



**SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISCIPLINA OPTATIVA TMEC168
COGERAÇÃO E TRIGERAÇÃO DE
ENERGIA**

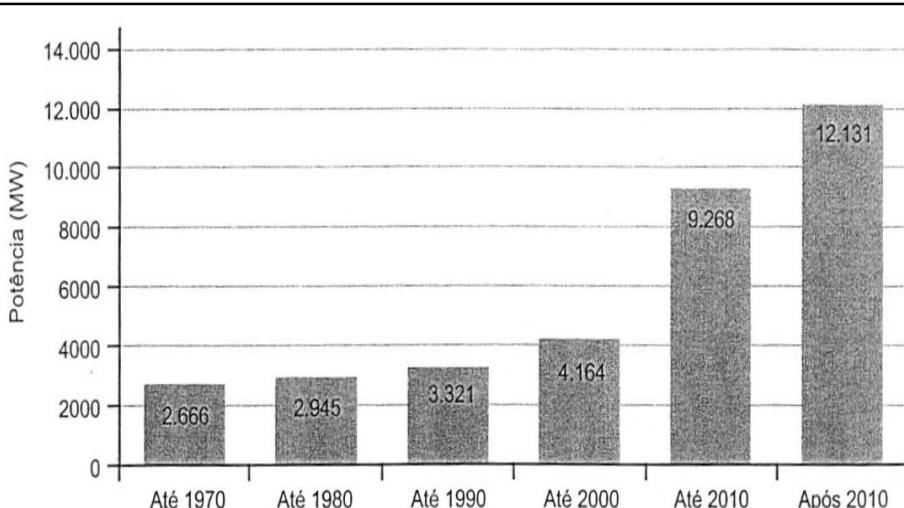
Parte 1

**Prof. Fernando Bócon, Dr. Eng.
bocon@ufpr.br**

**1 - DEFINIÇÃO E EXEMPLOS DE SISTEMAS DE
COGERAÇÃO E TRIGERAÇÃO DE ENERGIA**

1.1 - EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA COGERAÇÃO

- EUROPA: há mais de um século já usava rejeito térmico das termelétricas para diversas finalidades
- EUA 1900: cogeração 50% da energia produzida
- EUA 1970: aumento centrais térmicas e ampliação das redes de distribuição → cogeração cai para 4%
- EUA 1973: crise mundial do petróleo → PURPA (Public Regulatory Policy Act) obrigatoriedade da compra de eletricidade produzida por grandes e pequenos cogeradores
- EUA 2006: cogeração 9% da capacidade elétrica com 85 GW instalados (Três Gargantas - China 22,5 GW ; Itaipu 14 GW)
- EUA 2030: previsto cogeração 20% da capacidade total, com 241 GW (27% crescimento no fornecimento elétrico total, 184% crescimento da cogeração)



Potência instalada de cogeração em operação no Brasil (adaptado de Cogen, 2014).

Brasil 2014: 134 GW de geração elétrica total e 12,1GW de cogeração (9%)
 Brasil 2018: 160 GW de geração elétrica total e 17,4 GW de cogeração (10,9%)

Tabela 12.7 Capacidade instalada de cogeração por tipo de combustível em 2014		Tabela 12.8 Capacidade instalada de cogeração por segmento de atividade em 2014					
Combustível	Potência (MW)	Participação (%)	Segmento	Empreendimentos	Potência (MW)	Porção (%)	
Biomassa de cana-de-açúcar	8810	72,6	Sucroalcooleira	330	8767	72,3	
Gás natural	1339	11,0	Química e petroquímica	34	1297	10,7	
Licor negro	743	6,1	Papel e celulose	28	1124	9,3	
Gás de alto-forno	412	3,4	Siderurgia e metalurgia	9	650	5,4	
Gás de processo	408	3,4	Alimentos e bebidas	19	150	1,2	
Óleo combustível	227	1,9	Outras indústrias	7	57	0,5	
Outros	191	1,6	Shoppings e edifícios corporativos	11	43	0,4	
Total Brasil	12.131	100	Têxtil	3	22	0,2	
<i>Fonte:</i> adaptado de Aneel (2014).		<i>Fonte:</i> adaptado de Aneel (2014).		Comércio e serviços	6	15	0,1
				Hospitais e hotéis	4	7	0,1
		Total Brasil		451	12.131	100	

1.2 - COGERAÇÃO DE ENERGIA - definição
É a produção simultânea de energia elétrica (eletromecânica) e térmica a partir de uma única fonte de combustível.

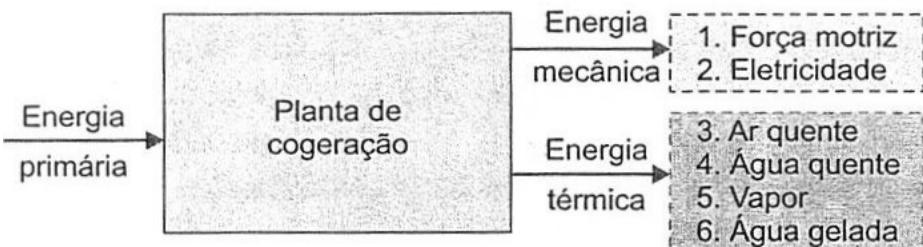
Plantas convencionais de processos:
Eletricidade (*power*) de centrais hidro ou termelétricas

+

Equipamentos in loco para aquecimento e/ou resfriamento (*thermal*: caldeira, chiller, bomba de calor)

Plantas de cogeração: geram energia eletromecânica e térmica em um único sistema integrado.

1.3 - TRIGERAÇÃO: cogeração simultânea de eletricidade, calor e frio (*power, heating and cooling*)



Planta de cogeração, energia mecânica e térmica.

(SIMÕES MOREIRA, 2017)

