

PEA 3100

Energia, Meio Ambiente e Sustentabilidade

Aula 10 - Fontes Convencionais

Usinas Termelétricas



Geração Termelétrica

Renovável e Não-renovável

Não renovável

- Diesel
- Óleo - combustível
- Carvão mineral
- Gás natural
- Urânio
- Geotérmica

Renovável

- Biomassa Florestal
- Óleos vegetais
- Bagaço de cana
- Palha de arroz
- Lixo

Combustíveis sólidos

- Madeira
- carvão mineral e vegetal
- biomassas vegetais
- lixo urbano



Combustíveis líquidos e gasosos

Combustíveis líquidos:

- etanol – cana de açúcar
- de origem fóssil: se obtêm mediante o processo de transformação do petróleo (craqueamento); o petróleo cru é aquecido de 300 a 370°C para que se formem os vapores que, separados, se condensam em temperaturas diferenciadas:
 - gás liquefeito de petróleo (GLP);
 - gasolina;
 - querosene;
 - óleo combustível.

Combustíveis gasosos:

- gás natural
- de origem não fóssil
 - gás de lixo - biogás

Conceitos básicos sobre combustão:

- **Combustão** é o processo através do qual os combustíveis são oxidados numa reação que transforma a energia química contida em suas moléculas em energia térmica, na forma de calor de combustão.
- As fontes combustíveis que apresentam melhores eficiências de conversão energética são compostas por cadeias de átomos de carbono associadas aos de hidrogênio, formando estruturas conhecidas como hidrocarbonetos:

ENERGIA QUÍMICA (COMBUSTÃO)

A “OXIDAÇÃO” DO CARBONO PROCEDE ATRAVÉS DA SEGUINTE REAÇÃO QUÍMICA.



Energia liberada por mol de carbono = 7,8 kcal.

A “OXIDAÇÃO” DO HIDROGÊNIO PROCEDE ATRAVÉS DA SEGUINTE REAÇÃO QUÍMICA.



Energia liberada por mol de hidrogênio = 4,2 kcal

Obs. Um mol de carbono queimando libera quase 50% mais de energia que um mol de hidrogênio. Entretanto, um mol de carbono pesa doze gramas, enquanto que um mol de hidrogênio pesa 2 gramas. Portanto, para a mesma massa o hidrogênio libera 4,5 vezes mais energia que o carbono.

Não é somente a quantidade de energia liberada que define a qualidade de um energético.

calor produzido na combustão de um grama

Metano (gás natural)	13,2 kcal
Óleo	10 kcal
Lipídio (gordura)	9,1 kcal
Carbono (carvão)	7,8 kcal
Álcool etílico	7,1 kcal
Proteína	5,7 kcal
Glicose	4,1 kcal

Exercício 1: Quantas calorias um resistor/aquecedor deve liberar para elevar a temperatura de 20 °C a 100 °C de 250 gramas de água (aproximadamente uma xícara)? (sistema totalmente isolado do ponto de vista de térmico)

Resposta:

$$E = Q = 250 \times 80 \text{ °C} = 20.000 \text{ cal}$$

Exercício 2: Quanto calor é necessário para elevar de 20 °C a temperatura de ebulição de 1 kg de água?

Resposta: $Q = mc \Delta T = (1\text{kg}) \times (4186 \text{ J/kg-°C}) (100 \text{ °C} - 20 \text{ °C})$

$$Q = 83,72 \text{ M J}$$

MÁQUINAS TÉRMICAS E O CICLO DE CARNOT

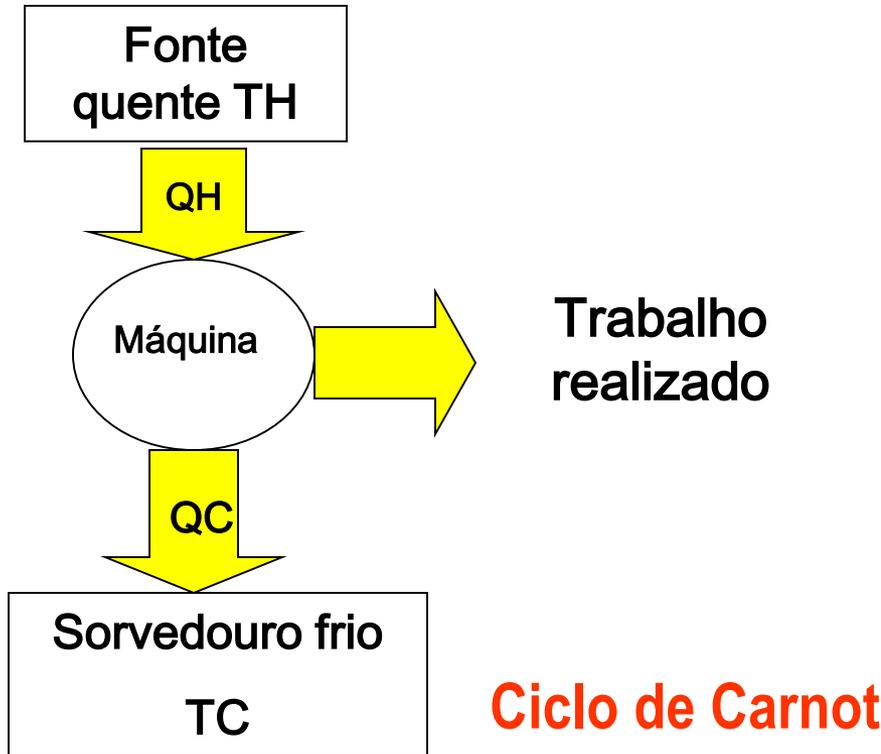
(Nicolas Leonard Sadi Carnot, nascido em Paris, no dia 1º de junho de 1796, e educado nas École Polytechnique (Paris) e École Genie (Metz).)

Carnot apresentou a possibilidade de interconversão entre calor e trabalho possui restrições para as chamadas máquinas térmicas. O Princípio da Termodinâmica, elaborado em 1824 por Sadi Carnot, é enunciado da seguinte forma:

"Para haver conversão contínua de calor em trabalho, um sistema deve realizar ciclos entre fontes quentes e frias, continuamente. Em cada ciclo, é retirada uma certa quantidade de calor da fonte quente (energia útil), que é parcialmente convertida em trabalho, sendo o restante rejeitado para a fonte fria (energia dissipada)"

Princípio da Conversão de Energia

Máquina Térmica – inclui todos os tipos de máquinas em que o calor é transformado em trabalho.



1ª Lei da Termodinâmica

Lei da conservação de energia diz que:

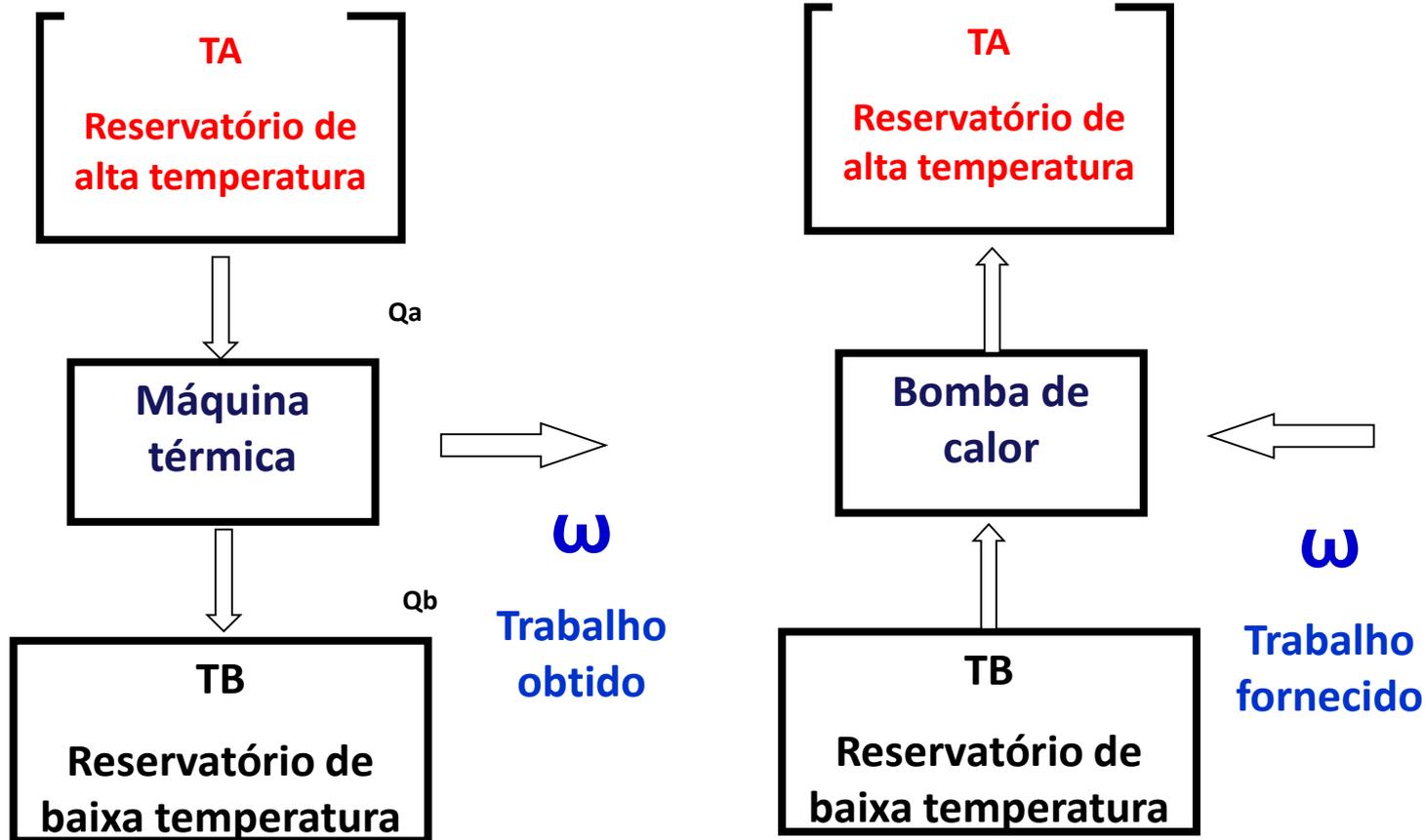
$$\text{Trabalho realizado} = QH - QC$$

Portanto:

