



Turbomaquinas y Máquinas Térmicas

Fundamentos teóricos, ejemplos prácticos.



Índice

- 1.- ¿Qué son las Turbomáquinas?
- 2.- Tipos de Turbomáquinas.
- 3.- Características Turbomáquinas.
- 4.- Máquinas térmicas.
- 5.- Cogeneración



1.- ¿Qué son las Turbomáquinas?

Las turbomáquinas se diferencian de las máquinas térmicas en que son de funcionamiento continuo, no alternativo o periódico.

Las turbomáquinas son transformadores de energía y de movimiento rotativo, y a diferencia con las máquinas térmicas, las turbomáquinas utilizan un fluido de trabajo, ya sea un líquido o un gas.



2.- Tipos de Turbomáquinas.

Las principales turbomáquinas que se utilizan en las diferentes industrias son.

- Hidráulicas: Estas son aquellas cuyo fluido de trabajo es un líquido. Dentro de estas se encuentran las bombas y turbinas (Pelton, Francis, Kaplan).
- Aquellas que utilizan gases como fluido de trabajo no tienen una denominación especial. Comprende esta categoría las turbinas a Gas, a vapor, y los compresores.



3.- Características Turbomáquinas.

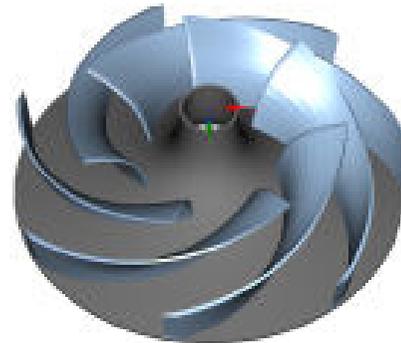
Turbomáquinas hidráulicas.

Bombas:

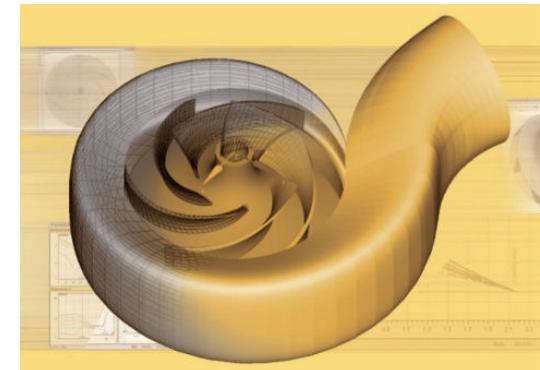
Las bombas se tratarán como un tema aparte, dado que son las turbomáquinas más utilizadas y conocidas en la industria.



Bomba Centrífuga Horizontal



Rotor de una Bomba



Simulación numérica de una Bomba



3.- Características Turbomáquinas.

Turbomáquinas hidráulicas.

Turbinas

Las turbinas hidráulicas transforman directamente la energía disponible en la naturaleza en energía utilizable (trabajo mecánico => Energía Eléctrica).

El tipo de turbina a utilizar dependerá de las condiciones del “salto” de agua disponible.

Un diagrama útil para determinar el tipo de máquina se muestra a continuación.



3.- Características Turbomáquinas.

Turbinas hidráulicas

<u>Turbina Hidráulica</u>	<u>Altura máxima</u>
<u>Turbina PELTON</u> El chorro de agua sale de una tobera y entra en forma tangencial al rodete. Los álabes tienen forma de doble cuchara.	1.800 m
<u>Turbina FRANCIS</u> El flujo pasa en forma centrípeta (radial) de los álabes directrices al rodete; y sale en dirección axial.	180 m
<u>Turbina KAPLAN</u> El flujo pasa en forma axial por el rodete, el cual tiene forma de hélice. El paso o ángulo de los álabes es variable.	30 m
<u>Turbina HELICE</u> Funciona como la turbina KAPLAN , pero con álabes del rodete fijos.	20 m



3.- Características Turbomáquinas.

Turbinas hidráulicas; Turbinas Pelton.

