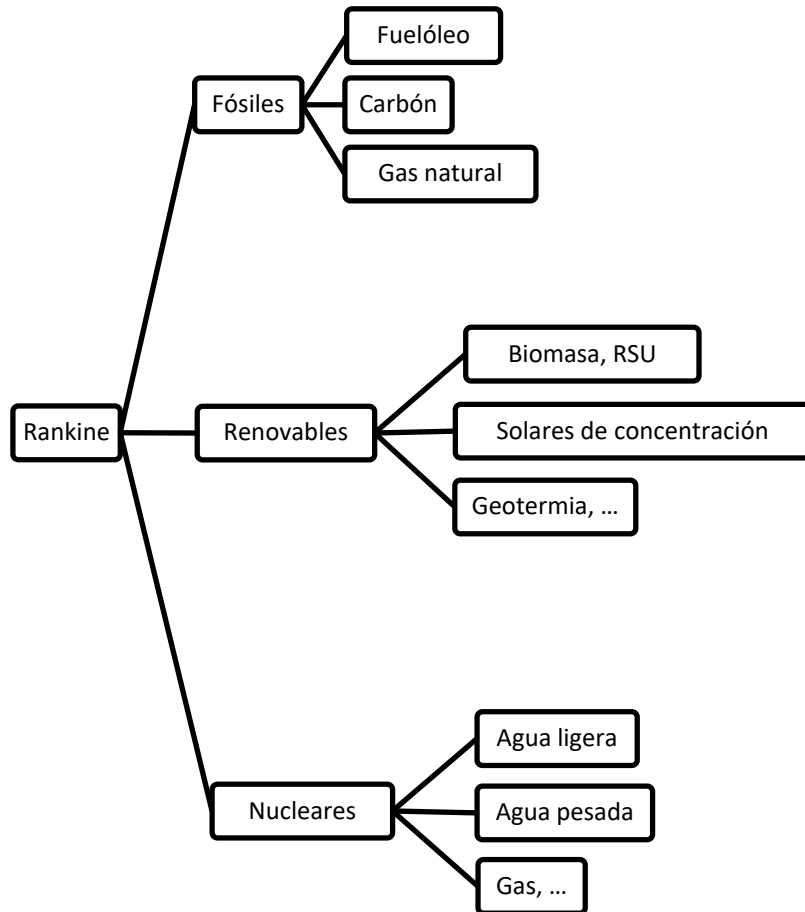


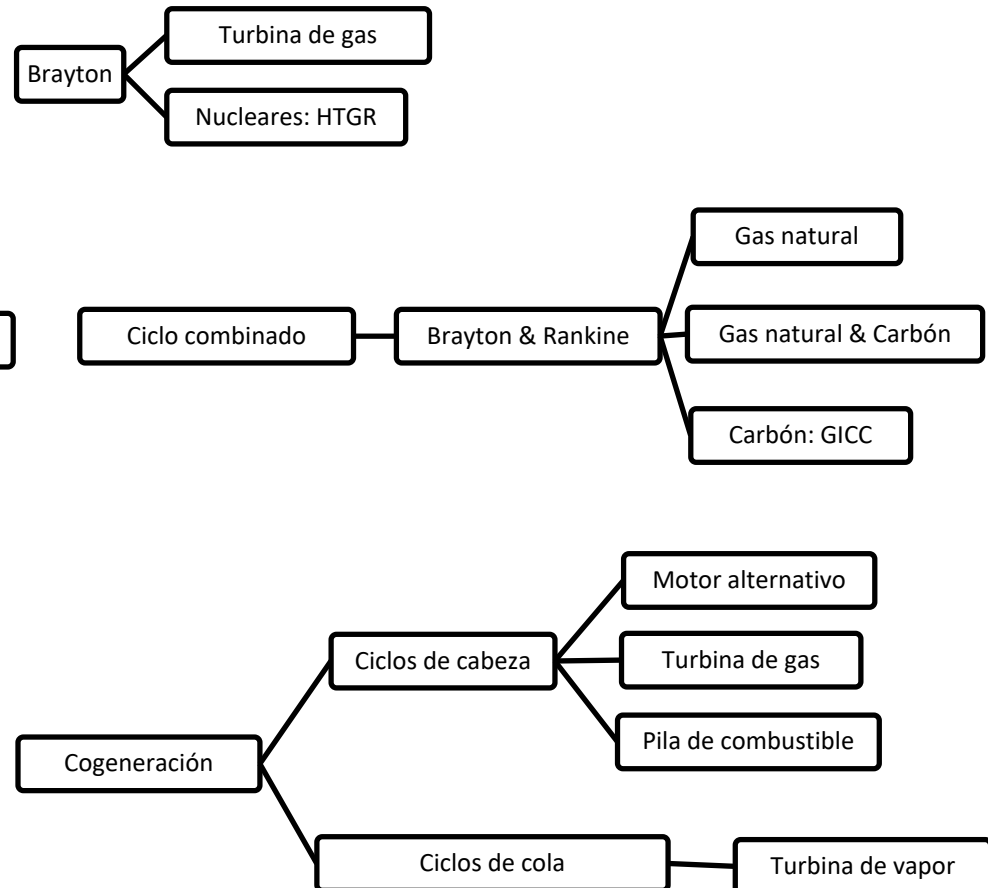
TEMA 3.- CENTRALES TÉRMICAS

- Introducción
- Centrales de carbón
- Centrales de ciclo combinado
- Repotenciación de centrales de carbón
- Combustión limpia en centrales térmicas
- Captura de CO₂

Introducción



Centrales Térmicas

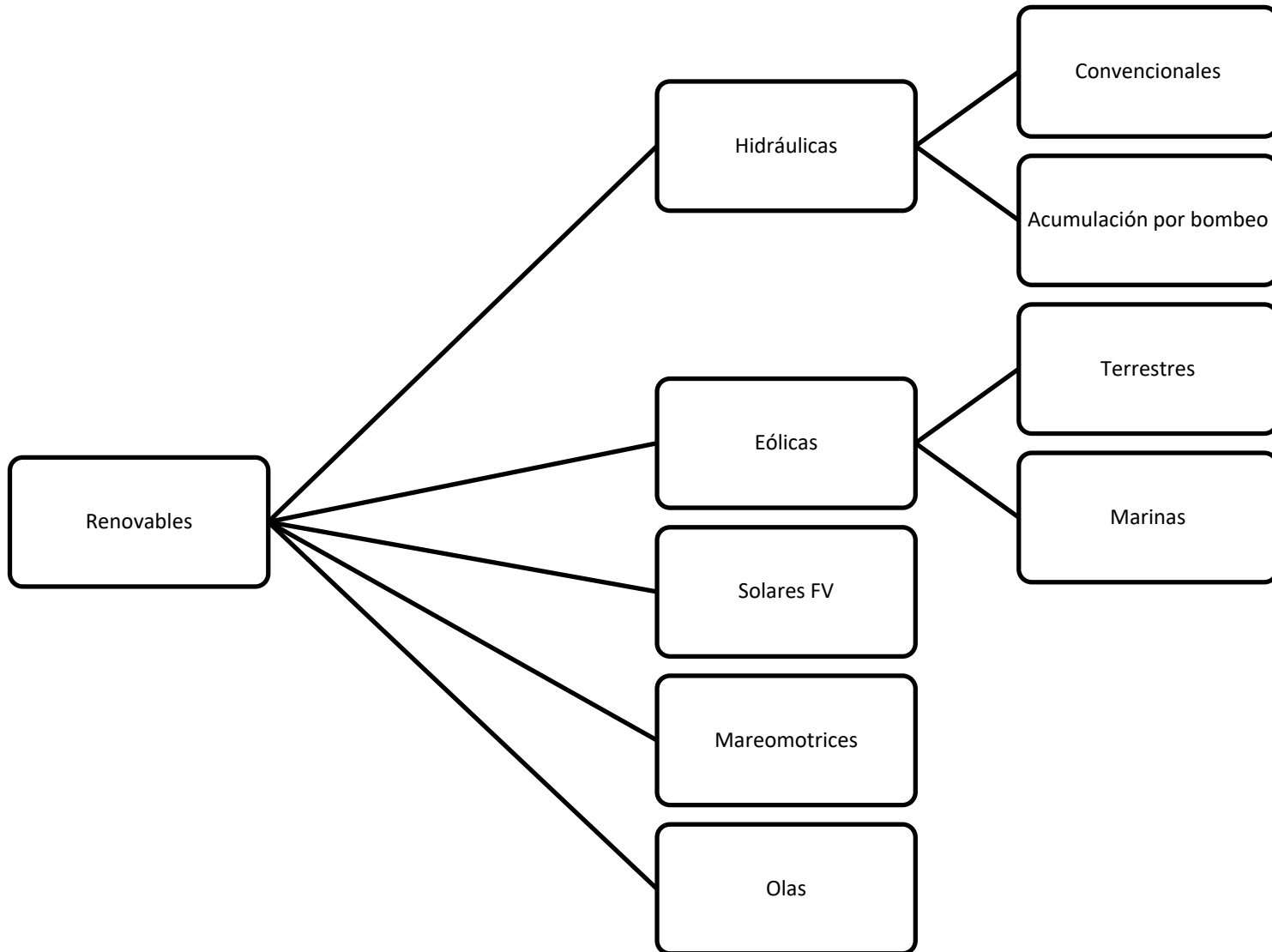


Introducción

- Las centrales térmicas tienen en común mucha tecnología dentro del mismo ciclo:
 - Rankine: fósiles, renovables y nuclear
 - Brayton y combinados: diferentes aplicaciones de TG
- En este tema se particularizara a centrales fósiles (carbón y gas natural) pero se mantienen muchos puntos en común con centrales solares, biomasa y nucleares.
- La repotenciación de centrales de carbón logrará reducir las emisiones específicas y el consumo relativo de carbón.
- La captura de CO₂ permite mantener el carbón como tecnología de transición hasta que otras tecnologías alcancen madurez.

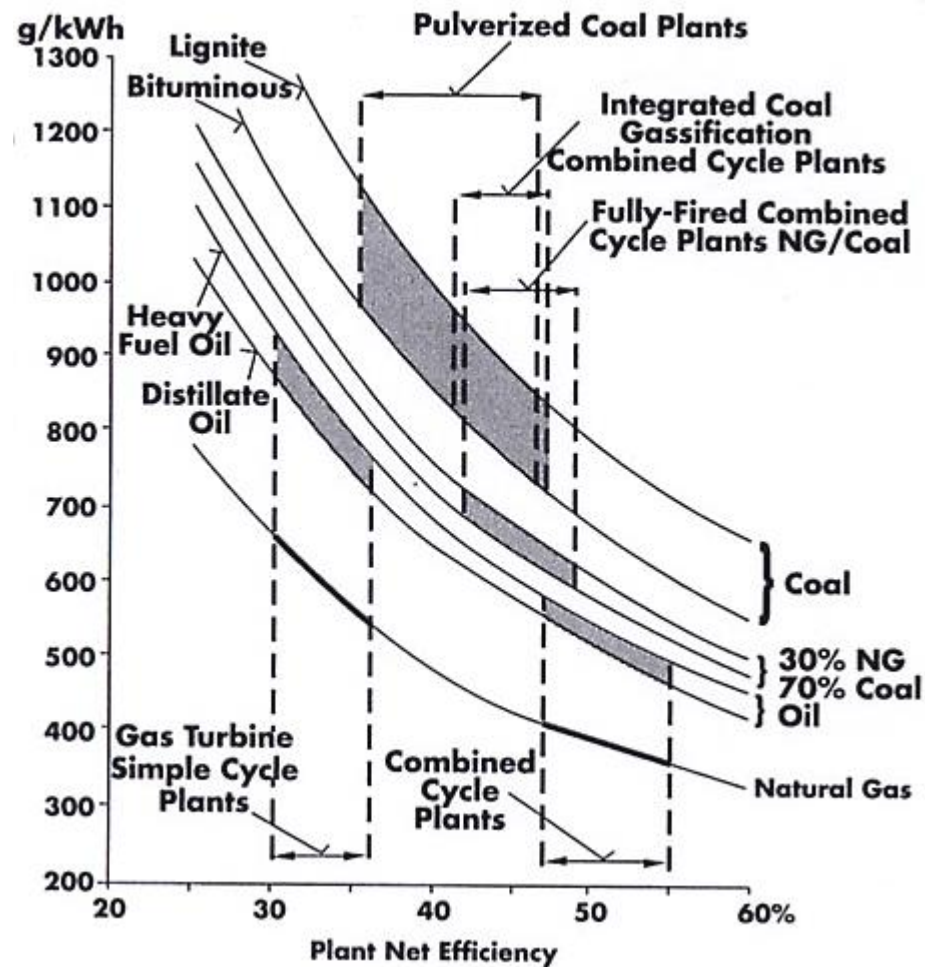
Introducción

Centrales no térmicas renovables



Introducción

Emisiones de CO_2 relativas a la energía eléctrica producida



[Petchers, 2003]

Centrales de carbón

Evolución de las centrales de vapor (I)

	GB								supercríticas		
	1907	1919	1938	1950	1958	1959	1966	1973	GB	USA	Japón
Potencia (MW)	5	20	30	60	120	200	500	660	450	800	700
P. caldera (bar)	13	14	41	62	103	162	159	159	241	241	310
T. inicial (°C)	260	316	454	482	538	566	566	565	566	538	566
T. Prim. Rec (°C)	-	-	-	-	538	538	566	565	566	552	566
T. Seg. Rec (°C)	-	-	-	-	-	-	-	-	566	538	566
T. sal. prec (°C)	-	79	171	196	224	238	252	252	286	287	
# precalentadores	-	2	3	4	6	6	7	8	9	7	
P. Cond. (kPa)	13.5	4	3.7	3.7	4.4	5.4	5.1	5.1			
Rendimiento (%)	17	27.6	30.5	35.6	37.5	39.8	39.5	40	40	41.7	

Centrales de carbón

Evolución de las centrales de vapor (II)

País	Grupo	Combustible	Potencia (MW)	P (bar)	T (C)	P _{cond} (bar)	η (PCI)	Año
Japón	Kawagoe-1	GNL	700	320	566/566/566	---	46.6	1989
Japón	Kawagoe-2	GNL	700	320	566/566/566	---	46.6	1990
Japón	Kawagoe-3	Carbón	700	250	540/593	---	---	1993
Japón	Matsuura-2	---	1000	240	540/593	---	---	1997
Dinamarca	Shaerbaek-3	Carbón	400	300	580/580/580	0.023	47.0	1997
Dinamarca	Nordjylland-1	Gas Natural	400	300	580/580/580	0.023	49.0	1998

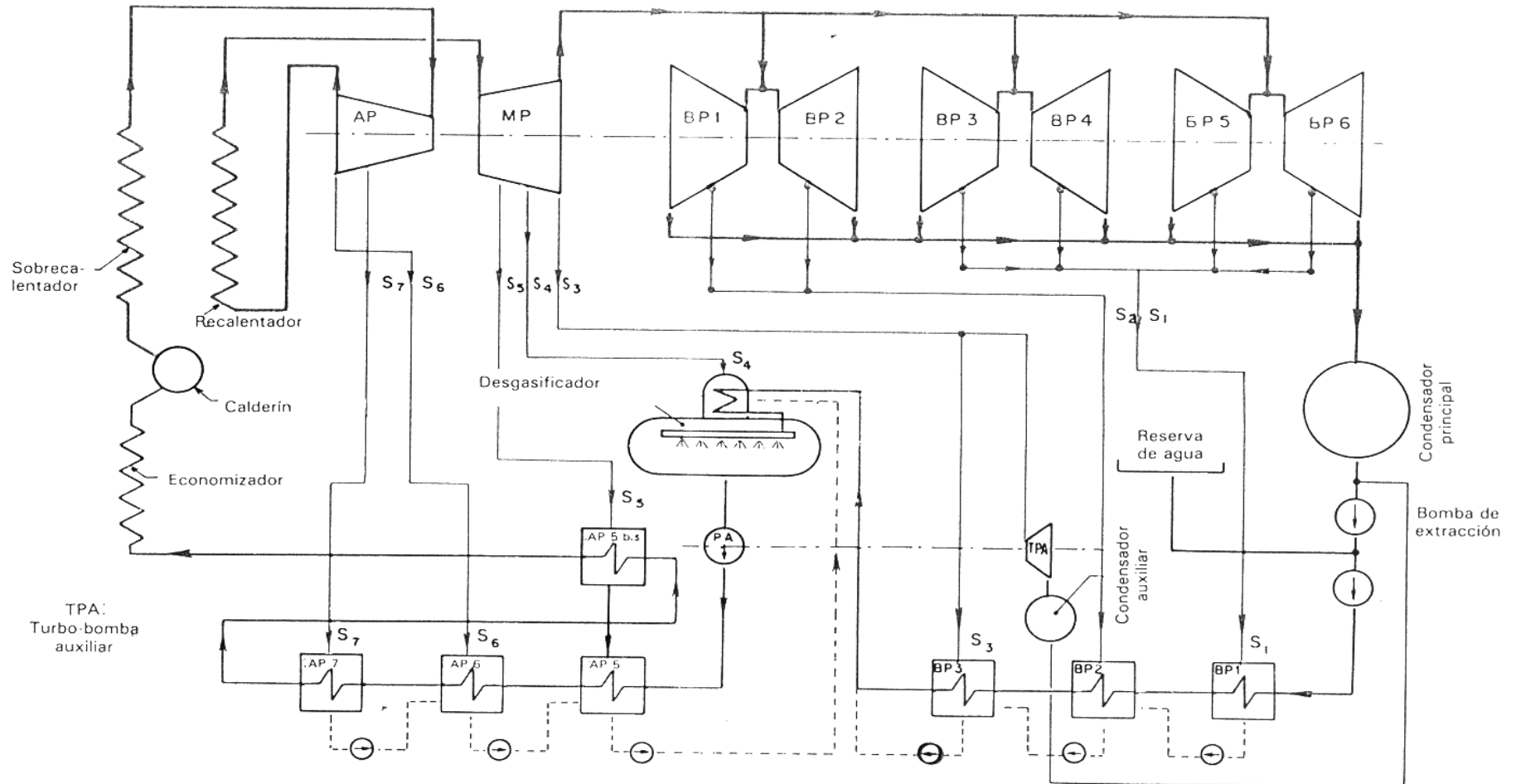
[Haywood, 2000]

Centrales de carbón

Planta tipo subcrítica

Características del vapor

Sobrecalentado P. = 163 bar. T = 565°C.
Recalentado P. = 34 bar. T = 565°C.