1.4 – EXEMPLOS DE SISTEMAS DE COGERAÇÃO

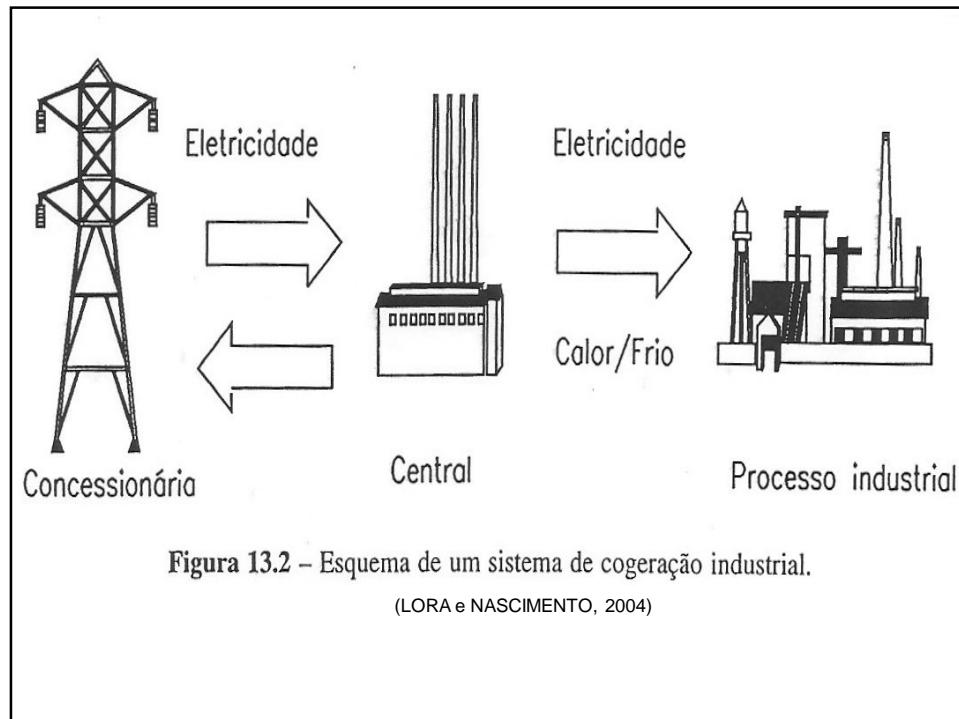
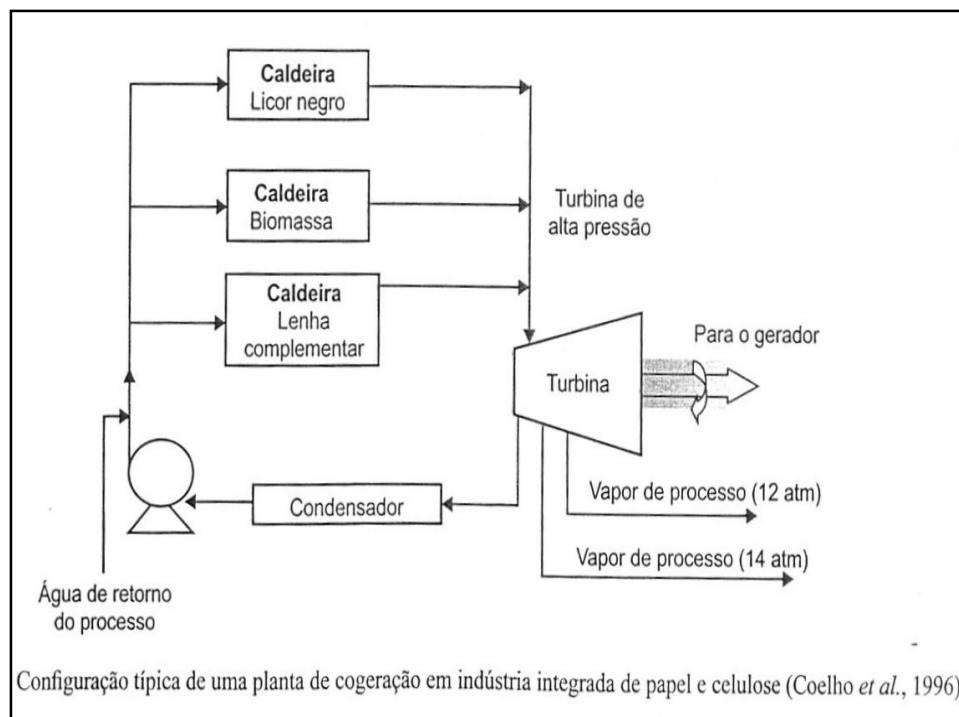
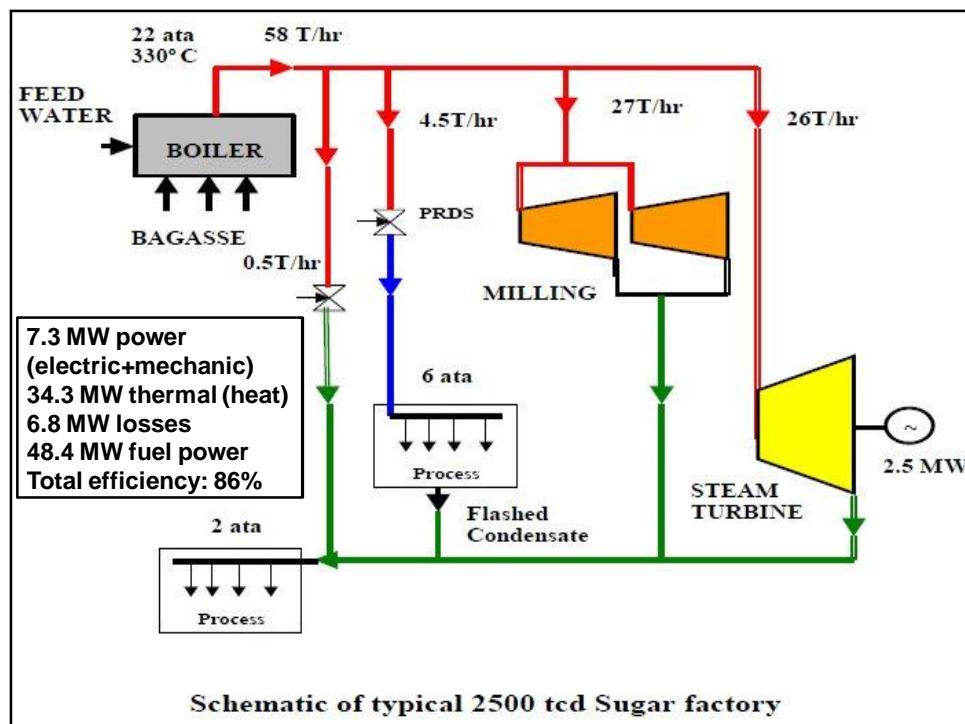
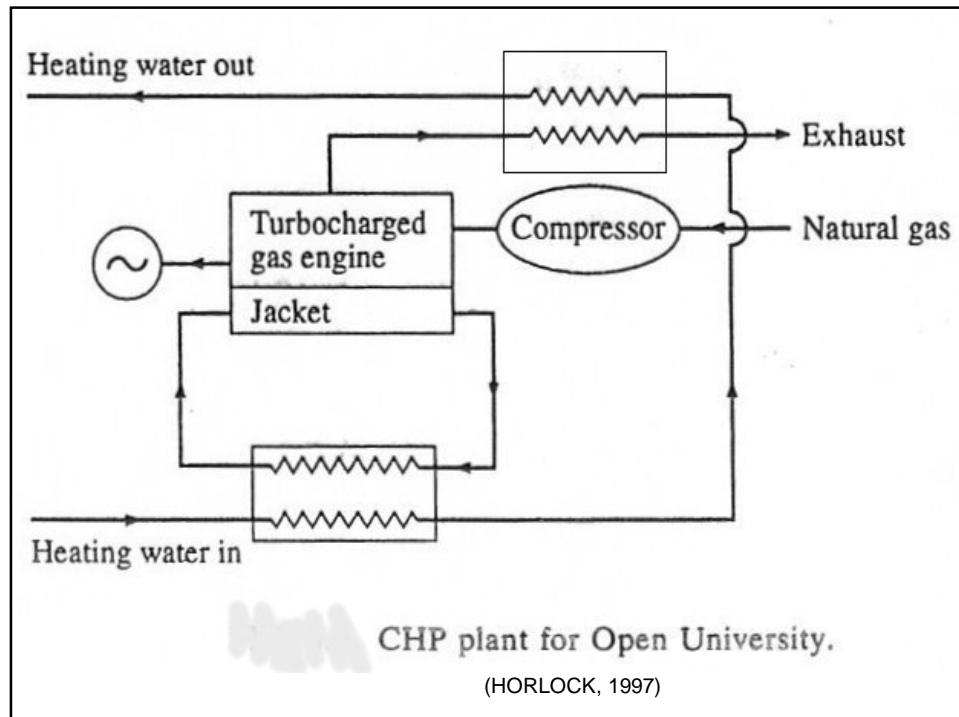


Figura 13.2 – Esquema de um sistema de cogeração industrial.

(LORA e NASCIMENTO, 2004)



Configuração típica de uma planta de cogeração em indústria integrada de papel e celulose (Coelho *et al.*, 1996)