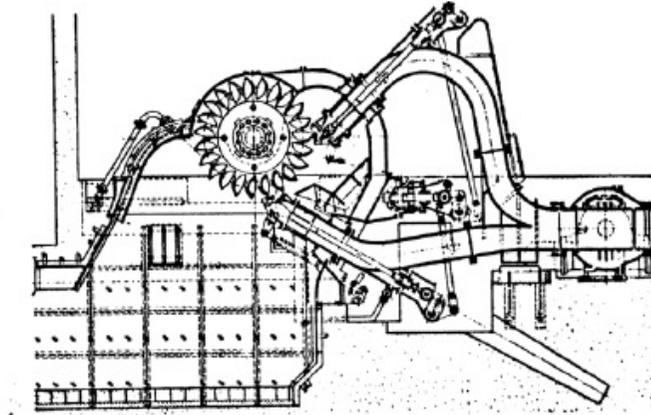


FIG. 30. 5,000 H.P. PELTON WHEEL.



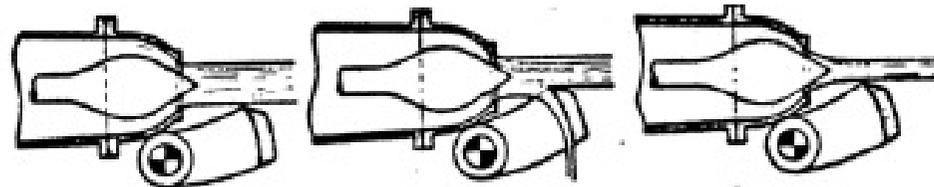
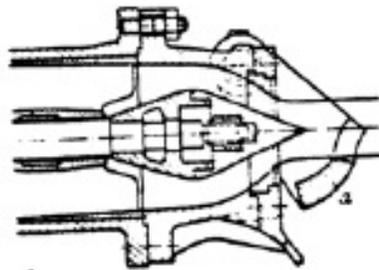


3.- Características Turbomáquinas.

Turbinas hidráulicas; Turbinas Pelton.

El control de estas turbinas se realiza mediante la regulación de la aguja del inyector, para variaciones pequeñas del caudal.

En caso de emergencias no es posible controlar el flujo solo con el inyector, por lo cual actúa un deflector, el cual corta el flujo hacia el rodete, pero permite el control “lento” del inyector para evitar el golpe de ariete en la línea aguas arriba.





3.- Características Turbomáquinas.

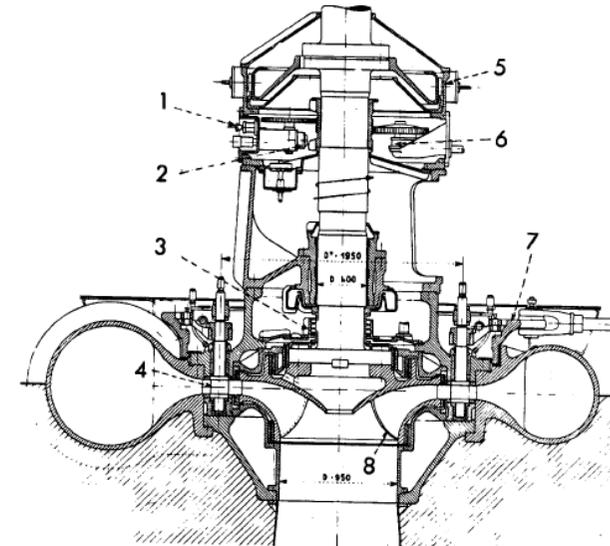
Turbinas hidráulicas; Turbinas Francis.

Las turbinas Francis trabajan bajo el principio de reacción, son instalaciones de mayor envergadura que las de turbinas Pelton. Estas turbinas manejan mayores caudales pero menores alturas que las pelton.

Son muy utilizadas con un embalse.

En las turbinas Francis el fluido entra de manera tangente al rodete y sale de forma perpendicular por el difusor.

A diferencia de las turbinas de acción o impacto, trabajan a altas presiones y un vacío a la descarga aumenta la energía producida.