$$\text{Eficiência} = \frac{(QH - QC)}{QH}$$

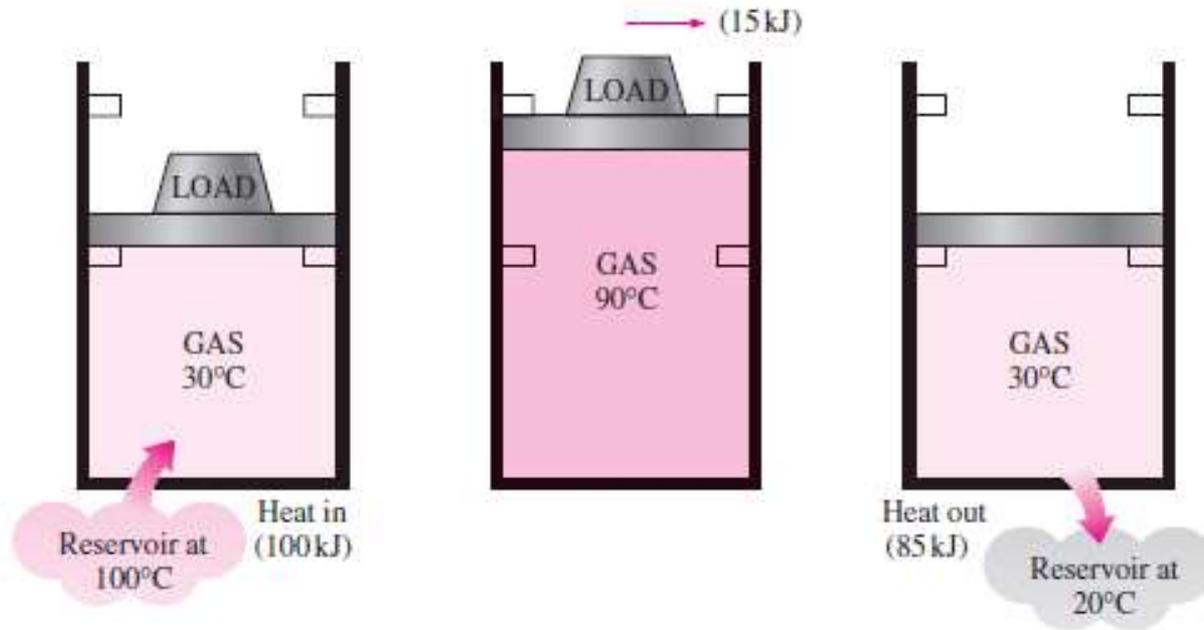
(Em Kelvin)

Para uma máquina ideal - Eficiência máxima = $(TH - TC) / TH$



$$(Eficiência)E = \frac{W}{Q_a} = \frac{Q_a - Q_b}{Q_a} = 1 - \frac{Q_b}{Q_a} = 1 - \frac{T_b}{T_a} \text{ (Temperatura _ em _ Kelvin)}$$

É Possível aproveitar o calor rejeitado e reiniciar o ciclo?



Para que haja calor (energia em trânsito) é necessário que haja diferença de temperatura - Calor flui da fonte quente p / fonte fria

Perguntas:
a - Em uma locomotiva a vapor qual é a fonte quente?
b – Quem é a fonte fria?





Thermodynamics an engineering approach - Boles & Yunos

Uma geladeira ideal (com perdas iguais a zero) funcionando em um quarto perfeitamente adiabático (sem troca de calor). O que acontece com a temperatura do quarto?

Exercício 3: Em uma usina geradora de energia elétrica a ciclo de vapor convencional, a temperatura do vapor que entra na turbina é de 540 °C ou 813 K. A temperatura do reservatório frio (a água de refrigeração) é de 20 °C ou 293 K.

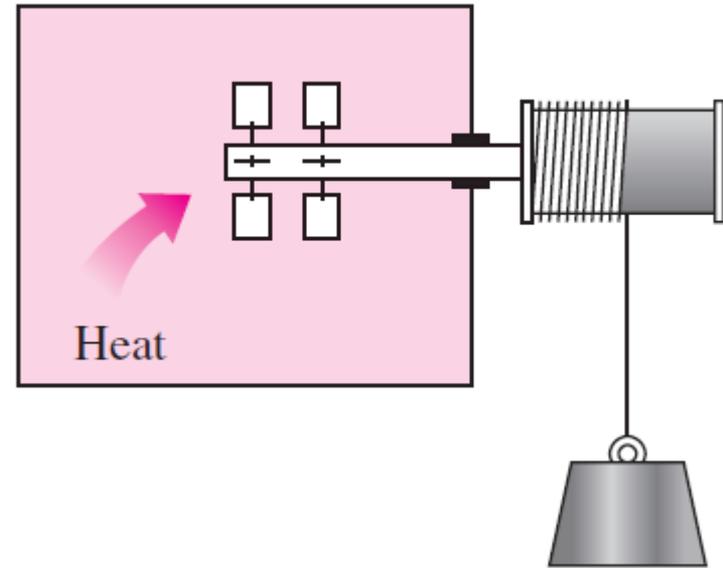
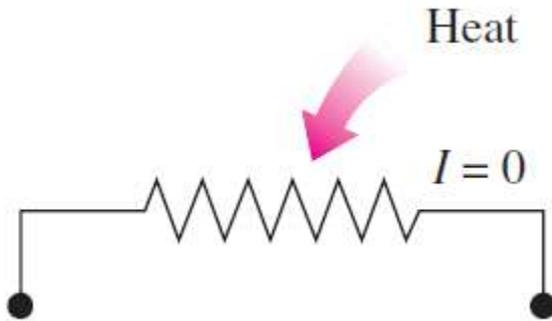
- a - Qual é a eficiência máxima possível desta máquina térmica?
b - Se a eficiência global da usina for de 35%, quanto a mesma estará operando em relação a eficiência de Carnot?

Respostas:

$$\text{Eficiência máxima} = \frac{813 - 293}{813} \times 100\% = 64\%$$

$$\text{Eficiência (em relação)} = \frac{0,35}{0,64} = 55\% \text{ da eficiência de Carnot}$$

Processos Irreversíveis



A primeira lei da termodinâmica não restringe a "direção" dos processos. Isso é verificado pela segunda Lei, através de uma propriedade chamada entropia

Thermodynamics an engineering approach - Boles & Yunos

Máquina Térmica Real

2ª Lei da Termodinâmica

É impossível converter uma dada quantidade de energia térmica completamente em trabalho útil. Em um processo de conversão de energia, esta sempre sofre degradação de qualidade, de forma que a habilidade para realizar trabalho é reduzida.

Entropia é uma propriedade que mede o grau de desordem do sistema, quando o mesmo tem a sua energia alterada, seja pela adição ou subtração de calor, seja pela realização de trabalho sobre o mesmo

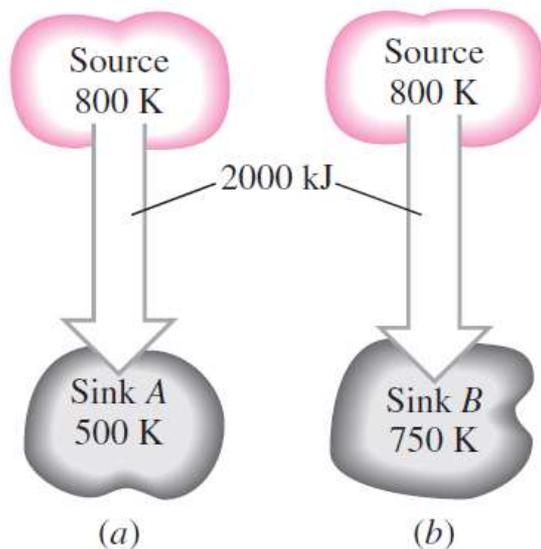
Relação entre calor e temperatura [kcal/K]

$\Delta S: >0$ Processos irreversíveis

$\Delta S: =0$ Processos reversíveis

$\Delta S: <0$ Processos impossíveis

2ª Lei da Termodinâmica



$$\Delta S_{\text{source}} = \frac{Q_{\text{source}}}{T_{\text{source}}} = \frac{-2000 \text{ kJ}}{800 \text{ K}} = -2.5 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_{\text{sink}} = \frac{Q_{\text{sink}}}{T_{\text{sink}}} = \frac{2000 \text{ kJ}}{500 \text{ K}} = +4.0 \text{ kJ/K}$$

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{source}} + \Delta S_{\text{sink}} = (-2.5 + 4.0) \text{ kJ/K} = \mathbf{1.5 \text{ kJ/K}}$$

$$\Delta S_{\text{source}} = -2.5 \text{ kJ/k}$$

$$\Delta S_{\text{sink}} = +2.7 \text{ kJ/K}$$

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{total}} = (-2.5 + 2.7) \text{ kJ/K} = \mathbf{0.2 \text{ kJ/K}}$$

Tipos de Máquinas Térmicas

Caracterizam-se pelo tipo de ciclo termodinâmico a que o fluido de trabalho é submetido.

Ciclo a Vapor ou Rankine: fluido de trabalho sofre mudança de estado.

Ciclo a Gás ou de Brayton: o fluido de trabalho se mantém no estado gasoso (gás quente).

