carvão mineral, bagaço de cana, óleo diesel, visto que esse material não entrará em contato com as partes móveis da turbina;
 - Podem utilizar combustíveis que devam permanecer confinados, como no caso de reatores nucleares.
- Embora sejam flexíveis quanto ao tipo de combustível a ser queimado, apresentam menos flexibilidade operativa do ponto de vista de acompanhamento de curva de carga, intermitência de operação, etc. São máquinas lentas (processos termodinâmicos lentos, transporte de fluídos, etc). O ideal é que as variações de carga sejam lentas, o mais próximo possível de um perfil plano de carga. O processo de produção/interrupção de vapor é caro e lento.
- Uso de tanques pulmão (câmaras que operam como reservatório de vapor) para melhorar a resposta dinâmica de curto prazo do sistema de geração termoelétrica.

TV – princípio de funcionamento

- Fluido de trabalho do ciclo térmico: vapor/condensado (H_2O na fase gasosa/líquida);
- Caldeira (*boiler, furnace*): queima de combustível na caldeira aquece o fluido de trabalho que circula em serpentinas (trocadoras de calor) que atravessam o interior da caldeira. O fluido de trabalho em alta pressão ao ser aquecido muda de fase, transformando-se em vapor de elevada temperatura e pressão;
- Turbina (turbine): O vapor em alta temperatura e pressão é injetado na turbina propriamente dita. Trata-se de uma câmara hermética cujo interior é formado por diversos conjuntos de lâminas (*blades, buckets*) de tamanhos e perfis variados, rigidamente acopladas ao rotor ou ao estator da turbina. O vapor se expande no interior da turbina, transferindo energia para o rotor seja por impulso ou por reação. Ao se expandir, a temperatura e a pressão do fluido de trabalho são reduzidas até que o resultante seja expelido para o condensador. A quantidade de vapor que é injetada na turbina está relacionada à velocidade/potência do rotor, que é acoplado ao eixo de uma máquina síncrona atuando como gerador.
- Condensador (condenser): o fluido de trabalho ao sair da turbina deve ser condensado (transformação de fase gasosa para líquida) para que seja mais facilmente bombeado de volta para a caldeira.
- Bomba (pump): o condensado deve ser bombeado da saída do condensador onde encontra-se em baixa pressão para a caldeira, onde encontra-se sob alta pressão.

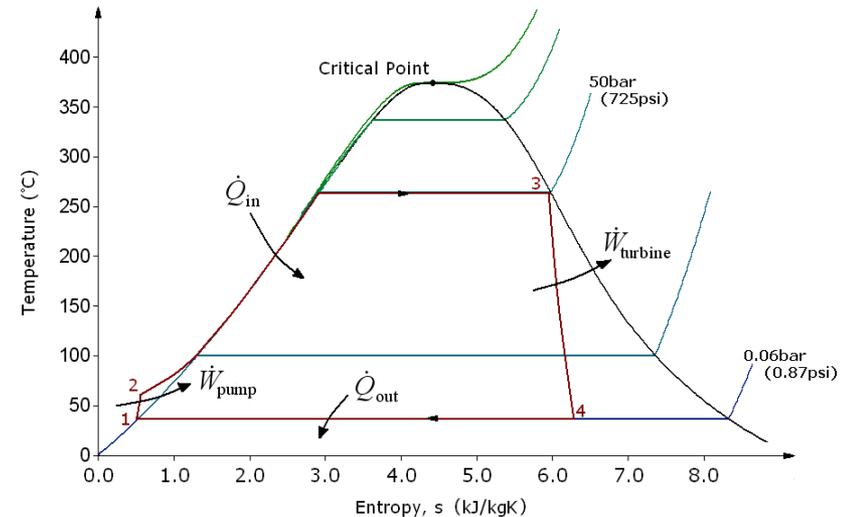
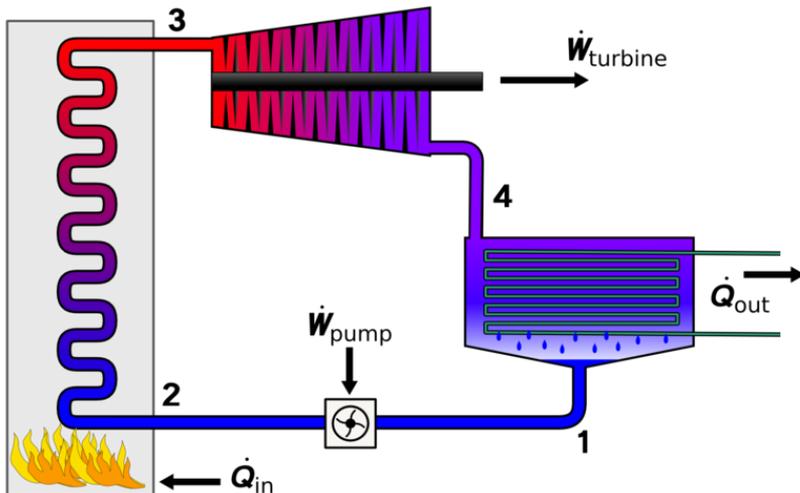
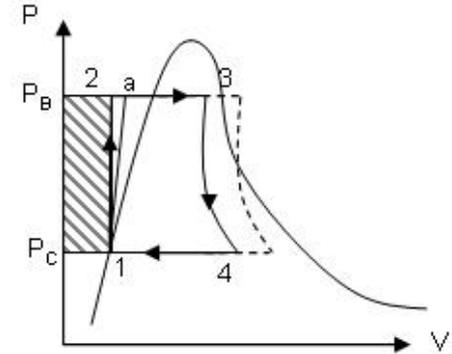


TV - subsistemas



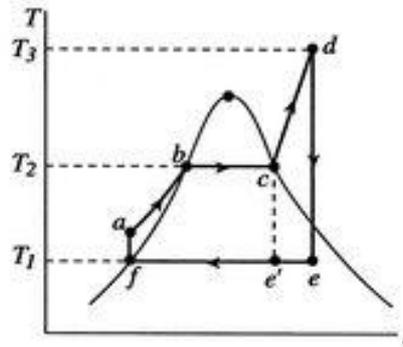
TV – ciclo termodinâmico: ciclo Rankine (básico)

- O ciclo termodinâmico das turbinas a vapor é o ciclo de Rankine, no qual há 4 processos:
- **Processo 1-2:** O fluido de trabalho é bombeado de baixa pressão para alta pressão. Como neste estágio o fluido de trabalho é líquido, o bombeamento requer pouca energia (tipicamente a bomba consome de 1 a 3% da potência da turbina).
- **Processo 2-3:** O fluido de trabalho líquido e em alta pressão entra na caldeira onde é esquentado a pressão constante, tornando-se vapor saturado (superaquecido).
- **Processo 3-4:** O fluido de trabalho agora em sua fase de vapor saturado (superaquecido) expande através dos estágios da turbina, gerando trabalho mecânico enquanto reduz sua temperatura e pressão. Pode ocorrer alguma condensação do fluido de trabalho
- **Processo 4-1:** O vapor úmido sai da turbina e passa pelo condensador, onde troca calor e condensa (torna-se líquido) em um processo isobárico. O fluido de trabalho condensado (líquido) é em seguida bombeado no Processo 1-2 fechando o ciclo.
- Ciclo de Rankine ideal: 1-2 (bomba) e 3-4 (turbina) são isentrópicos, mais próximos do ciclo de Carnot. 2-3 e 4-1 são isobáricos.
- Rendimento do ciclo de Carnot (teórico): $1 - T_F/T_Q = 1 - (30 + 273)/(565 + 273) \sim 63\%$.
- Ciclo de Rankine real (turbinas reais): rendimento menor que 63%.



TV – ciclo termodinâmico: ciclo Rankine (melhorado)

- O rendimento do ciclo de Rankine básico pode ser melhorado através de processos de superaquecimento e reaquecimento:

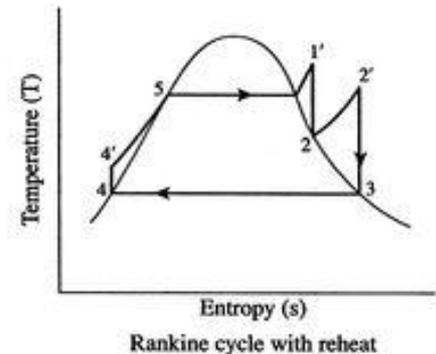
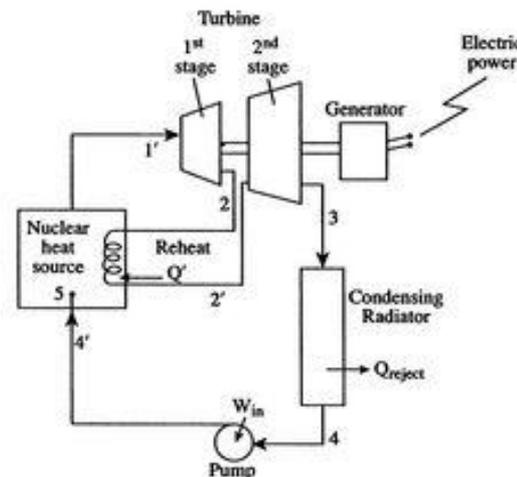


- cd** → **superaquecimento**

Conforme o fluido expande no interior da turbina, ele vai condensando e deixa o estado de vapor superaquecido (apenas gasoso) e atravessa os estados de vapor saturado (líquido) e passa a ser uma mistura de vapor + gotículas de água (gasoso + líquido). Pequenas gotículas de água colidindo em alta velocidade com as lâminas da turbina podem danificá-la. Com o superaquecimento, além da melhoria do rendimento, o fluido passa pela turbina na forma de vapor superaquecido (apenas gasoso), evitando o impacto das gotículas de água, preservando as lâminas da turbina.