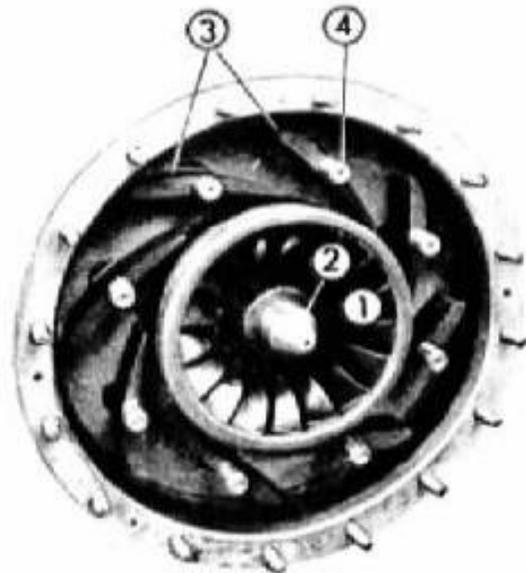
1. Limitador de velocidad
2. Bomba de fugas
3. Anillos múltiples de sellado
4. Alabe directriz
5. Freno
6. Bomba de regulador
7. Anillo regulador de la abertura de los álabes directrices
8. Rodete móvil



3.- Características Turbomáquinas.

Turbinas hidráulicas; Turbinas Francis.

En estas turbinas, uno de los principales problemas es la “cavitación” que se observa en la zona de descarga (difusor) de la turbina. Esto debido al vacío generado por el movimiento del fluido y el vortice que se genera.



El sistema de control de estas turbinas se lleva a cabo a partir del movimiento de la corono directriz o alabes diectrices.



3.- Características Turbomáquinas.

Turbinas Kaplan y de Hélice

Estas turbinas también trabajan bajo el principio de reacción, trabajan con altos caudales y con bajas alturas.

Son usadas principalmente en centrales de paso, y algunas veces en centrales con represa.

Existe una diferencia entre las turbinas Kaplan y las de Hélice. En las turbinas Kaplan, los álabes del rodete son orientables, esto permite aumentar su eficiencia en diferentes condiciones de trabajo.

Las turbinas de hélice no tienen alabes orientables en el rodete.





3.- Características Turbomáquinas.

Turbinas Kaplan y de Hélice

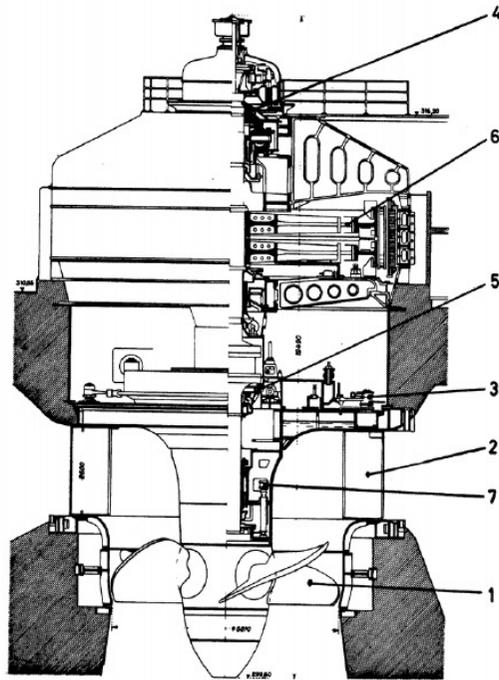




3.- Características Turbomáquinas.

Turbinas Kaplan y de Hélice

Estas turbinas controlan el caudal y por ende la potencia producida mediante una corona directriz o alabes directrices.