Classificação:

- **Centrais a combustão** – Termelétricas (convencionais):
 - ◆ Combustão externa: o combustível não entra em contato com o fluido de trabalho.
 - ◆ Combustão interna: a combustão se efetua sobre uma mistura de ar e combustível.
- **Centrais nucleares** – Processo de fissão do núcleo atômico do combustível nuclear.

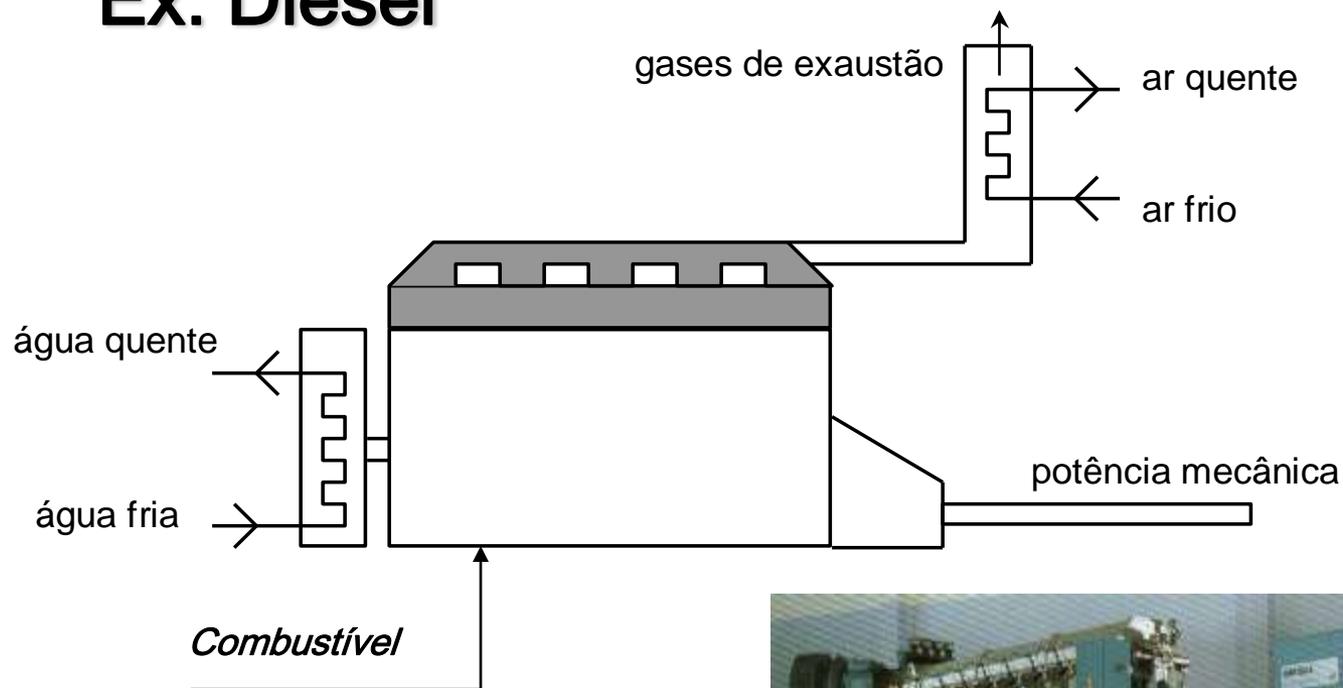
Centrais termelétricas

Esquemas, principais tipos e configurações:

- Centrais a Diesel
- Centrais a Vapor (não-nucleares)
- Centrais Nucleares
- Centrais a Gás
- Termelétrica com Sistema Combinado
- Central Termo-solar
- Central Geotérmica
- Central Oceânica – gradiente térmico
- Central de Cogeração

Motores de combustão interna

Ex: Diesel



Entalpia

Entalpia: energia (interna + trabalho)

$$U + PV = H \longrightarrow \text{Entalpia (kJ)}$$

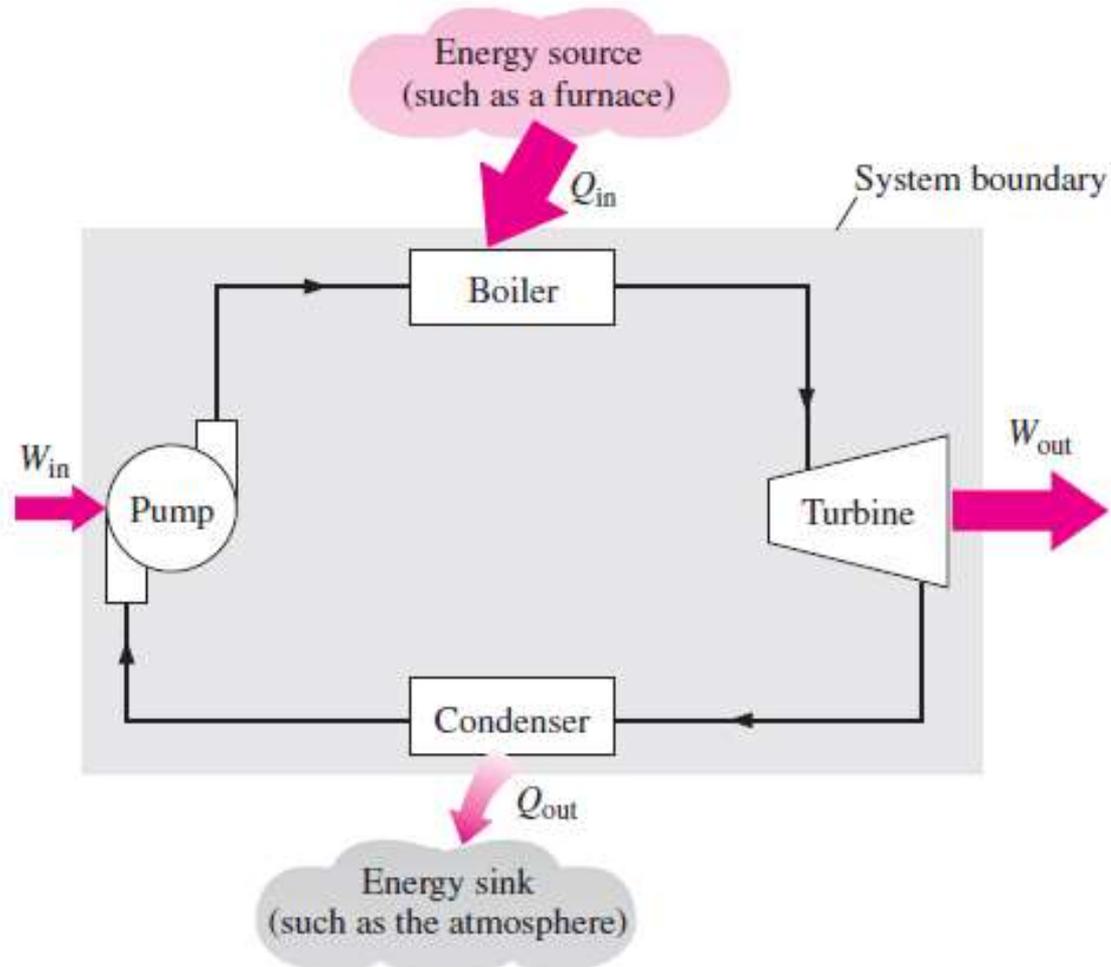
Trabalho

Energia interna

Pode-se definir entalpia específica - Por unidade de massa

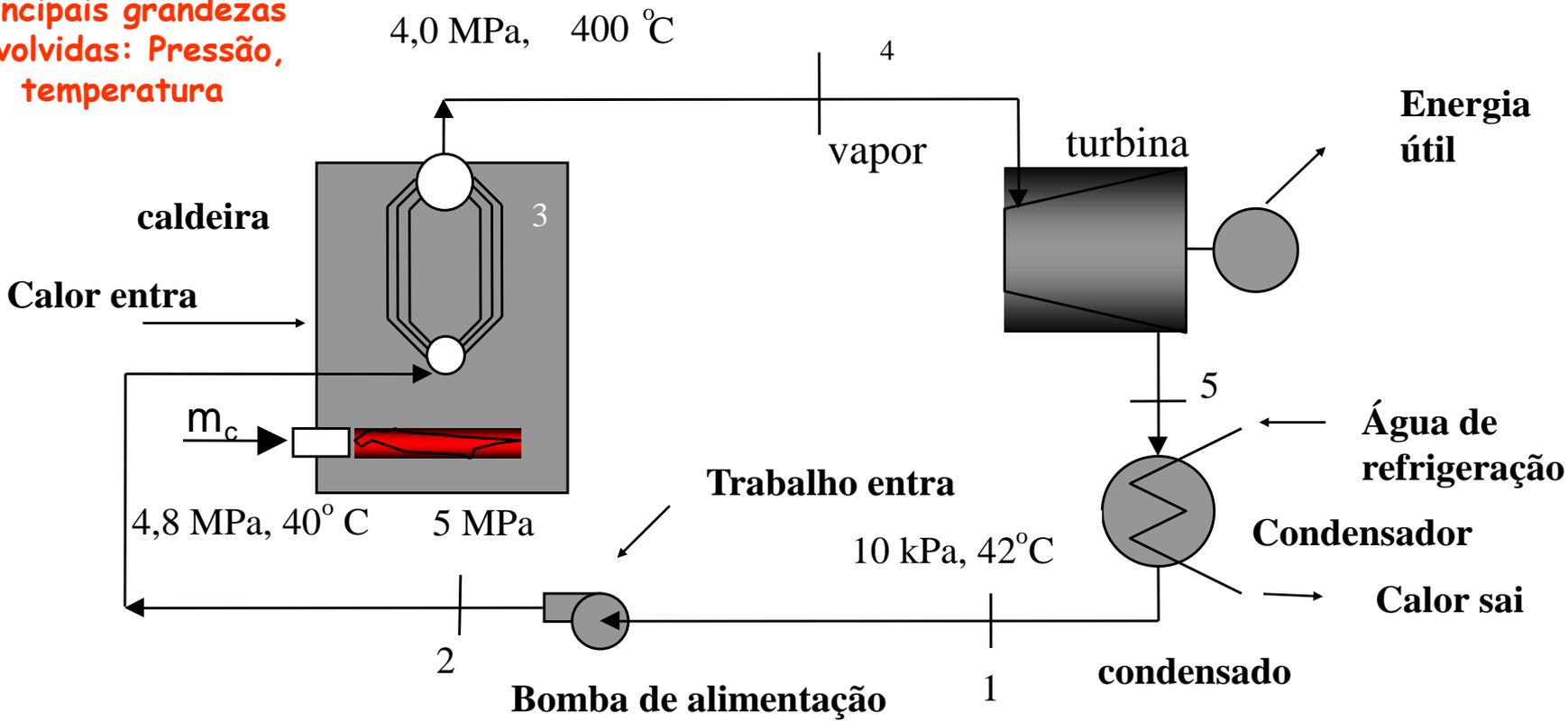
$$u + pv = h \longrightarrow \text{Entalpia específica (kJ/kg)}$$