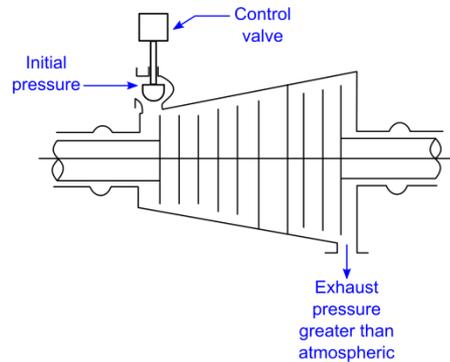
- 22'** → **reaquecimento**

Outra forma de melhorar a qualidade do vapor durante a(s) expansão(ões) nos estágios de pressão da turbina bem como o rendimento do ciclo é com o processo de reaquecimento. Após sair de um estágio de maior pressão, o fluido é reaquecido na caldeira antes de ser injetado no estágio seguinte de menor pressão. Pode haver reaquecimento entre um ou mais estágios de pressão da turbina.

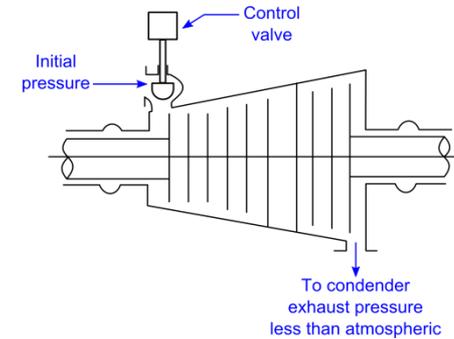


TV – tipos

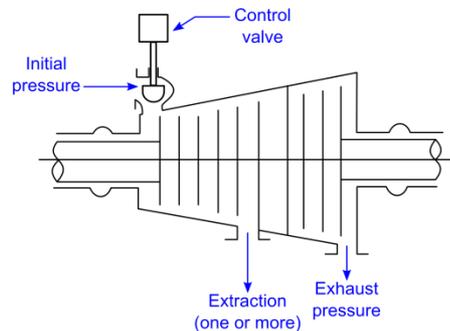
- A forma como o vapor é injetado/exaurido da turbina definem seus diversos tipos:



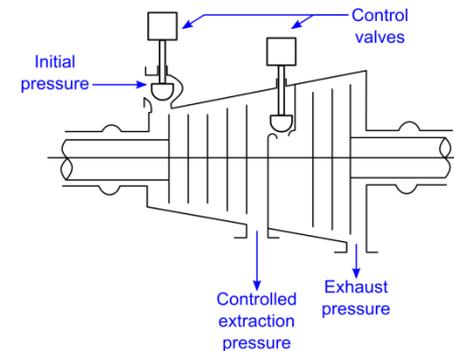
Turbina de contra pressão : todo o vapor é exaurido na mesma pressão, a qual é maior ou igual a pressão atmosférica.



Turbina de condensação simples: todo o vapor é exaurido na mesma pressão, a qual é menor que a pressão atmosférica.



Turbina de contra-pressão ou condensação com extração: o vapor é extraído em um ou mais estágios sem controle.



Turbina de contra-pressão ou condensação com extração controlada: o vapor é extraído em um ou mais estágios com controle.

TV – tipos

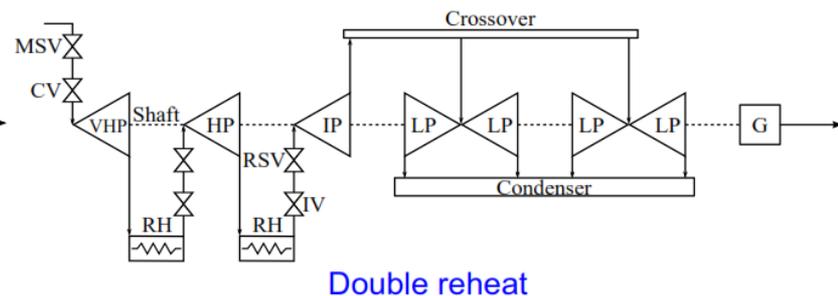
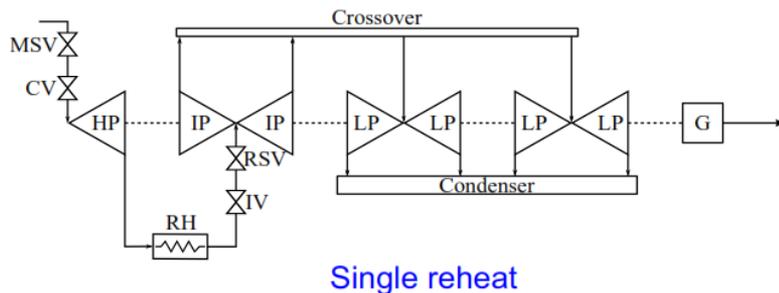
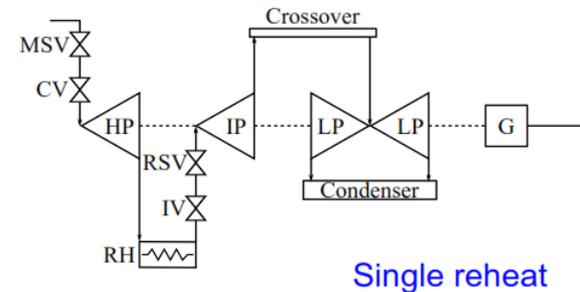
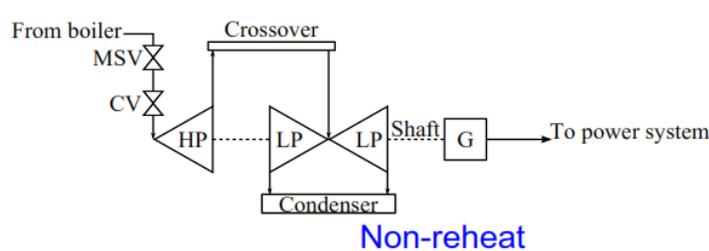
- **Contra pressão:** O vapor expandido na turbina sai acima da pressão atmosférica e é utilizado no processo;
- **Condensação:** O vapor sai abaixo da pressão atmosférica e condensa em equipamentos a vácuo;
- **Extração (*pass out*):** Parte do vapor deixa a turbina entre a entrada e a saída, onde um conjunto de válvulas regula o fluxo para a seção de exaustão, mantendo a extração na pressão requerida pelo processo. Pode ser configurada tanto em turbinas de contra-pressão ou de condensação;
- **Pressão mista (*pass in*):** Além do vapor de alta pressão, utiliza vapor de menor pressão entrando na parte baixa da turbina. Usada com caldeiras de dupla pressão, ou plantas combinadas com turbinas a gás ou motores a diesel.

TV – estágios de pressão

- Conforme o vapor se expande no interior da turbina, sua pressão vai sendo reduzida.
- Turbinas a vapor para geração de energia elétrica possuem vários estágios de pressão, com tamanhos e perfil de palhetas apropriadamente projetados para que a extração de energia do fluido de trabalho seja otimizada ao longo da expansão do vapor:

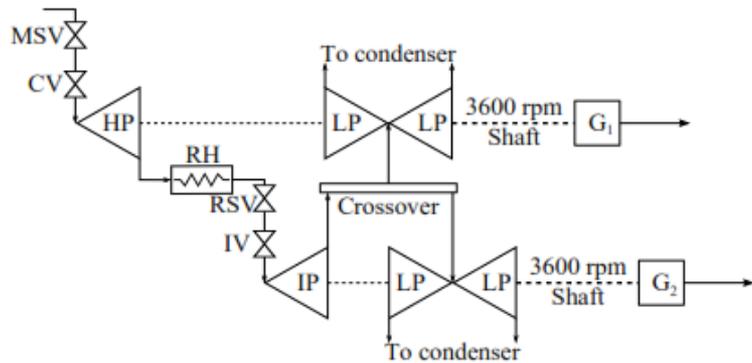
ALTA PRESSÃO (HP) → MÉDIA PRESSÃO (IP) → BAIXA PRESSÃO (LP)

- Além disso, entre um estágio e outro pode haver reaquecimento de vapor para melhorar o desempenho do ciclo térmico.

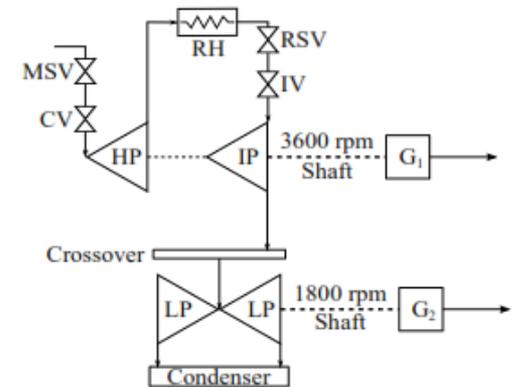


TV – múltiplos eixos

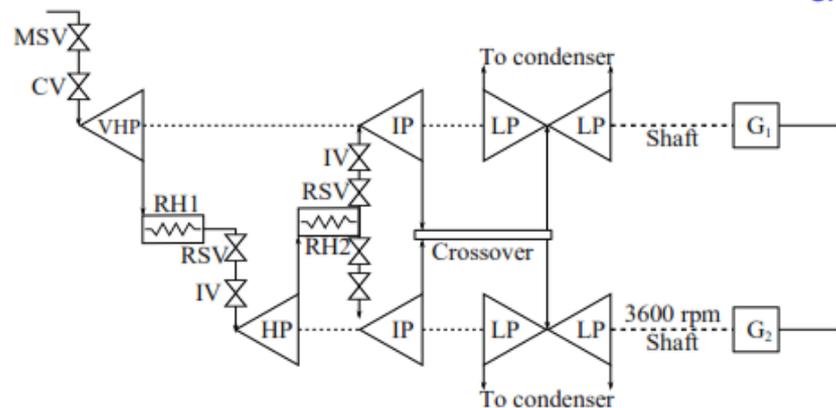
- Há ainda a possibilidade de utilização de múltiplos eixos, com turbinas de vários níveis de pressão de vapor.