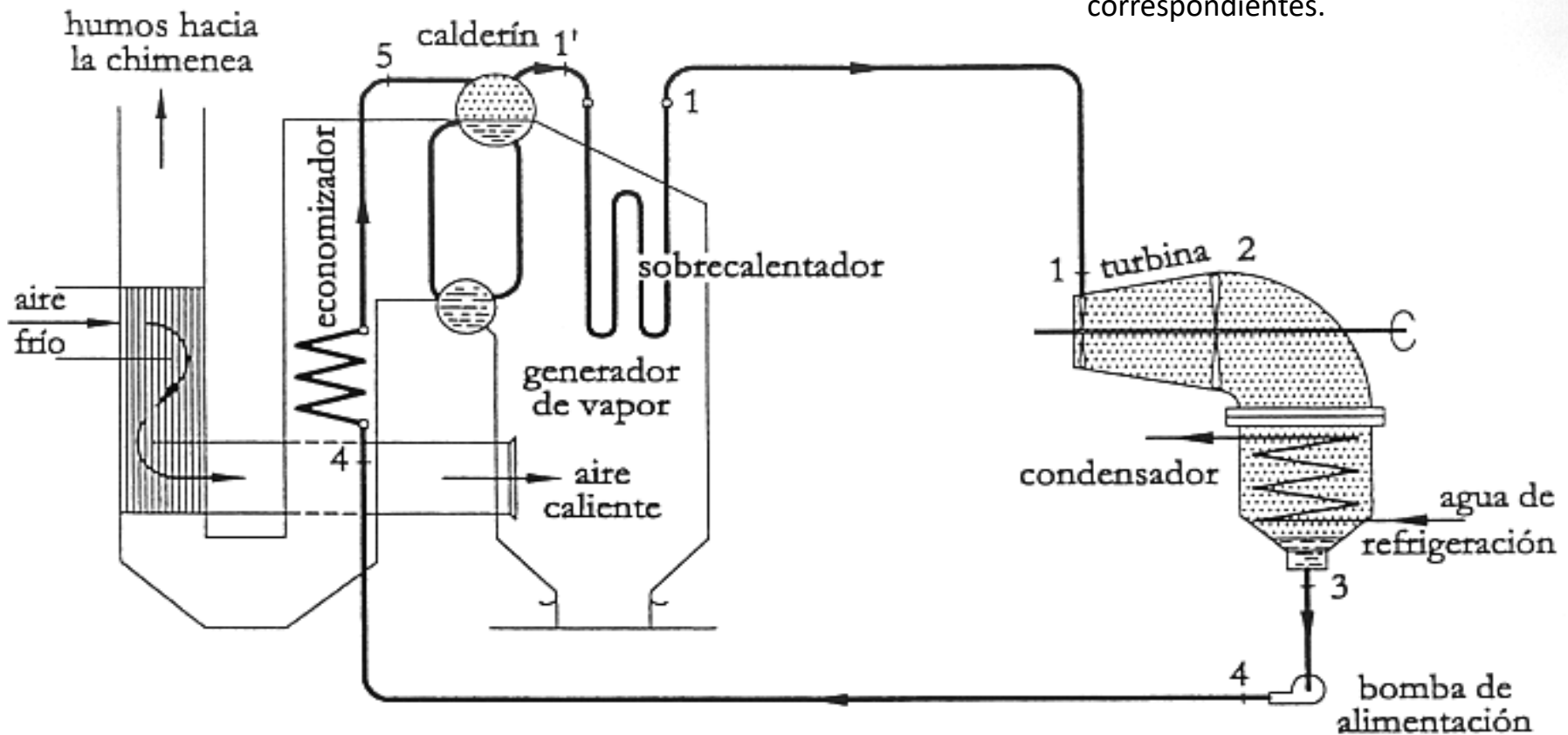


Central de Porcheville. Grupo de 600 MW.

Centrales de carbón

Elementos constructivos

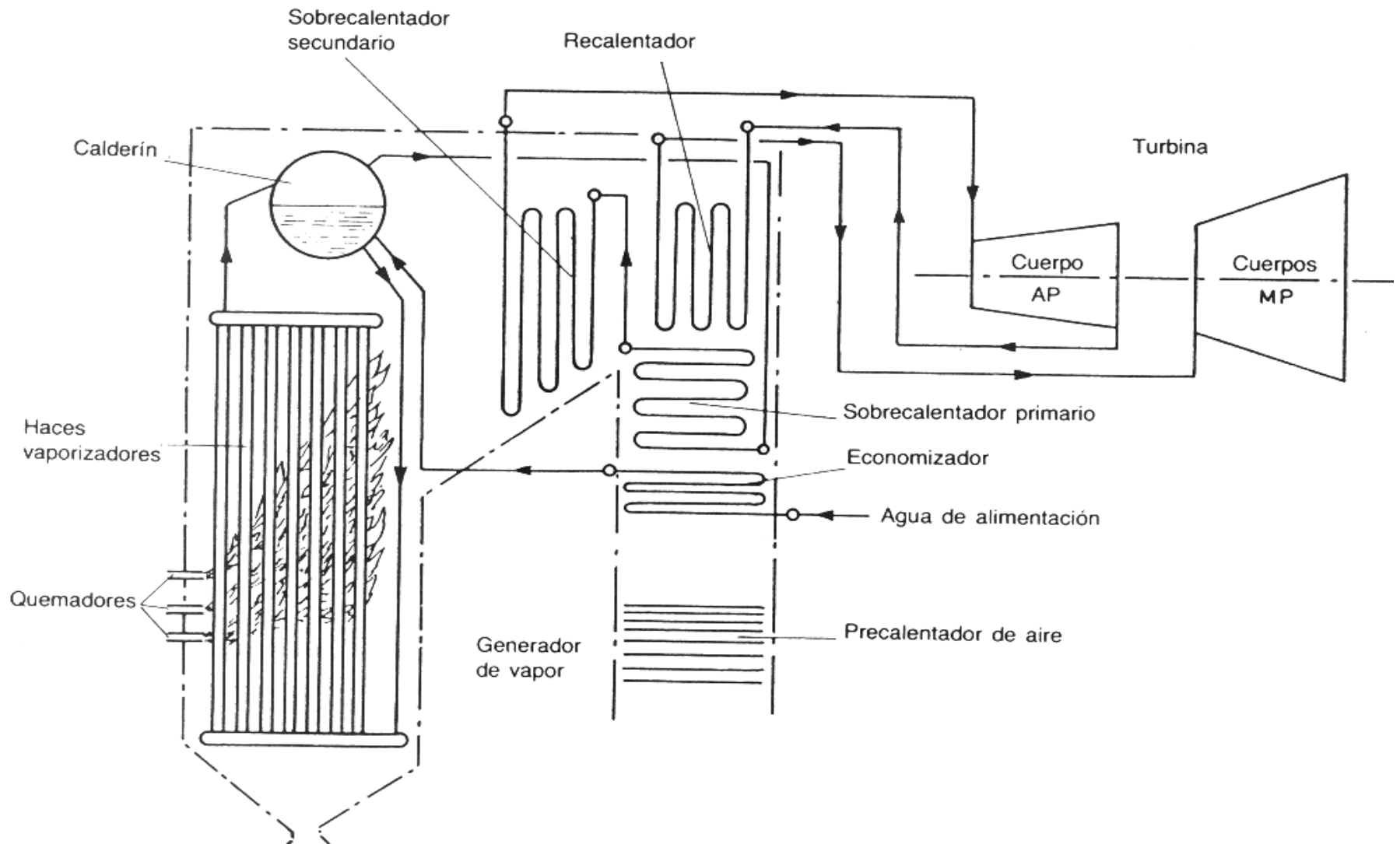
Salvo la caldera, el resto de componentes se encuentran también en centrales termosolares, de biomasa, y nucleares. Sus especificidades se verán en los temas correspondientes.



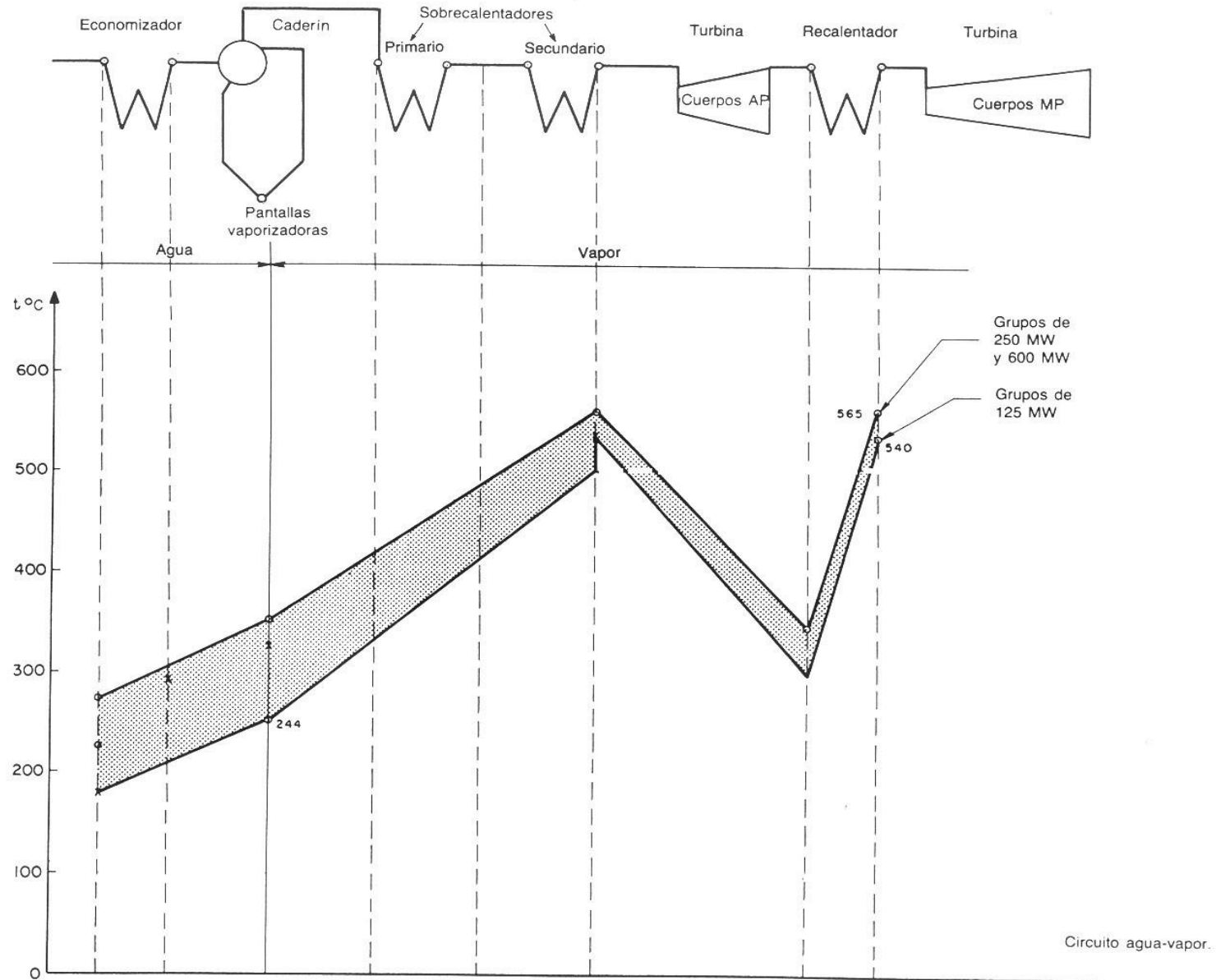
Centrales de carbón

- Caldera
 - caldera de tipo acuotubular, normalmente de circulación natural
 - dispone de un cilindro inferior con agua líquida, conectado al calderín mediante los tubos vaporizadores (por donde asciende el agua por convección); el retorno del calderín al cilindro inferior se hace por tubos fríos (alejados de la llama)
 - los tubos vaporizadores aíslan las paredes del hogar
 - en el calderín se forma vapor húmedo, conduciéndose el vapor saturado al sobrecalentador
 - puede haber recalentador
 - las últimas secciones (gases más fríos) se aprovechan para el economizador y el precalentador de aire
 - circulación:
 - casi siempre por convección natural: descenso en tubos fríos y ascenso por tubos vaporizadores
 - forzada: ausencia de calderín. Similar a caldera de serpentín.
 - asistida: bomba en tubos de descenso
 - combinada: asistida a carga parcial y forzada a plena carga. Utilizada en centrales supercríticas

