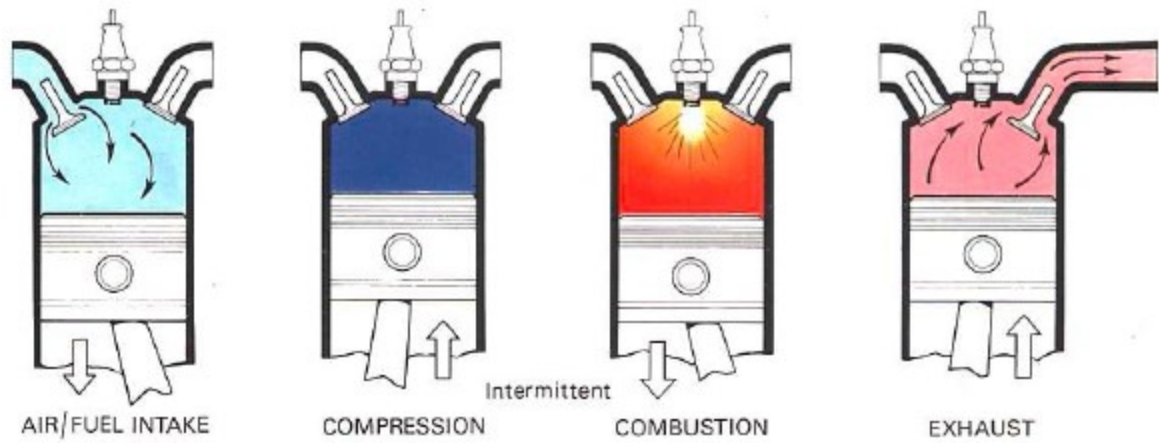
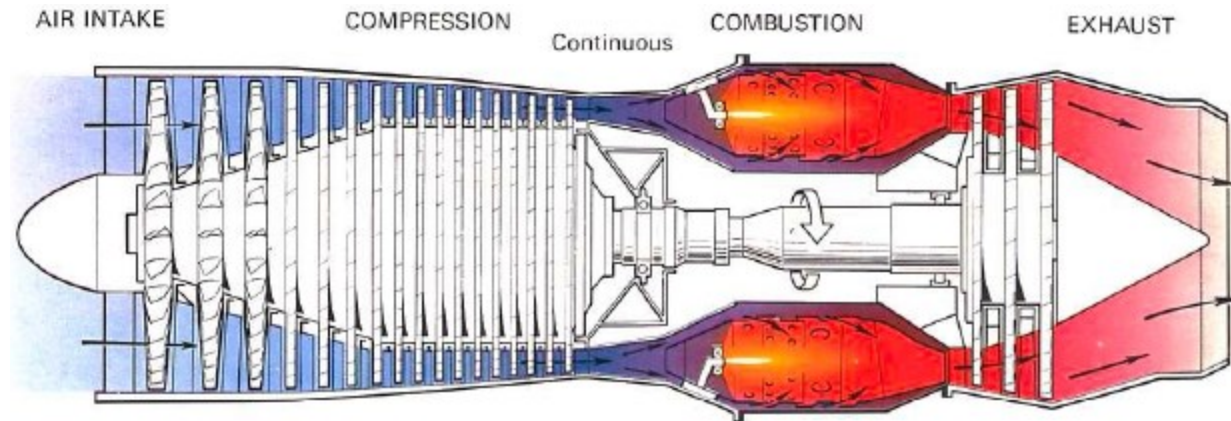


Ciclos baseados em gaseificação de combustíveis sólidos

Introdução

- Turbinas a gás e motores alternativos
 - Gases em contato com interior do motor
- Não compatíveis uso direto de comb. sólidos
 - Carvão
 - Lenha
 - bagaço de cana
 - etc.



Introdução

- Em alguns casos: comb. sól. disponível
- E deseja-se utilizar:
 - Motor alternativo
 - Pequenas instalações
 - Baixo custo
 - Turbina a gás
 - Principalmente para ciclo combinado e cogeração

Introdução: gaseificação

- Solução:
 - Gaseificação comb. sólidos
 - Conversão de combustível sólido em gás combustível
- Vantagens:
 - Util. comb. sól. pequenas instal.
 - Menor poluição do ar
 - Gás pode ser distribuído facilmente

Introdução: gaseificação

- Desvantagens:
 - Mais complicada que queima direta
 - Gases são tóxicos
 - Gases produzidos têm baixo poder calorífico
- Ciclos empregando gaseificação
 - São ciclos de potência a gás modificados
 - “Novidade” é a gaseificação
 - Gaseificador
 - Dispositivos para tratamento do gás

Perspectiva histórica

- Destilação seca (dry distillation, fim séc. XVIII)
 - Aquecimento do comb. em atm. isenta de O_2
 - Companhia de Gás de Carvão, Londres, 1812
 - Iluminação pública
- Gaseificador a contracorrente, 1839
 - Ar segue corrente ascendente, comb. descendente
- PB: produção de alcatrão e remoção cinzas

Perspectiva histórica

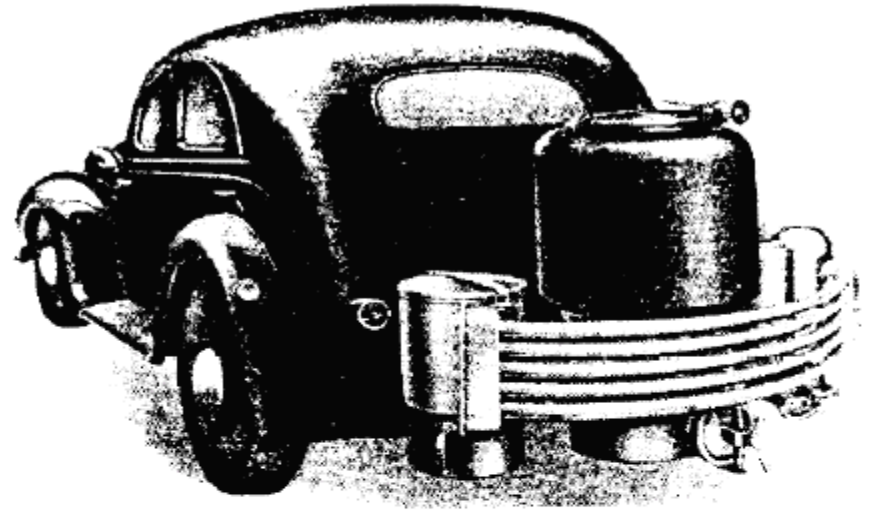
- Até início séc. XX, tentativas sol. Pbs
 - 2 zonas de reação
 - Reinjeção produtos pirólise no reator
 - Craqueamento do alcatrão
 - Quebra do alcatrão em $\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4$
- Início anos 1930: plantas desativadas
 - Disponibil. Petróleo e derivados
 - Linhas de gás natural

Perspectiva histórica

- Segunda Guerra Mundial
 - Escassez petróleo e derivados
 - Retorno aos ciclos com gaseificação
 - Reatores de leito fluidizado
 - Reatores de leito arrastado
 - Motores ICE e ICO convertidos
 - Gasogênios (pequenos gaseificadores)
 - Menor potência (-25% em relação à gasolina)
 - Maior manutenção (filtros, refrig., etc.)

Perspectiva histórica

- Motores ICE e ICO convertidos (cont.)
 - Larga utilização (cerca de 1 milhão de veículos ao fim 2ª Guerra
 - Usavam pedaços de madeira, coque, etc.



Movido a lenha!

Perspectiva histórica

- Lurgi (1936) e Koppers-Totzek (1948)
 - Gaseificadores operando acima de P_{atm}
- Logo após a 2^a Guerra, abandono gaseificação
 - Petróleo e derivados disponíveis

Perspectiva histórica

- Últimas décadas: retorno à gaseificação
 - Aumento preço petróleo
 - Emergência de economias, conflitos armados (África, Ásia), etc.
 - Uso mais eficiente da energia
 - Utilização “rejeitos” (bagaço de cana, p. ex.)
 - Ciclos combinados
 - Cogeração

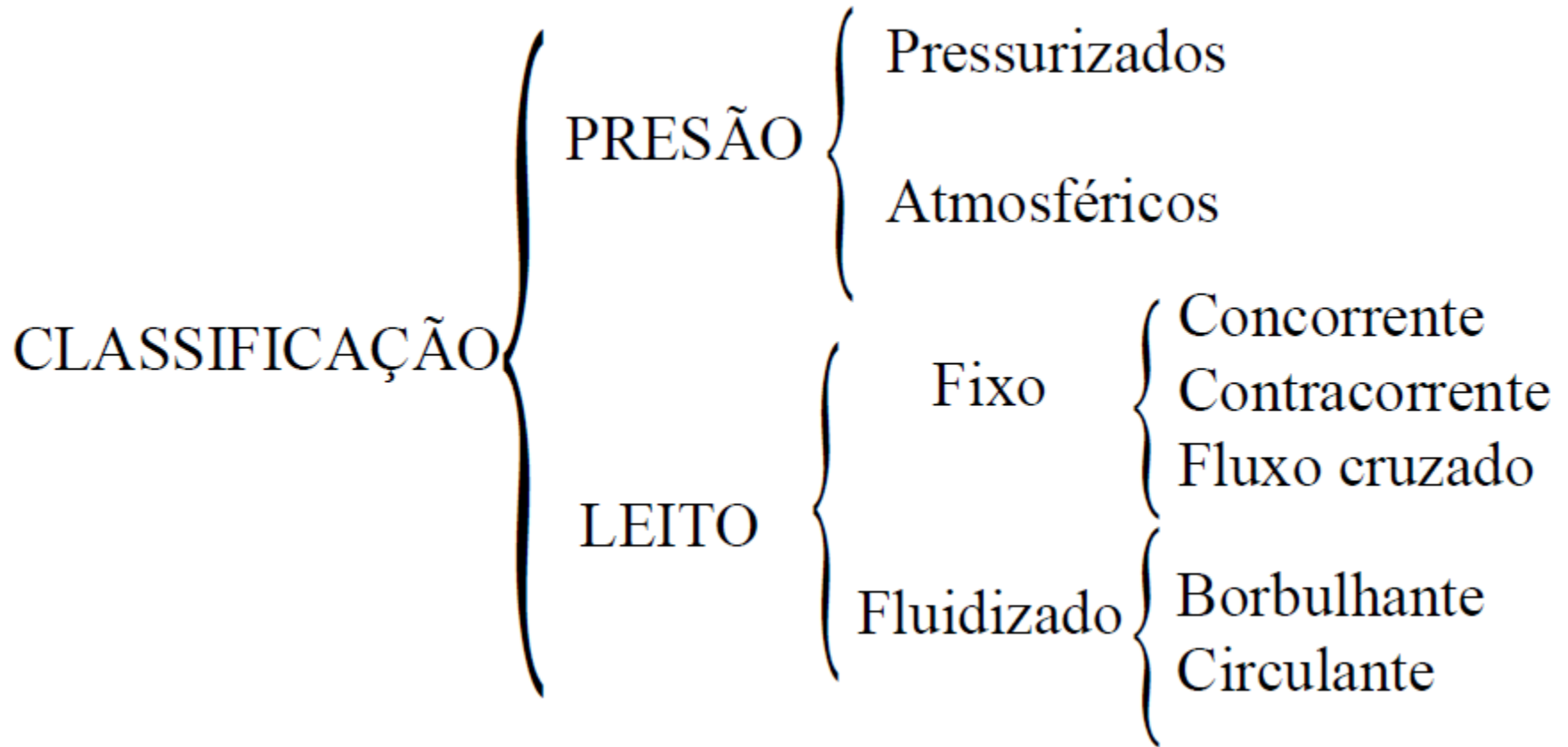
Gaseificação

- Conversão de combust. sólido em gás combustível
 - Combustão parcial a temperaturas elevadas
 - Somente uma parte dos elementos químicos do combustível sofre oxidação total
 - “combustão com falta de ar”
 - Gás baixo PC. Produtos podem conter:
 - CO
 - CO₂
 - H₂
 - CH₄
 - Alcatrão, vapor d'água, hidroc. Leves, N₂