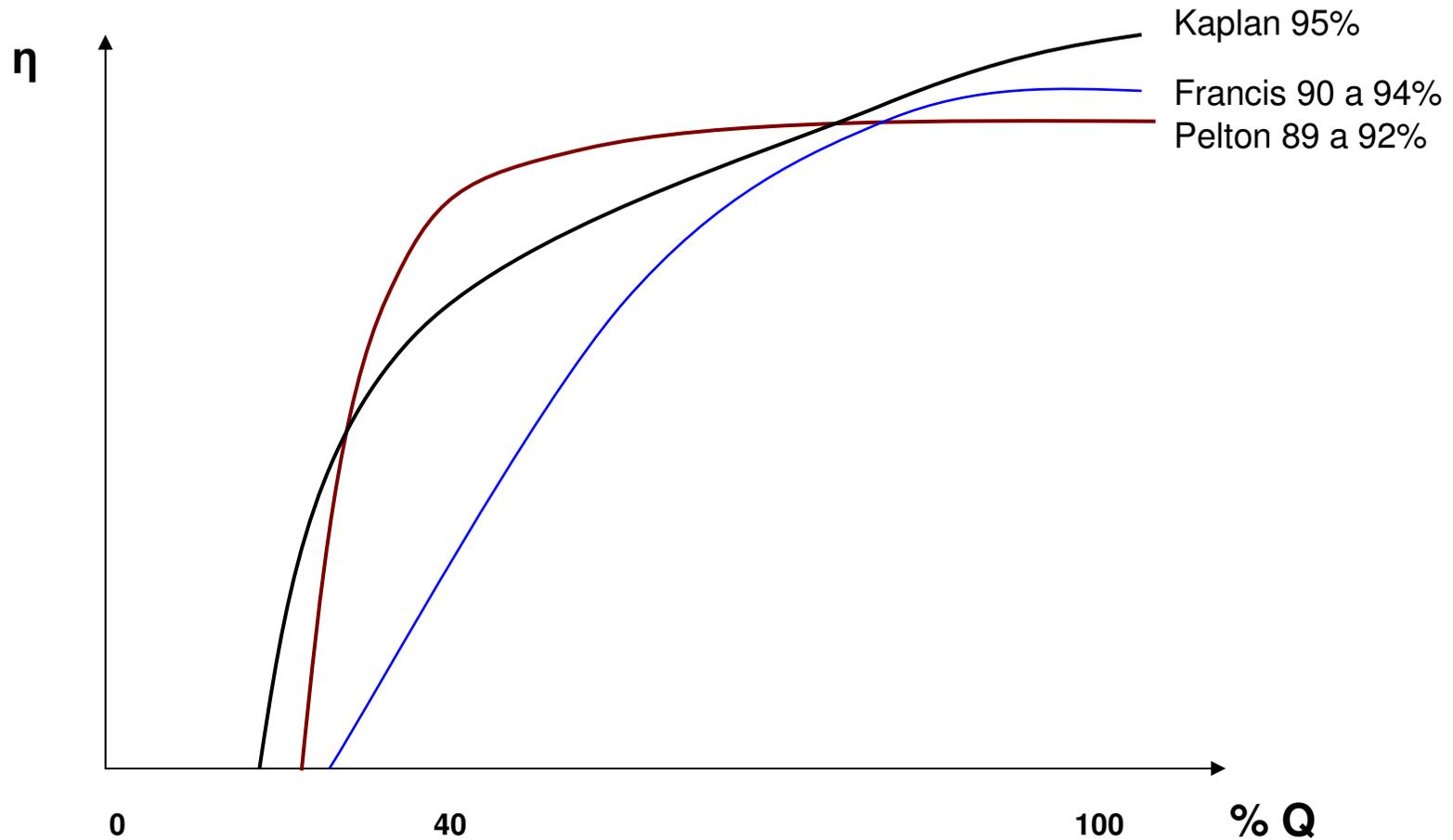
1. Alabe móvil orientable
2. Alabe fijo orientable
3. Sistema de mando para los álabes directrices
4. Generador
5. Descanso axial
6. Rotor del generador
7. Sistema de mando para los álabes móviles

Como se mencionó anteriormente las turbinas Kaplan tienen 2 sistemas de control, por lo cual son más eficientes que las turbinas de hélice.



3.- Características Turbomáquinas.

Comparación de eficiencias de turbinas hidráulicas.



El porcentaje de caudal se refiere al cociente entre el caudal de operación y el caudal máximo.



3.- Características Turbomáquinas.

Selección de turbina.

Además del salto y el caudal disponible, debemos considerar la fluctuación de los caudales disponibles para la generación.

Si bien, las turbinas Francis tienen una mayor eficiencia a máximo caudal, este disminuye rápidamente al trabajar con menores caudales, sin embargo las turbinas Pelton mantienen una eficiencia prácticamente constante hasta con un 50% del caudal máximo.