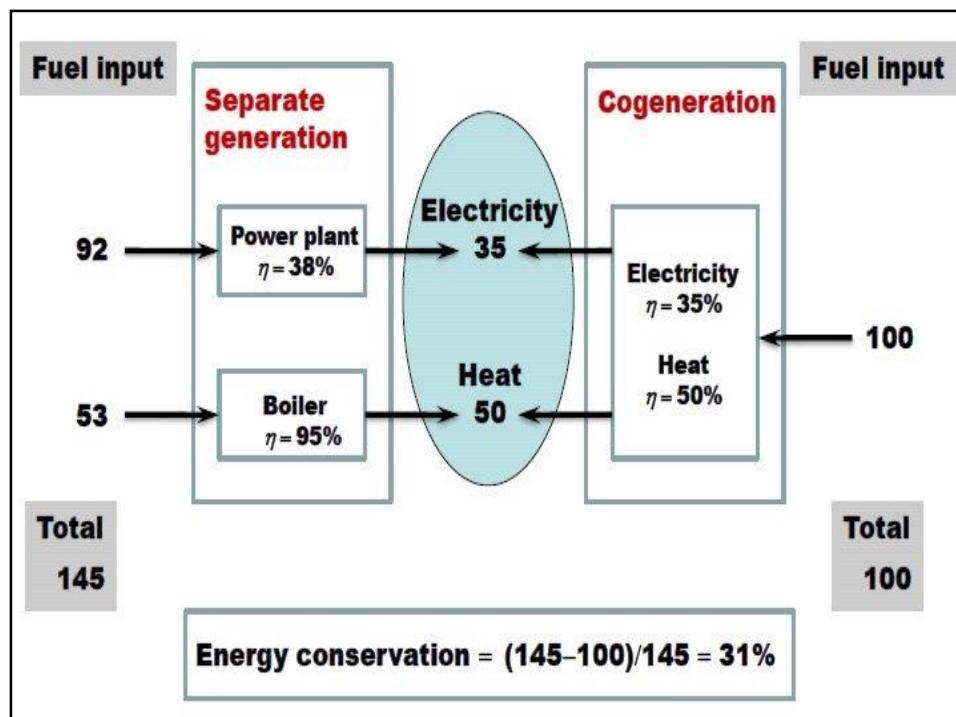


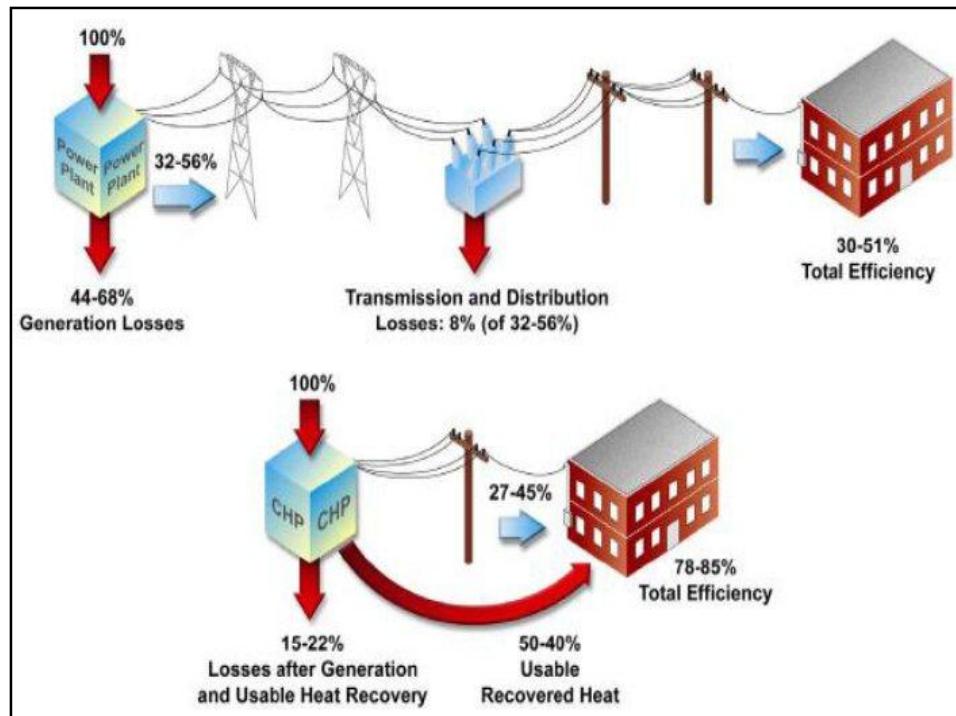
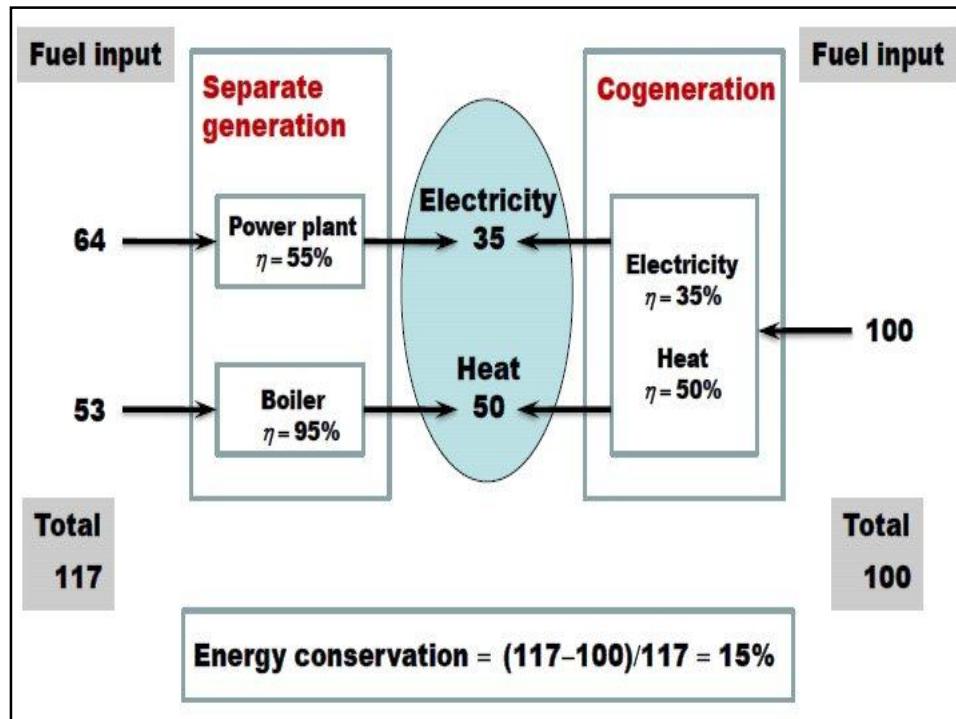
1.5 - COMPARAÇÃO ENTRE DEMANDAS DE INSUMOS TÉRMICOS E ELÉTRICOS :

PLANTAS CONVENCIONAIS

X

PLANTAS DE COGERAÇÃO





2 - CONFIGURAÇÕES DOS SISTEMAS DE COGERAÇÃO

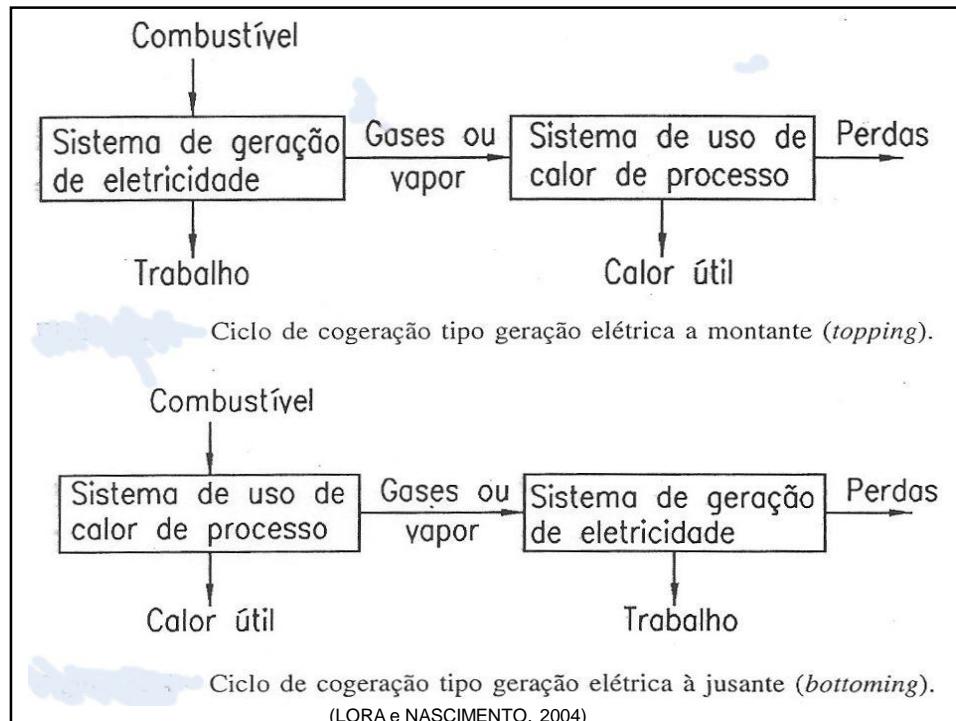
2.1 – TIPOS DE CONFIGURAÇÃO NA COGERAÇÃO

a) ***Topping cycle (ciclo a montante)***

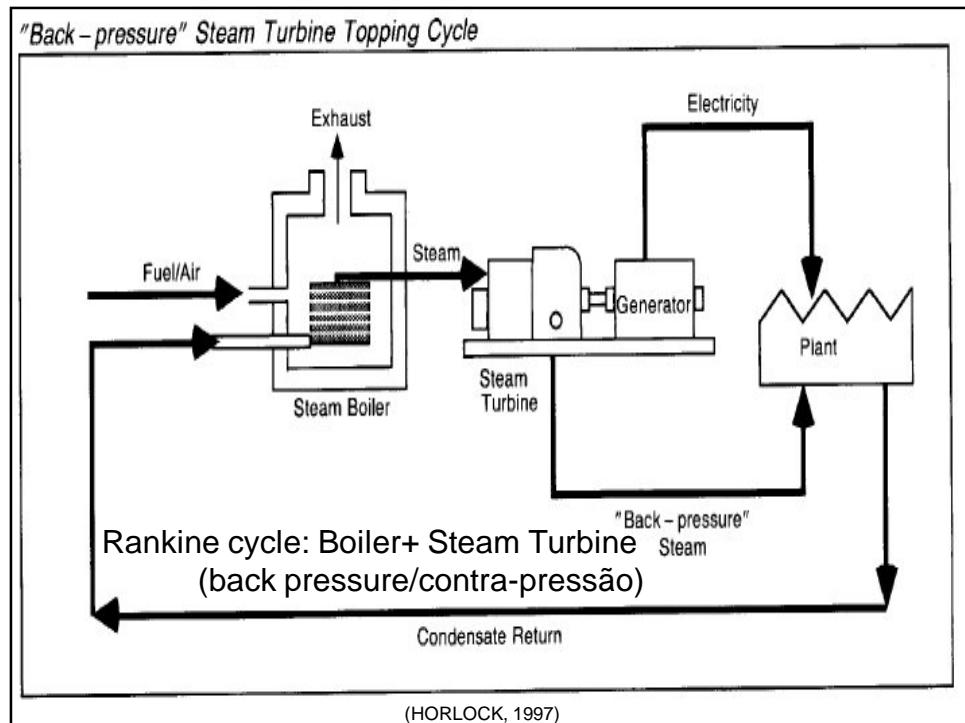
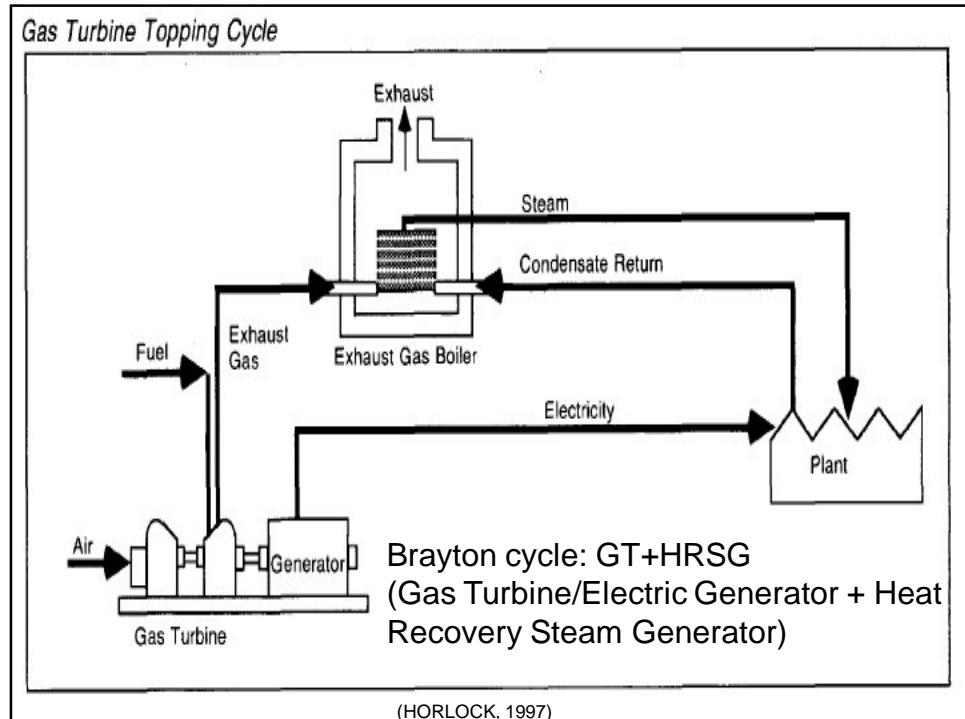
Geração de base (ou principal) é a energia elétrica. O excedente energético é aproveitado como calor.