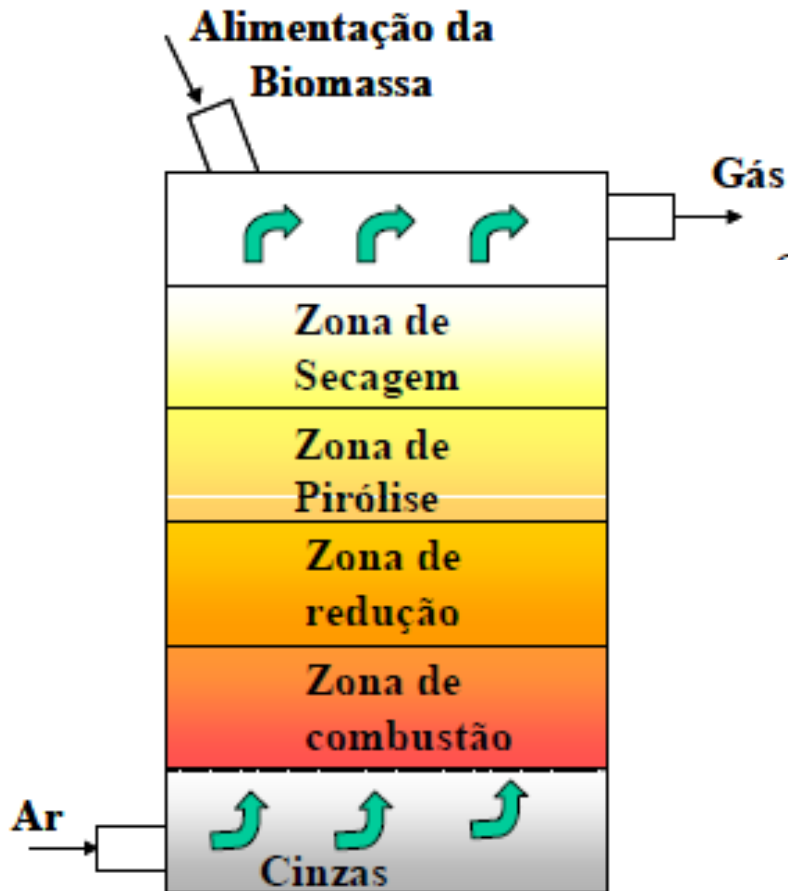
Gaseificação

- Alcatrão
 - Conjunto de compostos de elevado M
 - Por exemplo, $C_{10}H_8$
 - $M > M$ do benzeno (C_6H_6 , 78g/mol)
- Craqueamento do alcatrão
 - Alcatrão \rightarrow CO, CO_2 , CH_4 e outros produtos
- Tipos de combustível sólido
 - Fósseis
 - Carvão
 - Biomassa
 - Bagaço de cana, madeira, carvão vegetal, etc

Classificação Gaseificadores



Gaseificador contra-corrente



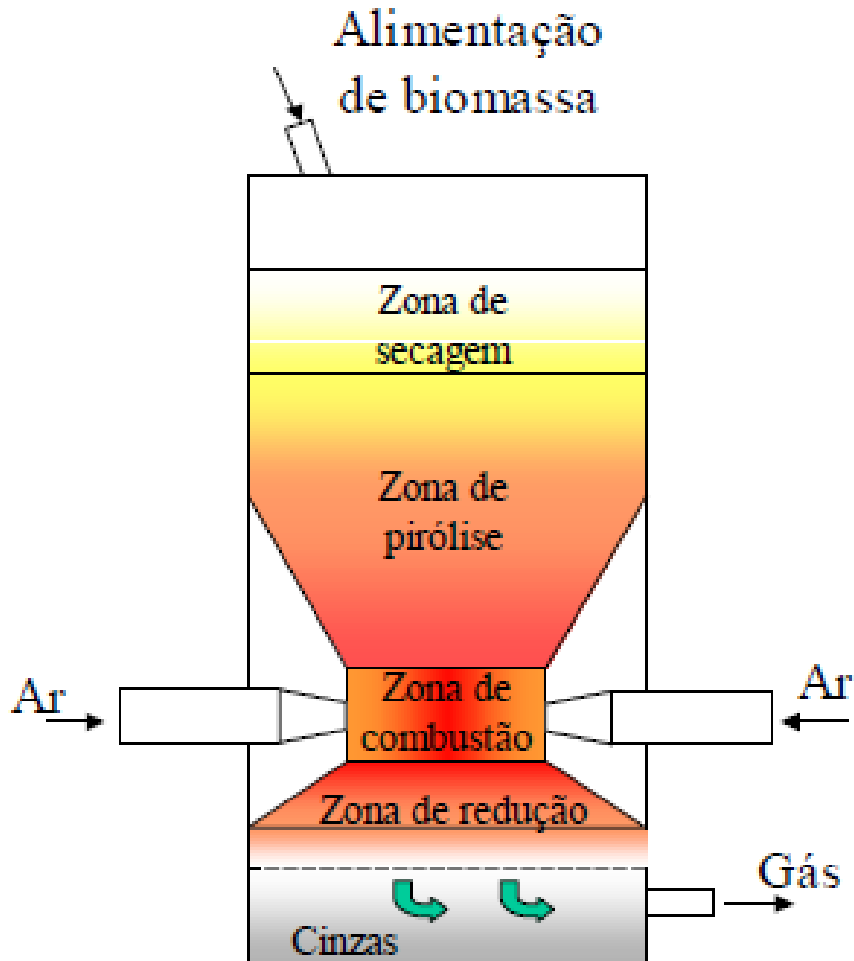
- Simplicidade
- Elevada Eficiência
 - Combustível é pré-aquecido antes zona comb.

Altos teores de alcatrão no gás

- Não há craqueamento na zona combustão

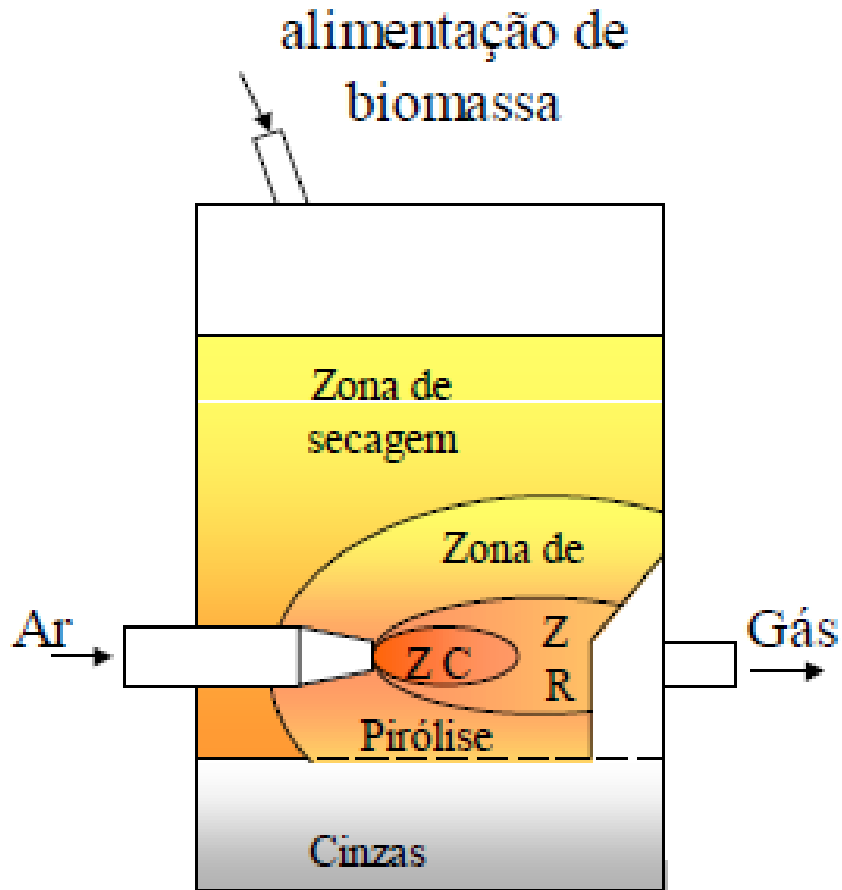
Não é usado diretamente em motores

Gaseificador concorrente



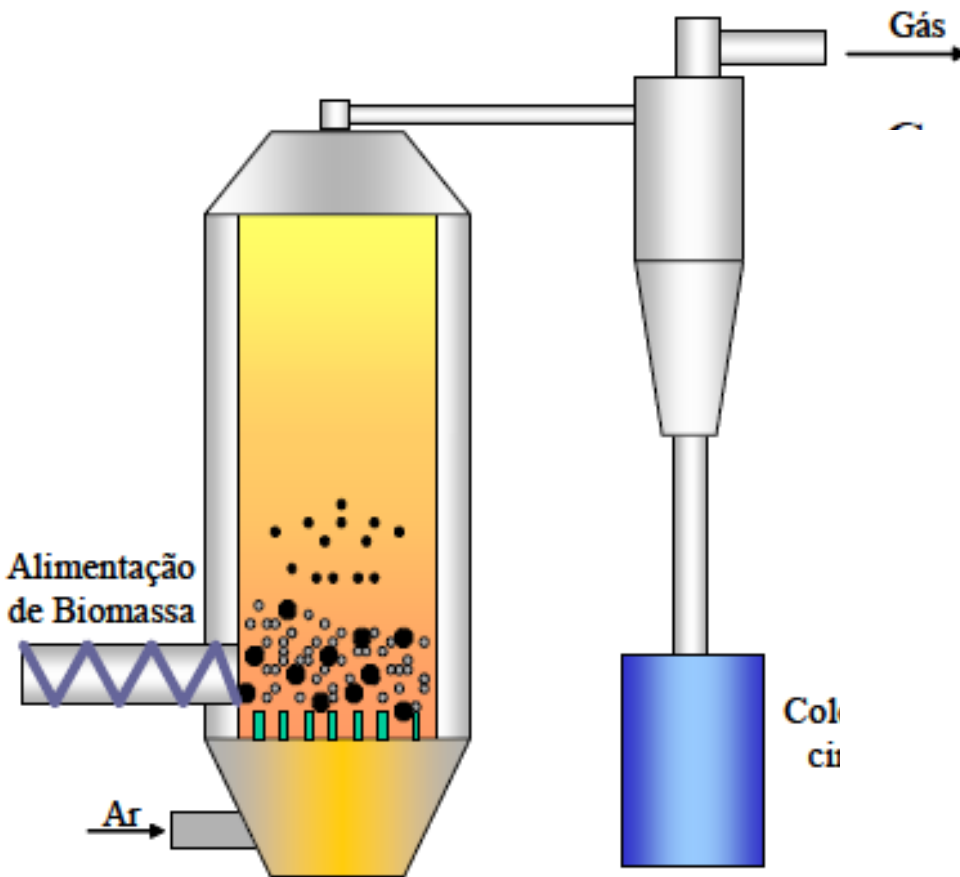
- Mais difundido
- Menos alcatrão que contra-corrente
 - Produtos pirólise passam pela zona combustão
 - São transformados em gás combustível e coque
- Possui quantidade grande de cinzas e fuligem no gás