Single reheat, 3600/3600 rpm shaft speeds



Single reheat, 3600/1800 rpm shaft speeds



Double reheat, 3600/3600 rpm shaft speeds

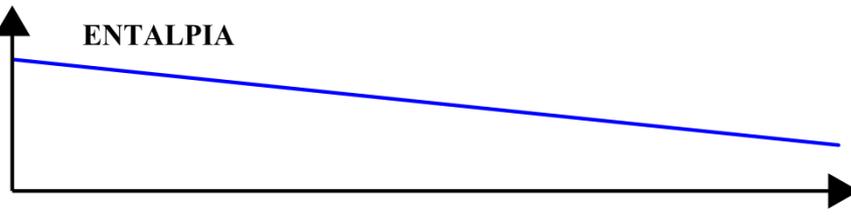
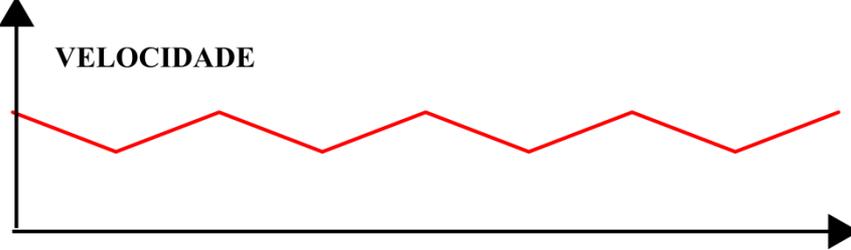
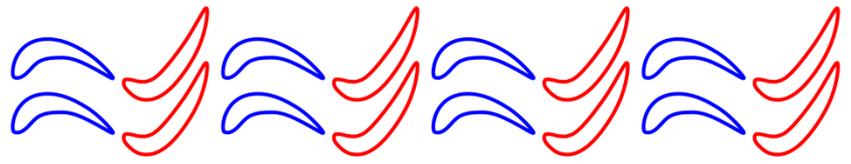
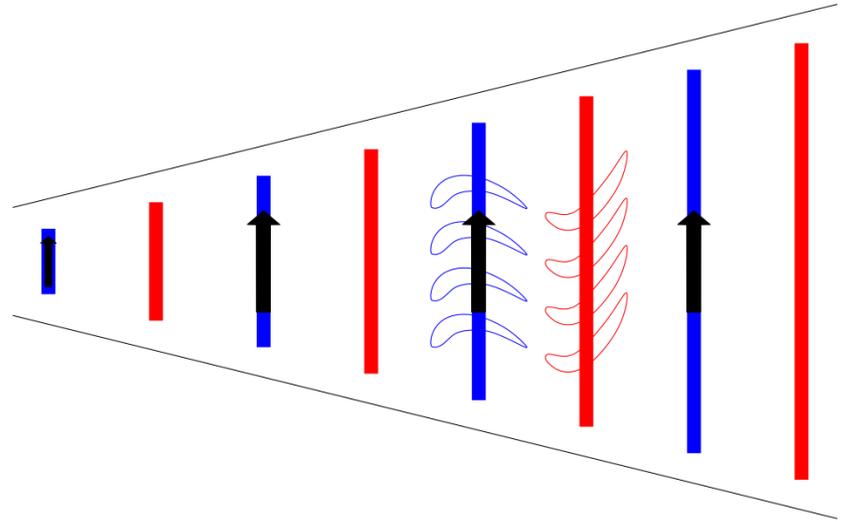
TV – energia do fluido

- Grosso modo, existem 3 tipos principais de energia em um fluido (mecânica dos fluidos clássica, Princípio de Bernoulli):
 - Energia cinética (deslocamento resultante do fluido, vazão).
 - Energia potencial (sobretudo campo gravitacional).
 - Energia “interna” → entalpia → temperatura e pressão.
- Na expansão do fluido pela turbina a vapor **não há**:
 - Variação significativa de potencial gravitacional (a tomada de vapor e a exaustão ocorrem tipicamente no mesmo nível).
 - Variação significativa de velocidade na entrada e na saída da turbina (embora haja variação ao longo da expansão como veremos a seguir).
- No balanço entre a entrada e a saída da turbina, a transferência de energia do fluido para o rotor ocorre devido a redução da entalpia (energia interna) do fluido: pressão e temperatura são reduzidas.
- Da 1ª lei da termodinâmica, a variação da entalpia (pressão e temperatura) do vapor entre a entrada e a saída da turbina é o trabalho que o fluido transfere para o eixo.

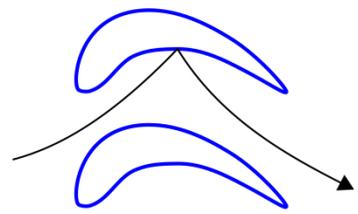
TV – conversão de energia do fluido em trabalho mecânico

- As lâminas da turbina a vapor são instaladas em discos.
- Cada estágio de pressão da turbina é composto por conjuntos alternados de discos móveis e estacionários:
 - Lâminas dos discos móveis (rotor): *buckets*
 - Lâminas dos discos estacionários (estator): *nozzle*
- Nas lâminas do rotor, o fluxo de vapor através do perfil aerodinâmico das palhetas cria uma região de alta pressão em uma face e uma região de baixa pressão na outra face, dando origem a uma força de sustentação aerodinâmica que impele um torque ao eixo da turbina livre pra girar.
- Durante a expansão do vapor pelo perfil aerodinâmico das palhetas móveis ocorre transferência de energia do fluido (cinética-velocidade e entalpia-pressão/temperatura) para o rotor. A velocidade e a entalpia do vapor após atravessar essas palhetas móveis é menor que na entrada.
- Em seguida, o fluido atravessa um conjunto de lâminas estacionárias (*nozzle*). Não ocorre transferência de energia do fluido para o rotor, porém no *nozzle* parte da energia interna do fluido (entalpia) é transformada em energia cinética e o vapor ganha velocidade novamente.