Ciclo a vapor – Termelétrica a vapor



Ciclo a vapor – Termelétrica a vapor

Principais grandezas envolvidas: Pressão, temperatura



Rendimento do ciclo

$$\eta_r = \frac{\text{Trabalho produzido (3)} - \text{Trabalho na bomba}}{\text{Calor fornecido á caldeira}} = \frac{(h_4 - h_5) - (h_2 - h_1)_s}{h_4 - h_2}$$

$P_e = P_u \times \eta_G$ Rendimento total = 30%

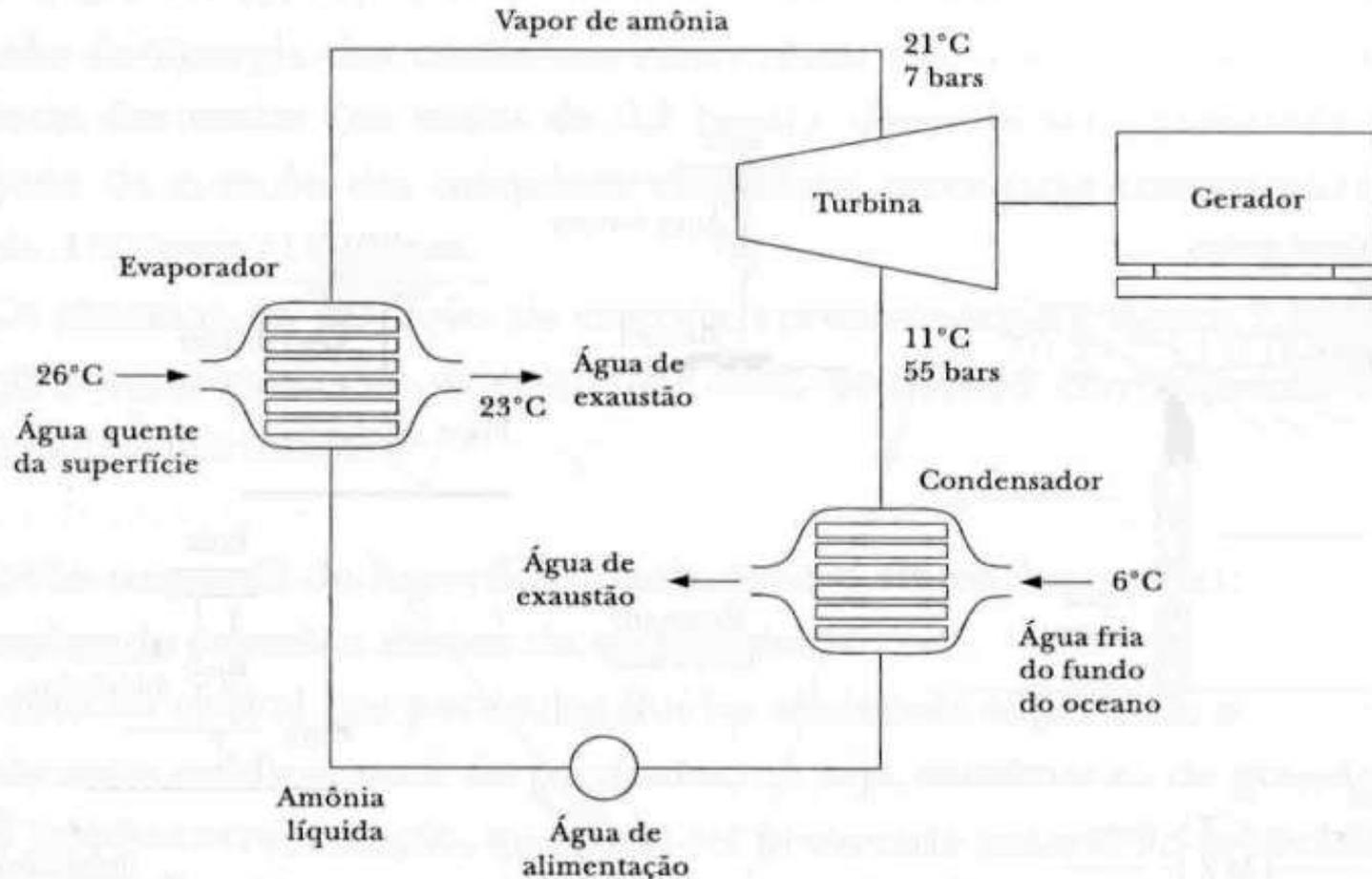


Aplicações da Turbina a Vapor

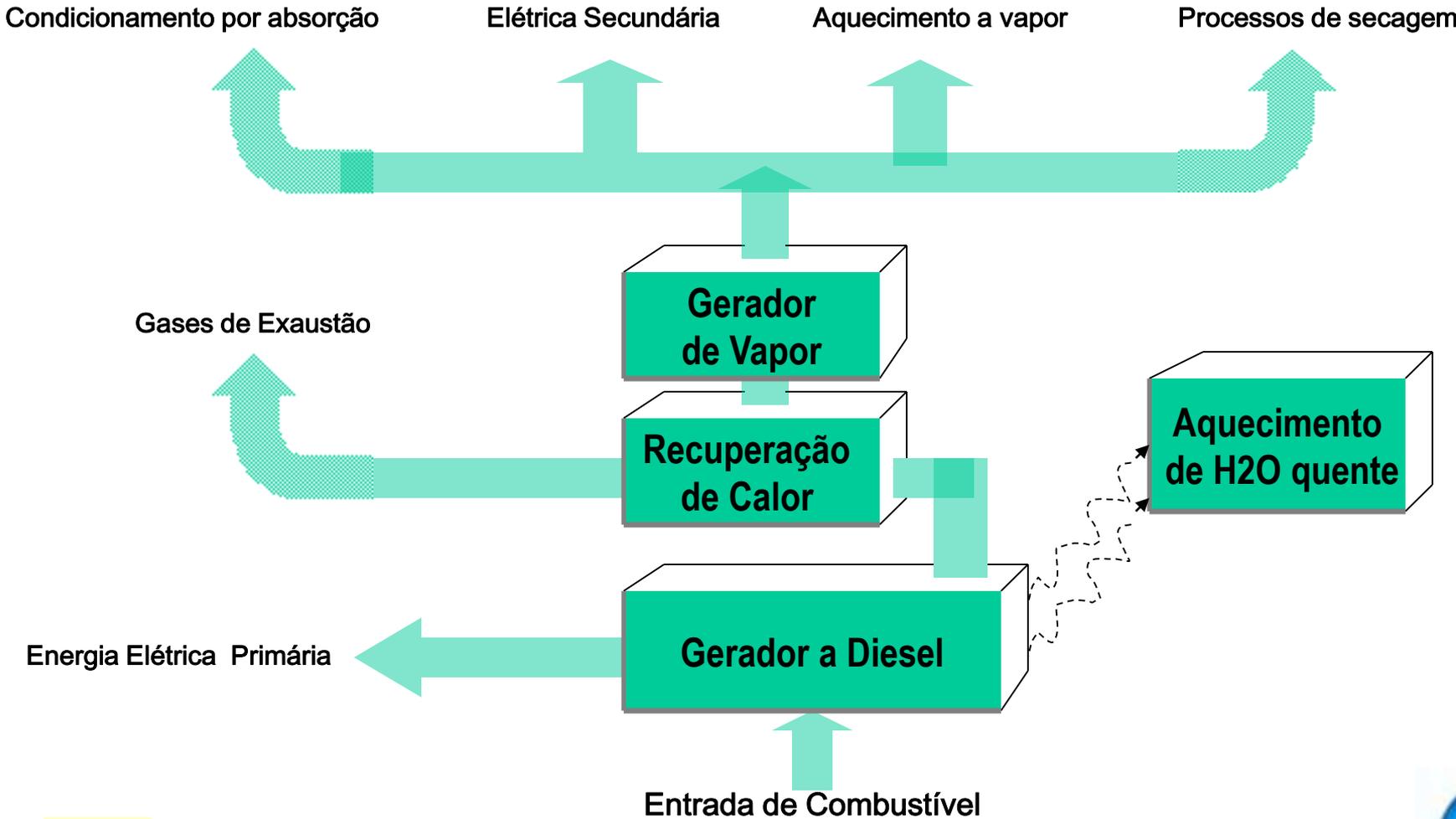
- **Ciclo a Vapor Convencional (já mostrado);**
- **Térmicas Utilizando Ciclo Binário:**
 - **Centrais Nucleares,**
 - **OTEC – *Ocean Thermal Energy Conversion*;**
- **Esquemas de Cogeração;**
- **Esquemas de Ciclo Combinado.**

Energia dos oceanos

Aproveitamento do gradiente térmico



Cogeração: Produção e uso simultâneo de várias formas de energia a partir de uma única fonte de combustível.