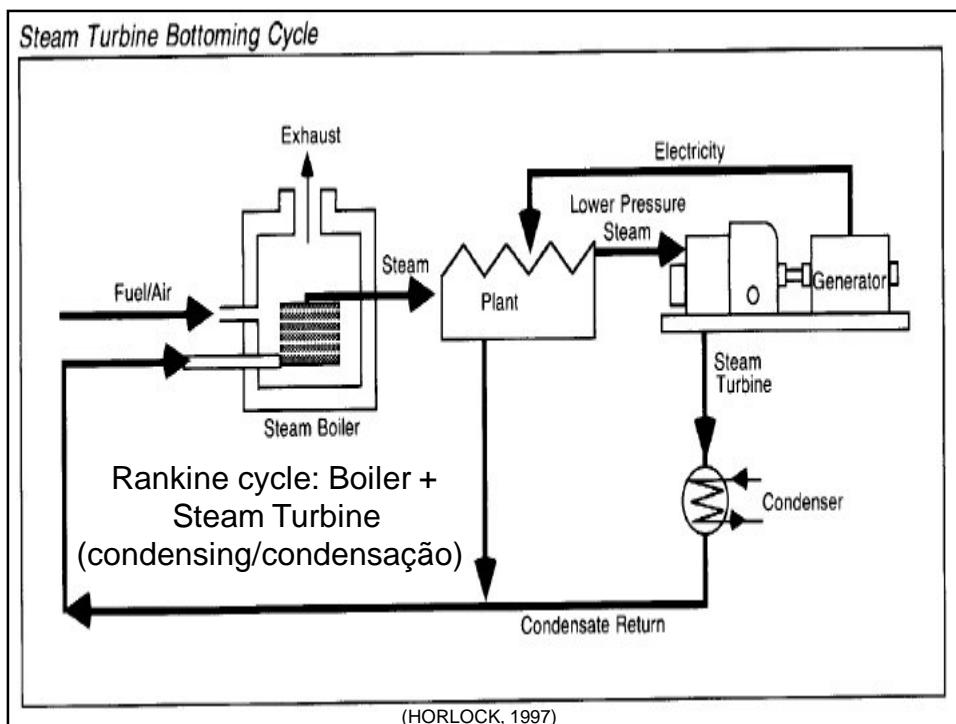
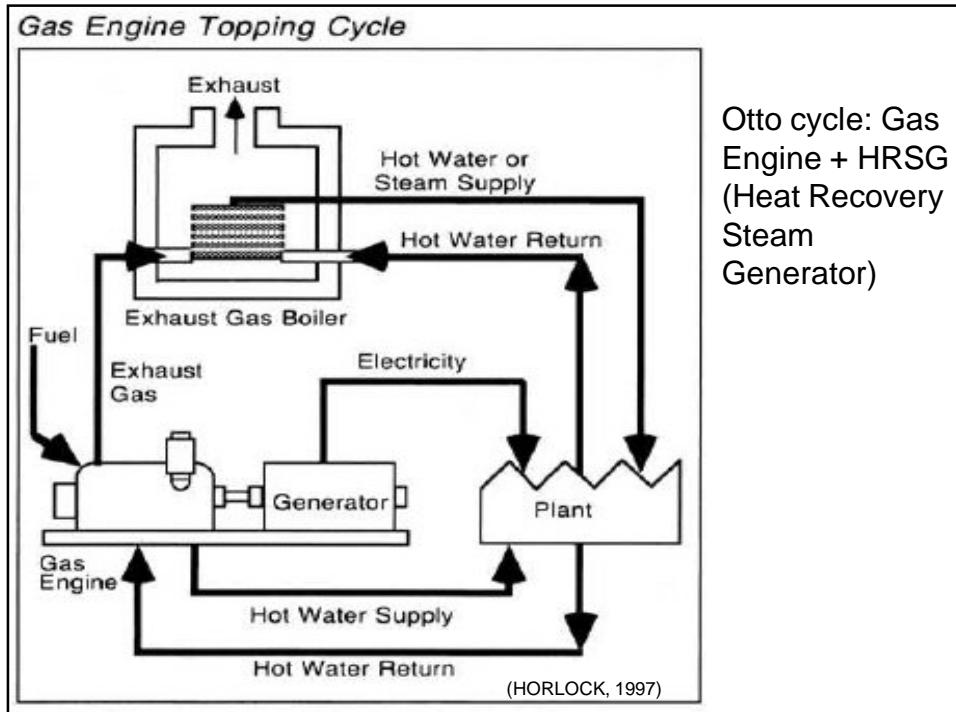
b) ***Bottoming cycle (ciclo a jazante)***

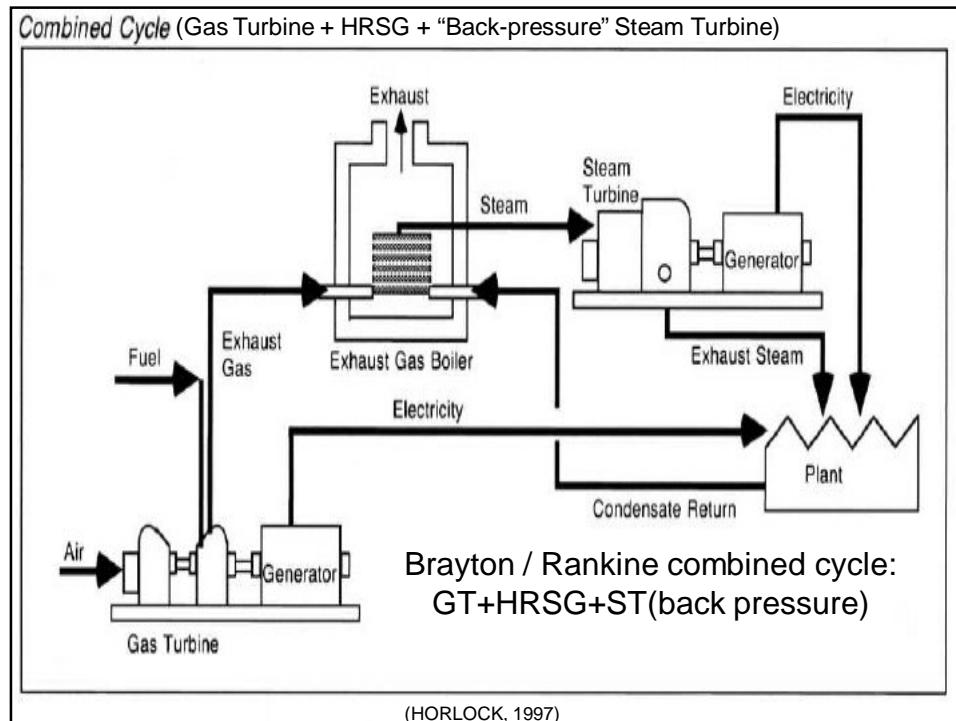
Geração de base (ou principal) é a energia térmica (calor). O excedente energético é convertido em eletricidade.