TV – conversão de energia do fluido em trabalho mecânico



100% IMPULSO



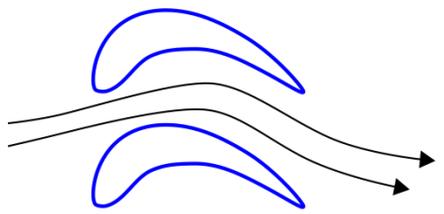
velocidade 1 ≠ velocidade 2

pressão 1 = pressão 2

temperatura 1 = temperatura 2

entalpia 1 = entalpia 2

100% REAÇÃO



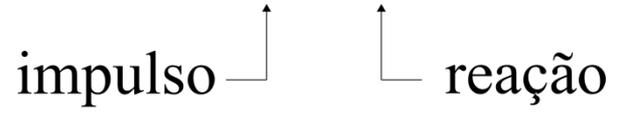
velocidade 1 = velocidade 2

pressão 1 ≠ pressão 2

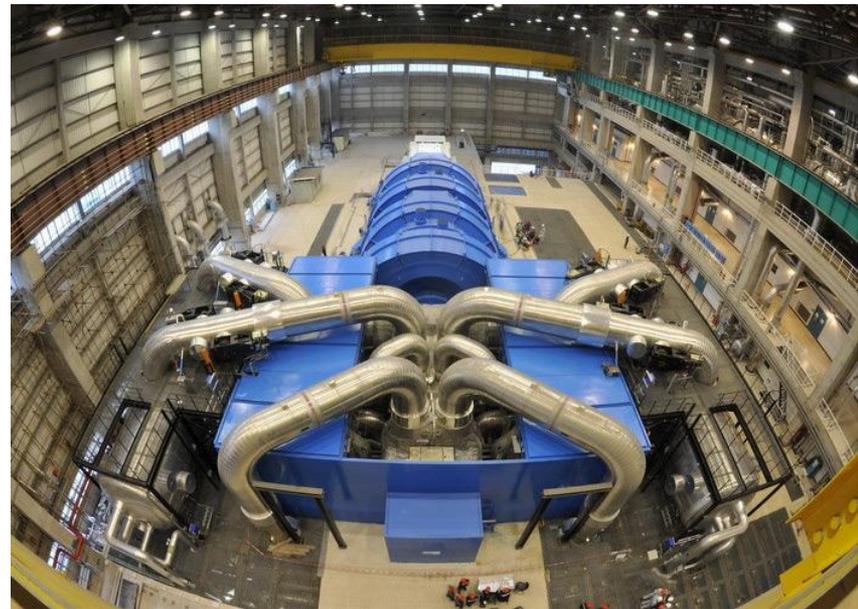
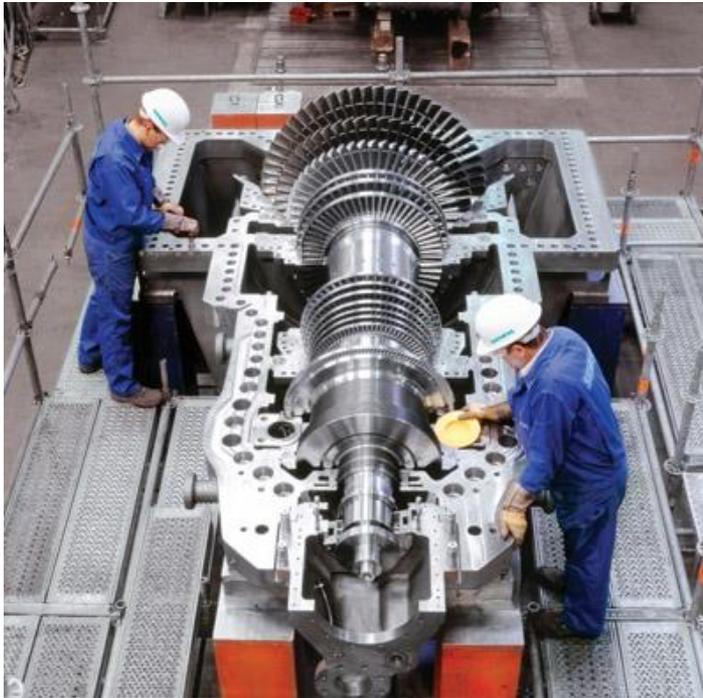
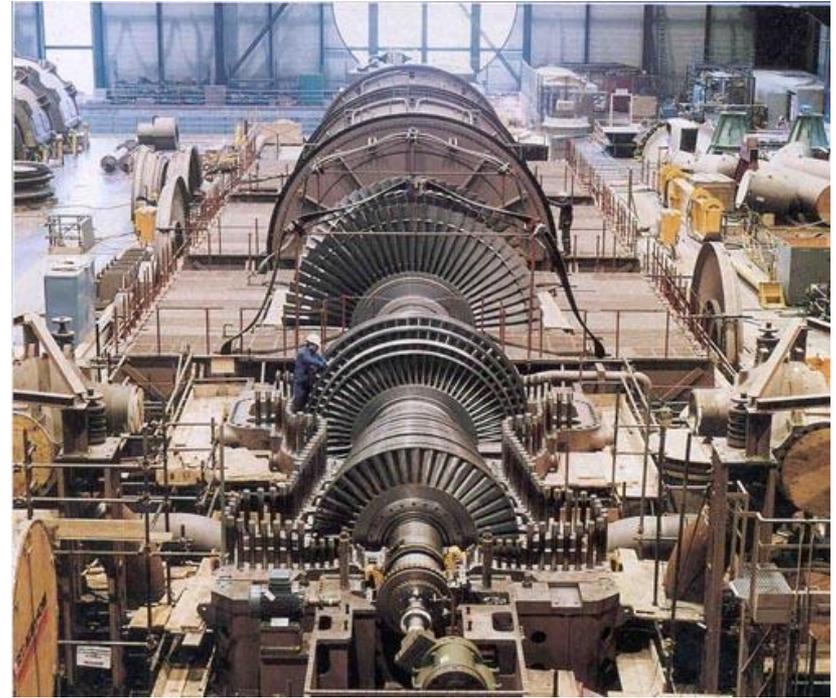
temperatura 1 ≠ temperatura 2

entalpia 1 ≠ entalpia 2

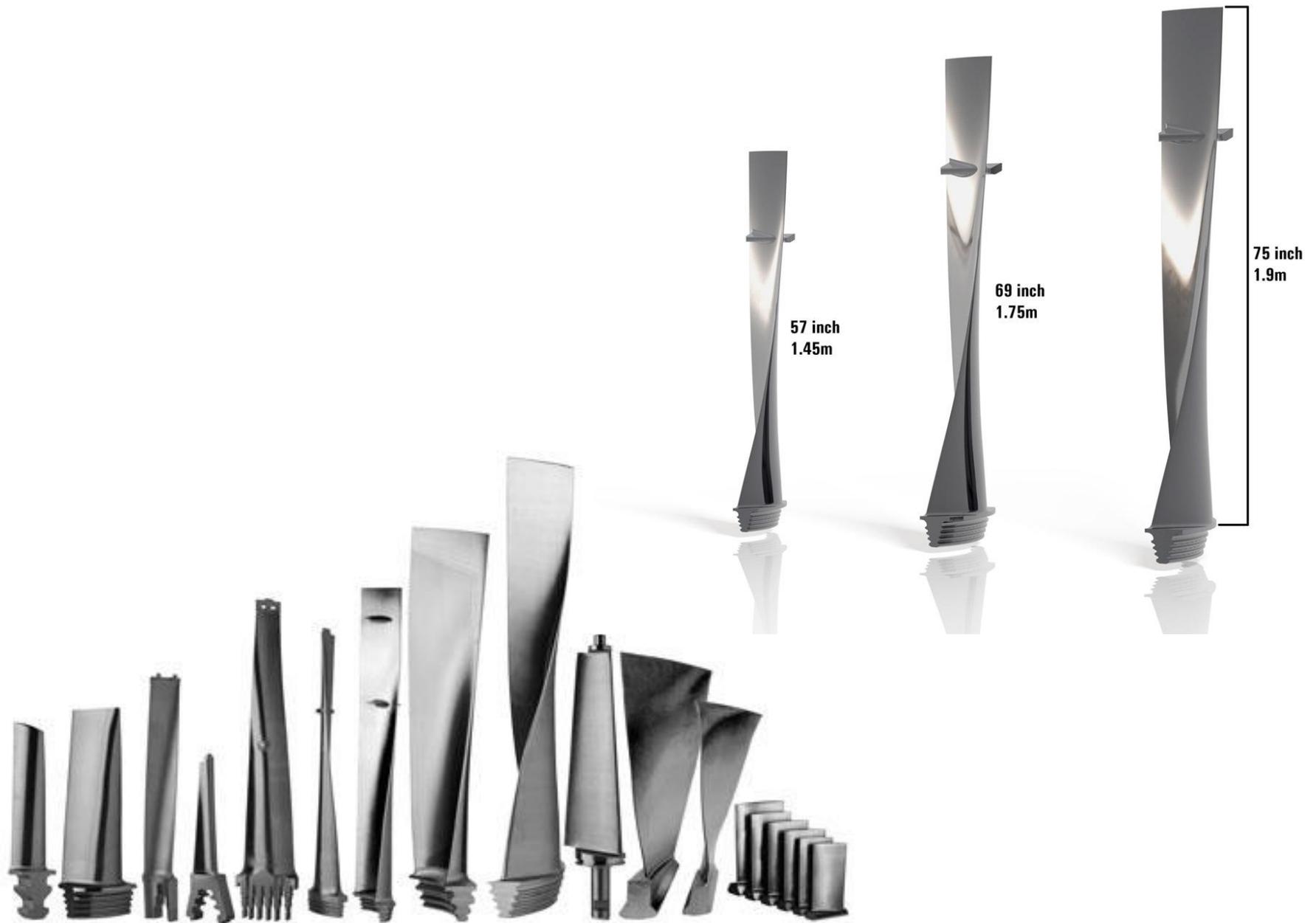
$$\text{Energia Transferida} = \Delta K + \Delta H$$



TV – fotos

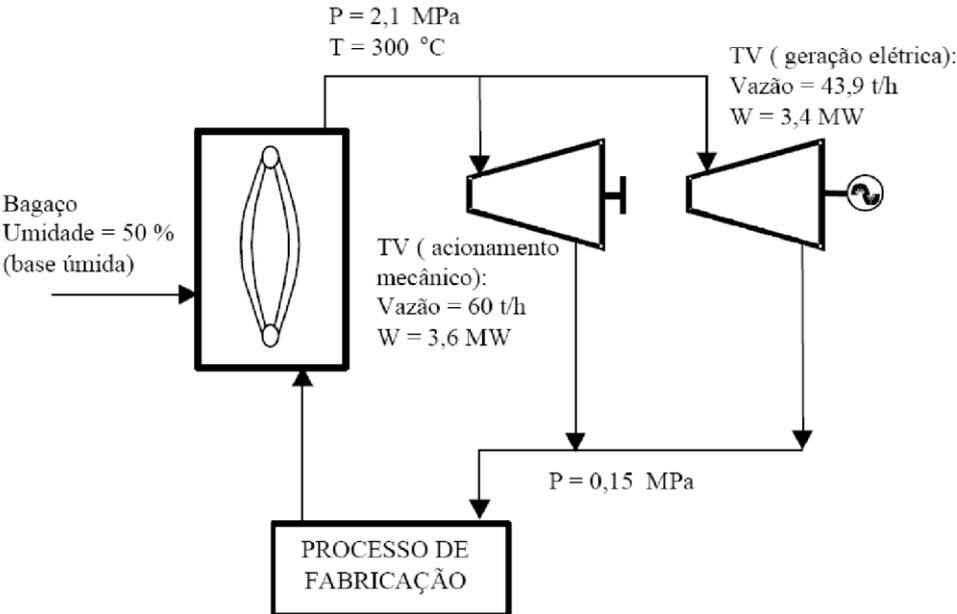


TV – fotos (lâminas)