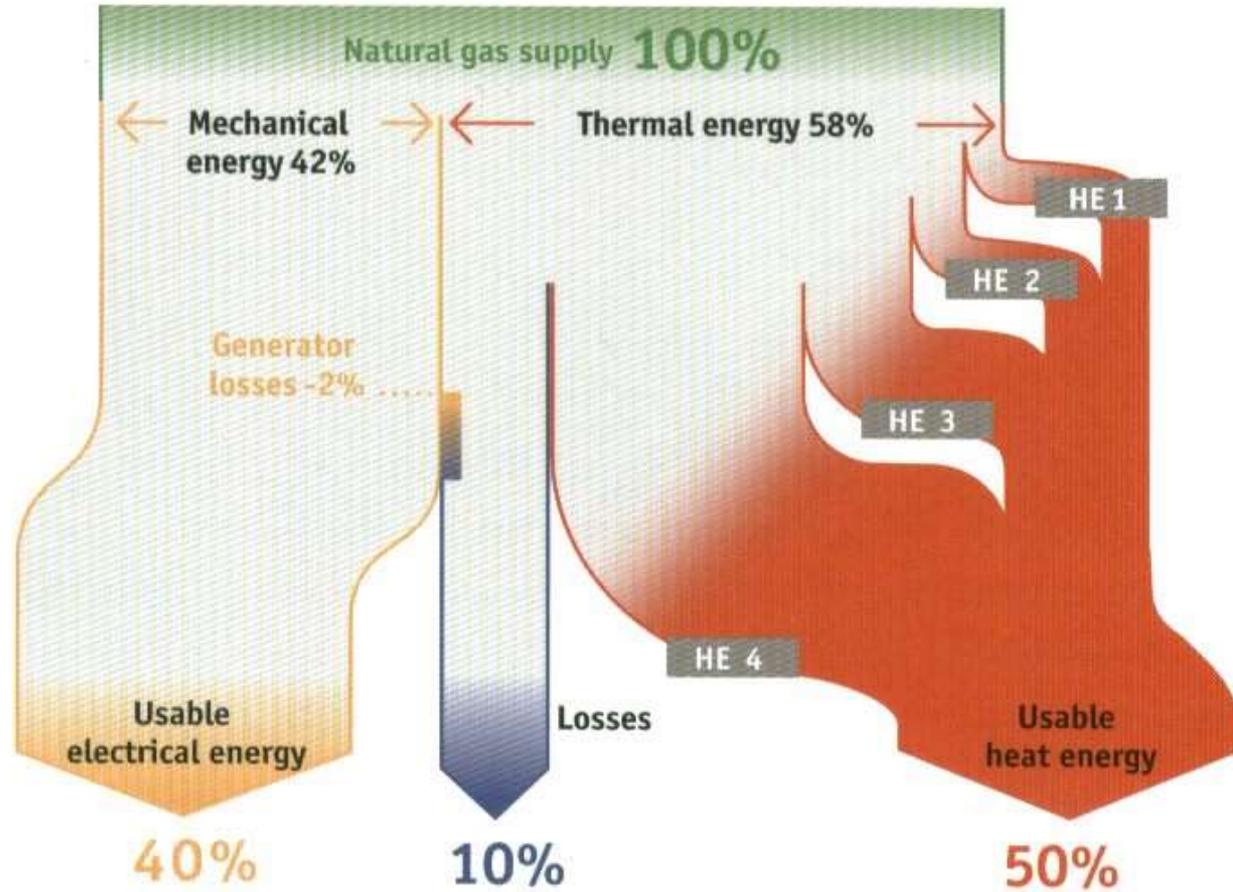


Fonte: Reproduzido de HINRICHS & KLEINBACH, 2003.



Centrais Termelétricas

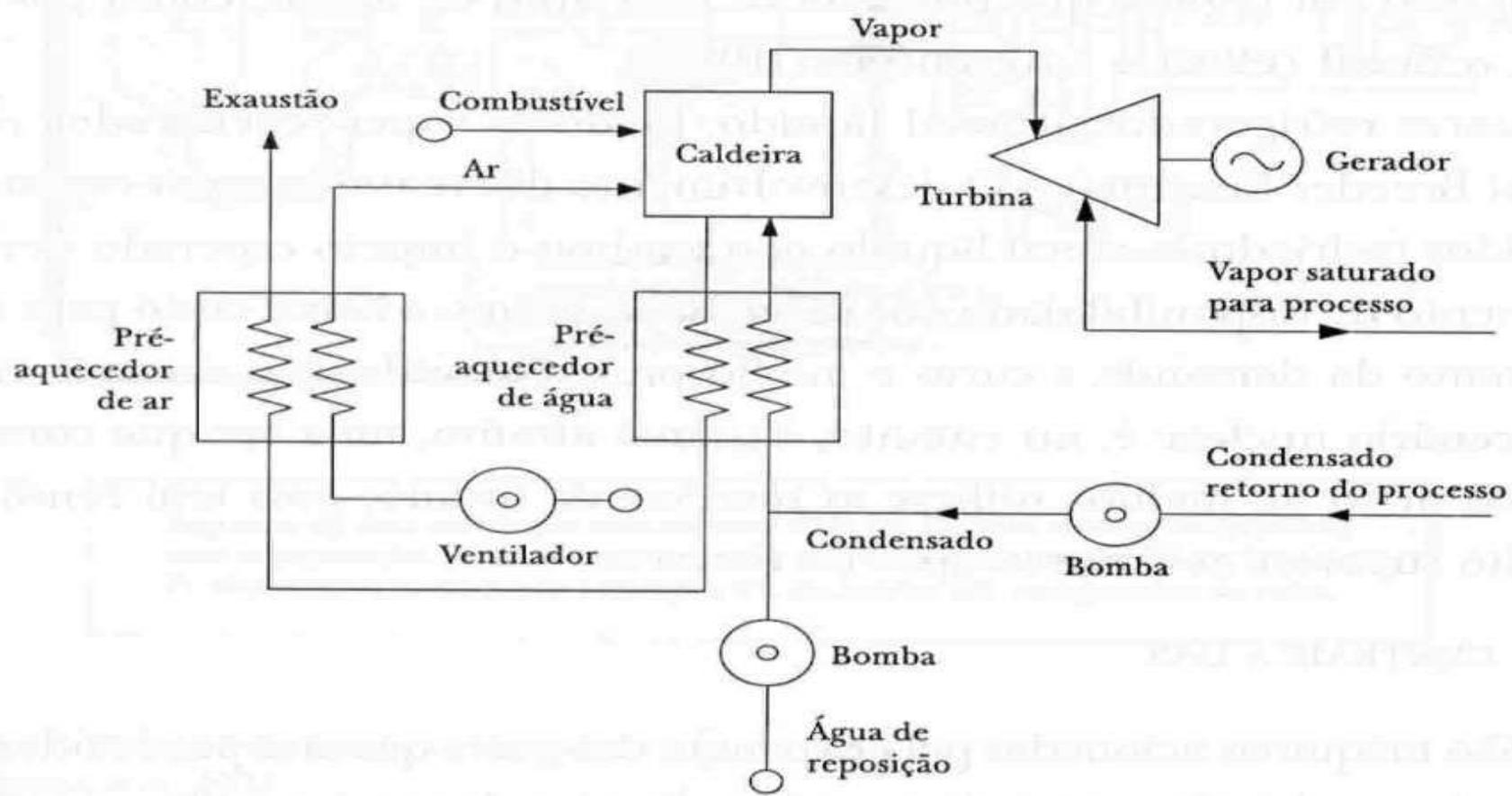
Cogeração



HE 1 - Mixture intercooler
HE 2 - Oil heat exchanger

HE 3 - Engine jacket water heat exchanger
HE 4 - Exhaust gas heat exchanger

Cogeração: Esquema usando Ciclo a Vapor



Rendimento = 80%

ENERGIA NUCLEAR - Princípio básico

A energia nuclear é a energia armazenada no núcleo dos átomos, mantendo prótons e nêutrons juntos.