Gaseificador fluxo cruzado



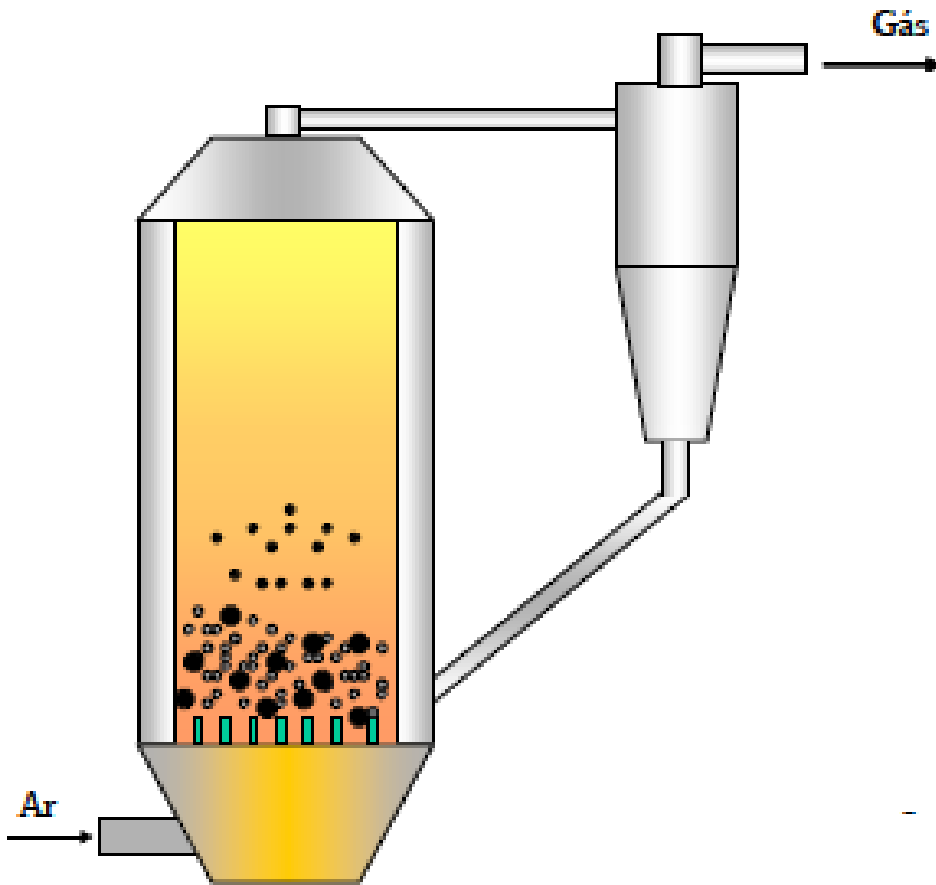
- Peso reduzido
- Resposta rápida à variação de carga
- Sensibilidade à umidade do combustível
- Limitações quanto ao tipo de combustível

Gaseific. leito fluidizado borbulhante



- Bolhas de gás passam entre partículas
- Partículas suspensas em meio inerte
 - Melhores transf.
 - Alta velocidade de reação
- Fácil controle da temp.
- Menor teor alcatrão

Gaseific.leito fluidizado circulante



- Não há bolhas gás
- Partículas suspensas em meio inerte
 - Melhores transf.
 - Alta velocidade de reação
- Fácil controle da temp.
- Menor teor alcatrão

Processos

- 1) Secagem e Pirólise
 - Decomposição térmica $280^{\circ}\text{C} < T < 450^{\circ}\text{C}$
 - Evaporação da água
 - Decomposição de carbo-hidratos
 - Produção de alcatrão e ácidos leves
- Produtos:
 - Gases não condensáveis (CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , O_2)
 - Carvão vegetal
 - Condensado (alcatrão e ácidos)

Processos (cont.)

- 2) Gaseificação
 - Reações exotérmicas de oxidação
 - Reações endotérmicas de redução envolvendo fases gasosa e sólida
- Reações heterogêneas gás-sólido
 - Oxidação do carbono
 - Fornece energia para reações endotérmicas

Oxidação parcial



Oxidação completa



Processos (cont.)

– Reação gás-água

- Oxidação parcial do carbono pelo vapor



– Reação de Boudouard



– Reação de formação do metano



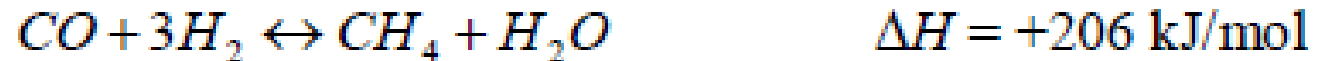
Processos (cont.)