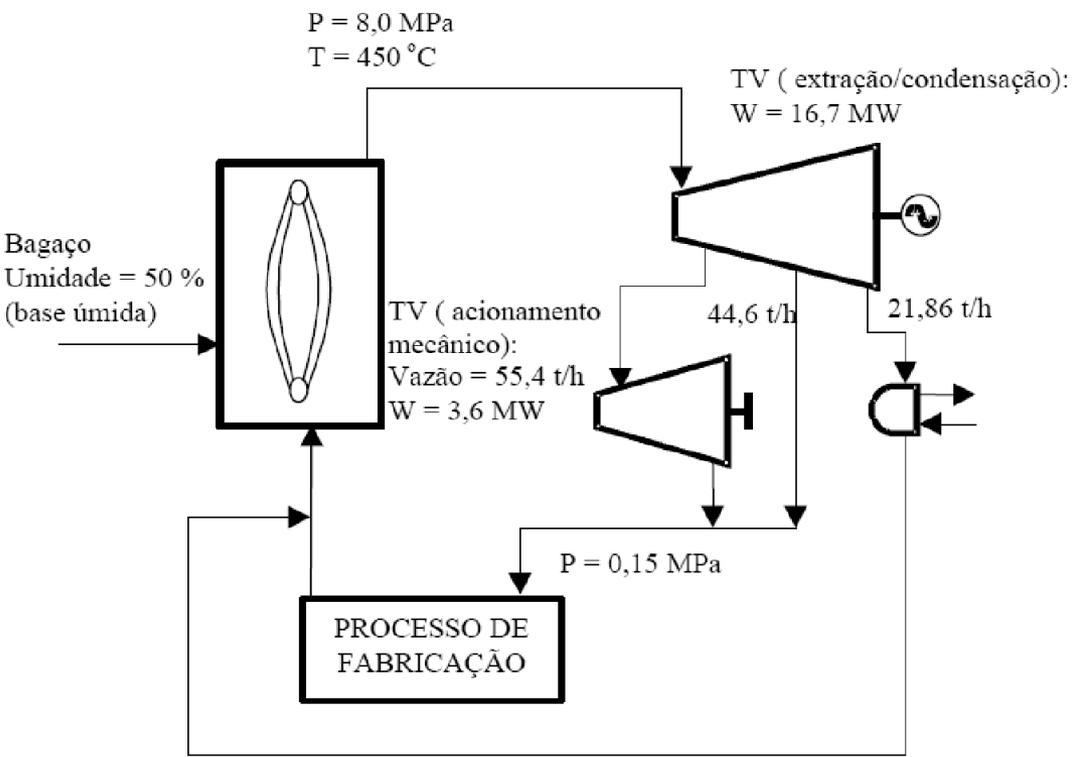


TV – Bagaço de Cana (biomassa)

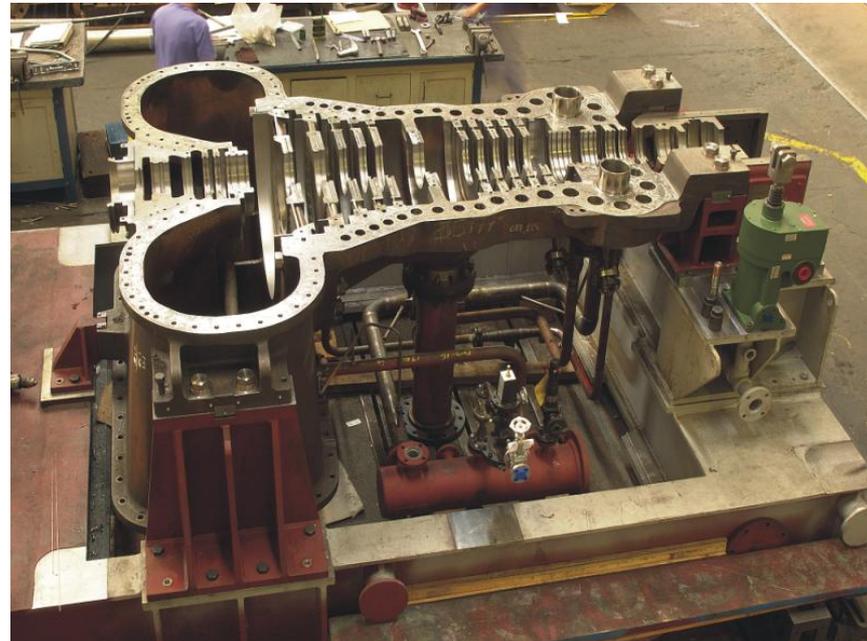
contra-pressão



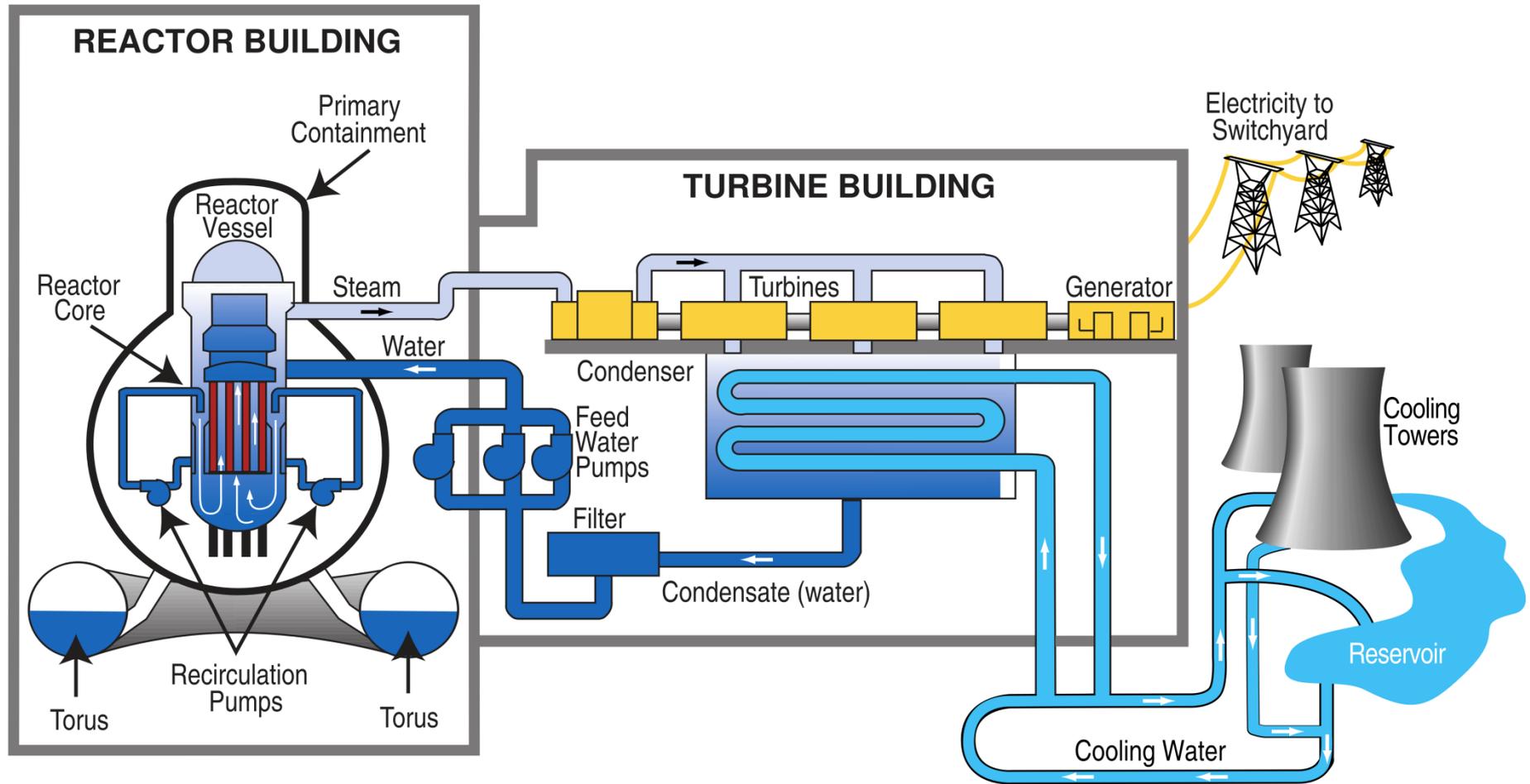
condensação



TV – Bagaço de Cana (biomassa)