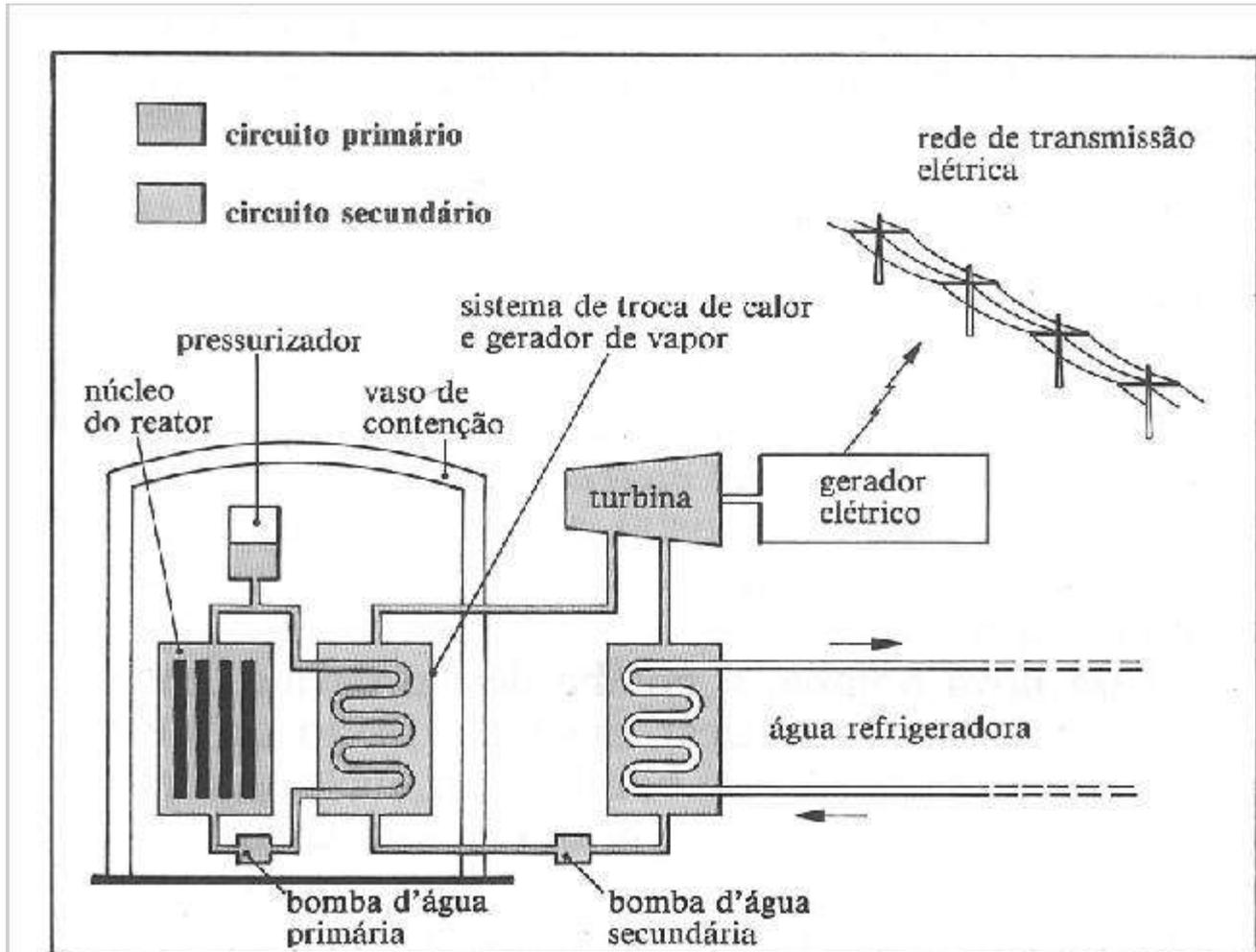
Esta energia é fóssil no sentido de que os elementos foram formados há cerca de 8 bilhões de anos.

O minério de urânio é toda concentração natural de minerais na qual o urânio ocorre em proporções e condições que permitam sua exploração econômica.

O elemento químico urânio é um metal branco-níquel, pouco menos duro que o aço e encontra-se em estado natural nas rochas da crosta terrestre. Sua principal aplicação é na geração de energia elétrica e na produção de material radioativo para uso na medicina e na agricultura.

Nos reatores nucleares, o que é aproveitado não é a radioatividade do urânio mas sim a sua propriedade de fissionar-se (quebrar-se ou partir-se) e de liberar grande quantidade de energia quando atingido por um “nêutron.

Centrais Nucleares – Geração de Eletricidade

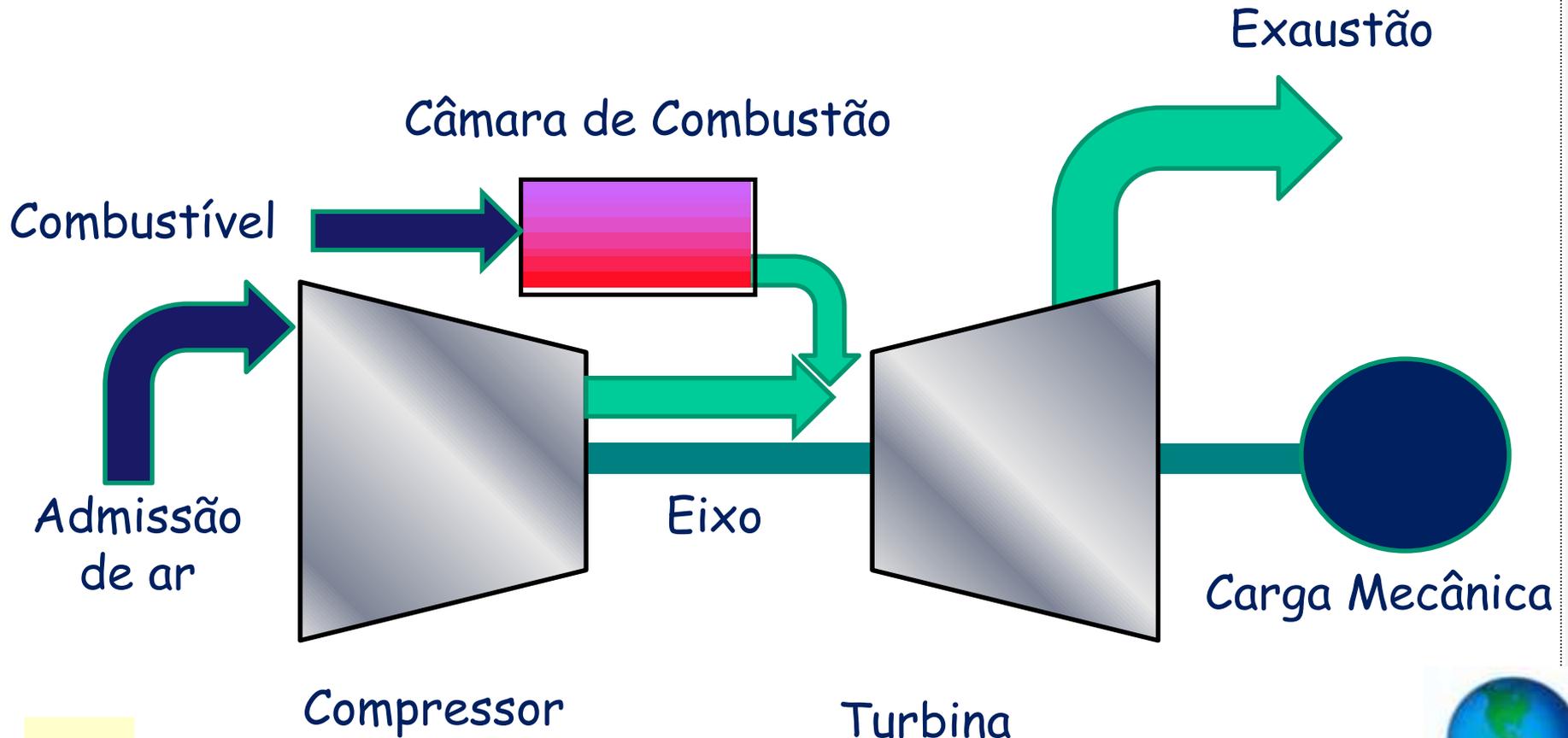


Esquema de construção de um reator nuclear do tipo Angra I

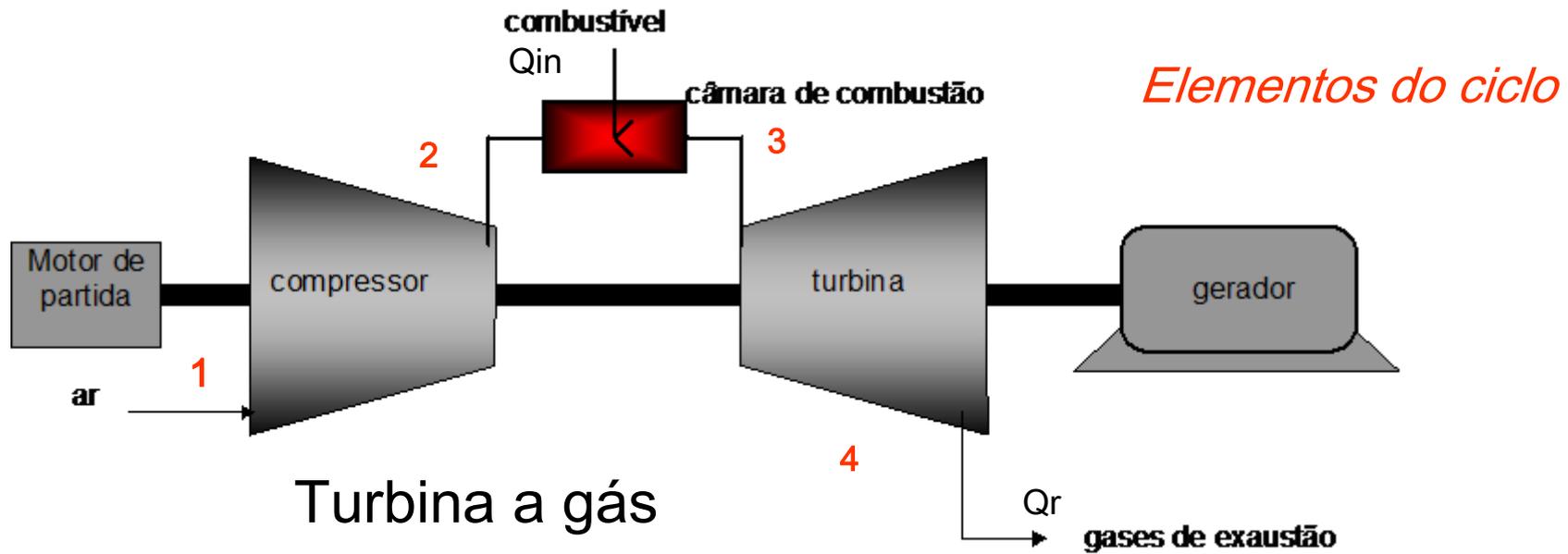
Centrais Termelétricas

Turbinas a Gás

32



Central a gás – Ciclo de Brayton (gás)



Trabalho líquido $\rightarrow q_{in} - q_r = c_p (T_3 - T_2) - c_p (T_4 - T_1)$

Então:

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

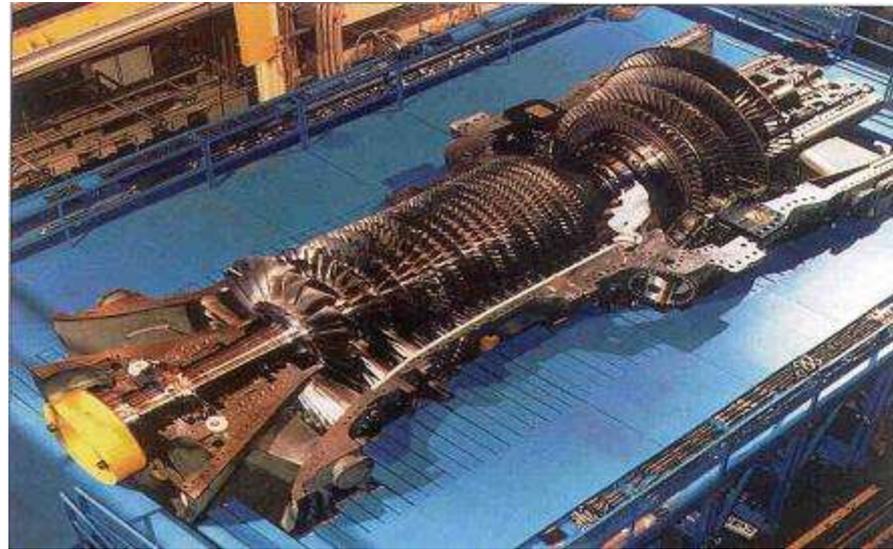
Rendimento = 37%

Calor fornecido ao ciclo

Onde: T = temperatura e C_p = calor específico

Turbina a gás

Turbina a gás
Alta potência →



← *Microturbina a Gás*

CENTRAIS A CICLO COMBINADO

Combinam ciclo a vapor (Central a vapor) com ciclo a Gás (central a gás).