Exemplos de configurações de sistemas de cogeração – *topping* e *bottoming*





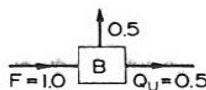
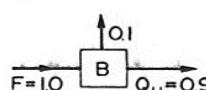
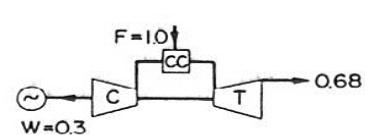


2.2 - RESUMO DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELETROMECÂNICA E TÉRMICA PARA USO INDUSTRIAL

(HORLOCK, 1997)

Esquemas A até E: sistemas convencionais – apenas eletricidade ou calor

Esquemas F a O: cogeração – eletricidade e calor

	F=fuel B=boiler Qu=useful heat W=work (power) CC=combustion chamber T=turbine	W	Q _U
A Domestic boiler		0	0.5
B District heating (industrial) boiler		0	0.9
C Gas turbine power plant		0.3	0

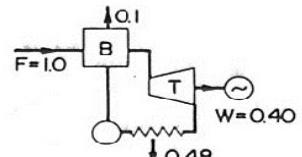
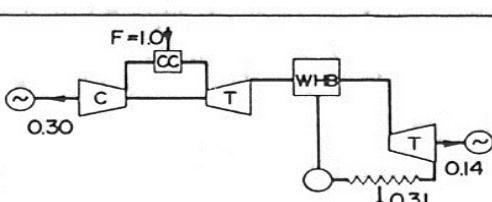
	C=compressor WHB=waste heat boiler (HRSG)	W	Q _U
D Steam turbine power plant		0.4	0
E Combined gas turbine/steam turbine power plant		0.44	0

FIG. 2.1. Systems for separate generation of electricity (W) or heat (Q_U) showing energy flows (after Timmermans¹).

F - Extraction-Condensing Steam Turbine

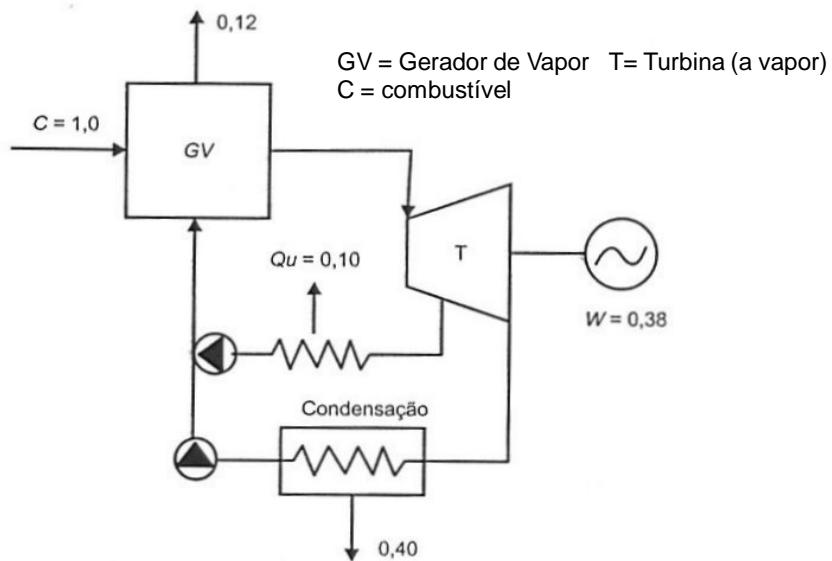


Figura 12.7 Planta de cogeração com TV de condensação.

(SIMÕES MOREIRA, 2017)

G - Back-pressure ST (Steam Turbine)

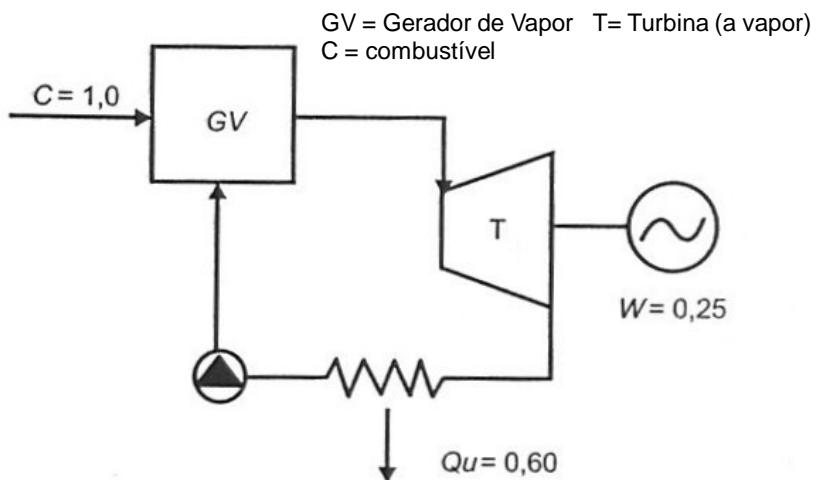


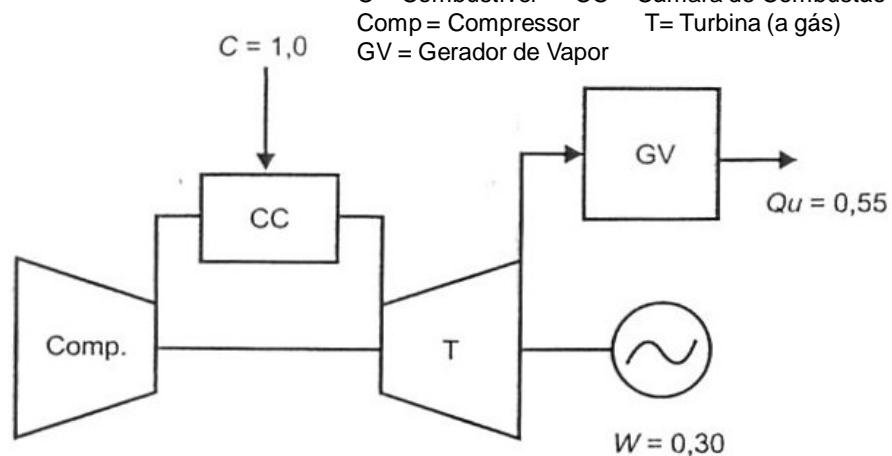
Figura 12.8 Planta de cogeração com TV de contrapressão.

(SIMÕES MOREIRA, 2017)

H - Gas Turbine (GT) with HRSG* (unfired or fired)

* Heat Recovery Steam Generator

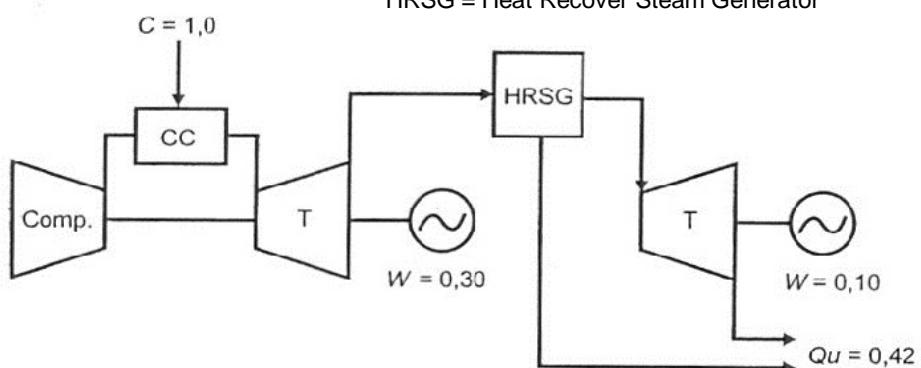
C = Combustível CC = Câmara de Combustão
 Comp = Compressor T = Turbina (a gás)
 GV = Gerador de Vapor

**Figura 12.9** Planta de cogeração com TG.

(SIMÕES MOREIRA, 2017)

I – Combined Cycle CHP plant

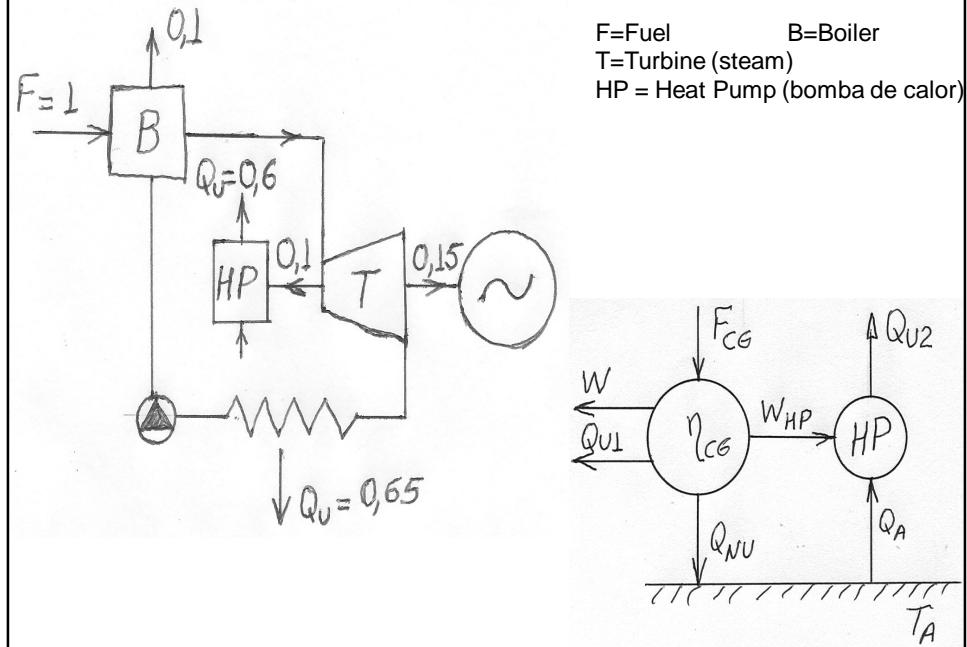
C = Combustível CC = Câmara de Combustão
 Comp = Compressor T = Turbina (gás/vapor)
 HRSG = Heat Recover Steam Generator