- Reações Homogêneas

- Reação de deslocamento da água



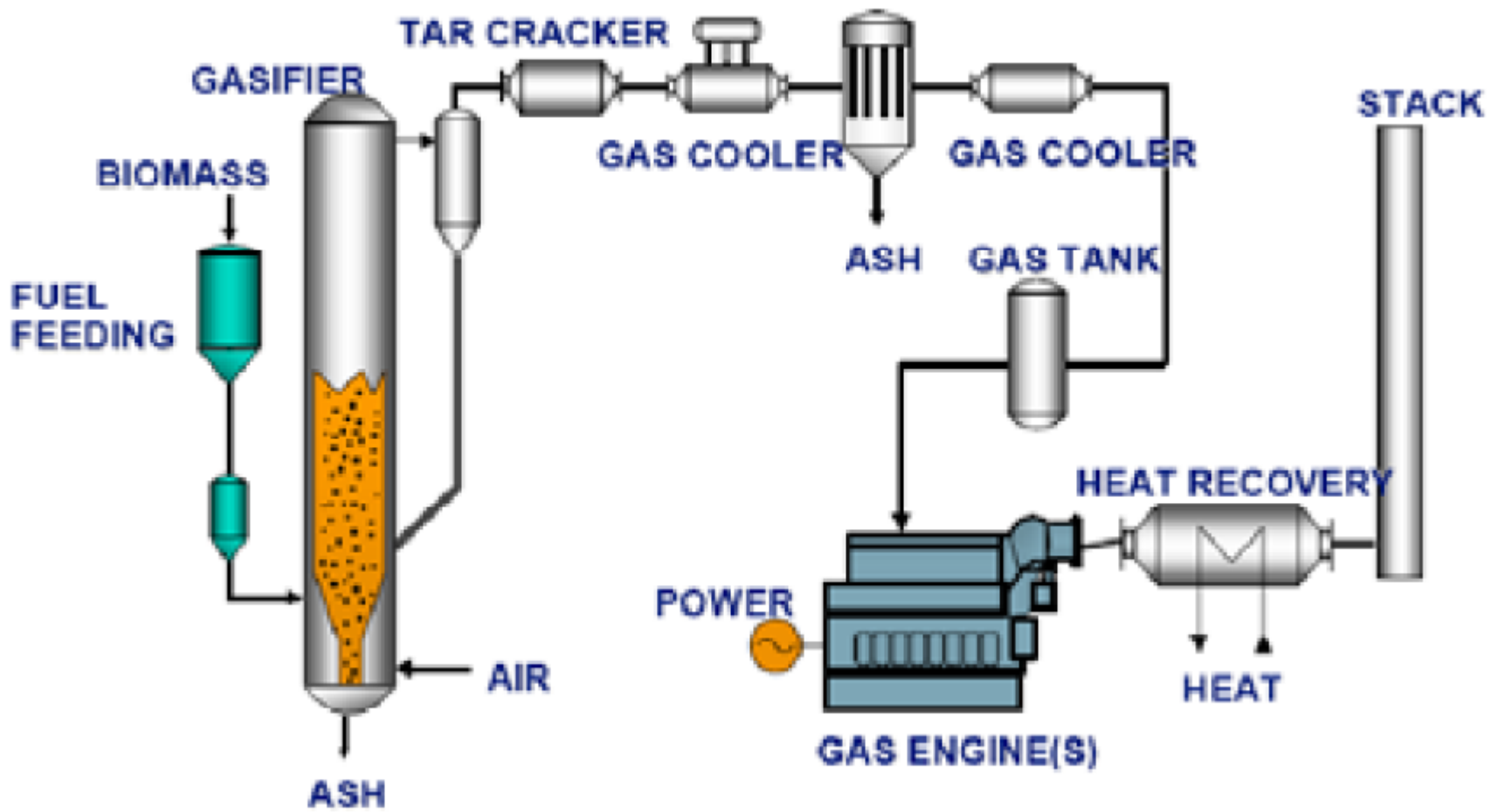
- Outra Reação de formação do metano



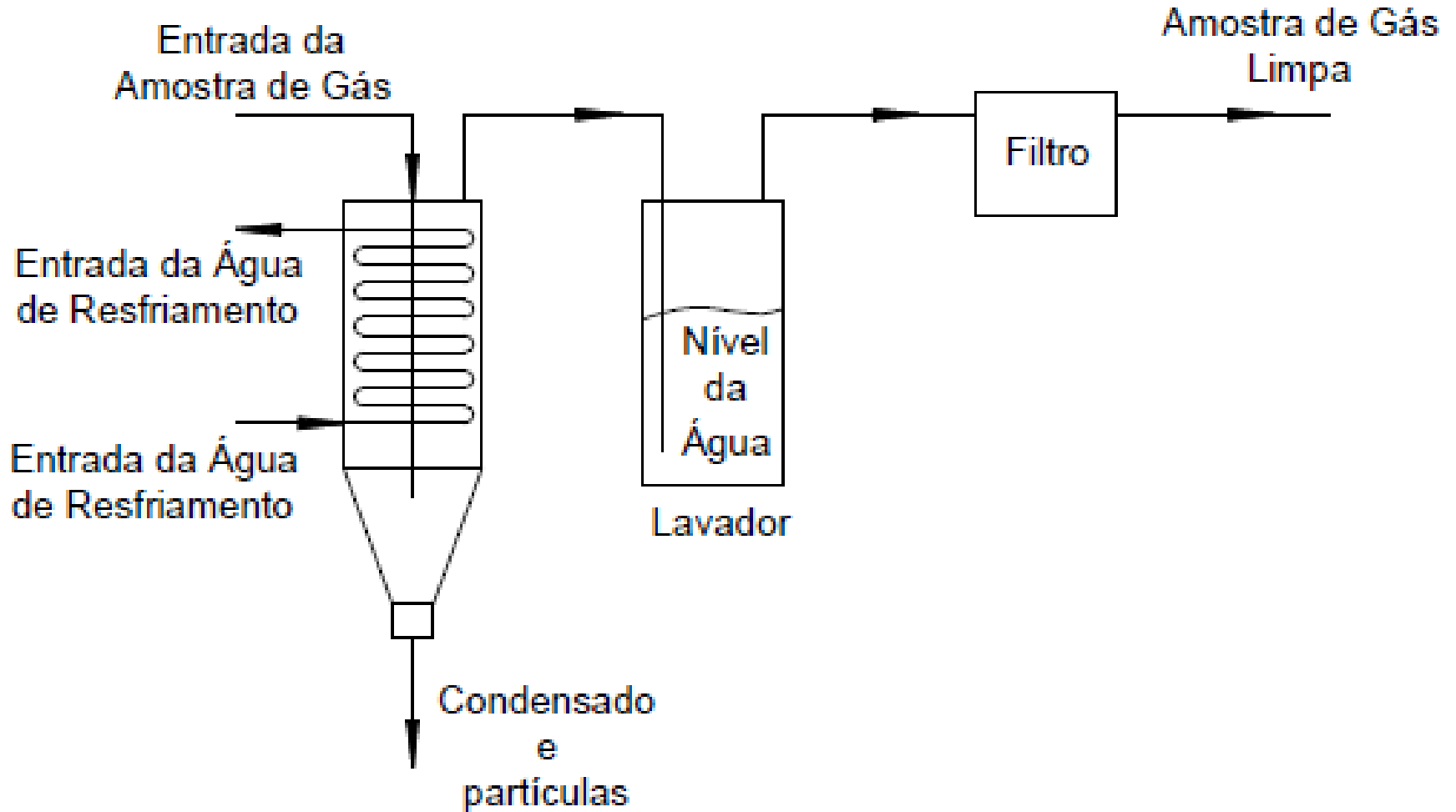
Ciclos utilizando gaseificação

- São ciclos de potência a gás modificados
 - “Novidade” é a gaseificação
- Motores alternativos
 - Otto
 - Diesel
- Turbinas a gás
 - Brayton simples
 - Brayton modificado
 - Ciclo combinado

Gaseificação + motores alternativos



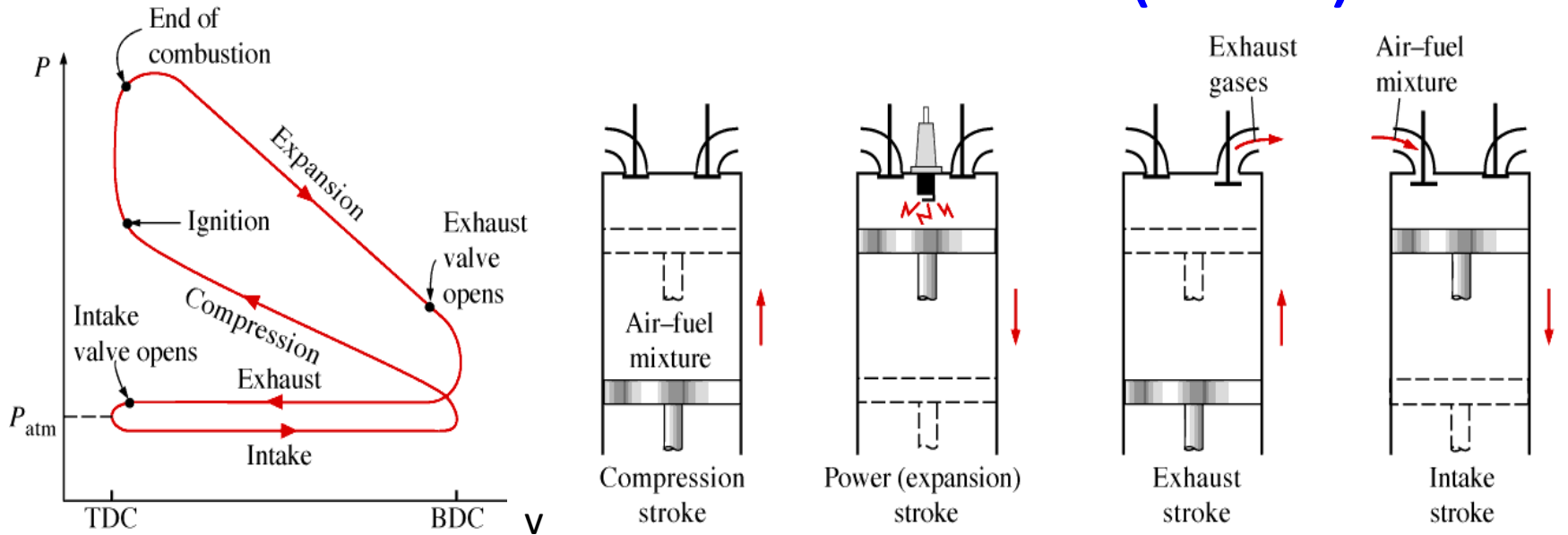
Sistema de limpeza gás



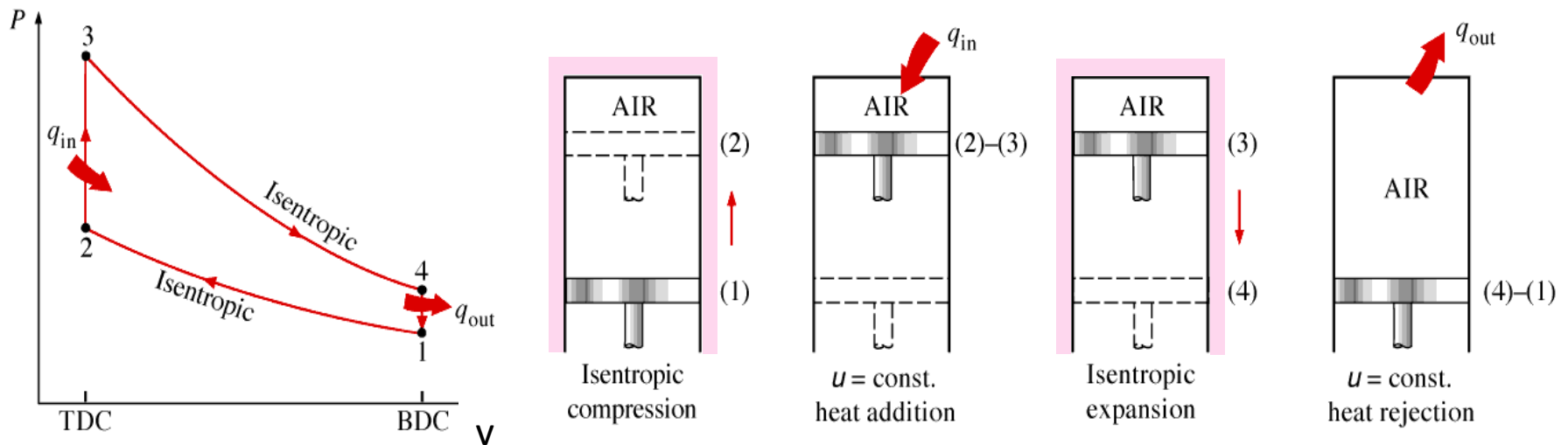
Exemplo: instalação - UNIFEI

- Motor a gasolina
 - Não é necessário fazer modificações
 - Ar e combustível misturados previamente
 - Introduzidos no sist. carburação
 - Opera somente com gás de biomassa
- Motor a diesel
 - Não opera apenas com gás
 - Gás diminui rendimento do motor

Ciclo real e ciclo ideal (Otto)



(a) Actual four-stroke spark-ignition engine



(b) Ideal Otto cycle

Ciclo Otto

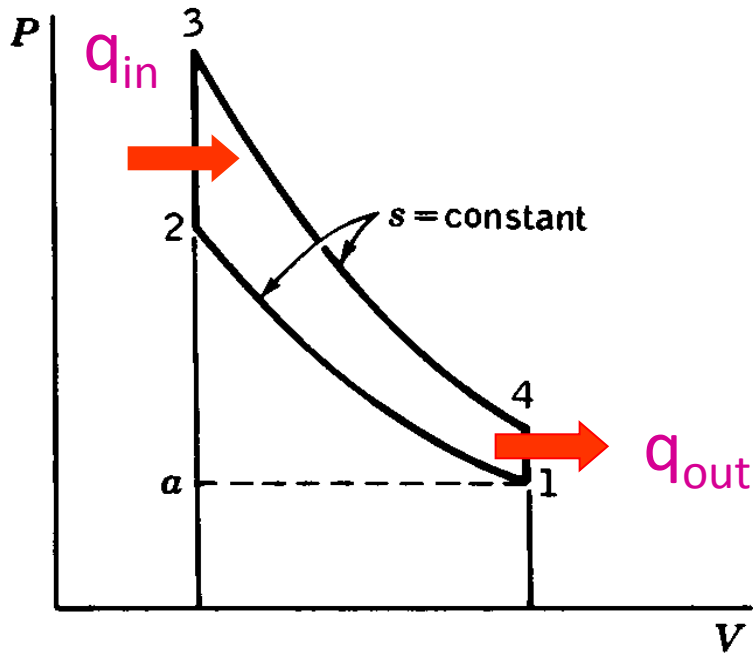


Diagrama P-V

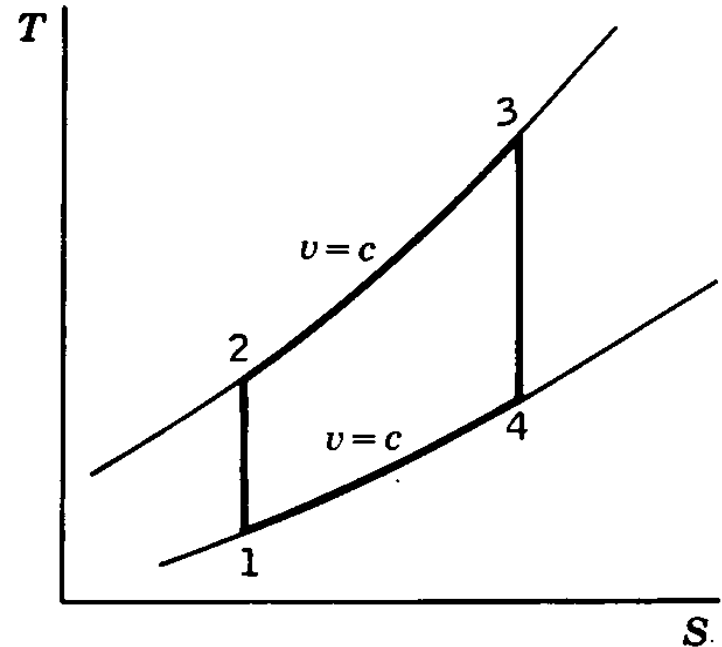


Diagrama T-S

Performance do ciclo

Eficiência térmica:

$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

- 1ª Lei, $\Delta KE = \Delta PE = 0$
 - Adição calor 2-3 : $Q_H = U_3 - U_2$
 - Rejeição calor 4-1: $-Q_L = U_1 - U_4$

Performance do ciclo

- Análise “ar frio”

- Adição calor 2-3

$$Q_H = mC_V(T_3 - T_2)$$

- Rejeição calor 4-1

$$Q_L = mC_V(T_4 - T_1)$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{mC_V(T_4 - T_1)}{mC_V(T_3 - T_2)}$$