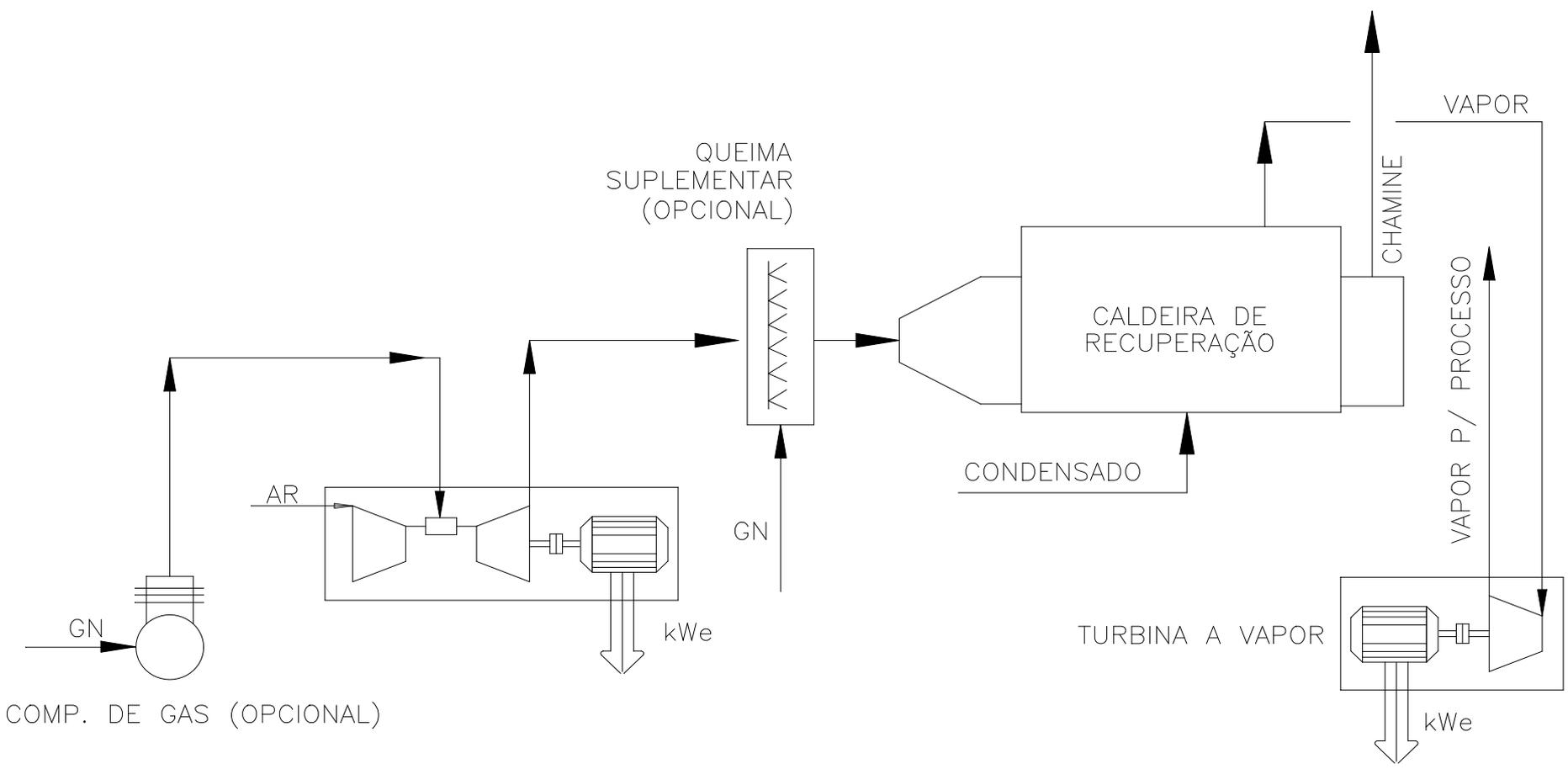
Vantagem: *aumenta o rendimento do ciclo*

Num ciclo simples de turbina a gás, os gases de exaustão após percorrerem a extensão da mesma, são enviados à atmosfera a uma temperatura elevada (aproximadamente 500°C).

O calor contido nos gases pode ser aproveitado para ser utilizado numa caldeira de recuperação térmica que irá transferir o calor dos gases para um circuito água-vapor.

O vapor gerado na caldeira de recuperação a uma alta pressão é enviado à uma turbina a vapor onde é expandido gerando mais eletricidade.

Ciclo combinado

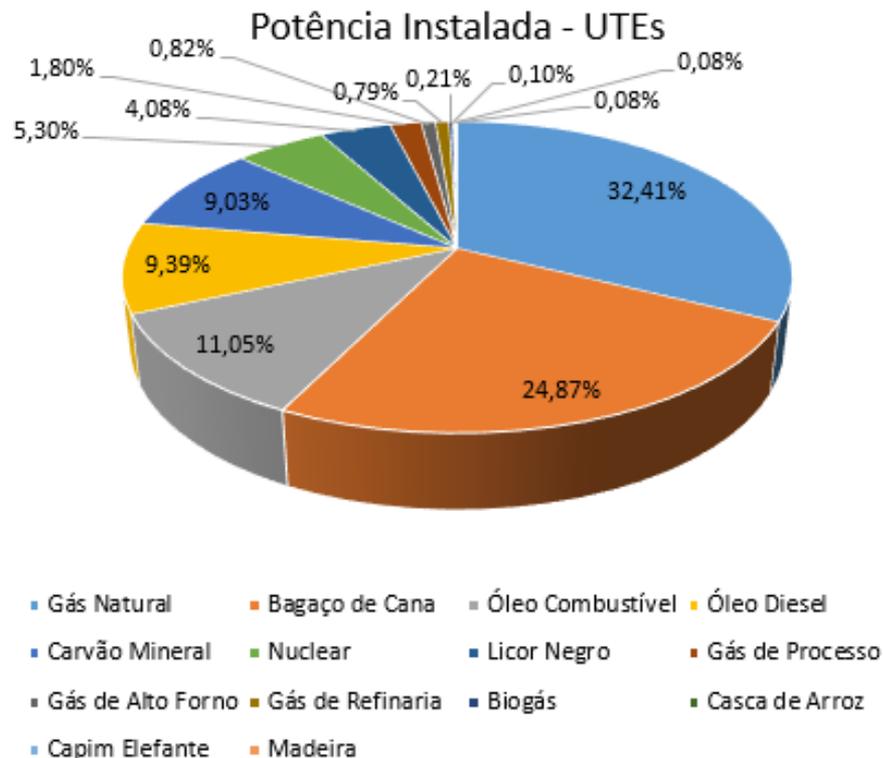


Rendimento = 55%

Potência Instalada em Termelétricas por Tipo de Combustível-Brasil – 2014

Potência total instalada = 132,4 GW

Potência instalada com Usinas térmicas = 38,4 GW (29,0%)



Gás Natural	32,41%
Bagacço de Cana	24,87%
Óleo Combustível	11,05%
Óleo Diesel	9,39%
Carvão Mineral	9,03%
Nuclear	5,30%
Licor Negro	4,08%
Gás de Processo	1,80%
Gás de Alto Forno	0,82%
Gás de Refinaria	0,79%
Biogás	0,21%
Casca de Arroz	0,10%
Capim Elefante	0,08%
Madeira	0,08%

Algumas Termelétricas no Brasil- dados:

Usina	Potência fiscalizada (kW)	Combustível	Ciclo	Localidade
Governador Leonel Brizola (Ex TermoRio)	1.058.300	Gás Natural	Combinado	Duque de Caxias - RJ
Mário Lago (Ex. Macaé Merchant)	922.615	Gás Natural	Aberto	Macaé - RJ
Norte Fluminense	868.925	Gás Natural	Combinado	Macaé - RJ
Santa Cruz	766.000	Gás Natural	Combinado	Rio de Janeiro - RJ
Uruguaiana	639.900	Gás Natural	Combinado	Uruguaiana - RS
Mauá (UTM-II)	552.564	Óleo Diesel	Combinado	Manaus - AM
Termopernambuco	532.755	Gás Natural	Combinado	Ipojuca - PE
Cuiabá	529.200	Gás Natural	Combinado	Cuiabá - MT
Araucária	484.150	Gás Natural	Combinado	Araucária - PR
Piratininga	472.000	Óleo Combustível	Combinado	São Paulo - SP
Presidente Médici A, B e C	446.000	Carvão Mineral	-	Candiota - RS
Fernando Gasparian (Ex-Nova Piratininga)	386.080	Gás Natural	Combinado	São Paulo - SP
Barbosa Lima Sobrinho (Ex-Eletrobolt)	379.000	Gás Natural	-	Seropédica - RJ
Jorge Lacerda IV	363.000	Carvão Mineral	-	Capivari de Baixo - SP
Termo Norte II	349.950	Gás Natural	Combinado	Porto Velho - RO