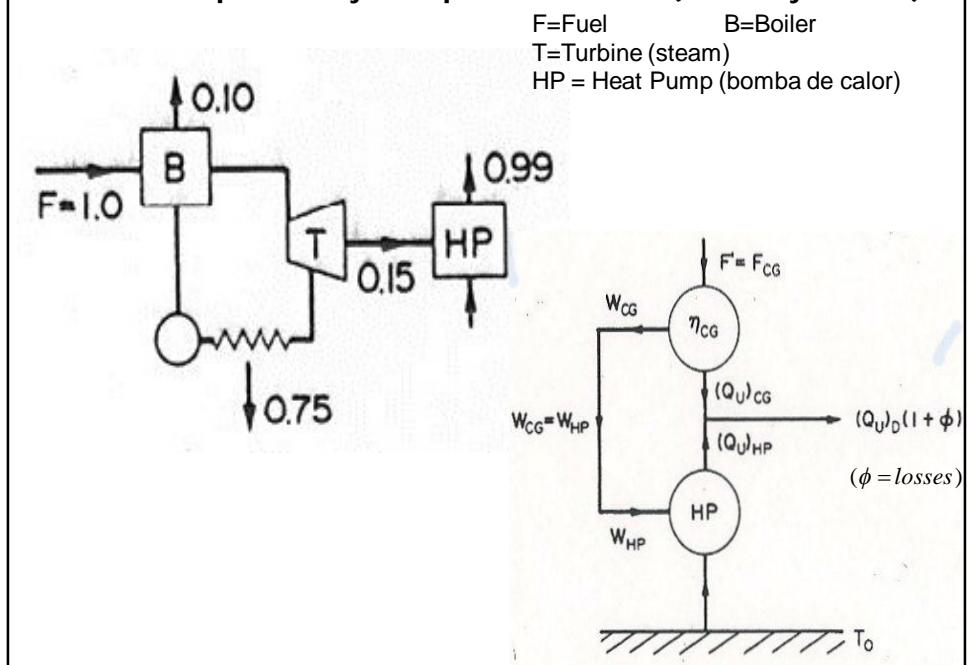
Planta de cogeração com ciclo combinado

(SIMÕES MOREIRA, 2017)

J – Heat Pump driven by Turbine (work and heat scheme)



K – Heat Pump driven by back-pressure turbine (heat only scheme)



L – Reciprocating Engine CHP plant for hot water

MCI=Motor de Combustão Interna
C=Combustível

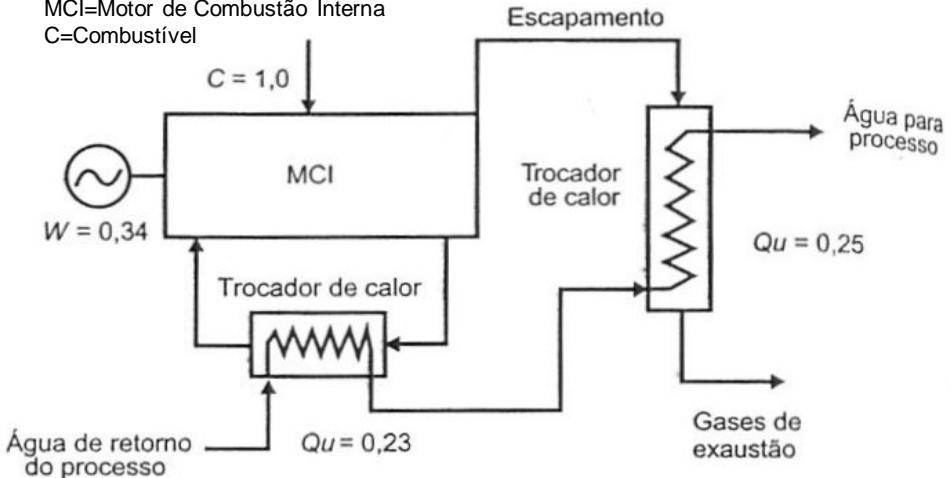


Figura 12.11 Planta de cogeração com MCI (água quente).

(SIMÕES MOREIRA, 2017)

M – Reciprocating Engine CHP plant for ice water

MCI=Motor de Combustão Interna
C=Combustível

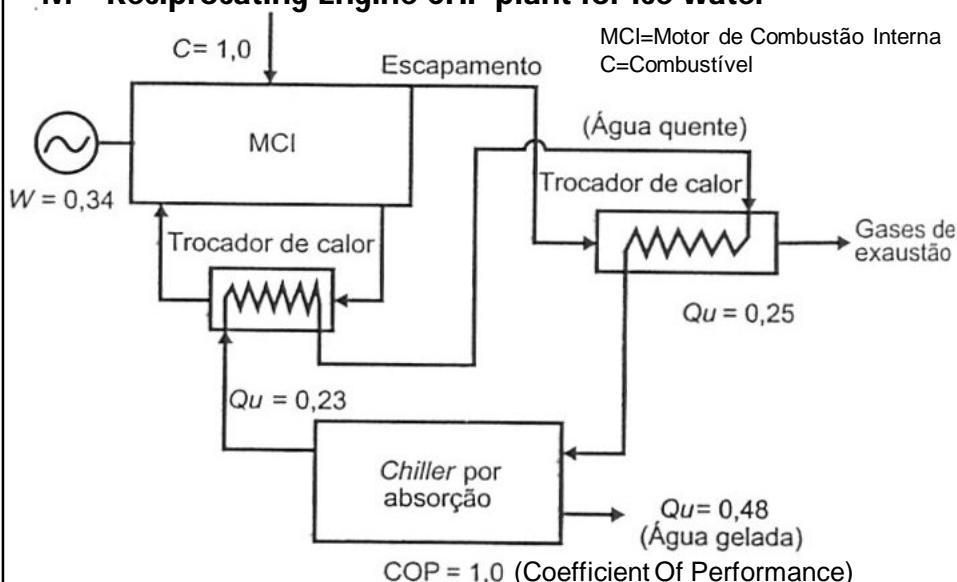
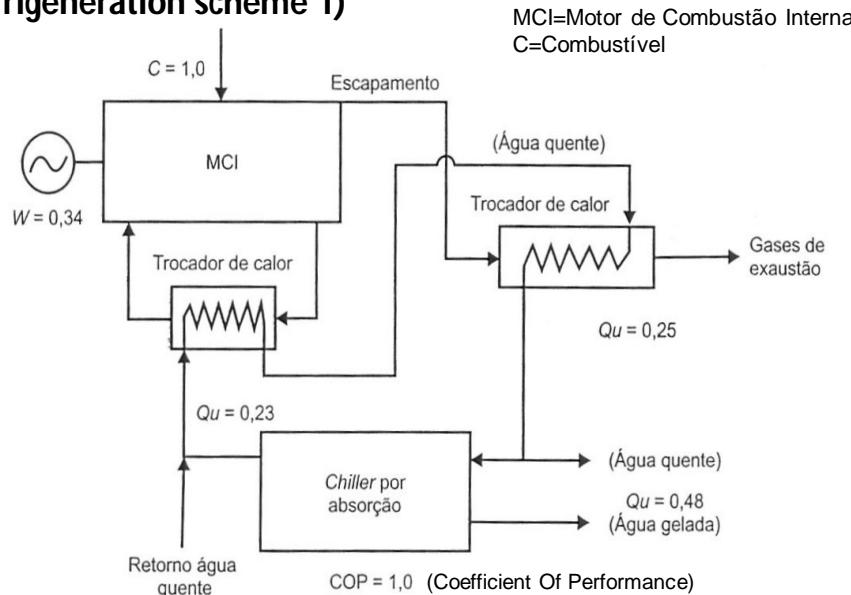


Figura 12.12 Planta de cogeração com MCI (água gelada).

(SIMÕES MOREIRA, 2017)

N - Reciprocating Engine CHP plant for hot & ice water (Trigeneration scheme 1)



Planta de cogeração com MCI (trigeração 1).