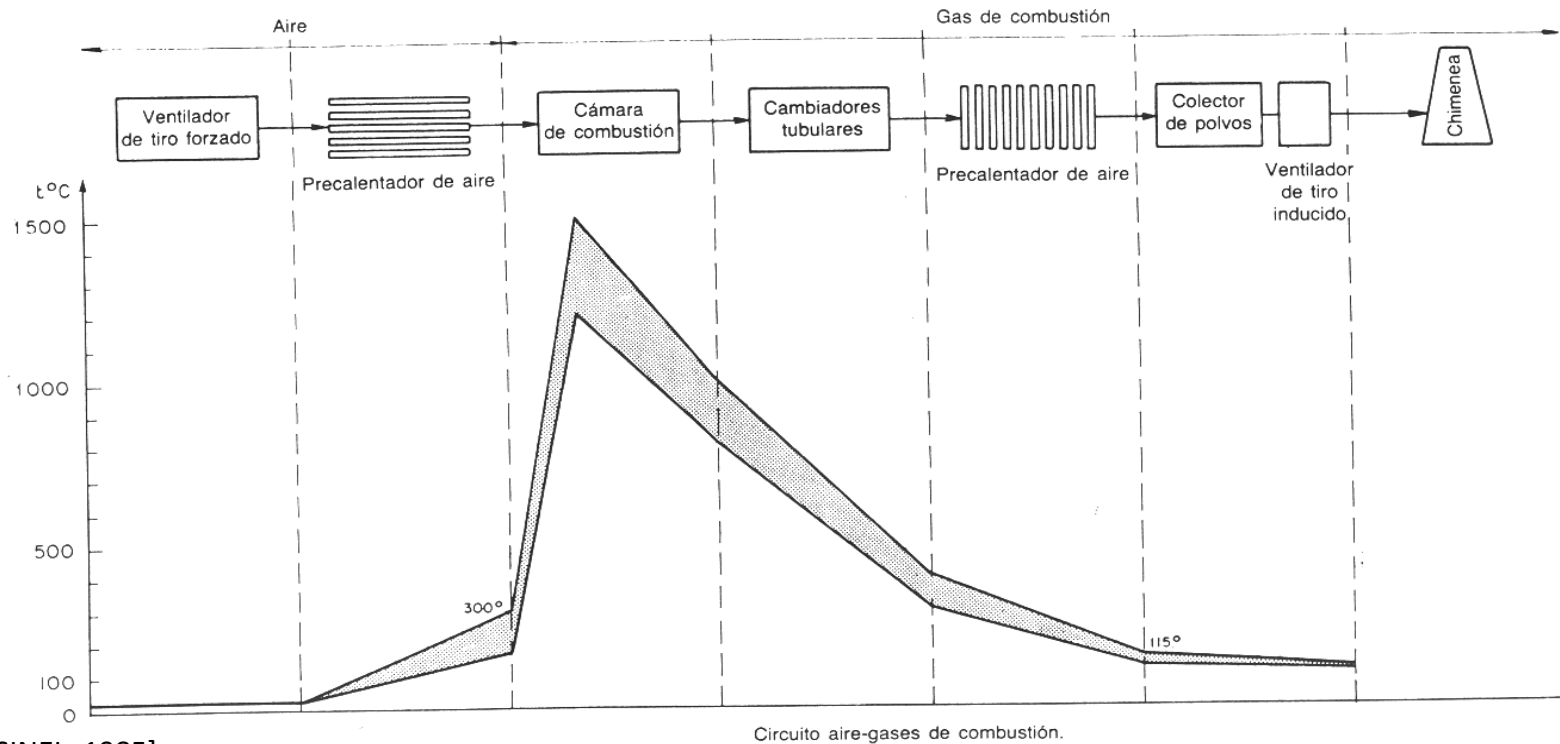
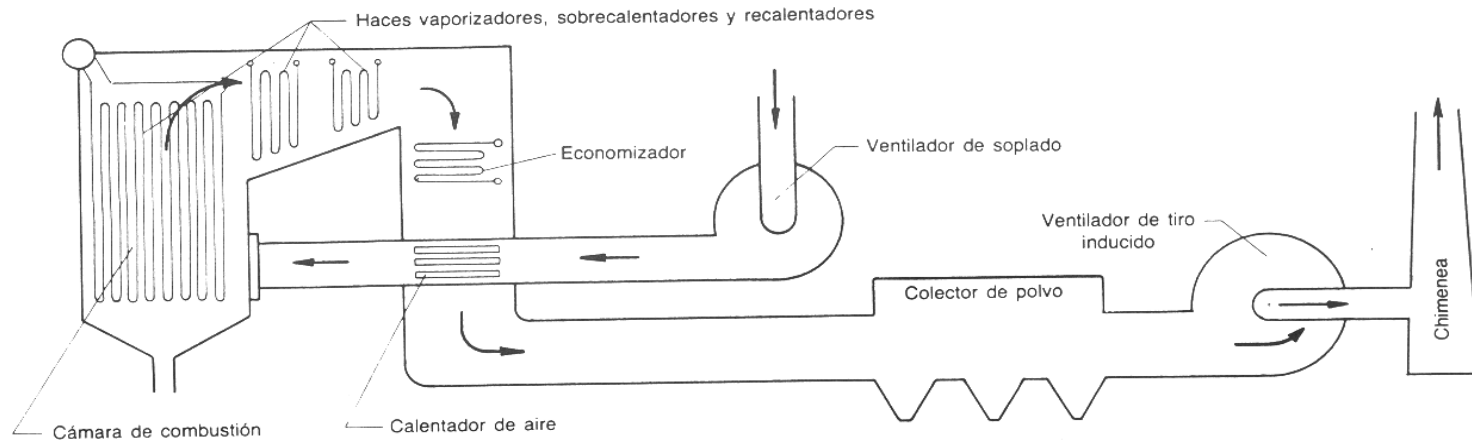
Centrales de carbón



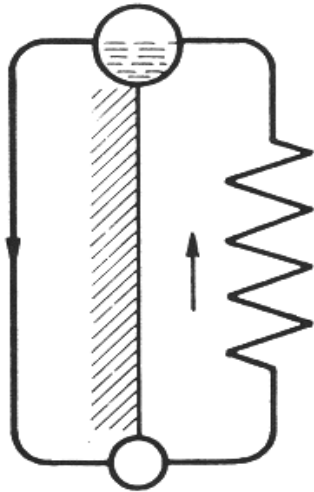
Centrales de carbón



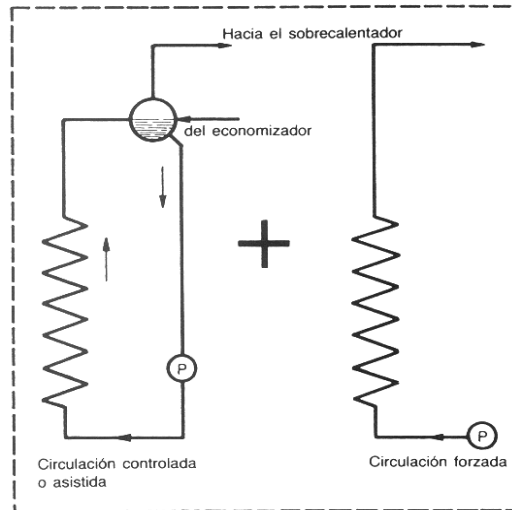
Centrales de carbón



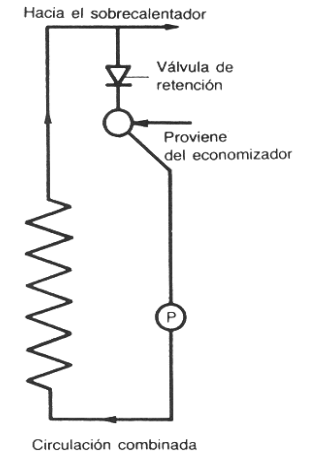
Centrales de carbón



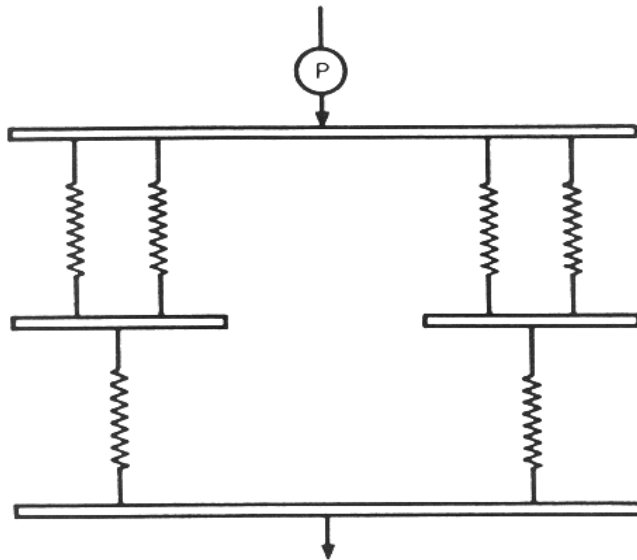
Generador de vapor de circulación natural.



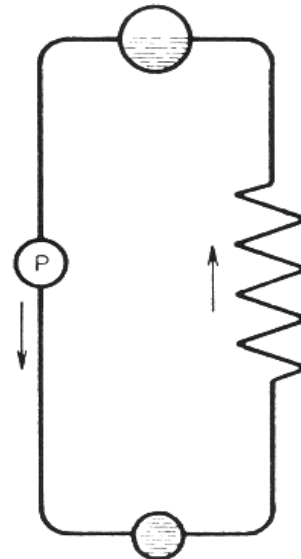
=



Generador de vapor de circulación combinada



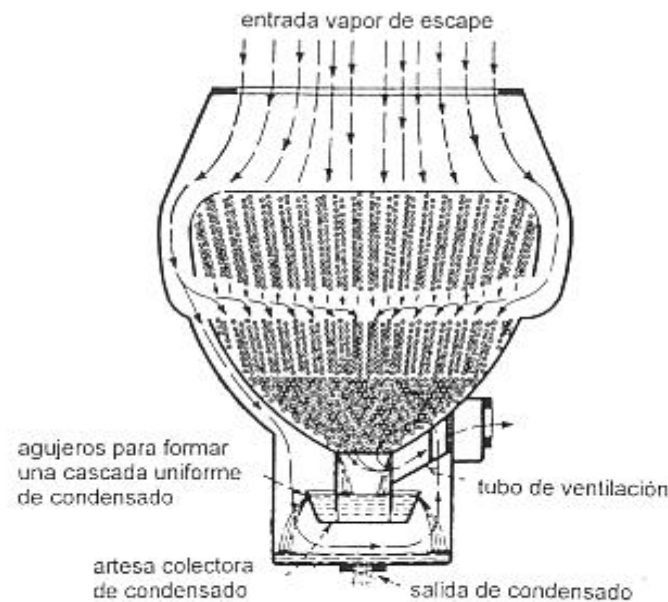
Generador de vapor de circulación forzada.



Generador de vapor de circulación asistida.

Centrales de carbón

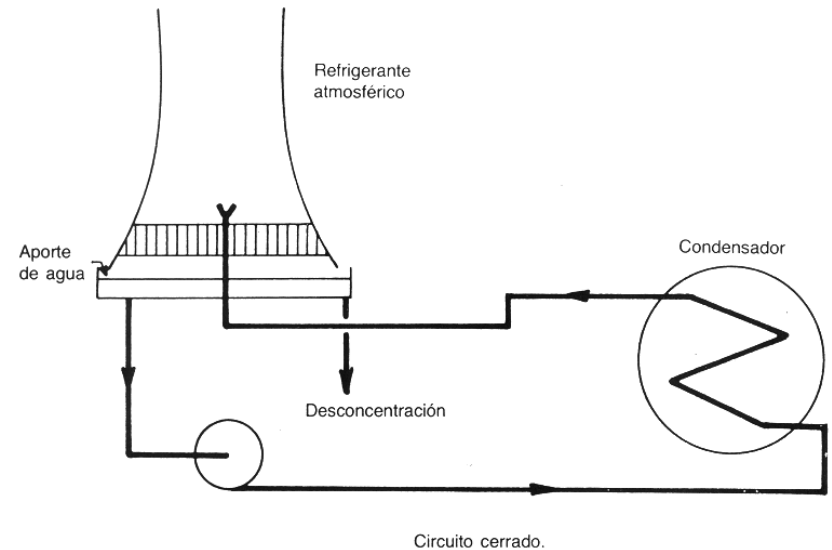
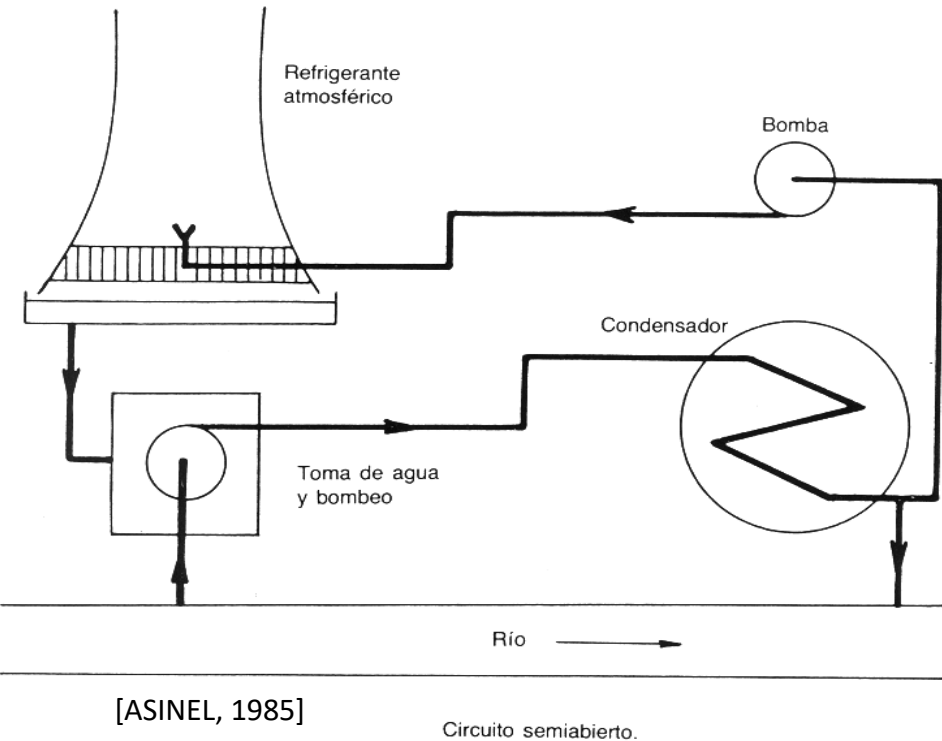
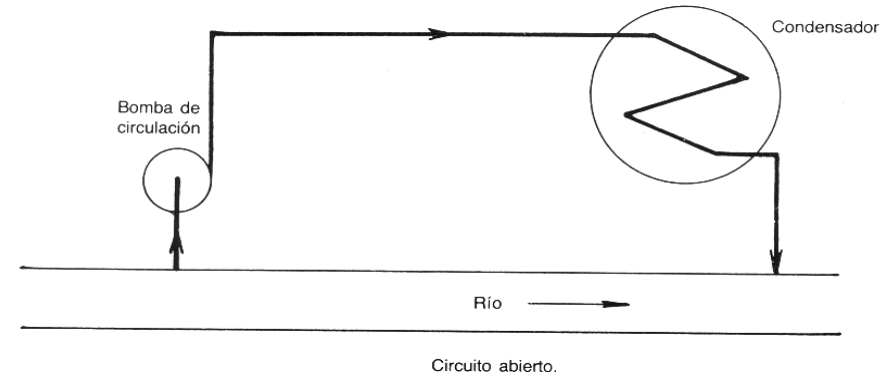
- Condensador
 - intercambiador de calor de tubos
 - el vapor se condensa en la carcasa
 - el agua de refrigeración circula por el interior de los tubos