Performance do ciclo

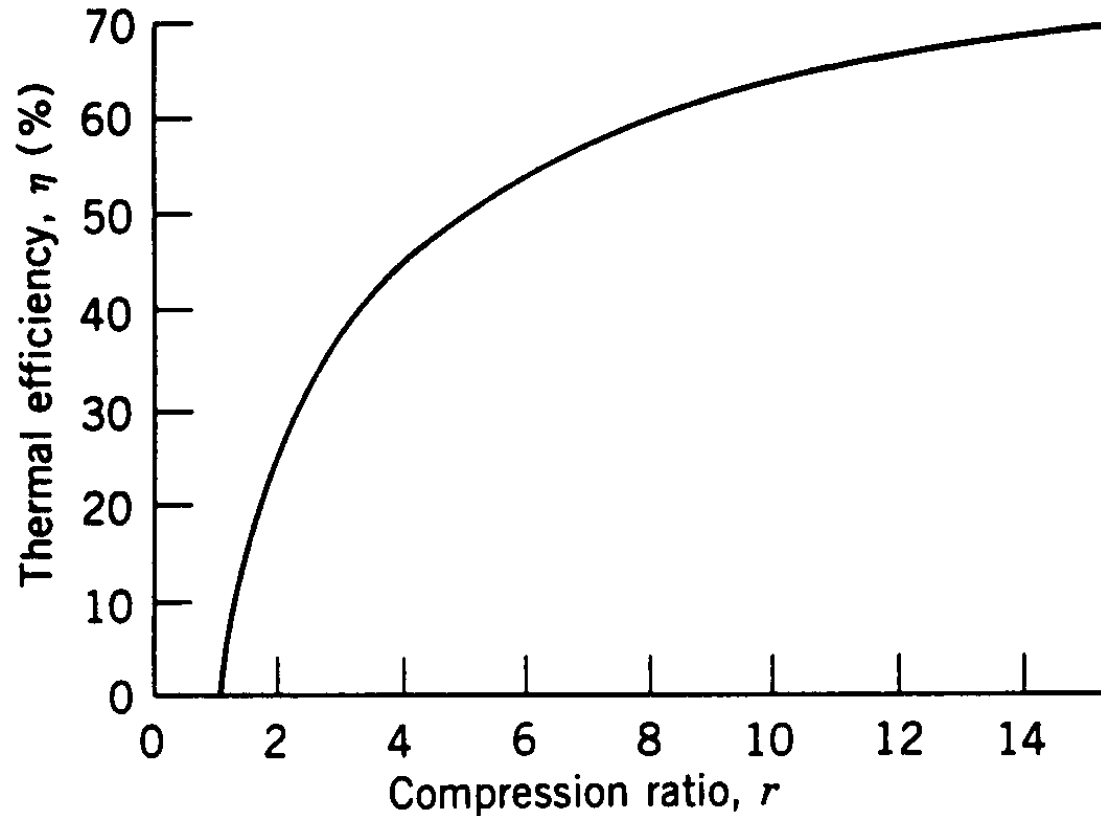
$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

- 1-2 e 3-4 : isentrópicos

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_3}{T_4} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} \equiv \frac{T_3}{T_4}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}}; \quad r = \frac{V_1}{V_2}$$

Performance do ciclo



$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}}; \quad r = \frac{V_1}{V_2}$$

Ciclo combinado

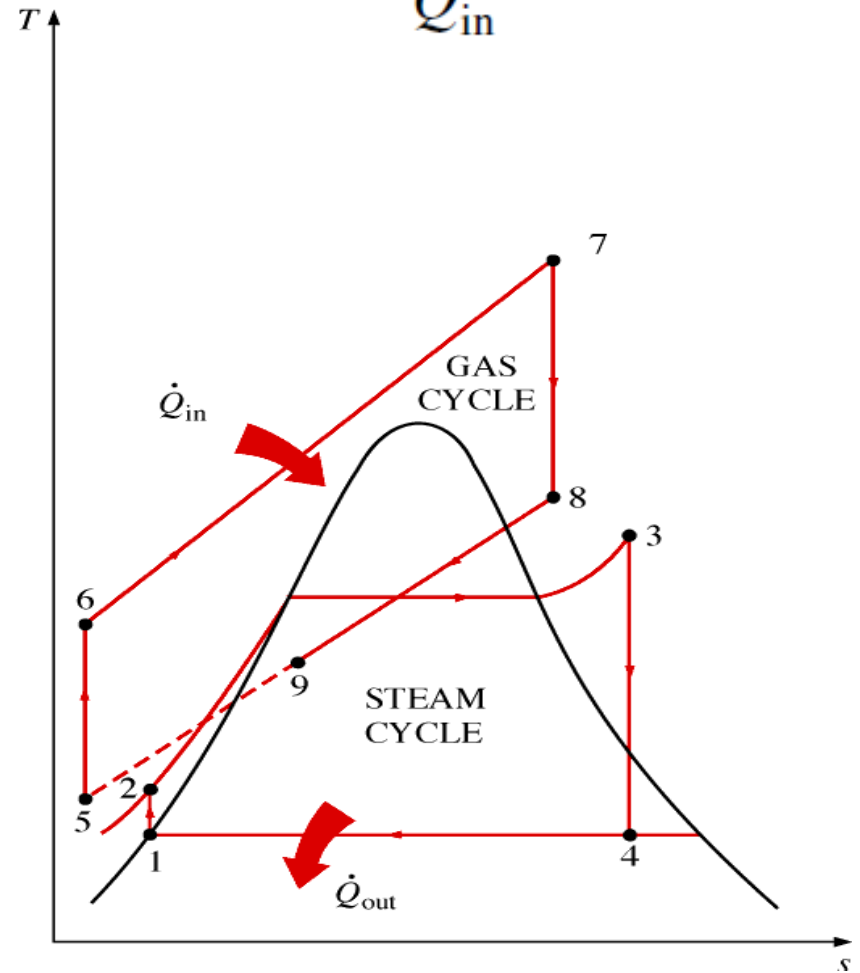
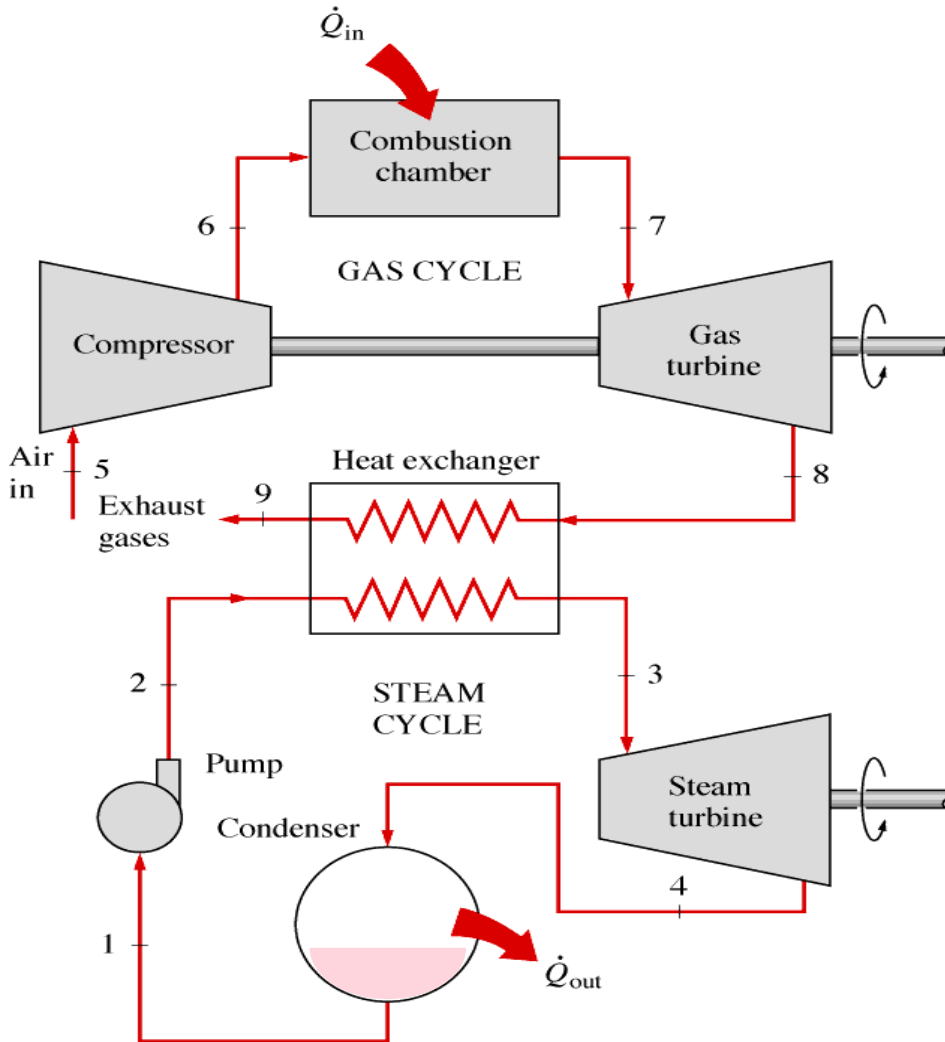
- Aumento eficiência ciclo
 - Aumento T máx ciclo
 - Minimizar perdas de energia
- 2 ciclos combinados para gerar potência
 - Atendem a estes aspectos
- Fluidos de trabalho diferentes podem ser utilizados
 - Vantagens de cada ciclo podem ser combinadas
 - Um ciclo trabalhando a T mais elevada pode ser combinado a outro

Ciclo combinado

- Ciclos simples de TG
 - Elevadas T de entrada
 - Elevadas T exaustão
 - Topping Cycle: rejeita calor para ciclo Bottoming
- Ciclos simples de TV
 - $T_{\text{máx}} < T_{\text{TG}}$ e T saída vapor é menor
 - Bottoming Cycle: recebe calor do ciclo Topping

Ciclo combinado

$$\eta = \frac{\dot{W}_{\text{gas}} + \dot{W}_{\text{vap}}}{\dot{Q}_{\text{in}}}$$



Ciclo combinado

	TG	TV	CC
T_{in} (k)	1000-1350	640-700	1000-1350
T_{out} (k)	550-600	300-350	300-350
η_c (%)	45-50	45-57	65-78