(SIMÕES MOREIRA, 2017)

O - Reciprocating Engine CHP plant for hot & ice water (Trigeneration scheme 2)

MCI=Motor de Combustão Interna
C=Combustível

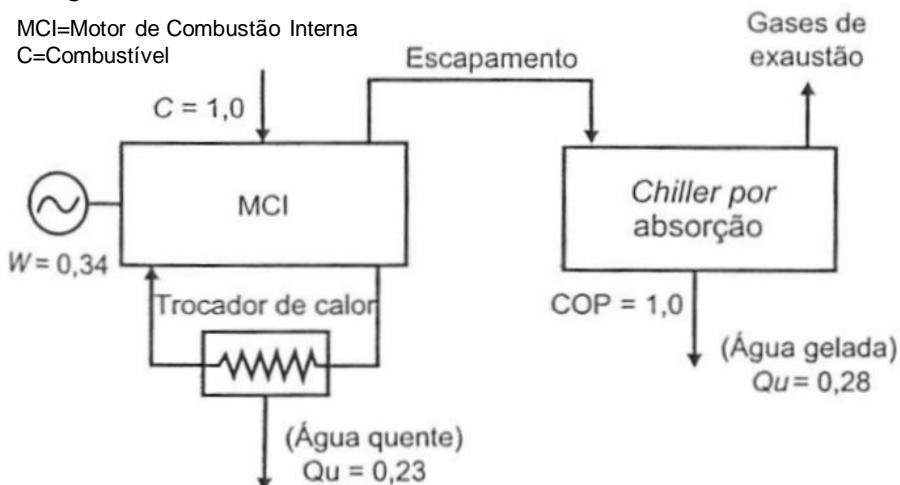


Figura 12.14 Planta de cogeração com MCI (trigeração 2).

(SIMÕES MOREIRA, 2017)

2.3 - CHP Applications

FEATURE	CHP – INDUSTRIAL	CHP – COMMERCIAL / INSTITUTIONAL	DISTRICT HEATING AND COOLING
<i>Typical customers</i>	Chemical, pulp and paper, metallurgy, heavy processing (food, textile, timber, minerals), brewing, coke ovens, glass furnaces, oil refining	Light manufacturing, hotels, hospitals, large urban office buildings, agricultural operations	All buildings within reach of heat network, including office buildings individual houses, campuses, airports, industry
<i>Ease of integration with renewables and waste energy</i>	Moderate – High (particularly industrial energy waste streams)	Low – moderate	High
<i>Temperature level</i>	High	Low to medium	Low to medium
<i>Typical system size</i>	1 – 500 MWe	1 kWe – 10 MWe	Any

FEATURE	CHP – INDUSTRIAL	CHP – COMMERCIAL / INSTITUTIONAL	DISTRICT HEATING AND COOLING
<i>Typical prime mover</i>	Steam turbine, gas turbine, reciprocating engine (compression ignition), combined cycle (larger systems)	Reciprocating engine (spark ignition), stirling engines, fuel cells, micro-turbines	Steam turbine, gas turbine, waste incineration, CCGT
<i>Energy / Fuel Source</i>	Any liquid, gaseous or solid fuels; industrial process waste gases (eg blast furnace gases,	Liquid or gaseous fuels	Any fuel

3 - ASPECTOS E PARÂMETROS ENERGÉTICOS, TECNOLÓGICOS E ECONÔMICOS PARA A ESCOLHA DA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE COGERAÇÃO

Análise do balanço energético da planta:

- demandas elétricas e térmicas;
- perfil de consumo das utilidades de energia;
- temperaturas de processo;
- seleção das tecnologias disponíveis;
- espaço físico para instalação da planta;
- análise da interligação dos processos produtivos.

Em empreendimentos com intenso consumo de energia térmica, por exemplo, deve-se estudar a possibilidade de venda do excedente de produção de energia elétrica para que exista um balanço energético que atenda à demanda térmica na totalidade. Ou ainda, é possível dimensionar o balanço energético com base na demanda de energia elétrica, criando-se um sistema de queima suplementar para geração adicional da demanda térmica.

Análise do ponto de vista econômico:

- custo da energia elétrica;
- disponibilidade e preço de combustíveis;
- incentivos fiscais disponíveis;
- possibilidade de financiamento;
- venda de excedente de geração de energia elétrica;
- disponibilidade e custo de água.

Outros parâmetros:

- legislação vigente sobre cogeração;
- legislação para interconexão na rede elétrica da concessória;
- questões ambientais.

ETAPAS DO PROCESSO DECISÓRIO SOBRE O SISTEMA DE COGERAÇÃO:

1) Com base na análise dos diversos aspectos e parâmetros antes expostos, pode-se verificar os tipos de equipamentos e as configurações mais adequadas:

- Motores de combustão interna (Otto, Diesel)
- Turbinas a gás (industriais, aeroderivativas)
- Turbinas a vapor (condensação, contrapressão, extração)
- Chiller (de compressão, de absorção)
- Bomba de calor

2) Para cada possível configuração, fazer o estudo termo-econômico considerando:

- investimento inicial (equipamentos, serviços de instalação)
- custos e garantia de fornecimento do(s) combustível(eis)
- tarifas de energia elétrica (compra e venda)
- custos de operação e manutenção

3) Com a análise econômica pode-se calcular o gasto líquido anual, a possível economia operacional, o tempo de retorno (*payback*) do investimento e a sua taxa interna de retorno.

No Brasil: payback entre 3 a 5 anos (pode ser maior no setor terciário).

No setor industrial a segurança operacional (garantia no fornecimento elétrico e/ou térmico) pode ser mais relevante, em detrimento do custo financeiro.

4 - CRITÉRIOS DE DESEMPENHO PARA PLANTAS DE COGERAÇÃO

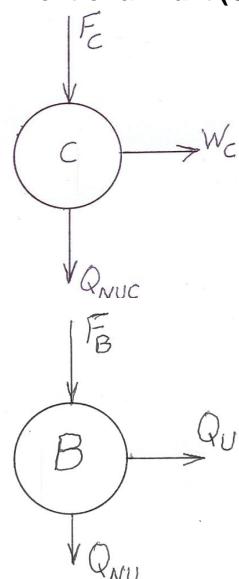
O conceito de máximo aproveitamento da energia do combustível

Instalações industriais, *shopping centers*, edifícios comerciais e residenciais, hospitais, entre outros, demandam energias eletromecânica (W , motores e sistemas elétricos) e térmica (Q , calor e/ou frio).

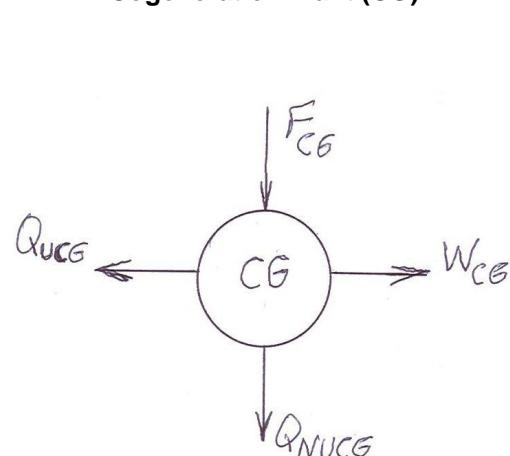
Na concepção convencional (C) a energia elétrica é comprada do sistema elétrico (rede, *grid*) e a demanda térmica é provida através de conversão da energia elétrica em calor ou frio (setor comercial e residencial). Já no setor industrial a energia térmica (calor) é, na maior parte, obtida da queima de combustíveis em caldeiras (vapor de processo) ou em fornos (siderurgia, cerâmica, cimento, alimentos).

Através de uma planta de cogeração (CG) otimiza-se o aproveitamento energético do combustível utilizado na máquina térmica primária escolhida (*prime mover*, que queima o combustível), produzindo energia eletromecânica e reaproveitando (recuperando) e energia perdida na forma de calor (calor rejeitado pelo ciclo térmico), de forma que a demanda (compra) de energias externas (elétrica/térmica) seja minimizada.

Conventional Plant (C)



Cogeneration Plant (CG)



F = fuel energy (chemical)

Q = heat (thermal energy)

W = work (mechanical / electric power)

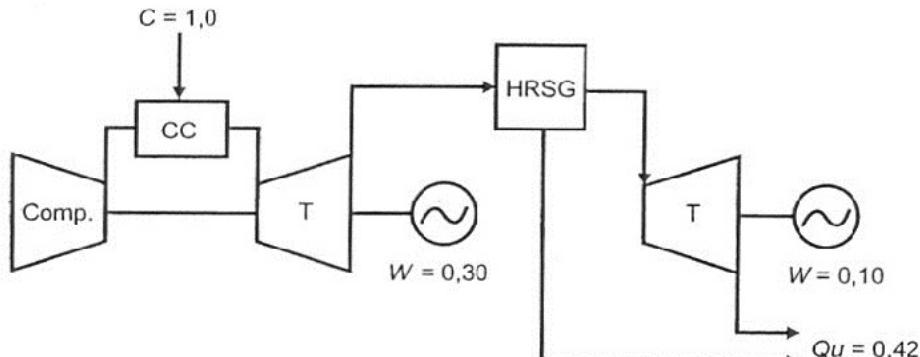
B = Boiler (or furnace)

U = useful (heat)

NU = not useful (heat)

Planta de Cogeração de Ciclo Combinado (CC) (Brayton + Rankine)