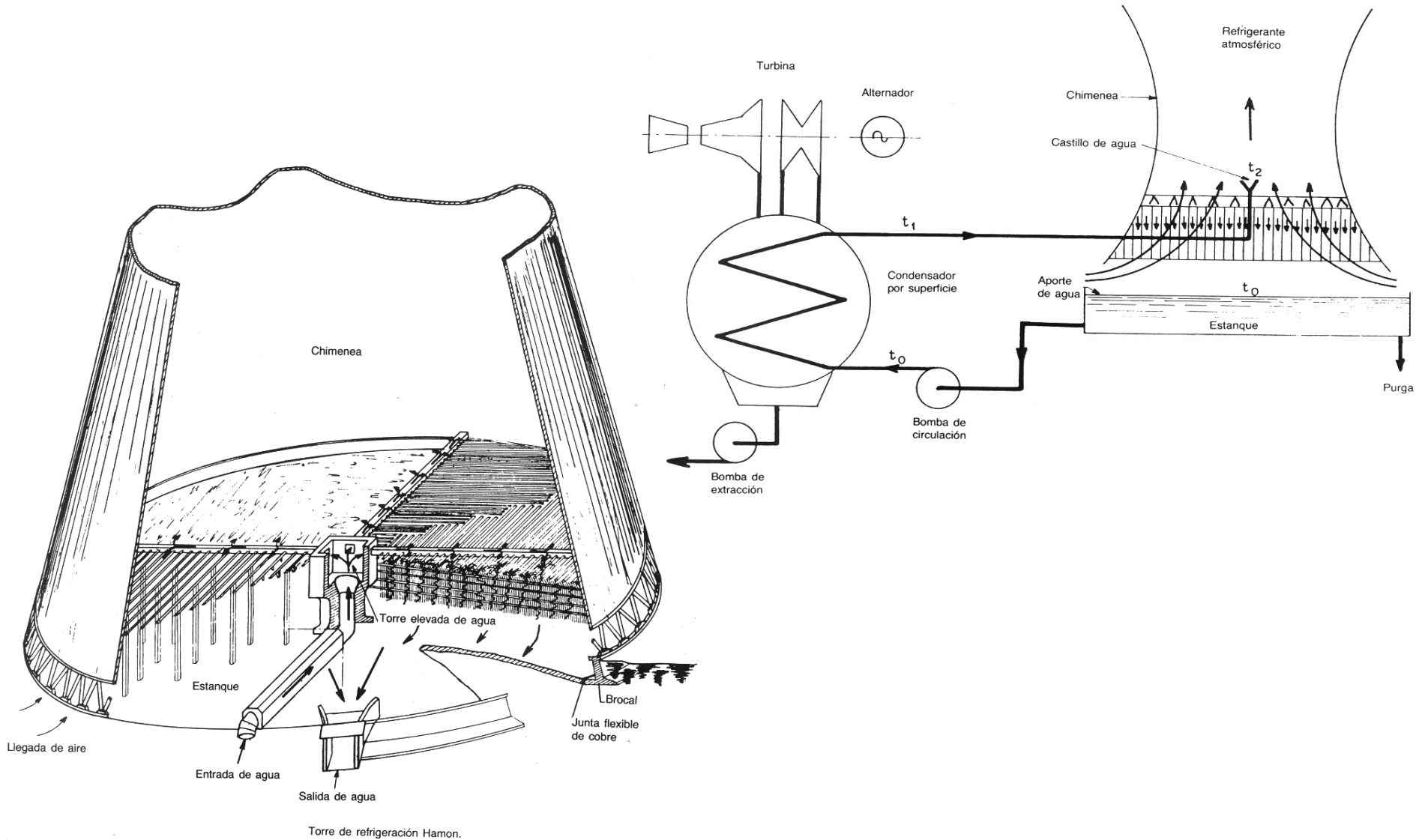
Centrales de carbón

• Circuito de refrigeración

- como foco frío se toma un río, embalse o mar
- el incremento de temperatura del foco se debe controlar
- un refuerzo lo constituyen las torres de refrigeración: el agua de refrigeración se enfriará, como mucho, a la temperatura húmeda del aire atmosférico



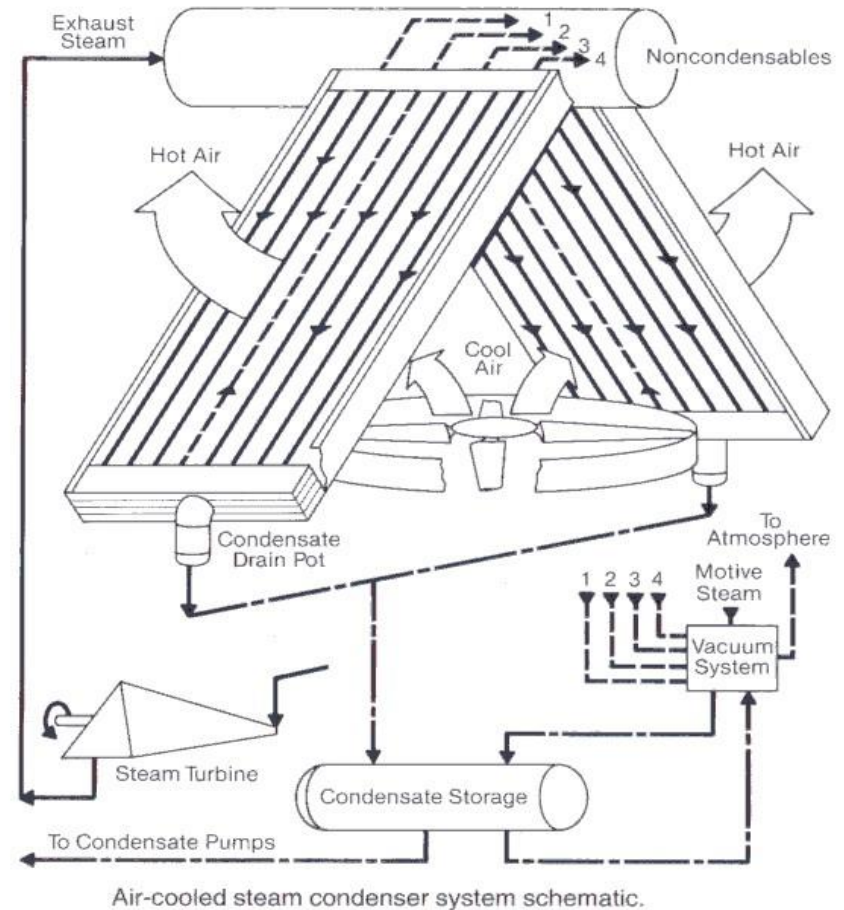
Centrales de carbón



Centrales de carbón

- Condensador por aire

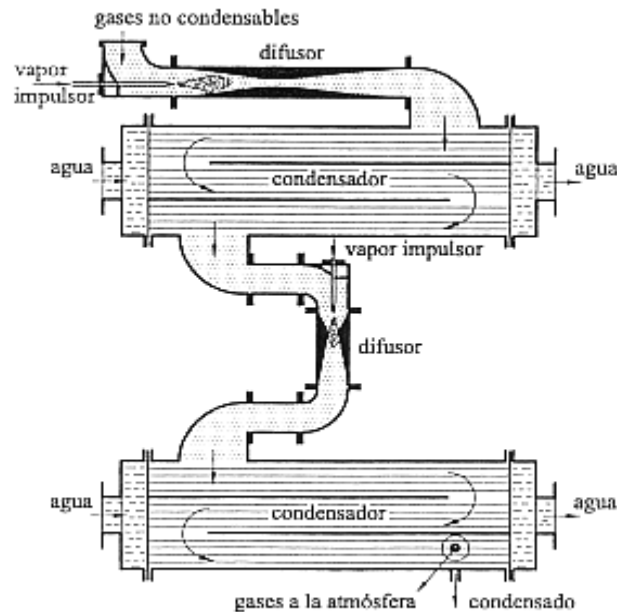
- es una alternativa al empleo de agua refrigerada por torre
- simplifica el tratamiento del agua
- reduce el almacenamiento de agua
- reduce problemas de mantenimiento
- la presión de condensación se incrementa, la ser la temperatura seca ambiente superior a la húmeda



[Babcock & Wilcox, 1992]

Centrales de carbón

- Circuito de vacío
 - para hacer el vacío en el condensador se emplea uno o dos eyectores
 - se toma vapor vivo, que al expansionarse en una tobera provoca una depresión capaz de arrastrar los gases no condensables del condensador (aire y nitrógeno) y algo de vapor
 - luego atraviesan un difusor para incrementar la presión, desembocando en un pequeño condensador (diferente al de la central)
 - en ese condensador se condensa el vapor arrastrado y retorna al ciclo
 - los gases no condensables se eliminan a la atmósfera o continúan al segundo eyector

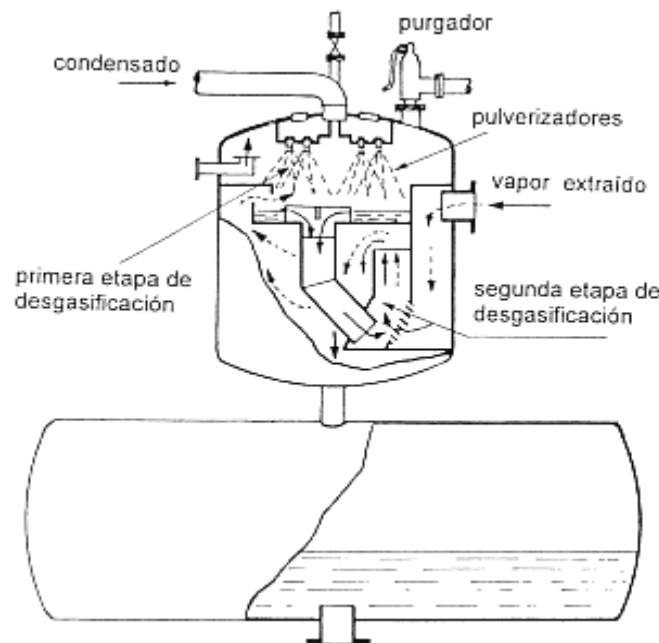


[Agüera, 1999]

Centrales de carbón

- Desgasificador

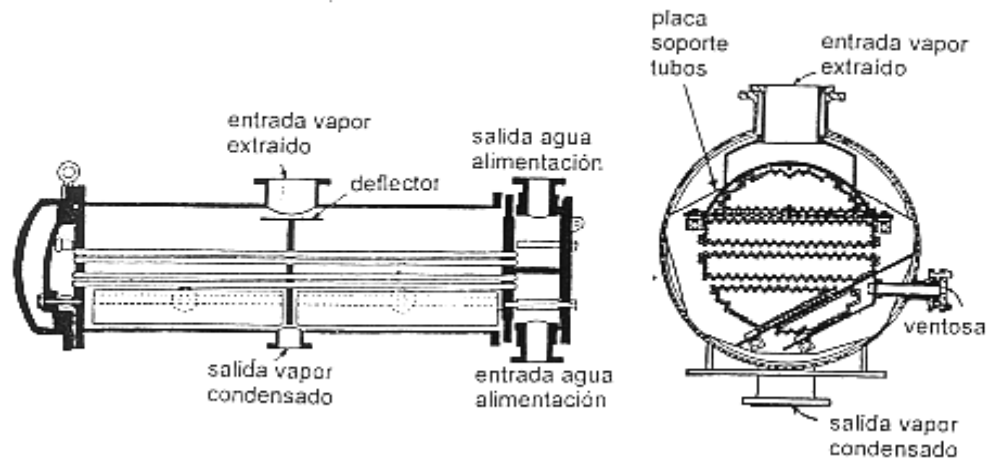
- es un precalentador abierto
- casi todos los gases son eliminados en el eyector, pero el oxígeno se disuelve en el agua, y puede entrar aire en otros puntos (cierres de bombas, ...)
- el desgasificador puede eliminar hasta el 95% de oxígeno disuelto. El resto se elimina químicamente con hidracina, resultando agua y nitrógeno, que es eliminado en el eyector
- el condensado es pulverizado contra chorros de vapor extraído que arrastran el oxígeno, expulsándolo por unos purgadores. El condensado sale por la parte inferior



[Agüera, 1999]

Centrales de carbón

- Precalentadores cerrados
 - es un intercambiador de calor de carcasa y tubos
 - el vapor de extracción se condensa en la carcasa, circulando el agua de alimentación por los tubos



[Agüera, 1999]

Centrales de ciclo combinado

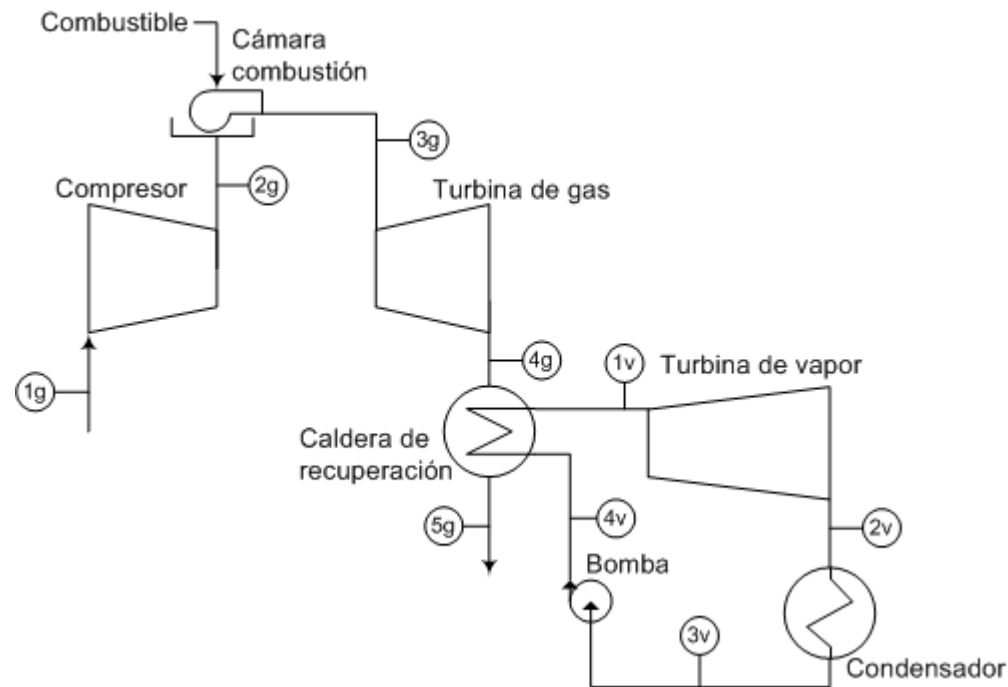
- Maximización de sinergias ciclo vapor/ciclo de gas
- Ciclo de gas:
 - Elevado trabajo de compresión. Se requiere elevar mucho la temperatura de entrada en turbina
 - Se emplea combustión para alcanzar elevada temperatura. Requiere renovación de aire y expulsión a la atmósfera
 - Los humos a la salida de la turbina aún tienen temperaturas elevadas al no poder expansionar hasta vacío. Se cede calor a temperatura variable y elevada
- Ciclo de vapor:
 - Reducido trabajo de compresión. No se requiere excesiva temperatura de entrada en turbina
 - No existe combustión, luego no se requiere renovación del fluido de trabajo y se puede realizar la expansión hasta presiones de vacío: límite la temperatura del foco frío
 - Cesión de calor realizada en cambio de fase, a temperatura constante

Centrales de ciclo combinado

- Combustible:
 - El ciclo Brayton precisa de altas temperaturas, que se alcanzan haciendo pasar los gases de escape por la turbina
 - El combustible tiene que ser limpio:
 - Gas natural en CC y TG de cualquier potencia
 - GLP y líquidos ligeros en TG de baja potencia (microturbinas)
 - El gas natural (metano) puede ser reemplazado por biogás o gas natural sintético procedente de fuentes renovables, que se inyecta en la red de gas

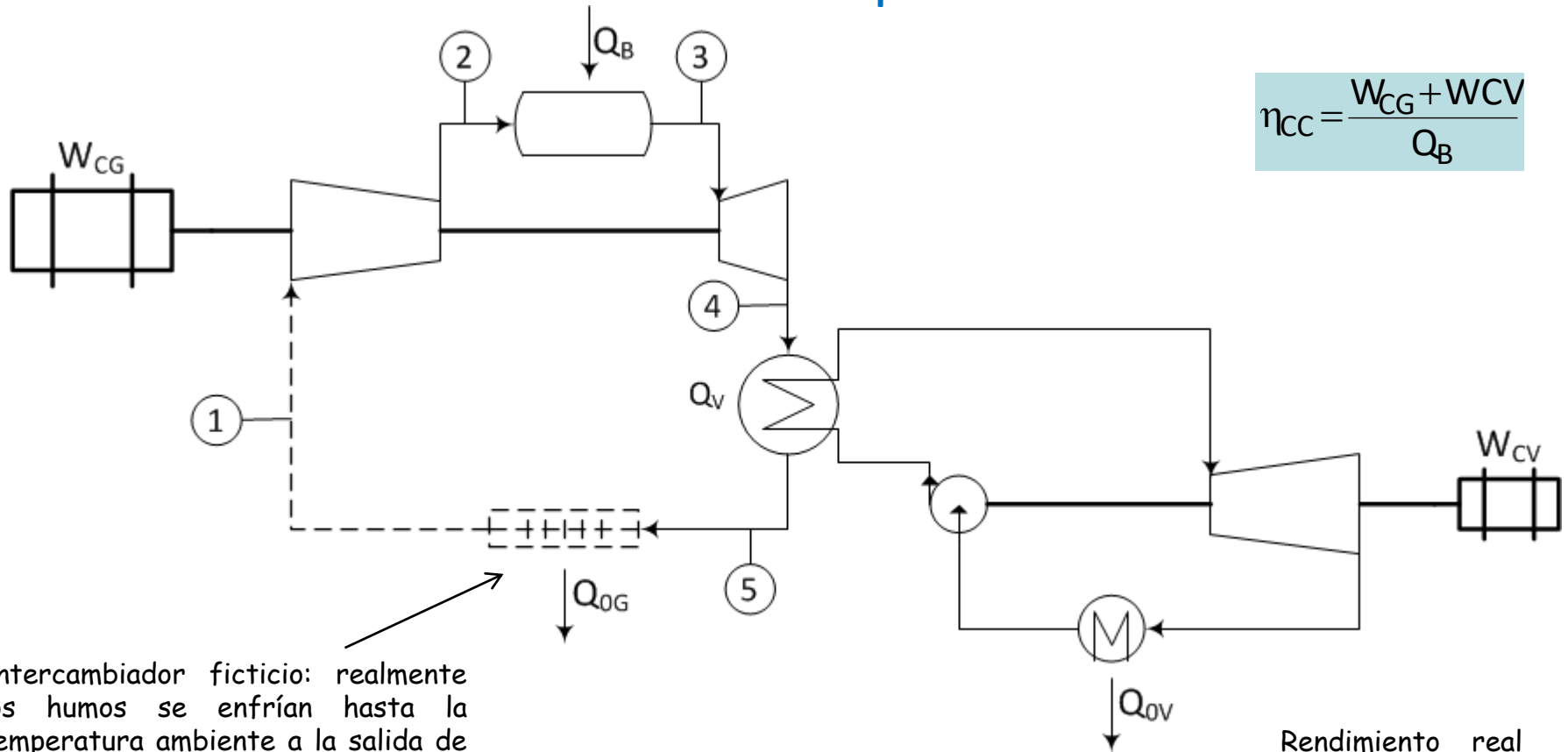
Centrales de ciclo combinado

- Ciclo combinado:
 - Foco caliente de alta temperatura bien aprovechado por el ciclo de gas
 - Foco frío de baja temperatura muy bien aprovechado por el ciclo de vapor
 - Conexión mediante la caldera de recuperación (HRSG)