Total de usinas termoelétricas em operação: 1850

Potência total instalada: 36.383.469 kW

Total de usinas a bagaço de cana: 378

Potência total das usinas a bagaço de cana: 9.339.426 kW

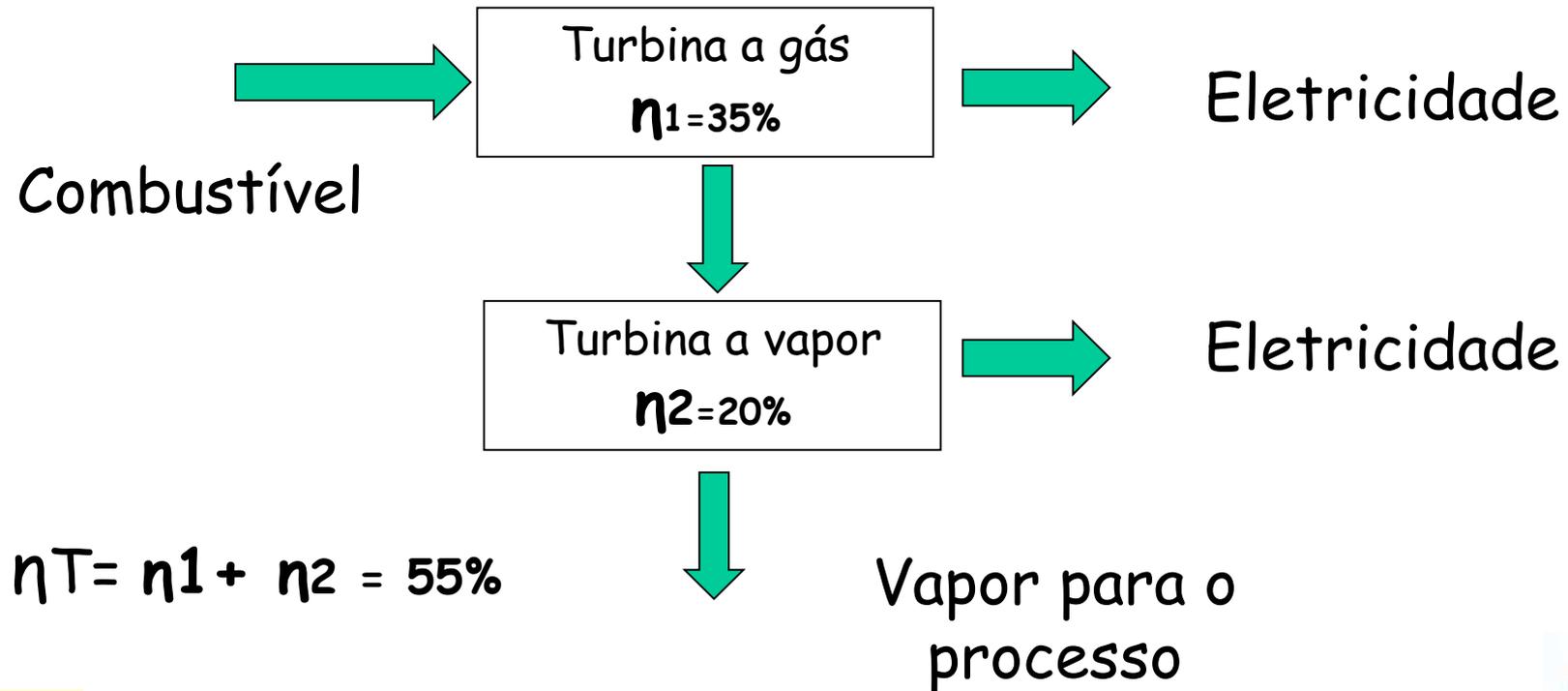
Fonte: Banco de Informações de Geração da ANEEL. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Combustivel.cfm> Acessado em Fevereiro/2014.



AVANÇOS TECNOLÓGICOS NA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE

Os impactos ambientais e custos resultantes da produção de energia elétrica podem ser reduzidos melhorando a eficiência das tecnologias de geração de energia

Ex: Centrais termelétricas – Geradores com ciclo combinado



Alguns números:

- Os avanços tecnológicos já permitiram ultrapassar a barreira dos 60% de rendimento na geração de eletricidade
- O rendimento médio da geração térmica brasileira através de serviços públicos aumentou de 31% em 1989 para 36% em 2005.
- No mesmo período, o segmento autoprodutor não cresceu mas já parte de uma patamar mais alto = 40%
- Para se comparar, no Japão a eficiência média de 36% em termelétrica já tinha sido atingida em 1965.
- Em 2004, as termelétricas no Japão possuíam eficiência média de 40,4% com algumas unidades chegando a 52%
- A Dinamarca tinha 36% de eficiência média em 1960 e 52% no ano 2000.

Novos desenvolvimentos em tecnolcias: Direcionados para obter maior eficiência, menores custos e emissões

Exemplos:

- Geradores de vapor supercríticos
- Ciclos combinados (Rankine + Brayton)
- Novos materiais como ligas de níquel
- Ciclos magneto-hidrodinâmicos
- Queimadores mais eficientes
- Injeção de amônia - combustão
- Usinas de combustão com Leito fluidizado circulante
- Usinas de ciclo combinado com gaseificação integrada
- Captura e sequestro de carbono

Ex: Ciclo integrado de gaseificação e cogeração

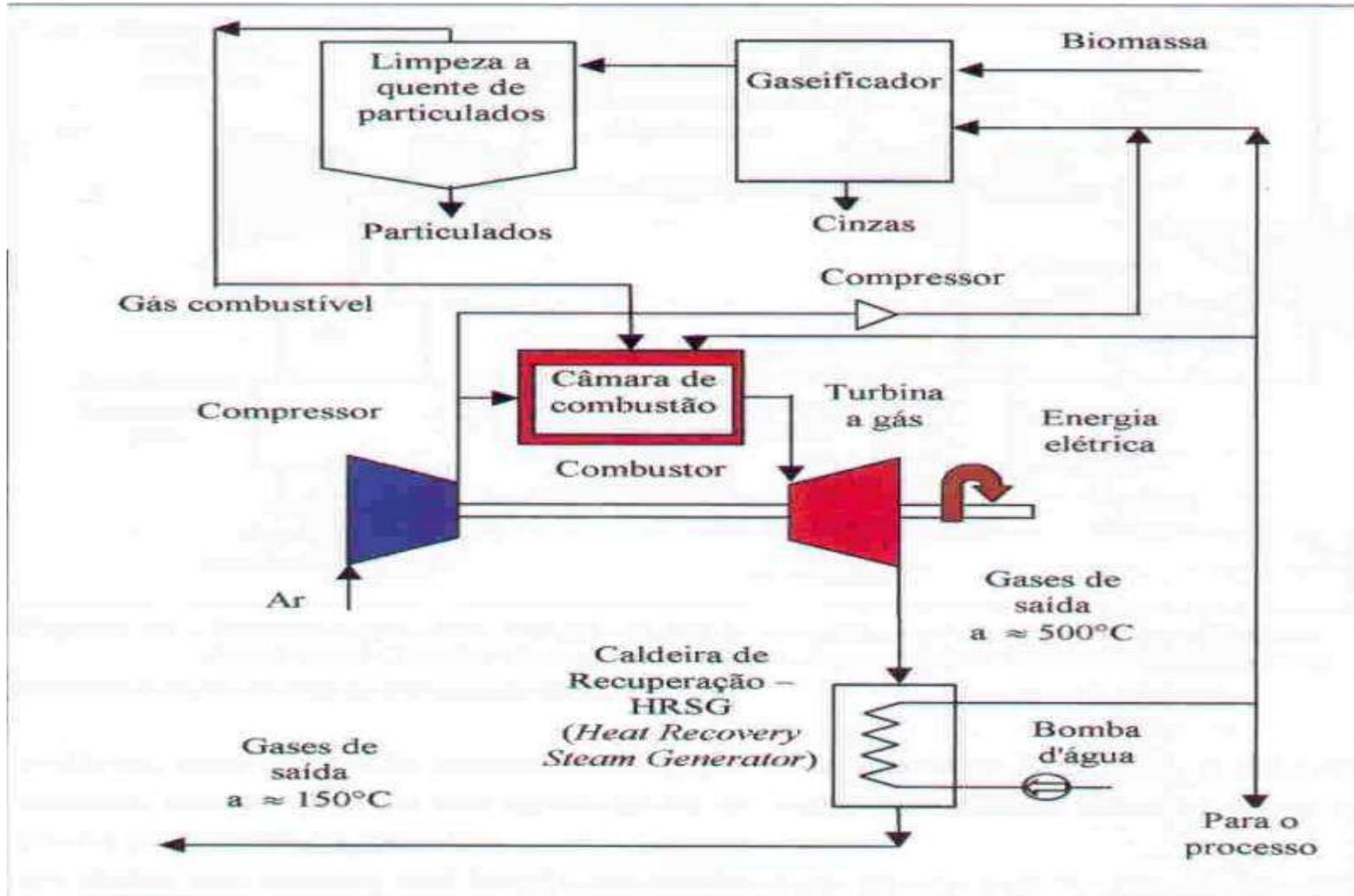


Figura 14 - Turbina a gás com injeção de vapor integrada a gaseificador de biomassa - Biomass Integrated Gasifier/Steam Injected Gas Turbine (BIG/STIG).