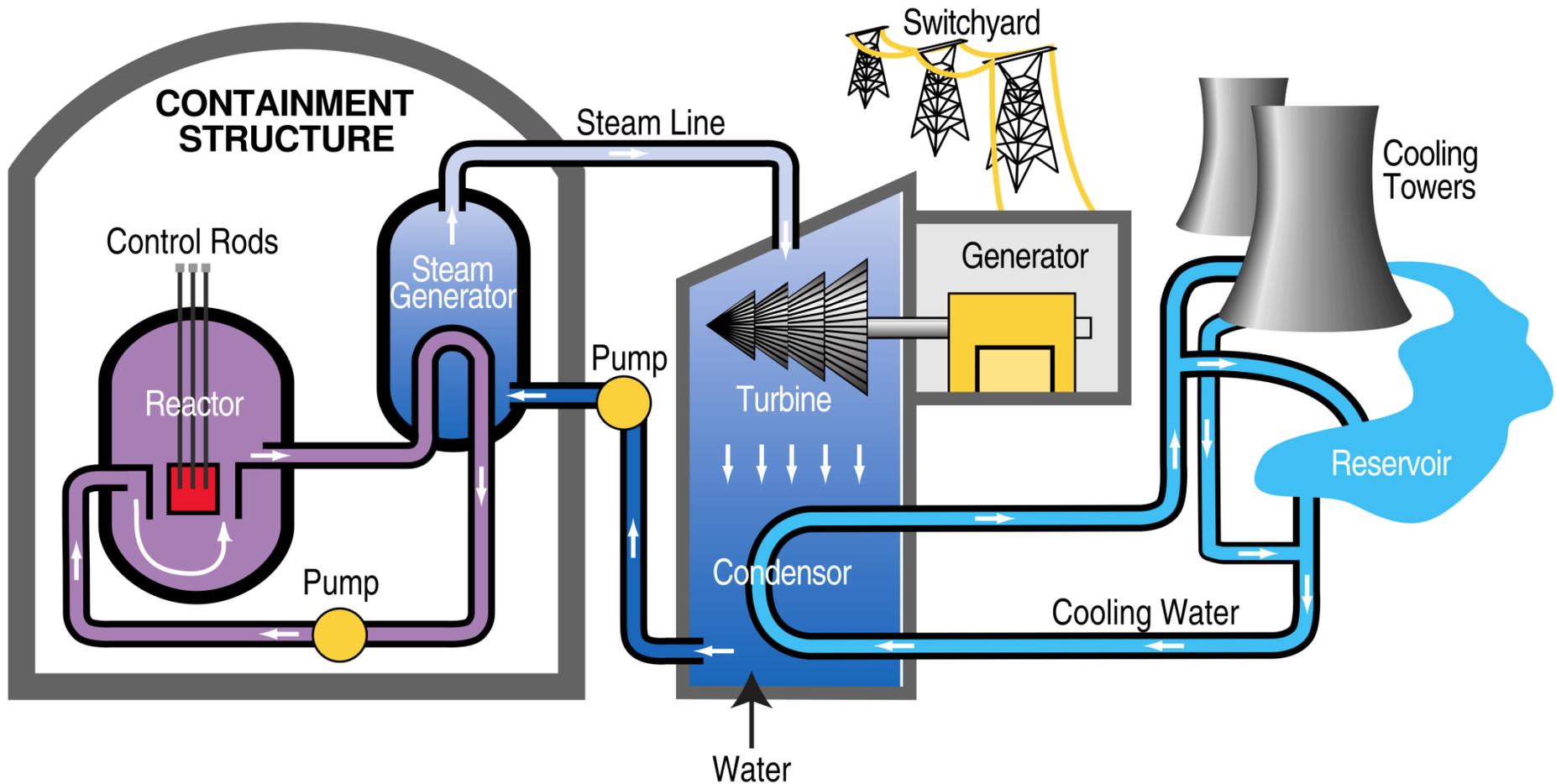


TV – Reatores Nucleares: BWR (Boiling Water Reactor)



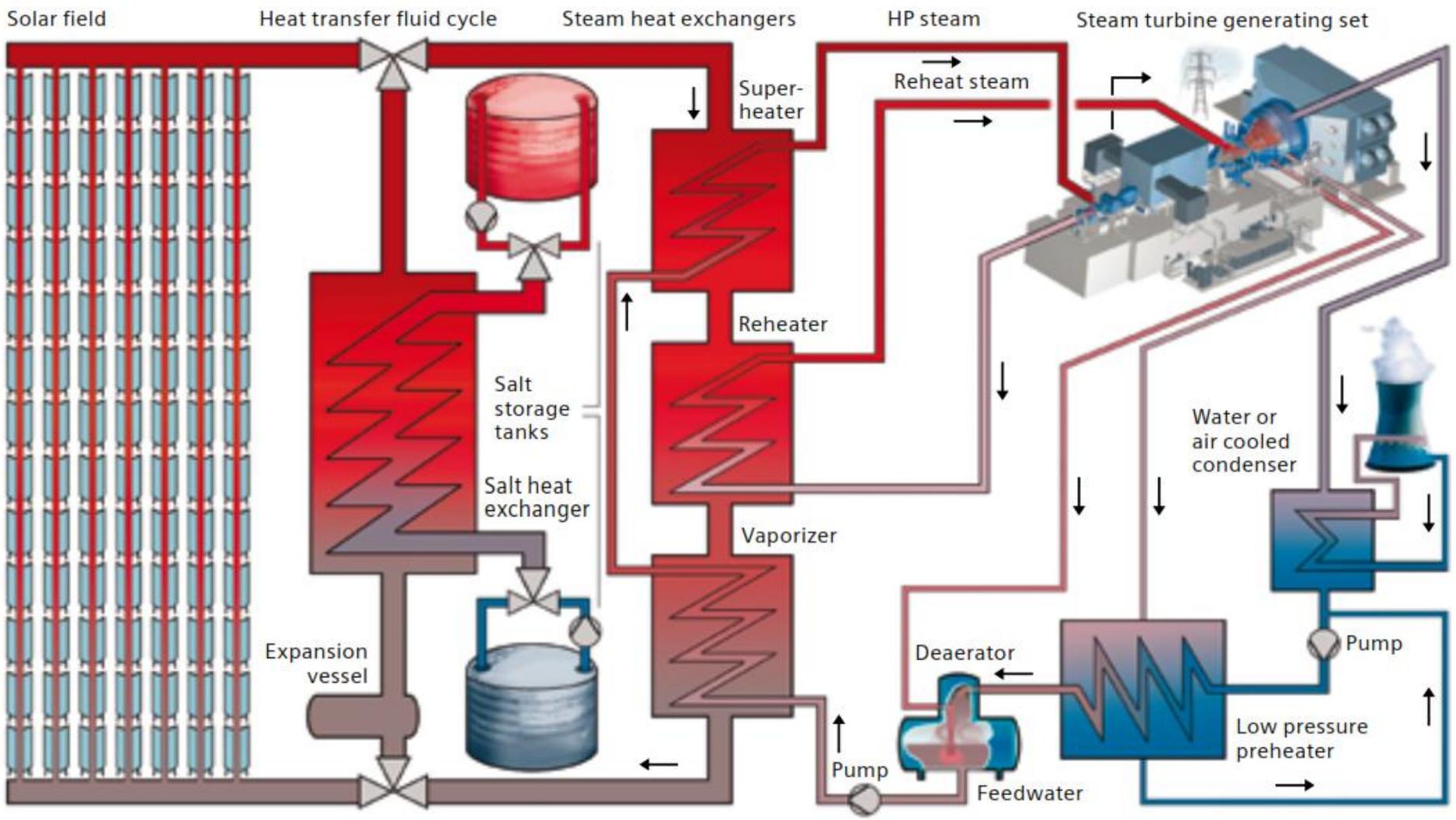
- tecnologia mais antiga (e mais perigosa do ponto de vista de acidentes – 2 circuitos de água/vapor)

TV – Reatores Nucleares: PWR (Pressurized Water Reactor)



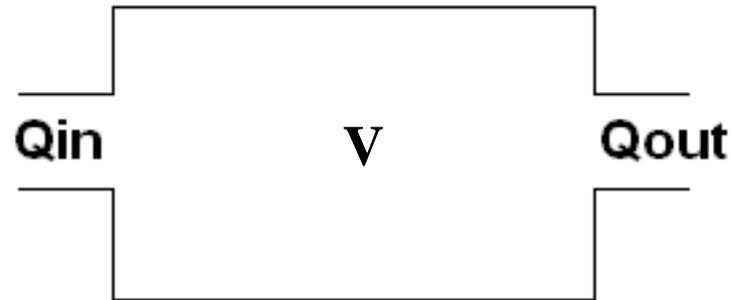
- tecnologia mais moderna (e mais segura do ponto de vista de acidentes – 3 circuitos de água/vapor)

TV – Usina termosolar



TV – modelagem

- Função de transferência de um recipiente de volume fixo cheio de vapor a uma dada pressão e temperatura:



- O balanço de massa para esse recipiente é dado por:

$$\frac{dW}{dt} = V \frac{d\rho}{dt} = Q_{in} - Q_{out}$$

- $W = V \cdot \rho \rightarrow$ é a massa total de vapor no recipiente (kg)
- $V \rightarrow$ volume da câmara (m³)
- $\rho \rightarrow$ densidade do vapor (kg/m³)
- $Q \rightarrow$ vazão de vapor (kg/s)
- $t \rightarrow$ tempo (s)

TV – modelagem

- Supondo que a vazão Q_{out} no recipiente é proporcional à pressão P , tem-se:

$$Q_{\text{out}} = \left(\frac{Q_0}{P_0} \right) \cdot P$$

- $P_0, Q_0 \rightarrow$ pressão e vazão nominais
- Supondo temperatura T constante no recipiente, tem-se:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{dP}{dt} \cdot \frac{d\rho}{dP}$$

- A taxa de variação da densidade com a pressão é uma propriedade tabelada.