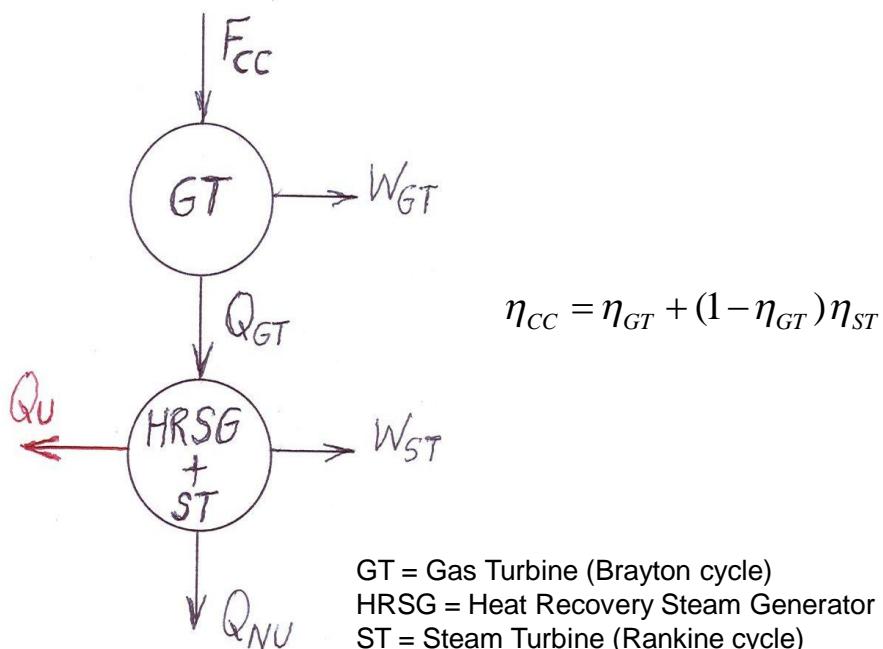
C = Combustível CC = Câmara de Combustão
 Comp = Compressor T = Turbina (gás/vapor)
 HRSG = Heat Recover Steam Generator



Planta de cogeração com ciclo combinado

(SIMÕES MOREIRA, 2017)

Combined Cicle Power Plant (CC)



4.1 - EFICIÊNCIA TÉRMICA

$$\text{Thermal Efficiency: } \eta = \frac{W}{F}$$

4.2 - FATOR DE UTILIZAÇÃO DA ENERGIA

$$\text{Energy Utilization Factor: } EUF = \frac{W + Q_U}{F}$$

4.3 - FATOR PONDERADO DE UTILIZAÇÃO DA ENERGIA

Value-Weighted Energy Utilization Factor:

$$EUF_{VW} = \frac{\$_E W + \$_H Q_U}{\$_F F} \quad \$ = \left[\frac{\$}{kWh} \right]$$

4.4 – FATOR DE ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL

Fuel Energy Savings Ratio:

$$FESR = \frac{(F_C + F_B) - F_{CG}}{F_C + F_B} \quad F_C = \frac{W_C}{\eta_C} \quad F_B = \frac{Q_U}{\eta_B}$$

B = process steam Boiler

4.5 – TAXA DE CALOR

$$\text{Heat Rate: } HR = \frac{\text{heat from fuel}}{\text{work output}} = \frac{F}{W} \quad \left(= \frac{1}{\eta} \right)$$

4.6 – RELAÇÃO CALOR / TRABALHO

$$\text{Heat to Work Ratio: } \lambda = \frac{Q_U}{W}$$

4.7 – COEFICIENTE DE DESEMPENHO (*performance*)

É aplicado a bombas de calor (heat pumps: HP) e chillers (de compressão CC - compression chillers - ou de absorção - AC)

Coefficient of Performance:

$$COP = \frac{Q_U}{W} \quad (> 1, \text{ for HP and CC}) \quad COP = \frac{Q_U}{Q_{in}} \quad (\leq 1, \text{ for AC})$$

$$\text{Letting } Q_U = 1 \Rightarrow W = \frac{1}{COP} \quad \text{and} \quad Q_{in} = \frac{1}{COP}$$

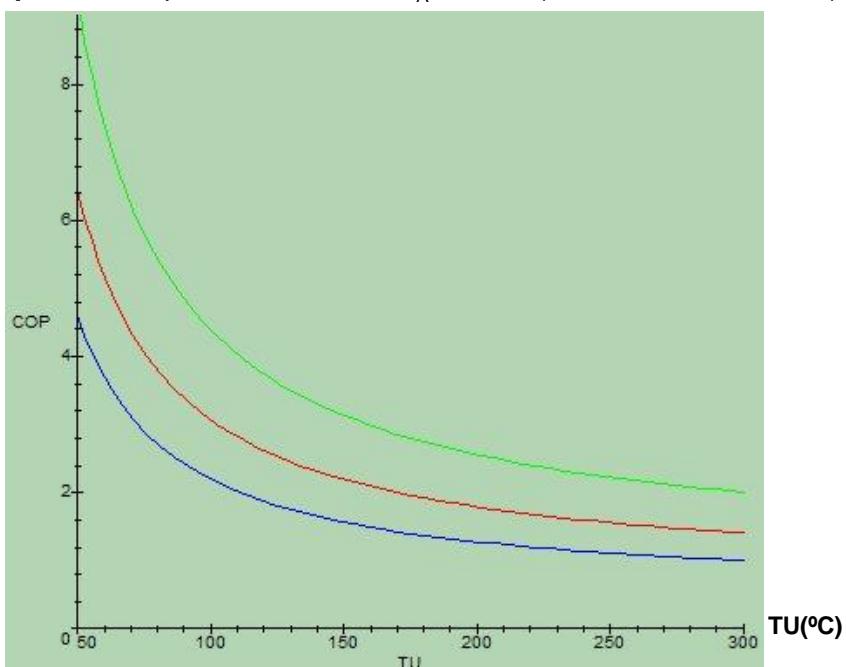
Performance Ideal --> Ciclo de Carnot (reverso):

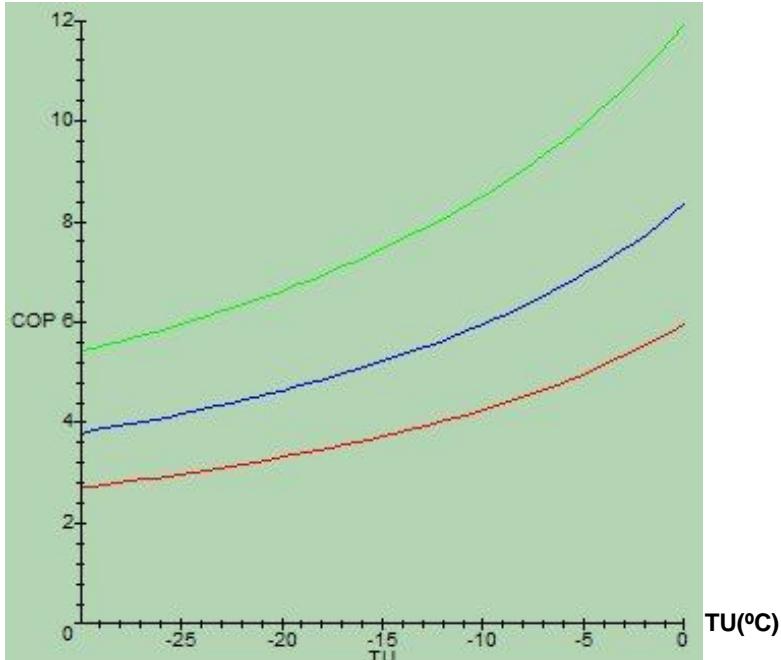
$$COP_{\max} = \frac{T_U}{T_U - T_A} \quad (\text{for HP})$$

$$COP_{\max} = \frac{T_A}{T_A - T_U} \quad (\text{for CC})$$

T = absolute temperature (K)
U = refers to usefull heat = T(Q_U)
A = ambient

Exemplo 1: COP p/ bomba de calor, $T_A = 15^\circ\text{C}$ (100%, 70% e 50% max)



Exemplo 2: COP p/ chiller, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (100%, 70% e 50% max)**PROBLEMA 1****CHP plant with back-pressure (and extraction) steam turbine**

Uma planta de cogeração opera com as seguintes características (pressões absolutas):

- Turbina a vapor de extração-contrapressão: rendimento 85%, alimentação 101 bar/500°C, extração média pressão 21 bar, 50% de massa extraída, saída contrapressão p/ processo 5 bar
- Caldeira a óleo combustível ($\text{PCI}=40000 \text{ kJ/kg}$) rendimento de 90%
- Gerador elétrico: rendimento 99%

Desprezando o trabalho de bombeamento, calcular os índices de desempenho e fatores de calor/trabalho 4.1 a 4.6 anteriormente definidos.

Considerar:

$$\$_E = 0,50 \text{ R\$/kWh}, \$_H = \$_E/3, \$_F = 1,60 \text{ R\$/kg}, \eta_C = 0,4, \eta_B = 0,9$$