Centrales de ciclo combinado

Influencia de la caldera de recuperación en la eficiencia



$$\eta_{CC} = \frac{W_{CG} + W_{CV}}{Q_B}$$

Intercambiador ficticio: realmente los humos se enfrían hasta la temperatura ambiente a la salida de la caldera de recuperación

La eficiencia de la caldera de recuperación compara el calor recuperado con el disponible a la salida de la turbina de gas, respecto al ambiente:

$$\eta_{CR} = \frac{Q_V}{Q_V + Q_{0G}} = \frac{Q_V}{Q_{41}}$$

Rendimiento real del CV

$$\eta_{CV} = \frac{W_{CV}}{Q_V}$$

Rendimiento del CV si se recuperase todo el calor disponible a la salida de la TG

$$\eta'_{CV} = \frac{W_{CV}}{Q_{41}} = \eta_{CV} \cdot \eta_{CR}$$

Centrales de ciclo combinado

Expresiones para explicar la eficiencia

El ciclo de vapor amplifica la eficiencia del ciclo de gas. En un ciclo combinado típico (no repowering): $\times 1,5$

$$\eta_{CC} = \eta_{CG} \cdot \left(1 + \frac{W_{CV}}{W_{CG}} \right)$$

La eficiencia de la caldera de recuperación limita el máximo rendimiento alcanzable (el que habría si el gas saliese de la caldera de recuperación a la temperatura de entrada al compresor, es decir, si $Q_{OG} = 0$)

$$\eta_{CC}^{\text{máxrec}} = \eta_{CG} + \eta_{CV} - \eta_{CG} \cdot \eta_{CV}$$

- El rendimiento del ciclo de gas influye más sobre el CC
- No se debe realizar regeneración en ciclo de vapor:
 - aumenta el rendimiento del ciclo de vapor
 - reduce el de la caldera de recuperación

$$\eta_{CC} = \eta_{CG} + \eta_{CV} \cdot (1 - \eta_{CG}) \cdot \eta_{CR}$$

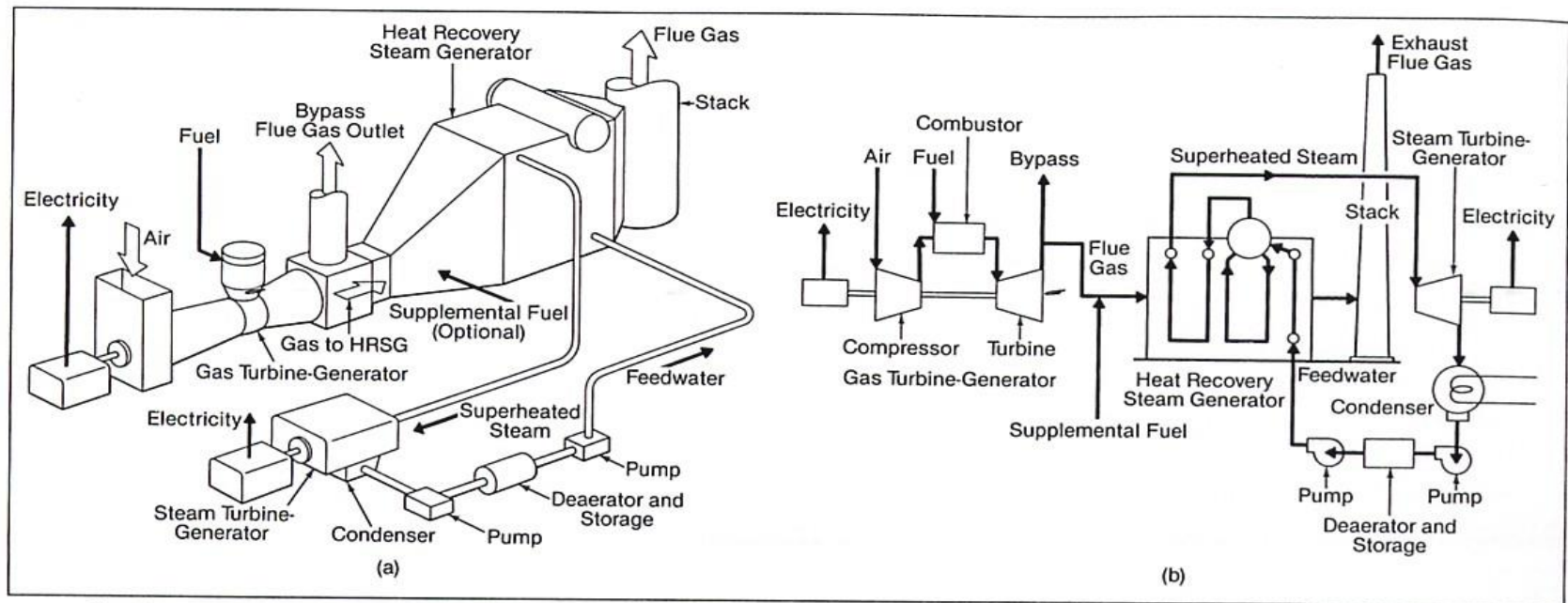
$$\eta_{CC} = \eta_{CG} + \eta'_{CV} - \eta_{CG} \cdot \eta'_{CV}$$

Centrales de ciclo combinado

CALDERA DE RECUPERACIÓN PRESIÓN SIMPLE

$$\eta_{CC} = \eta_G + \eta_V \eta_{CR} (1 - \eta_G)$$

$$\eta_{CC} = \eta_{CG} + \eta'_{cv} - \eta_{CG} \cdot \eta'_{cv}$$



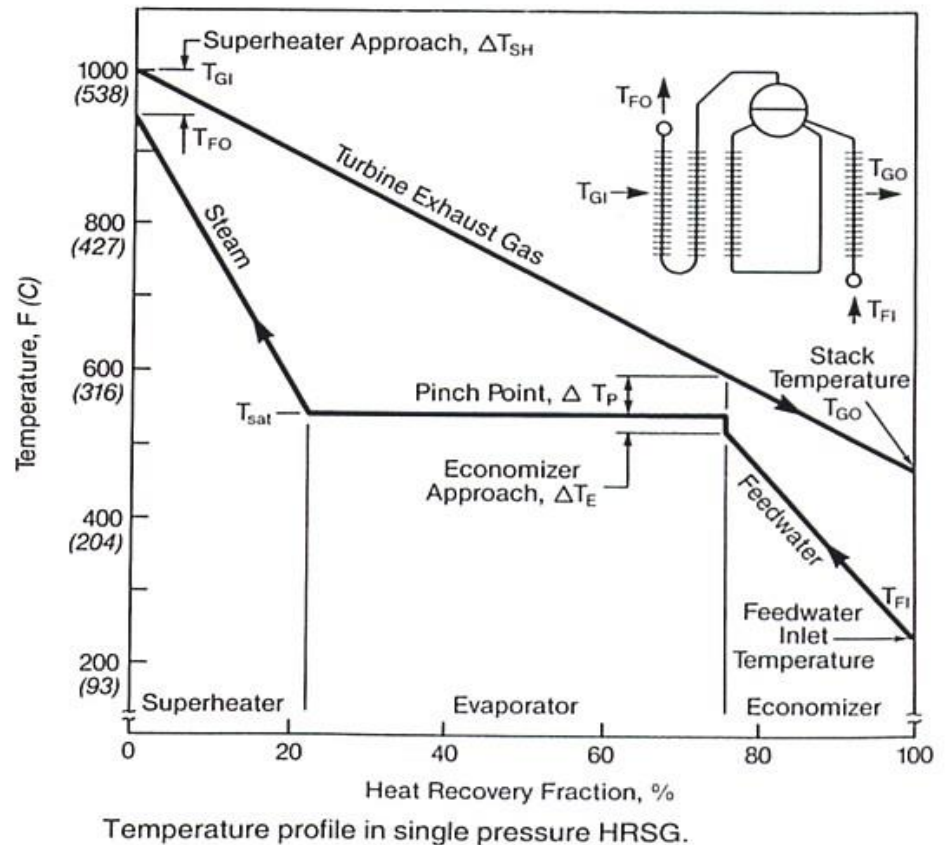
Simplified combined cycle system schematics.

[Babcock & Wilcox, 1992]

Centrales de ciclo combinado

- El funcionamiento de la caldera de recuperación (Heat Recovery Steam Generator) queda regulado por:

- punto de estricción (pinch point, PP): 11 a 28 °C
- acercamiento en el sobrecalentador (superheater approach, SA): 22 a 33 °C
- acercamiento en economizador (economizer approach, EA): 6 a 17 °C
- El acercamiento en el economizador pretende evitar la evaporación en el economizador



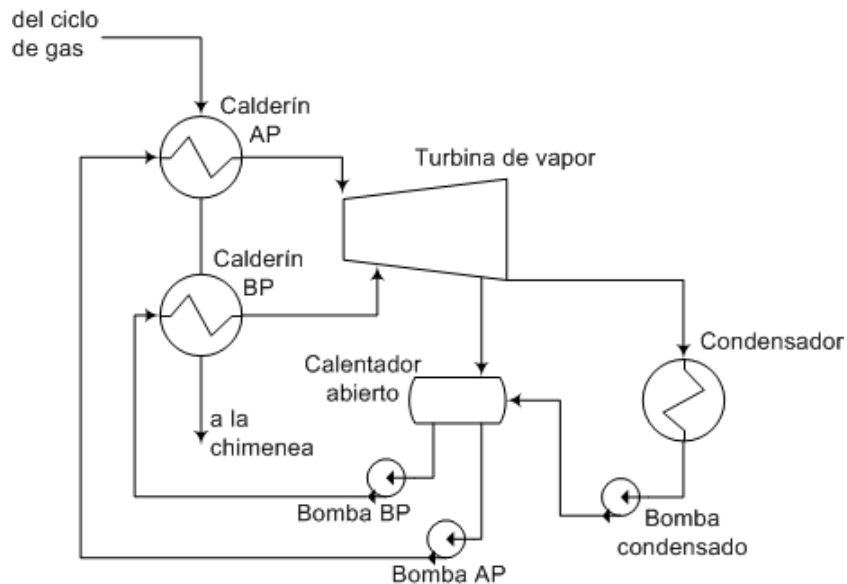
[Babcock & Wilcox, 1992]

Centrales de ciclo combinado

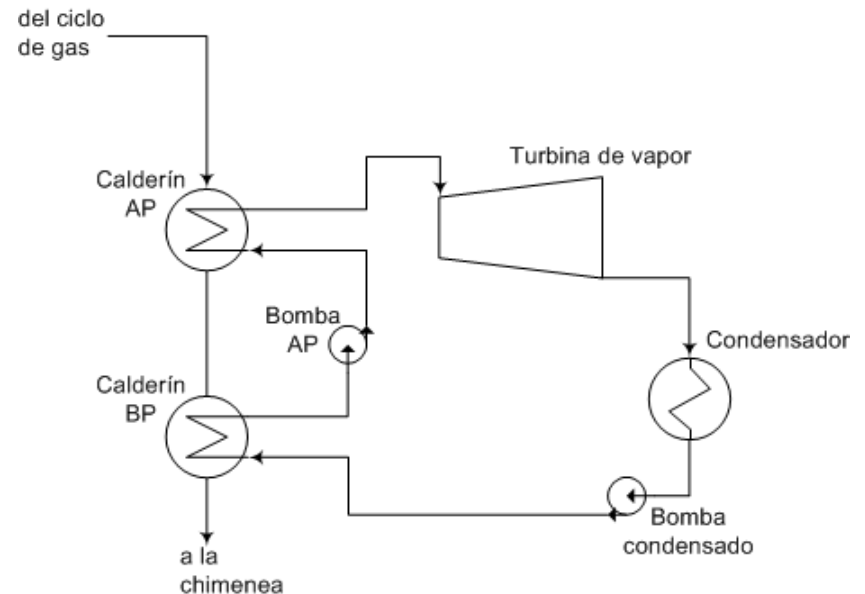
Calderas de recuperación de varios niveles de presión

- Con un sólo nivel de presión la temperatura de salida de los gases aún es elevada, con lo que el rendimiento del acoplamiento térmico en la CR es mejorable ($\sim 70\%$)
- En ciclos avanzados pueden requerirse presiones intermedias para otros usos
- Los niveles intermedios de presión permiten una mayor adaptación de los perfiles térmicos: se reduce la irreversibilidad en la CR

Paralelo (2 niveles)

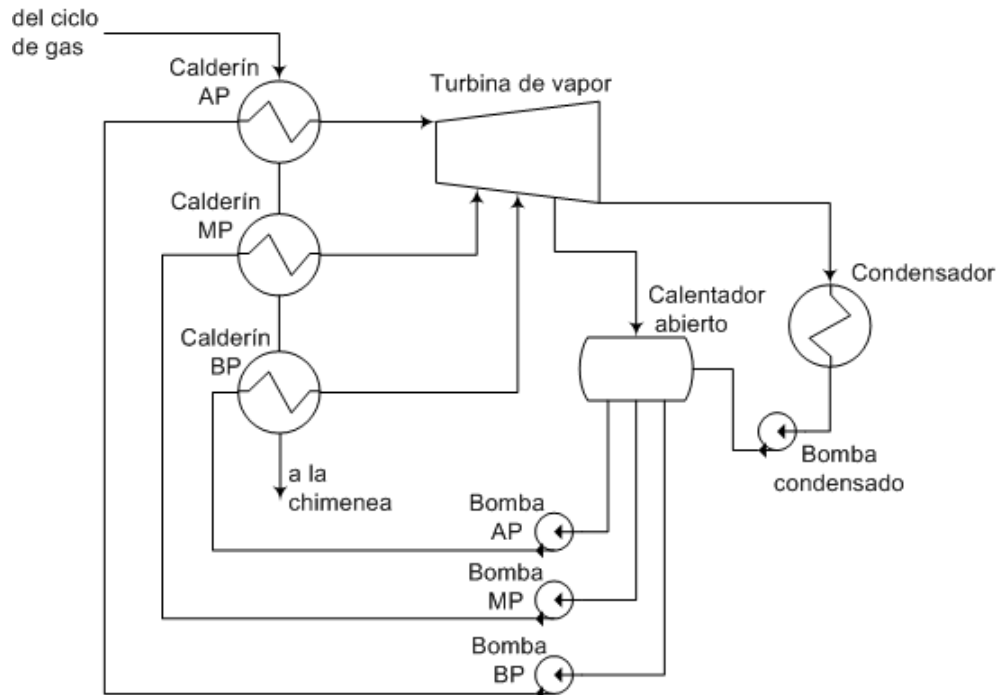


Serie (2 niveles)