TV – modelagem

- Com isso, pode-se escrever a equação anterior como:

$$Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} = V \frac{d\rho}{dt} = V \frac{dP}{dt} \frac{d\rho}{dP} = V \frac{d\rho}{dP} \frac{d}{dt} \left(\frac{P_0}{Q_0} Q_{\text{out}} \right) = \left(V \frac{P_0}{Q_0} \frac{d\rho}{dP} \right) \frac{dQ_{\text{out}}}{dt}$$

- $T_V = V \frac{P_0}{Q_0} \frac{d\rho}{dP}$ é a constante de tempo do tanque de vapor.

$$T_V \frac{dQ_{\text{out}}}{dt} + Q_{\text{out}} = Q_{\text{in}}$$

$$\frac{\Delta q_{\text{out}}}{\Delta q_{\text{in}}}(s) = \frac{1}{T_V s + 1}$$

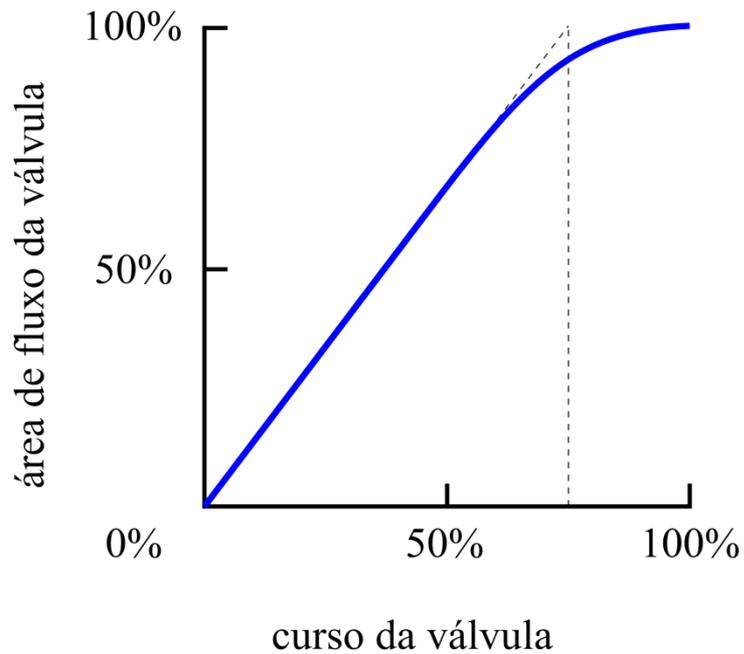
$$T_m = k \cdot q$$

- RESULTADO:** uma variação de vazão na entrada não é instantaneamente transferida para a saída do tanque.
- Ou seja, a transferência de calor dentro da caldeira, tubulações, turbinas, reaquecedores, etc, envolve atrasos de tempo associados ao ciclo térmico do vapor.

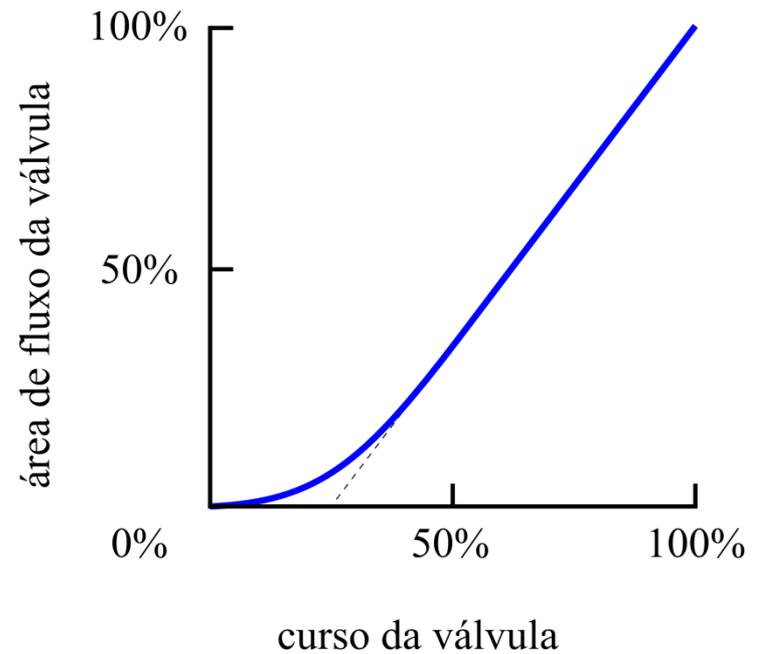
TV – válvulas

- Válvula: dispositivo de controle de fluxo/vazão.
- Em sistemas de geração termoelétricos há uma grande quantidade de válvulas.
- Em geral temos:
 - válvulas de emergência que interrompem a circulação do fluido, cessam o ciclo termodinâmico e desligam a usina: utilizada em casos de acidentes, para desligamento completo da usina, por exemplo.
 - válvulas de controle, que são responsáveis por modular a injeção de vapor na turbina para que a geração da usina varie, respondendo a distúrbios na rede elétrica ou em resposta à curva de despacho de geração, por exemplo.
- Estamos interessados apenas nas válvulas de controle.
- O comando das válvulas de controle é feito pelo regulador de velocidade da turbina: se a turbina gira mais rápido que o nominal, a válvula deve ser fechada para reduzir a injeção de vapor; se a turbina gira mais lento que o nominal, a válvula deve ser aberta para aumentar a injeção de vapor.
- Entre a saída do regulador de velocidade e a variação de vazão de fluido, há uma função de transferência que pode ser utilizada para modelar a dinâmica (atraso) dos atuadores, servomecanismos, etc que de fato traduzem o erro de velocidade em aumento/redução de fluxo/vazão.
- Esses atuadores podem ser hidráulicos, pneumáticos, eletrônicos, etc: cada um possui uma dinâmica (atraso) próprios.

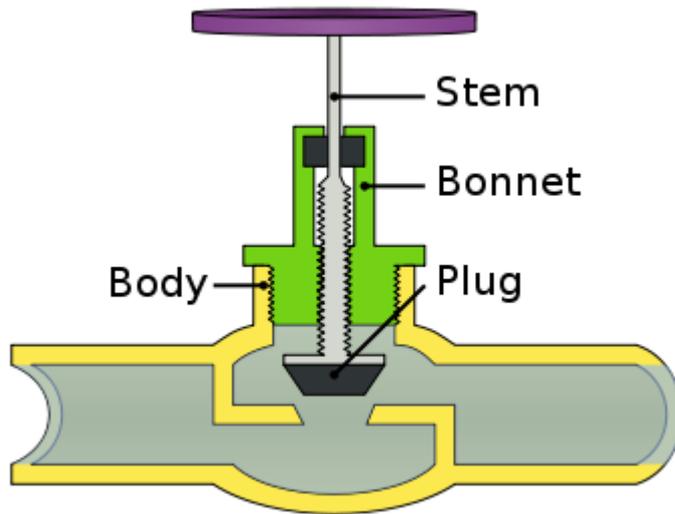
TV – válvulas: característica vazão × curso