η_c = efic. Carnot, utilizado como indicador de qualidade do ciclo

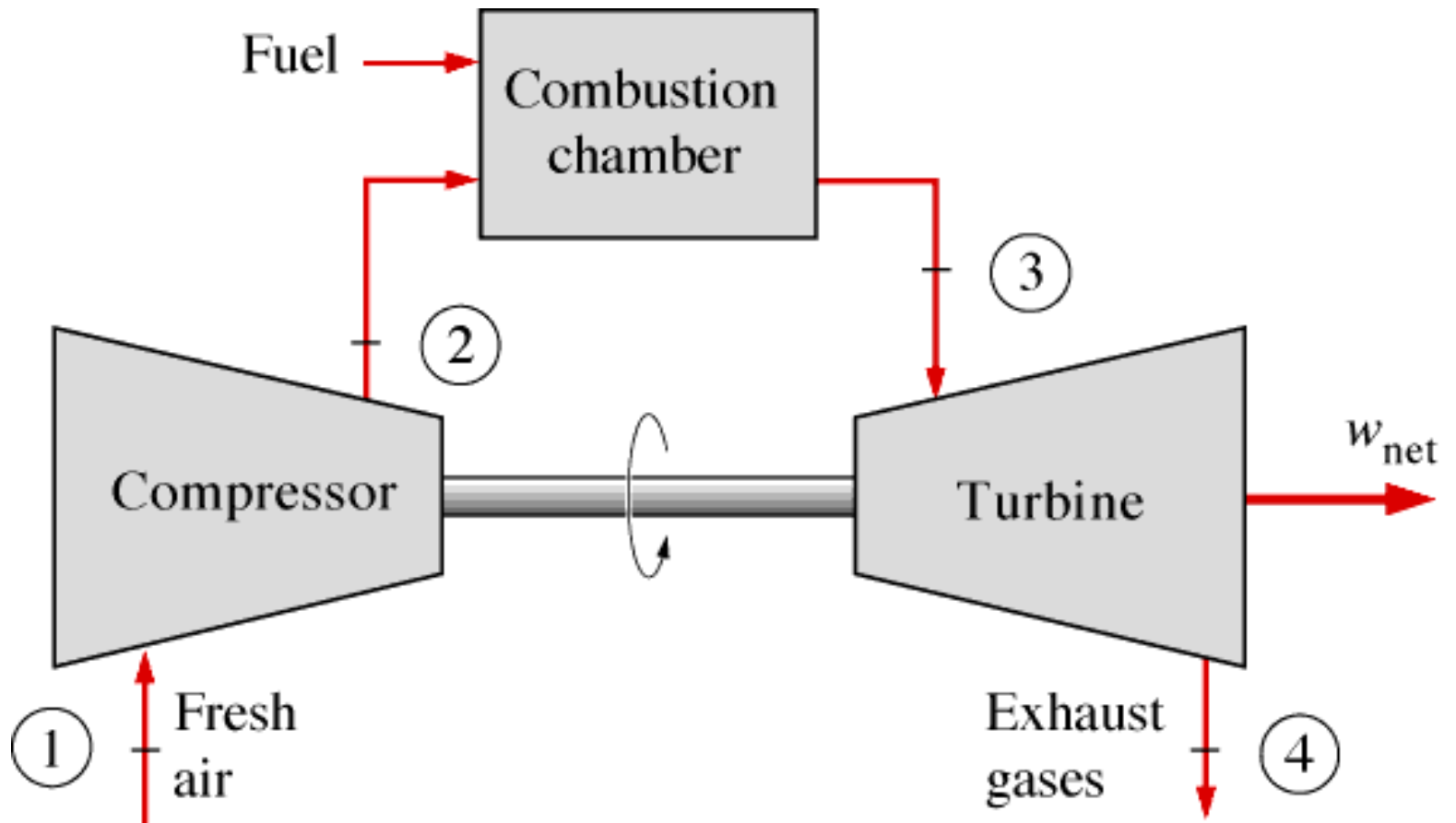
Ciclos combinados

- 2 tipos básicos
 - Energia suprida apenas no Topping
 - Energia adicional suprida no Gerador de Vapor de Recuperação de Calor (HRSG)
- Eficiência CC:

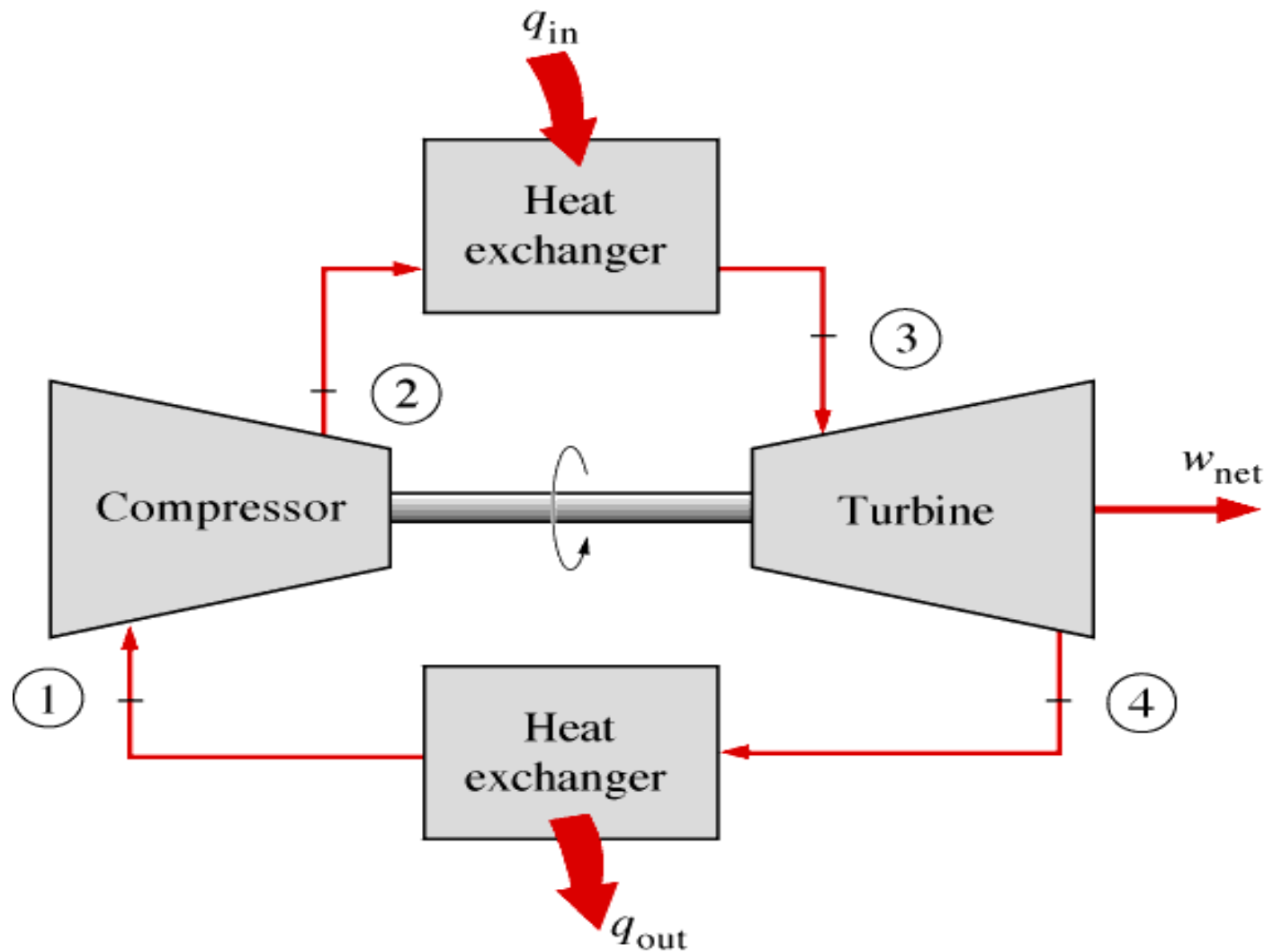
$$\eta = \frac{\dot{W}_{TG} + \dot{W}_{TV}}{\dot{Q}_{TG} + \dot{Q}_{HRSG}}$$

- Maior que a dos ciclos simples

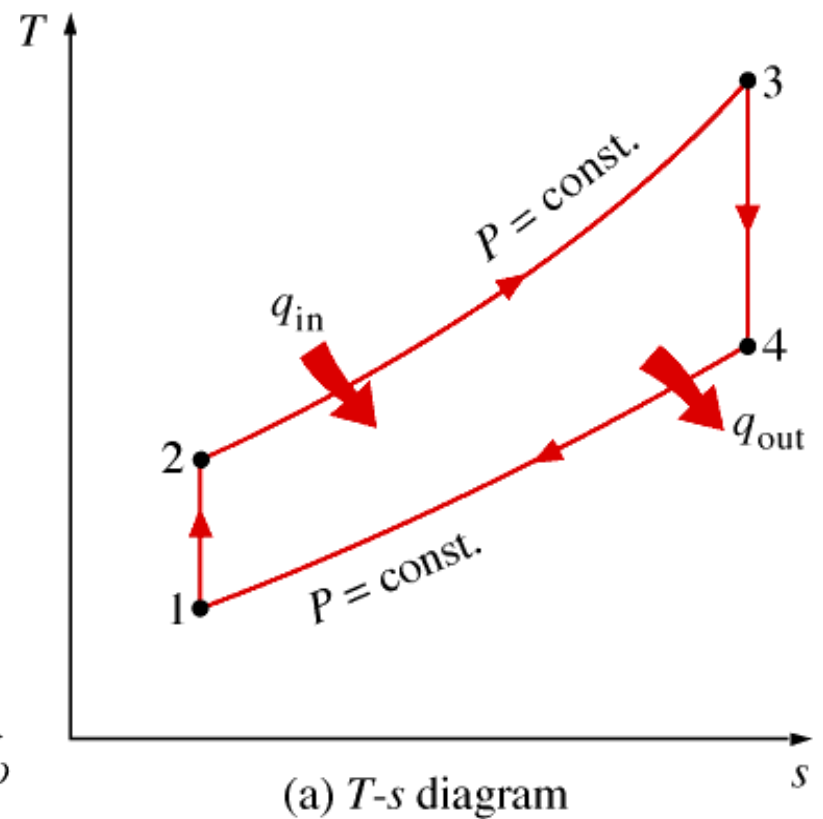
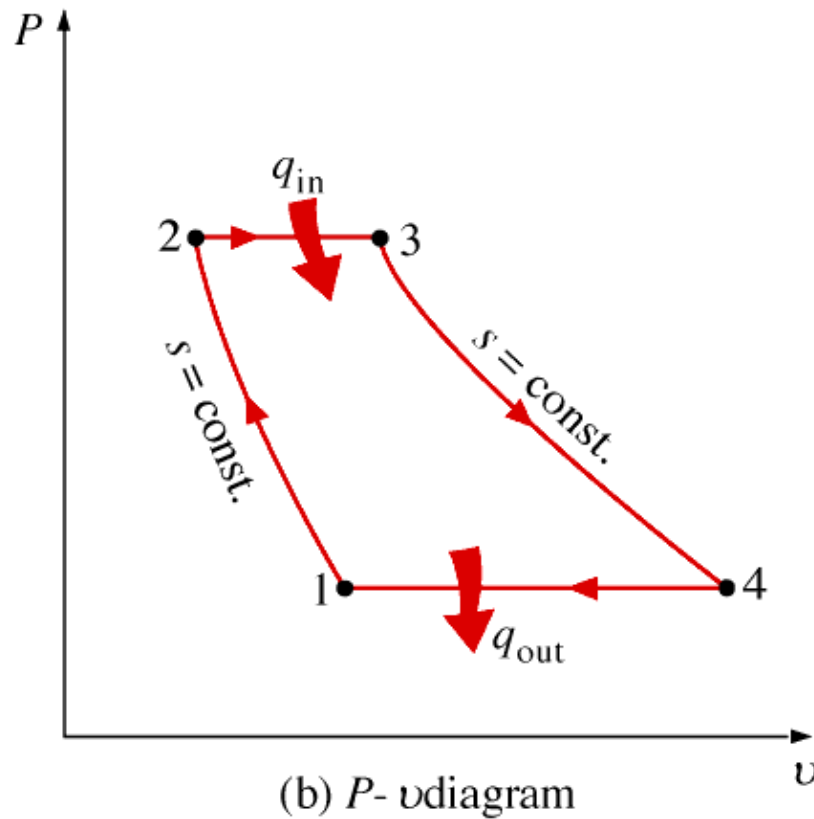
TG: Ciclo Brayton simples (aberto)