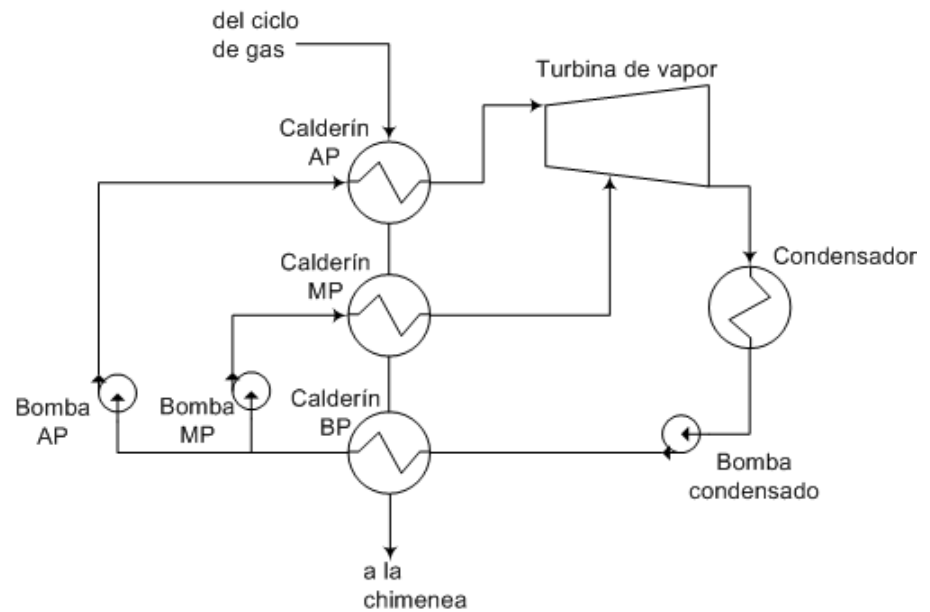


Centrales de ciclo combinado

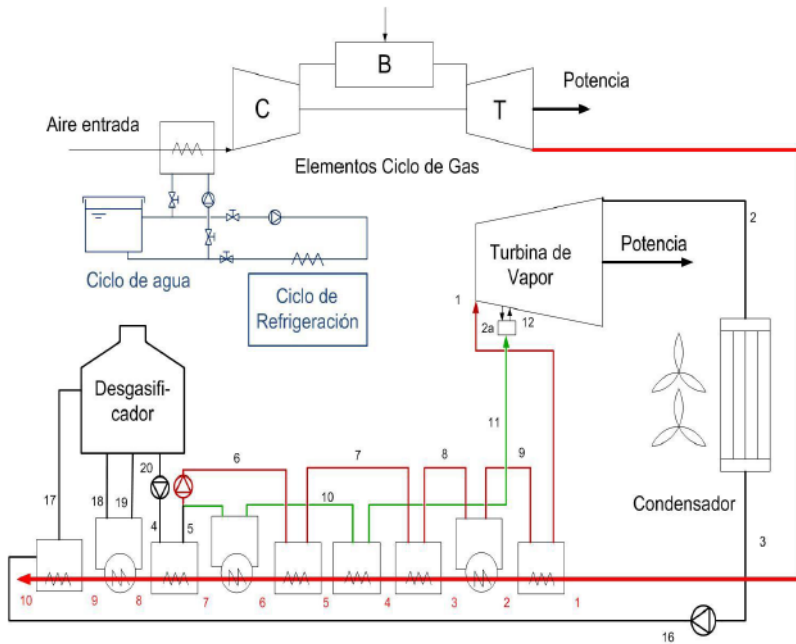
Paralelo (3 niveles)



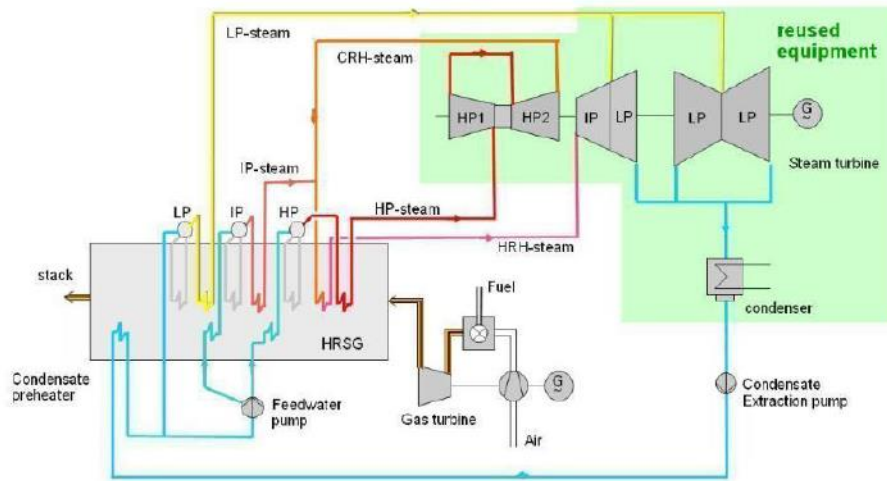
Serie/paralelo (3 niveles)



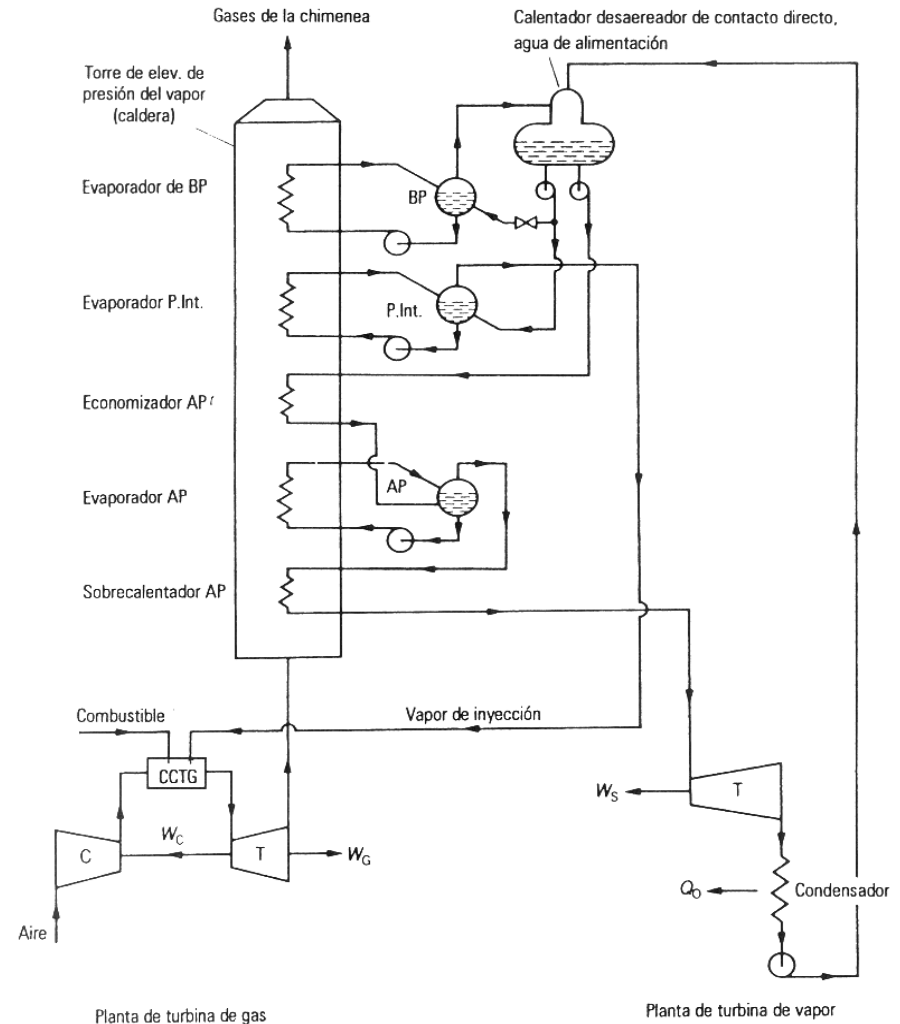
Centrales de ciclo combinado



[Goñi, 2011]

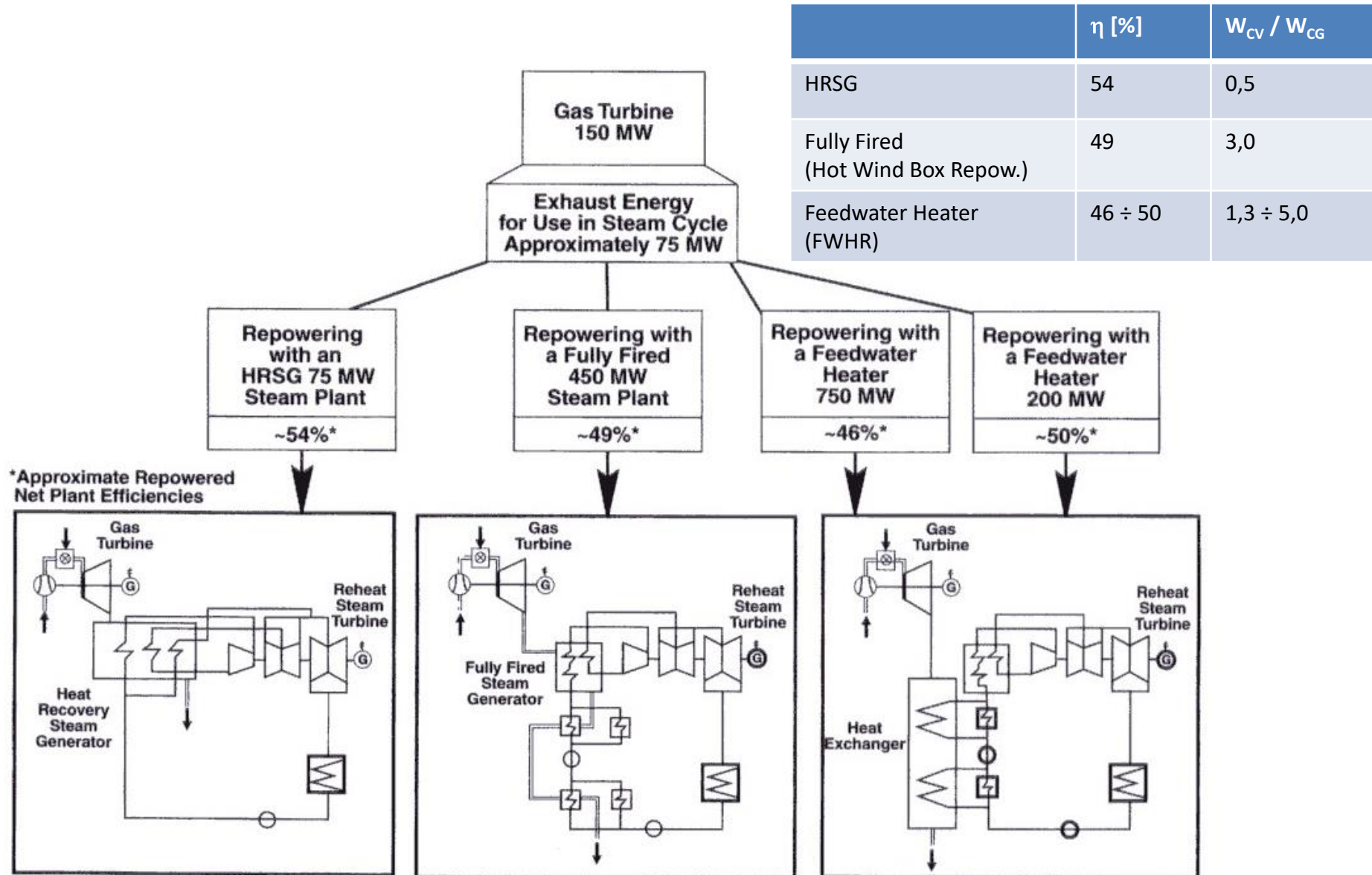


[Fränkle, 2008]



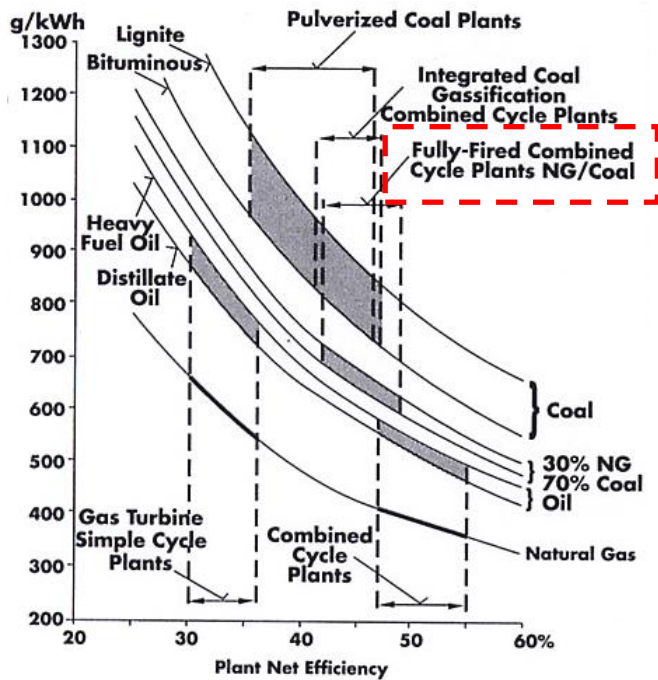
[Haywood, 2000]

Repotenciación de centrales de carbón



[Petchers, 2003]

Repotenciación de centrales de carbón



- La inclusión del gas natural permite reducir las emisiones
- El consumo específico de carbón se reduce o incluso se elimina.

Repowering por caldera de recuperación (HRSG):

- Reemplaza el carbón por gas natural
- Aplicable sólo a centrales antiguas y pequeñas

Repowering por agua de alimentación (Feedwater):

- La caldera de carbón se mantiene
- El ciclo de gas puede ser el menor de los 3 casos (términos relativos)
- La reducción del consumo de carbón podría ser la menor

Repowering por postcombustión (Fully Fired):

- Requiere modificación de la caldera
- Se sustituye el precalentador de aire por precalentadores de agua de alimentación
- Tamaño de ciclo de gas intermedio, así como la reducción del consumo de carbón

Combustión limpia en centrales térmicas

Tecnologías con aporte de agua (ciclos de gas)