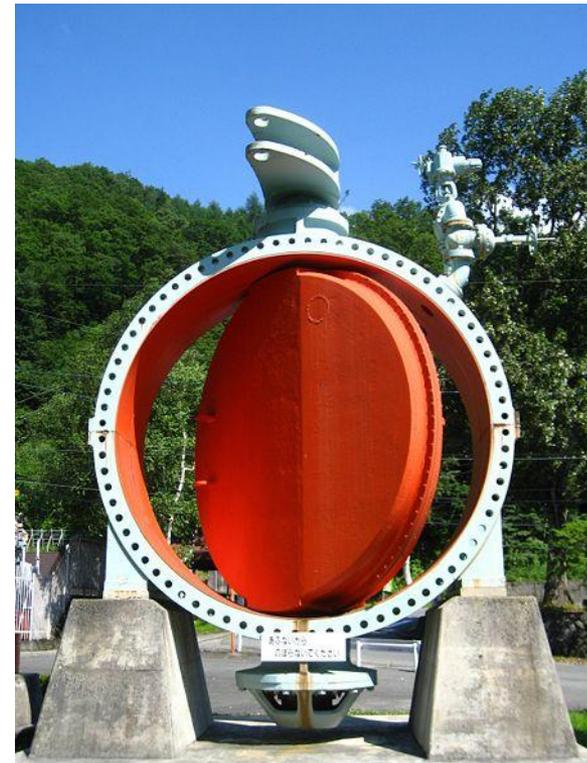
(a) válvula tipo plugue



(b) válvula tipo borboleta



(a) válvula tipo plugue

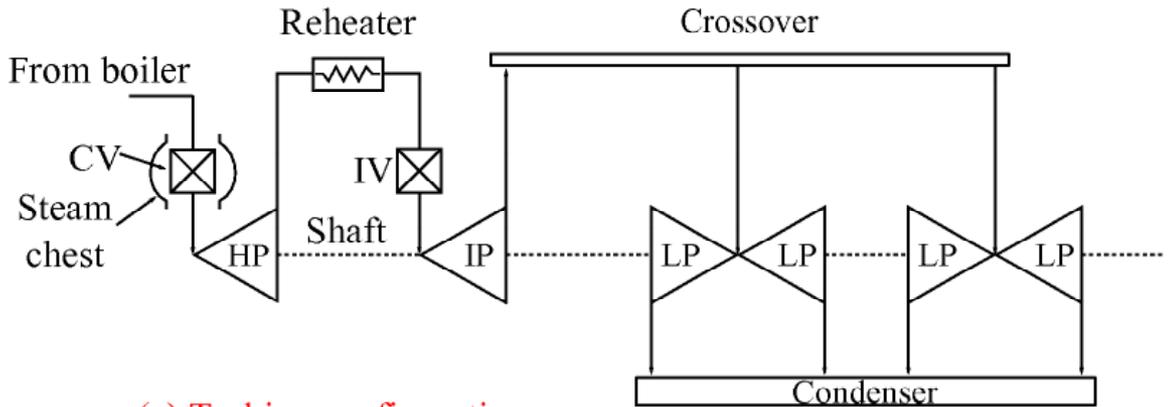


(b) válvula tipo borboleta

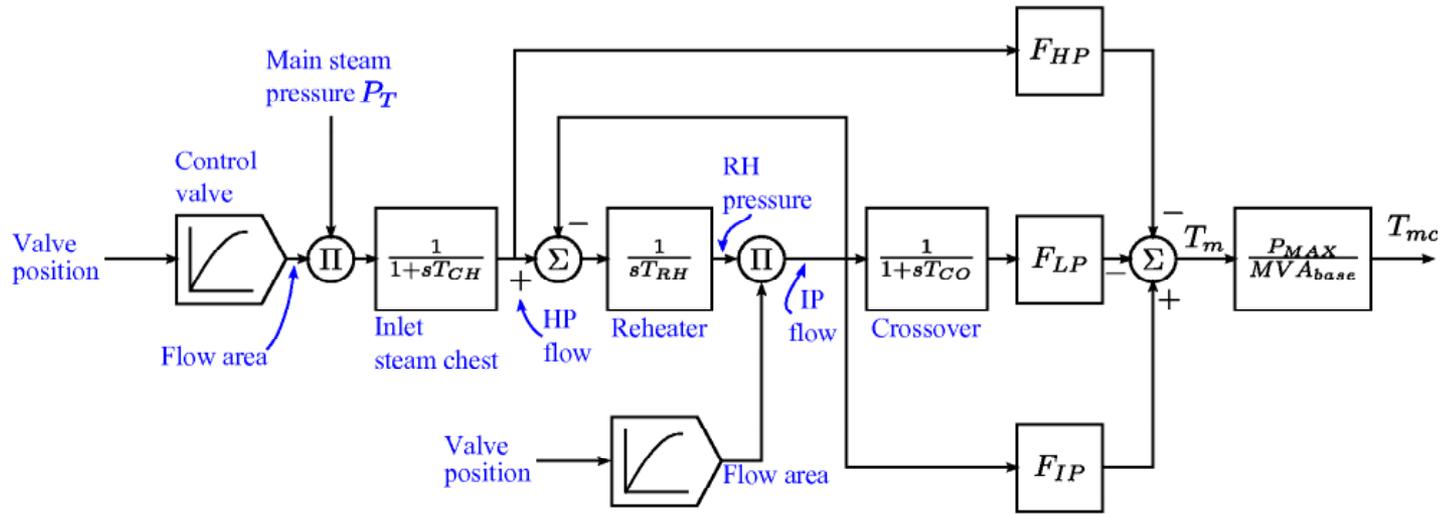
$$\frac{\text{vazão de entrada do tanque pulmão}}{\text{saída do regulador de velocidade e}} (s) = \frac{1}{T_{CV} s + 1}$$

TV – diagrama de blocos do modelo

- Ideia da modelagem da turbina completa: representar cada bloco da configuração particular da turbina por diagramas de bloco da função de transferência do atraso da câmara em questão.
- Hipótese: a caldeira é uma fonte infinita de vapor (o que é razoável para dinâmica de curto prazo (estabilidade transitória) porém é ruim para dinâmica de médio/longo prazo. Nesses casos o ideal é representar também a dinâmica da caldeira/condensador.



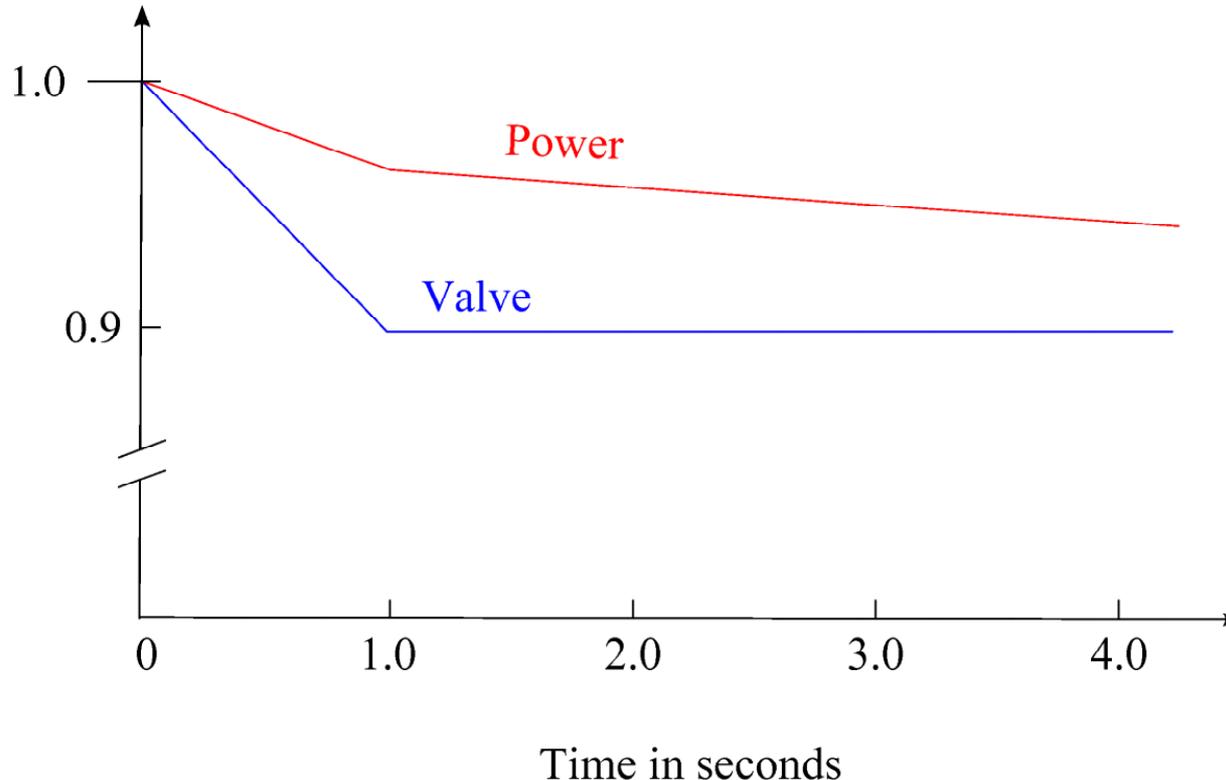
(a) Turbine configuration



(b) Block diagram representation

TV – diagrama de blocos do modelo

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta V_{CV}} = \frac{F_{HP}}{1 + sT_{CH}} + \frac{1 - F_{HP}}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} = \frac{1 + sF_{HP}T_{RH}}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})}$$



Resposta de uma turbina a vapor para um rampa de 1 segundo de fechamento de 10% da válvula:
 $T_{RH} = 7,0$ s, $F_{HP} = 0,3$, $T_{CO} = 0$

Próxima Aula: Controle de Carga-Frequência e Regulação de Velocidade

- Próxima aula: como controlar a abertura da válvula ΔV_{CV} de modo automático: controle carga-frequência e o regulador de velocidade.

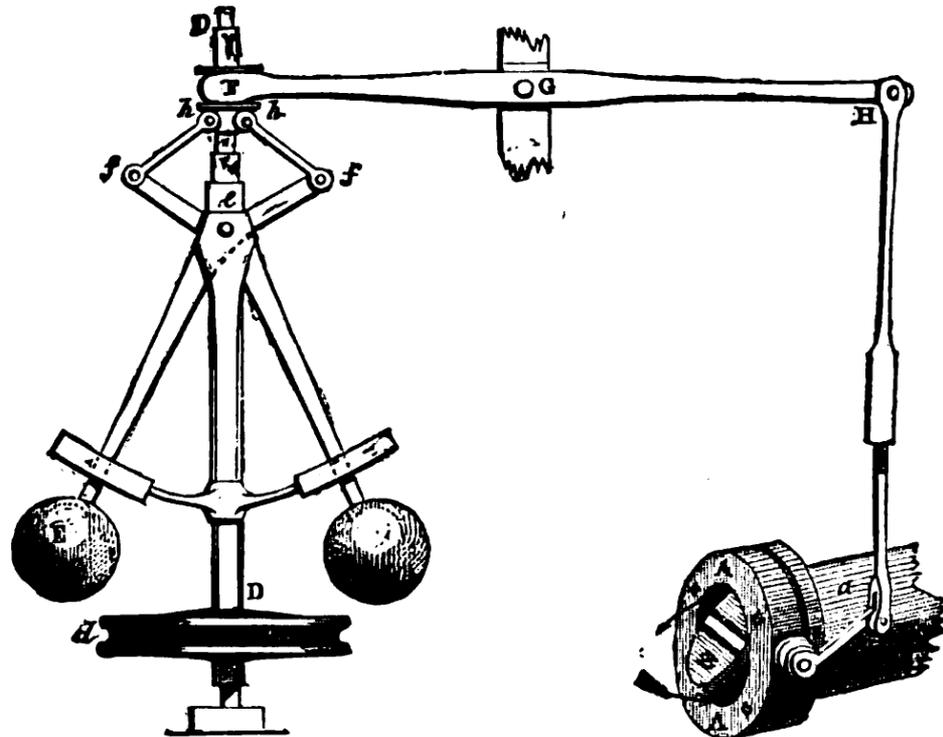


FIG. 4.--Governor and Throttle-Valve.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - T_e}{2H} \Rightarrow \begin{cases} \text{se } T_m > T_e, \omega \uparrow \\ \text{se } T_m < T_e, \omega \downarrow \end{cases}$$