Ciclo Brayton simples (fechado)



Diagramas Pv e Ts para ciclo Ideal



Performance do ciclo

Eficiência térmica:

$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

- 1ª Lei (R.P., P.U.F., $\Delta KE = \Delta PE = 0$):
 - Adição calor 2-3 : $q_H = h_3 - h_2$
 - Rejeição calor 4-1: $q_L = h_4 - h_1$
 - Trab. Turb. 3-4: $w_T = h_3 - h_4$

$$\eta_{TG} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

Análise ar frio

- Eficiência térmica

$$\eta = 1 - \frac{C_p (T_4 - T_1)}{C_p (T_3 - T_2)} \quad \eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \frac{(T_4/T_1 - 1)}{(T_3/T_2 - 1)}$$

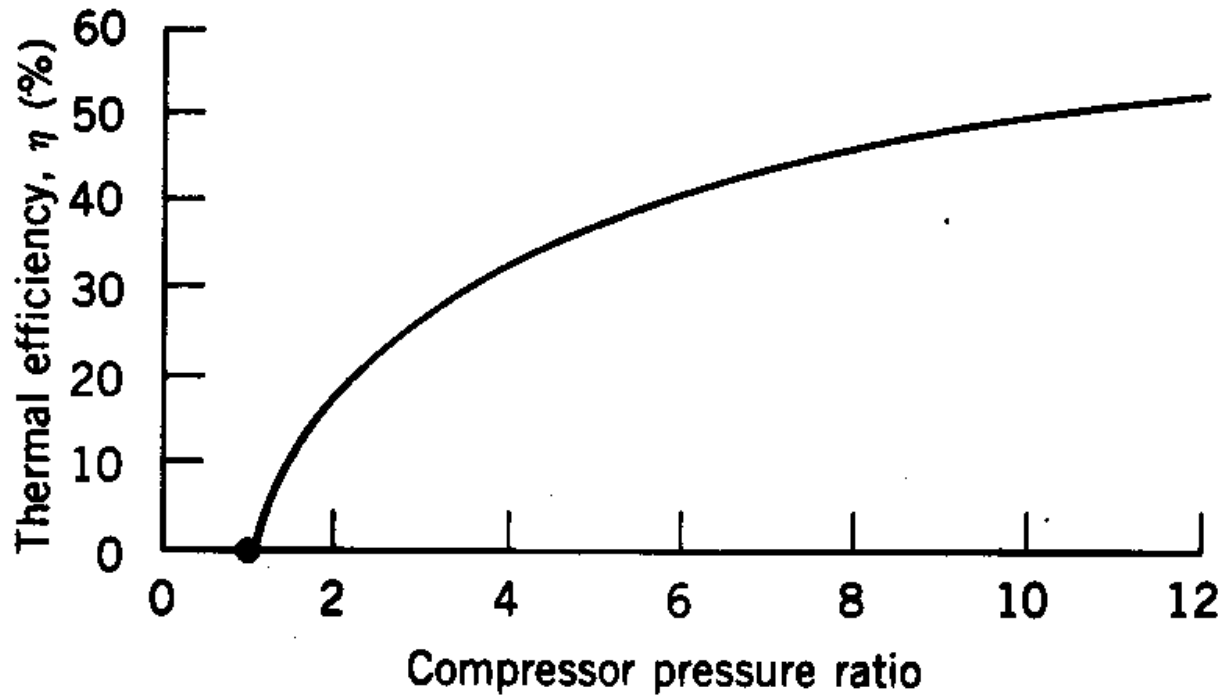
- Relações isentrópicas

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} ; \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

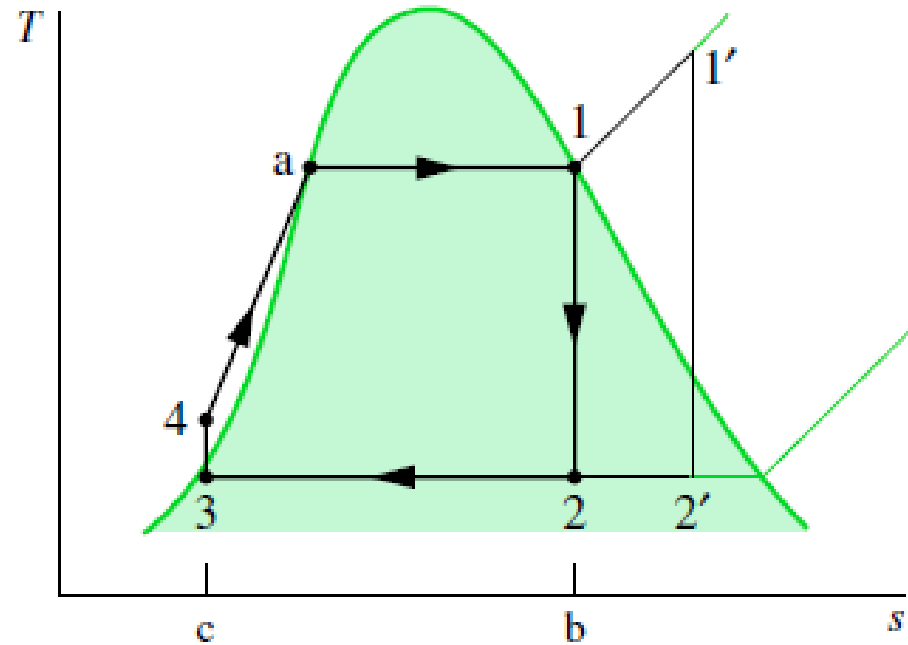
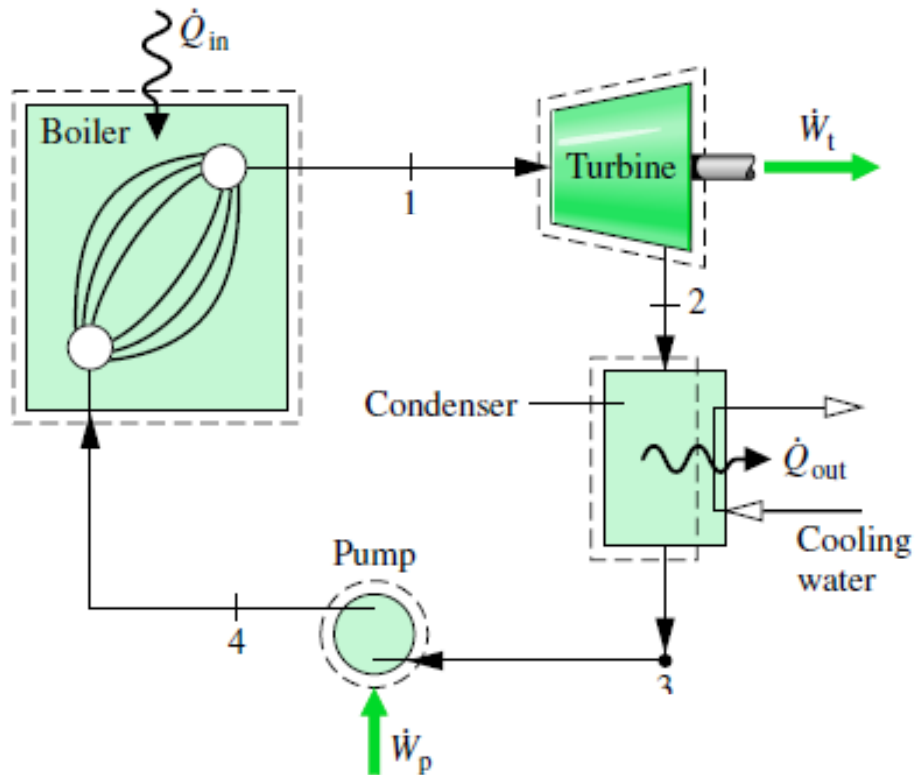
- Opera entre 2 isobáricas => razão de pressões é importante $r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$

Ciclo Brayton simples

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$



TV: ciclo Rankine



Performance do ciclo (1/2)

Eficiência térmica:

$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

- 1ª Lei (R.P., P.U.F., $\Delta KE = \Delta PE = 0$):
 - Adição calor 4-1: $q_H = h_1 - h_4$
 - Rejeição calor 2-3: $q_L = h_2 - h_3$

$$\eta_{TV} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4}$$

Performance do ciclo (2/2)

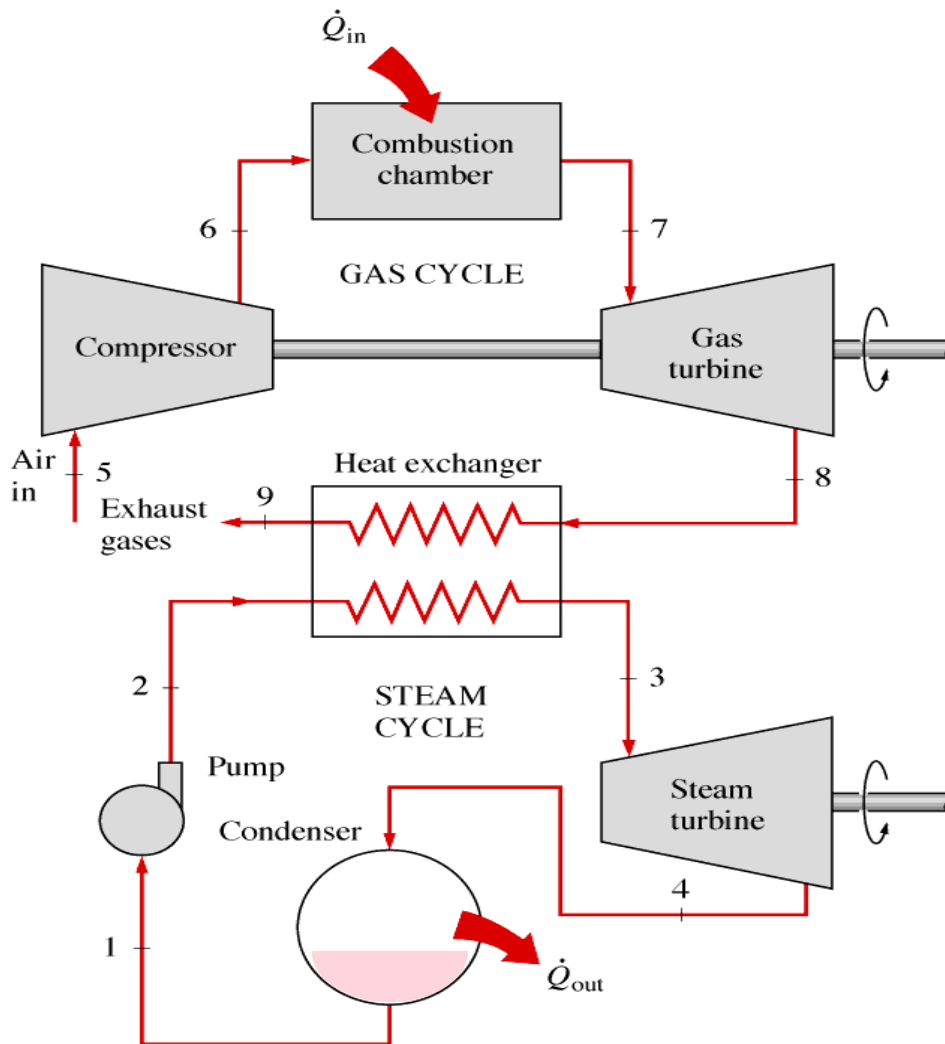
Eficiência térmica:

$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_H} = \frac{W_T - W_B}{Q_H}$$

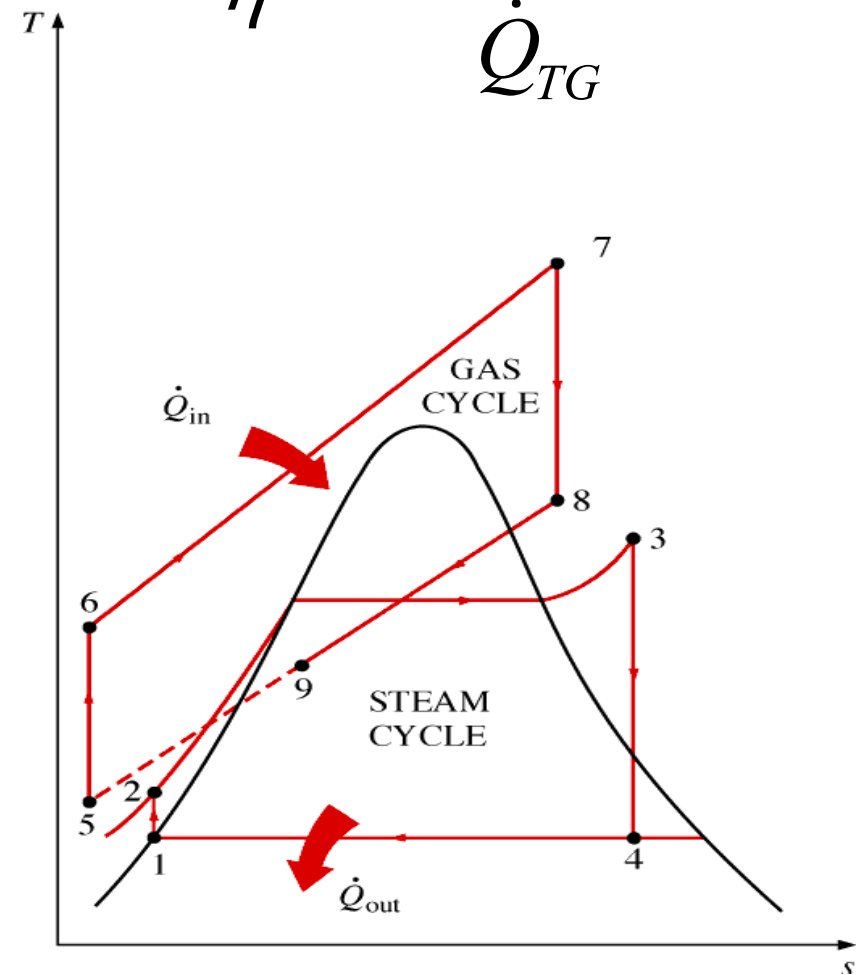
- 1ª Lei (R.P., P.U.F., $\Delta KE = \Delta PE = 0$) ::
 - Trabalho Turb. 1-2 : $w_T = h_1 - h_2$
 - Trabalho bomba 3-4: $w_B = h_4 - h_3$

$$\eta_{TV} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)}$$

Ciclo combinado sem Q_{HRSG}

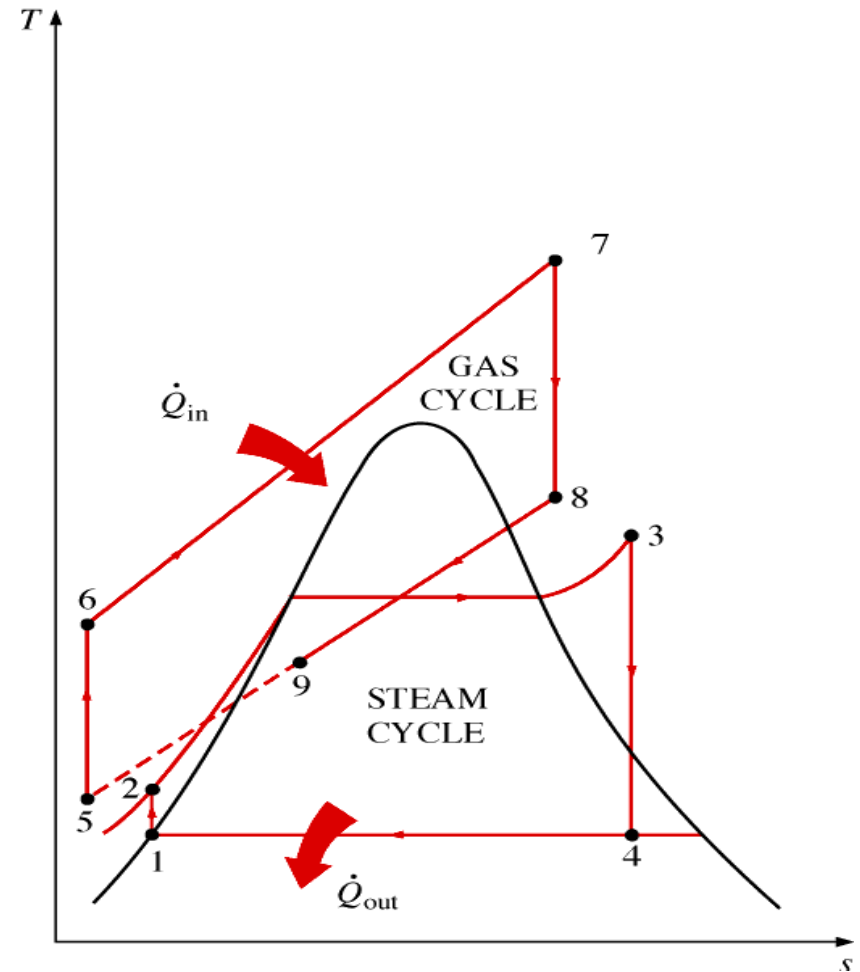
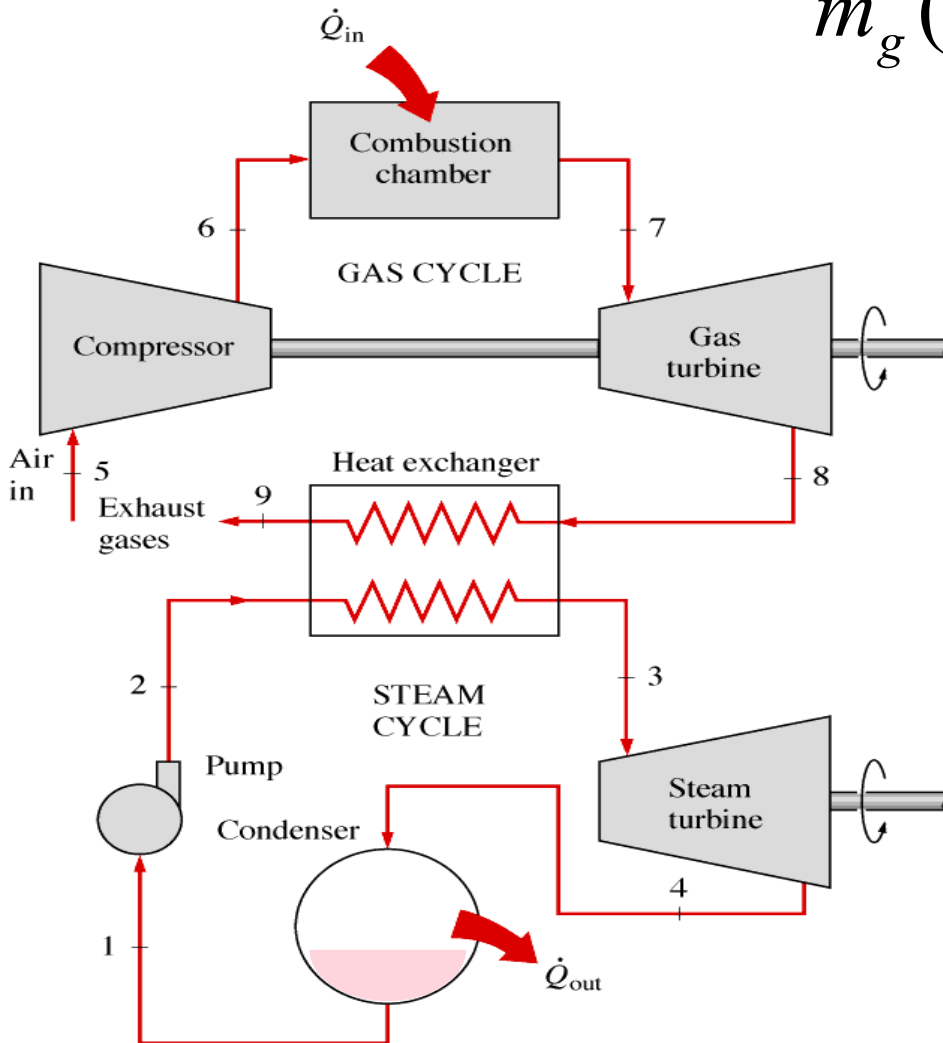


$$\eta = \frac{\dot{W}_{TG} + \dot{W}_{TV}}{\dot{Q}_{TG}}$$



Ciclo combinado sem Q_{HRSG}

$$\eta = \frac{\dot{m}_g (h_7 - h_8 + h_5 - h_6) + \dot{m}_v (h_3 - h_4 + h_1 - h_2)}{\dot{m}_g (h_7 - h_6)}$$



Ciclo combinado com cogeração

- É ainda possível obter maiores eficiências
- A cogeração é a produção simultânea potência mecânica e calor útil
- Um caso simples, é a utilização do calor rejeitado pelo vapor no CC
- Neste caso, se este calor for, hipoteticamente, totalmente utilizado em algum processo => aumento eficiência

Ciclo combinado com cogeração

- Eficiência térmica:

$$\eta = \frac{\dot{E}_{util}}{\dot{E}_{cons}} \longrightarrow \eta = \frac{\dot{W}_{TG} + \dot{W}_{TV} + \dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{TG}}$$

Demais melhorias

- Aumento na eficiência podem ser obtidos com modificações ciclos TG e TV
- TG:
 - Regeneração, reaquecimento, resfriamento intermediário
- TV:
 - Regeneração, superaquecimento, reaquecimento
- Critérios econômicos devem ser levados em consideração

Devemos ainda considerar...

- Processos utilizados para utilização de gerador de vapor
 - “Sangrias” do compressor
 - “Sangrias” da turbina
 - Compressores adicionais para injeção de ar
 - Perdas em filtros

Conclusão (1/2)

- Ciclos de potência a gás não suportam utilização direta de comb. sólidos
- Gaseificação permite seu uso em motores a gás
- Diversas vantagens incentivam seu uso
 - Utilização de “rejeitos” (ex. bagaço de cana)
 - Melhor aproveitamento energético
 - Util. comb. sól. pequenas instal.
 - Menor poluição do ar

Conclusão (2/2)

- Uso com motores alternativos
 - Utilização comb. menos nobres
 - Instalações pequenas
- Uso em ciclo combinado e cogeração
 - Uso de “rejeitos” e comb. menos nobres
 - Melhor aproveitamento energético
 - Menor poluição do ar