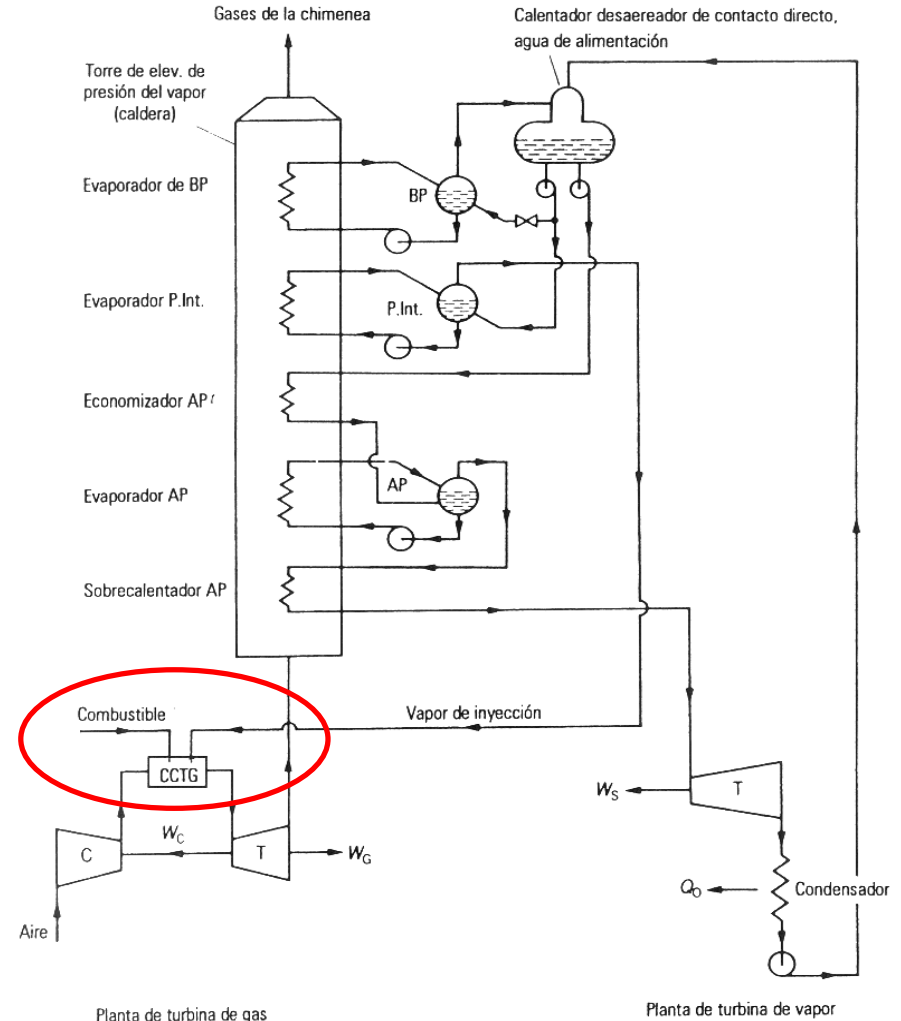
- Saturación del aire y del combustible (HAT)
 - se saturan los gases de entrada a la cámara de combustión
 - se emplea un humectador para saturar el aire a la salida del compresor y/o el gas combustible antes de su entrada a la cámara de combustión
 - proceso adaptado a CC, pues el agua del humectador procede de calderines de media presión del HRSG, pudiéndose precalentar mediante humos de escape de la turbina de gas
 - se reduce la temperatura de combustión (reducción de NO_x)
 - se incrementa el gasto másico que pasa por la turbina, así como el calor específico de los gases, aumentando así la potencia y el rendimiento

Combustión limpia en centrales térmicas

Tecnologías con aporte de agua

- Inyección de vapor en la cámara de combustión (STIG)

- el gasto de vapor inyectado suele ser del 15% del gasto de aire
- se facilita la integración en CC, al proceder el vapor de algún calderín de media presión del HRSG. El vapor se puede precalentar mediante los gases de escape
- se reducen las emisiones de NO_x al reducir la temperatura de combustión
- el calor específico de los gases aumenta, así como el gasto de gases que pasa por la turbina de gas. Por ello aumenta la potencia y el rendimiento



[Haywood, 2000]

Combustión limpia de carbón

Combustión en lecho fluidizado (carbón)

- Combustión en lecho fijo
 - el carbón se deposita sobre una parrilla, circulando sobre él el aire. Las cenizas caen de la parrilla.
 - se trata del sistema habitual, que presenta el problema de fuertes emisiones:
 - NO_x por alta temperatura
 - SO_2 por el azufre del carbón
- Combustión en lecho fluidizado
 - el carbón pulverizado, junto con arena y caliza se mantienen “flotando” por acción de una corriente de aire, comportandose como un fluido
 - la caliza absorbe el azufre del carbón formando sulfato cálcico
 - para favorecer la reacción anterior el lecho se refrigera con agua o aire, de modo que su temperatura sea de 850°C
 - a esa temperatura no se forma NO_x
 - las partículas arrastradas en los humos se separan sin dificultad
 - mejora el rendimiento de la combustión

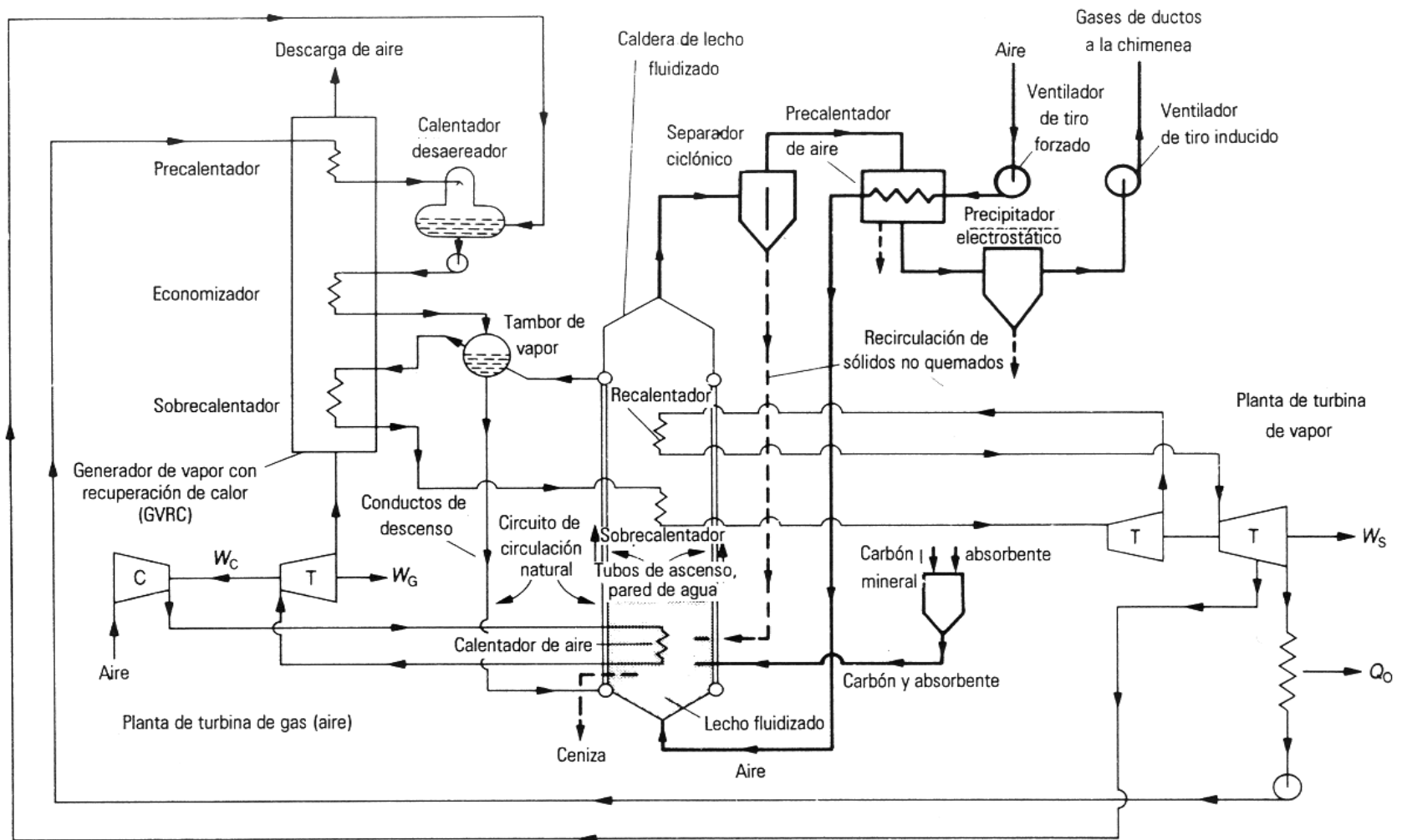
Combustión limpia de carbón

Combustión en lecho fluidizado

- Lechos atmosféricos: el hogar se mantiene a presión atmosférica
 - lecho burbujeante: profundidad del lecho de hasta 1,5 m. Velocidad de aire de 2 m/s
 - lecho profundo: similar al anterior, pero con mayores profundidades de arena, carbón y caliza
 - lecho circulante fluidizado: el lecho es muy profundo, ocupando todo el hogar. El aire circula a 8 m/s, arrastrando sólidos no quemados hasta la parte superior. Allí son capturados por el ciclón, inyectándose en la parte inferior. La cámara de combustión es de mayor altura, pero aumenta la cantidad de combustible quemado y aumenta la captura de azufre
- Lechos presurizados
 - el hogar es alimentado con aire procedente de un compresor de una planta de turbina de gas
 - se emplea en ciclos combinados gas-vapor

Combustión limpia de carbón

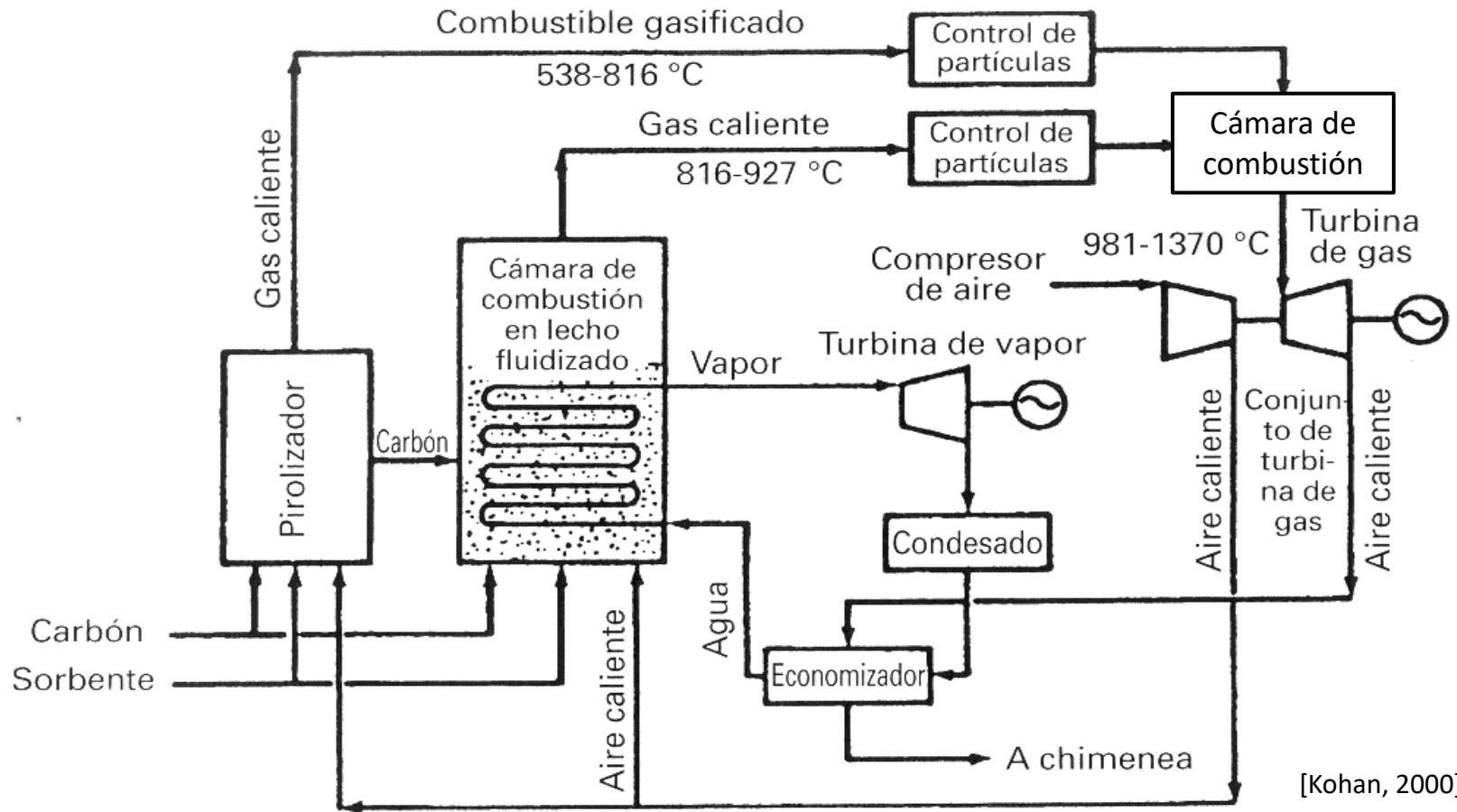
Combustión en lecho fluidizado



Combustión en lecho fluido atmosférico de tipo circulante. Se detalla la circulación natural en la caldera

Combustión limpia de carbón

Combustión en lecho fluidizado



Combustión en lecho fluido presurizado. Se obtiene gas de aire para la TG y coque para la caldera

Combustión limpia de carbón

Gasificación integrada en ciclo combinado

- facilita la eliminación de SO_2 y NO_x
- se puede combinar con lecho fluidizado para quemar el coque de la gasificación
- admite elevado nivel de integración:

- **Integración sistemas agua-vapor** del gasificador y del ciclo: el agua de alimentación a calderas se precalienta en el HRSG y se envía al desgasificador para producir vapor saturado, que vuelve al HRSG para su sobrecalentamiento

- **Integración del nitrógeno** entre ASU y ciclo: el nitrógeno residual tras la separación del aire es comprimido y mezclado con el gas de síntesis para reducir los NO_x y aumentar la potencia de la turbina de gas

- **Integración del aire** entre ASU y ciclo: el aire comprimido requerido por la ASU es extraído del compresor de la turbina de gas

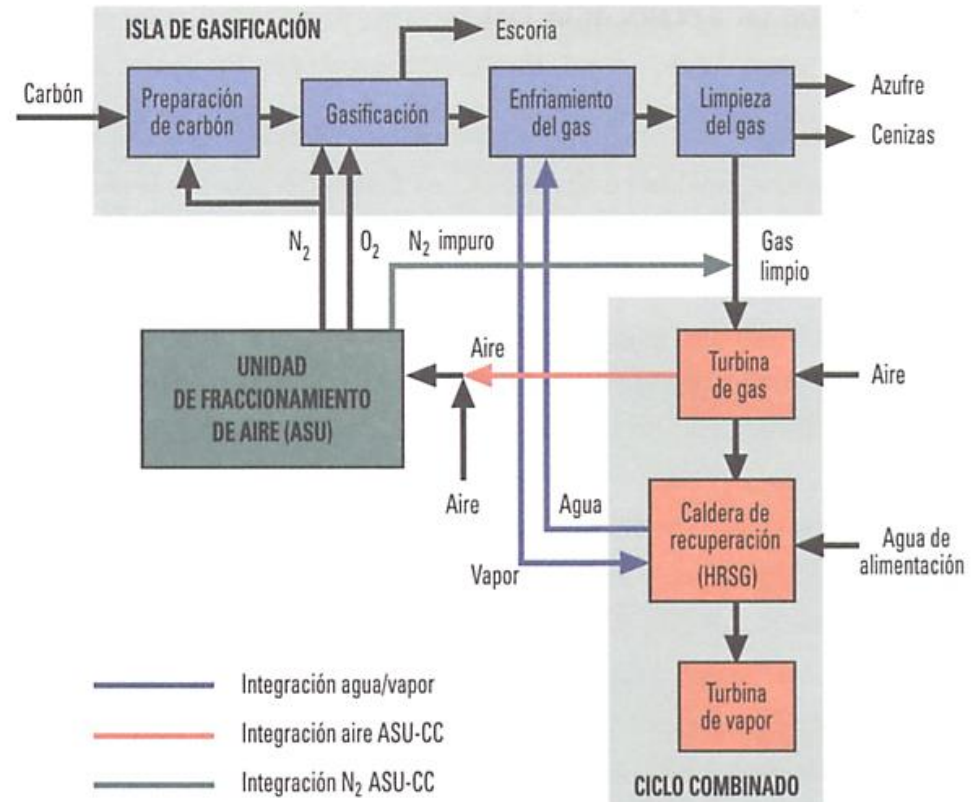


Diagrama de bloques y opciones de integración para una central GICC.

[Treviño, 2003]

Captura de CO₂

- Carbón sostenible:
 - el carbón es el combustible fósil con mayores reservas
 - puede emplearse para producir nuevos vectores energéticos: hidrógeno
 - es el que más CO₂ emite
 - Si se elimina el CO₂ se tendría un combustible fósil que permitiría una transición cómoda hacia otras fuentes de energía
- Captura:
 - pre-combustión: GICC
 - durante la combustión: oxi-combustión, combustión indirecta
 - post-combustión: tras la combustión
- Almacenamiento:
 - tras la captura se requiere: transporte y almacenamiento
 - el almacenamiento puede ser tan condicionante como la extracción; cuello de botella

Captura de CO₂



**Separación
del CO₂
CAPTURA**



Compresión



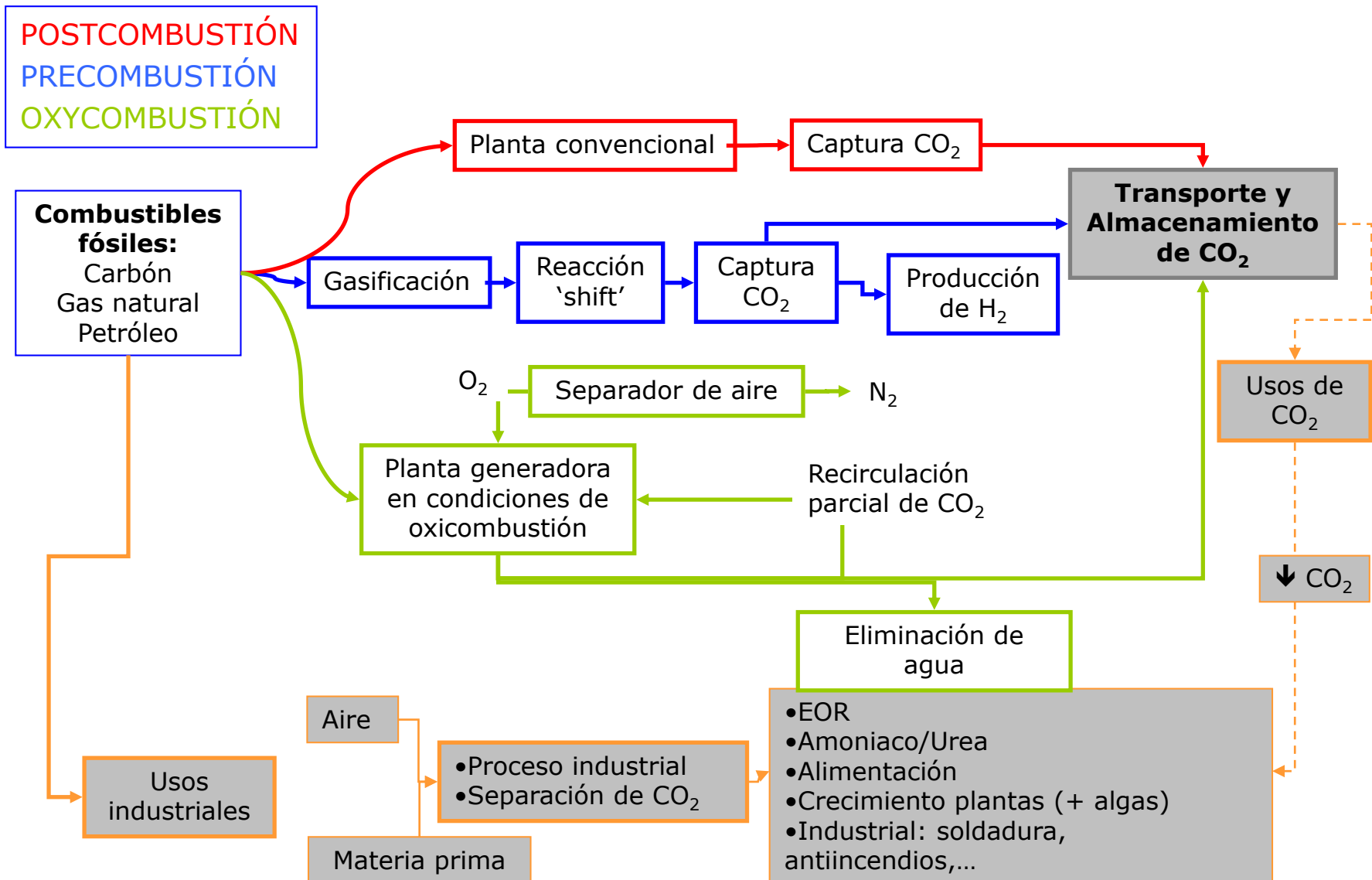
Transporte



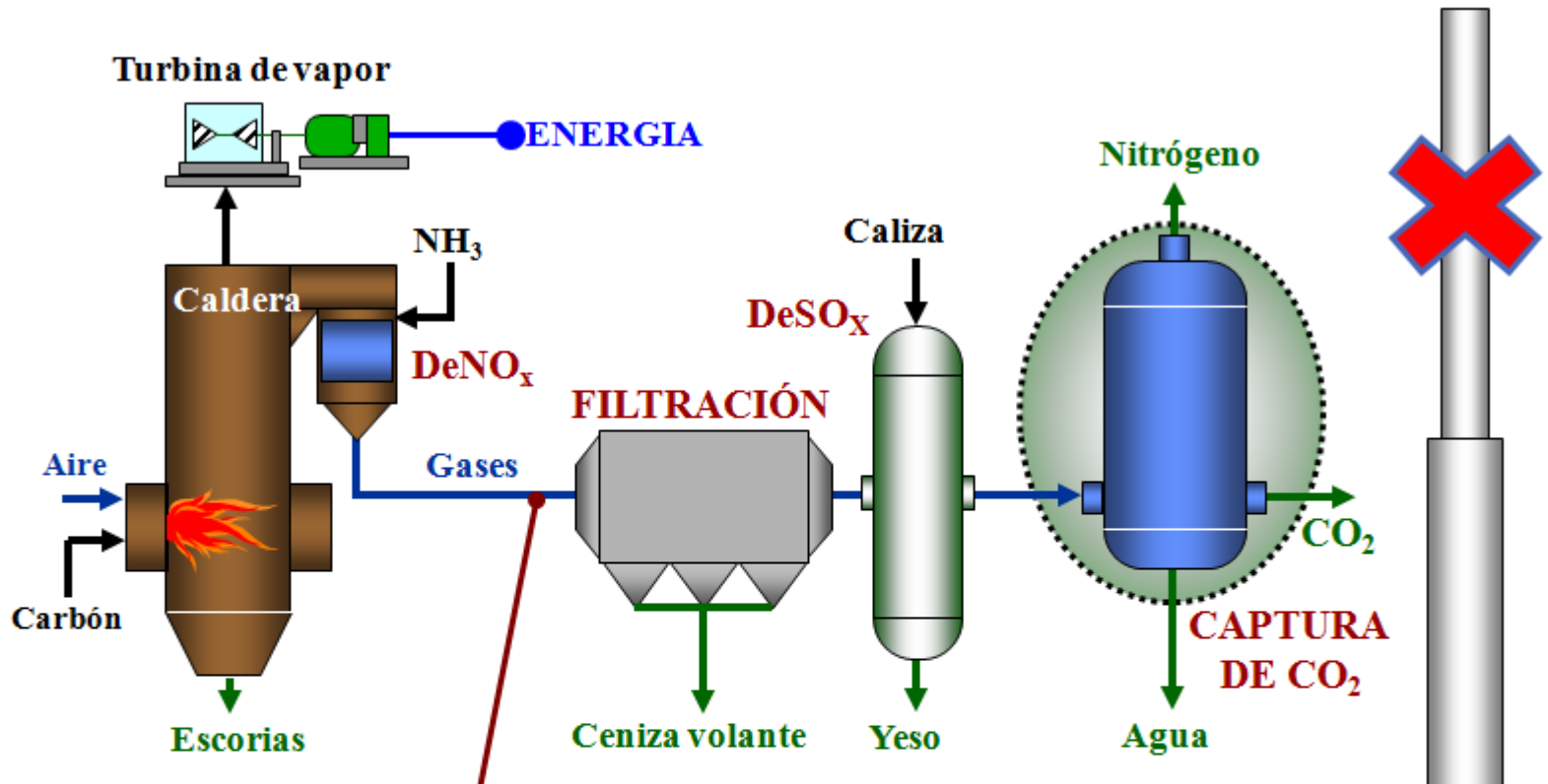
Inyección

[Cortés y Navarrete, 2011]

Captura de CO₂



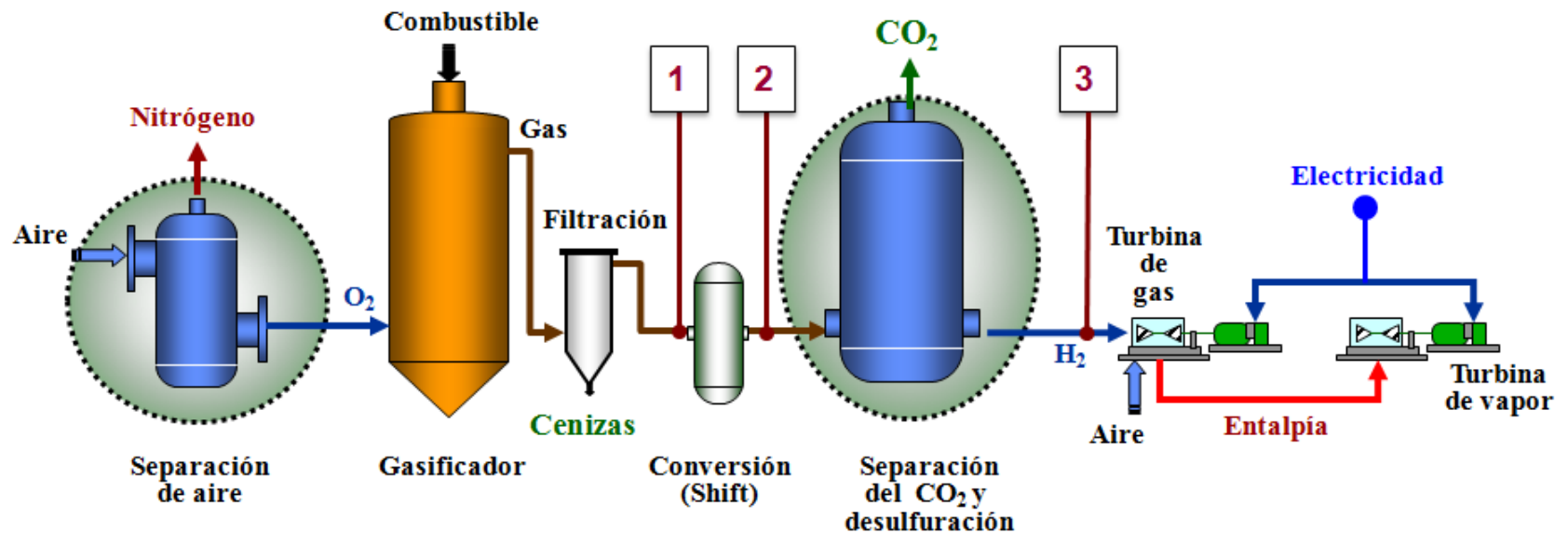
Captura de CO₂ Post-Combustión



% vol	N ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	VOL REL	IMPUREZAS
COMBUSTIBLE + AIRE	75	14	7	3	100	SO _x NO _x PARTÍCULAS

Captura de CO₂

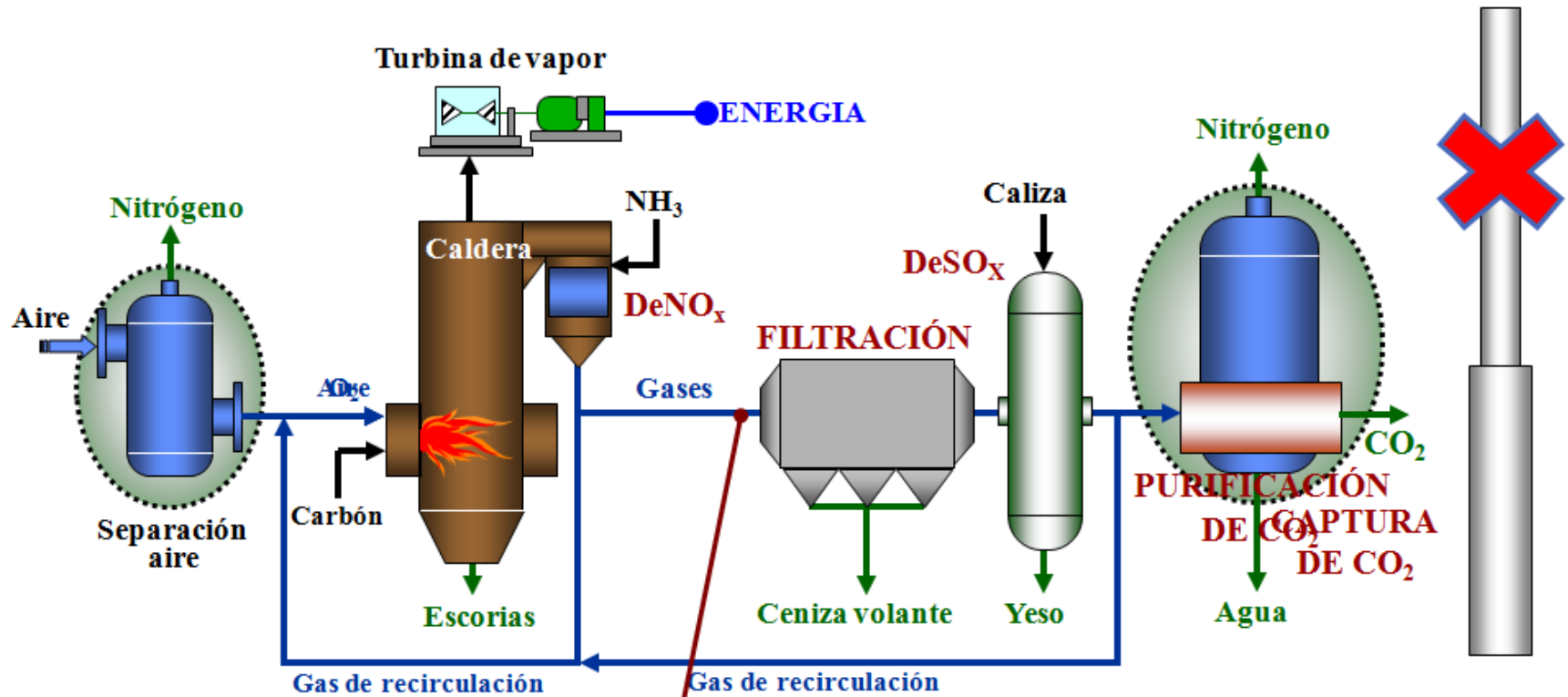
Pre-Combustión (GICC)



% vol, aprox.	H ₂
1	22
2	50
3	77

[Cortés y Navarrete, 2011]

Captura de CO₂ Oxi-Combustión



% vol	N ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	VOL REL	IMPUREZAS
COMBUSTIBLE + O₂ (30%) + CO₂	6	83,5	7	3,5	65	SO_x NO_x PARTÍCULAS

[Cortés y Navarrete, 2011]

REFERENCIAS

- Babcock & Wilcox, STEAM. ITS GENERATION AND USE, Babcock & Wilcox, 1992
- Haywood, Ciclos Termodinámicos de Potencia y Refrigeración, Limusa, 2000
- ASINEL, Calderas de vapor. Colección: Textos sobre centrales termoeléctricas convencionales y nucleares, ASINEL, 1985
- Agüera, Termodinámica lógica y motores térmicos, Ed. Ciencia 3, Madrid, 1999
- Fränkle, M., SRS: The standardized repowering solution for 300 MW steam power plants in Russia, Siemens Power Generation, 2008
- Goñi del Cacho, A., Optimización de aplicaciones de enfriamiento de aire de entrada a turbina para ciclos combinados, Proyecto Fin de Carrera, ETS de Ingeniería-ICAI, Universidad Pontificia Comillas, 2011
- Petchers, Combined heating, cooling & Power Handbook: Technologies & Applications, Fairmont Press & Marcel Dekker, 2003.
- Stenzel et al., Strategic Assessment of Repowering, TR-106908, 1997.
- Kohan, Manual de calderas, Mc Graw-Hill, 2000
- Treviño, Tecnologías de gasificación integrada en ciclo combinado: GICC, Elcogas & Club Español de la Energía, 2003

REFERENCIAS

- García Peña, 2007, Gasificación integrada en ciclo combinado., en Captura y almacenamiento de CO₂, Universidad Pontificia Comillas (Moratilla, Coord.), Madrid, 2007
- Ballesteros, 2007, Actividades de ENDESA en tecnologías de captura de CO₂., en Captura y almacenamiento de CO₂, Universidad Pontificia Comillas (Moratilla, Coord.), Madrid, 2007.
- Cortés, Navarrete, Captura, transporte y almacenamiento del CO₂ originado por el empleo de combustibles fósiles, Fundación Ciudad de la Energía (CIUDEN), 2011