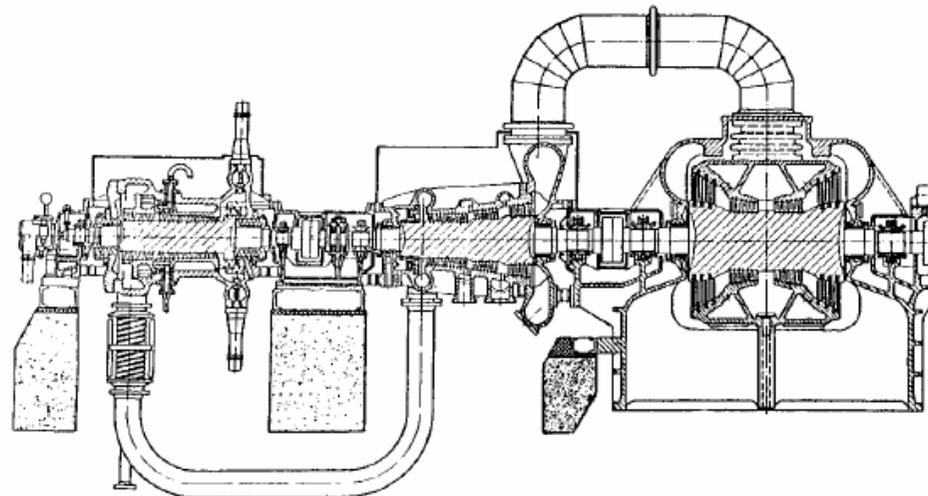
3.- Características Turbomáquinas.

Turbinas a vapor

Las turbinas a vapor son turbomáquinas que trabajan con un fluido en estado gaseoso, principalmente vapor de agua u otro fluido.

Trabajan con altas presiones (150 [bar] o mayores) en la admisión y bajas presiones en la descarga (0,5 [bar]).

Las turbinas a vapor se diseñan para potencias desde 1 [kW] hasta aproximadamente 1 300 [MW].





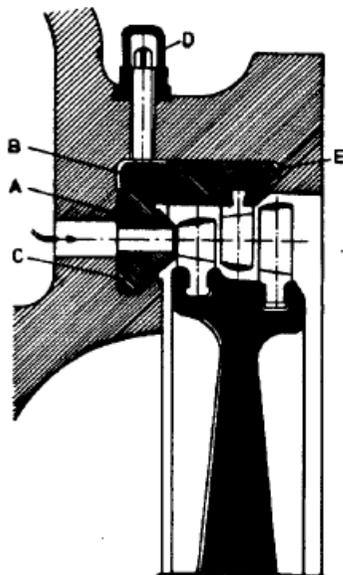
3.- Características Turbomáquinas.

Turbinas a vapor

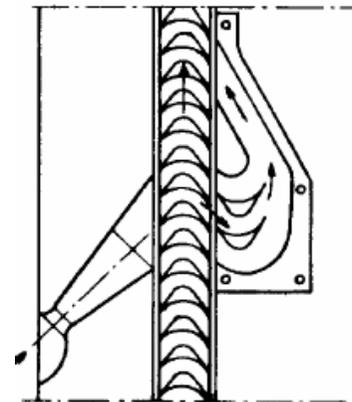
Existen dos principios de trabajo para las turbinas a vapor, estos son de acción y de reacción, al igual que en las turbinas hidráulicas.

Las turbinas de acción (Rodetes Curtis y Electra) se utilizan cuando se trabaja con fluido a altas temperaturas, además se utilizan como primera etapa en las turbinas de vapor de varias etapas.

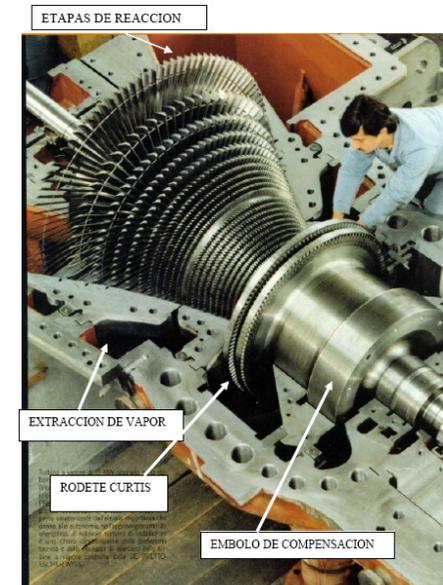
Las turbinas de reacción son de mayor envergadura, comprenden varias etapas, en las cuales el vapor va expandiéndose y enfriándose.



RODETE CURTIS



Rodete Electra de 2 pasos





3.- Características Turbomáquinas.

Turbinas a vapor

Además las turbinas pueden clasificarse de la siguiente forma:

- A contrapresión: El vapor se envía directamente al proceso, sin necesidad de pasar por un condensador o torre de enfriamiento.
- De extracción y condensación: El vapor se expande y luego debe pasar por un condensador, para luego ser bombeado a la caldera. En estas turbinas es posible extraer vapor a diferentes condiciones para ser utilizado en el proceso o para la “regeneración del ciclo”.



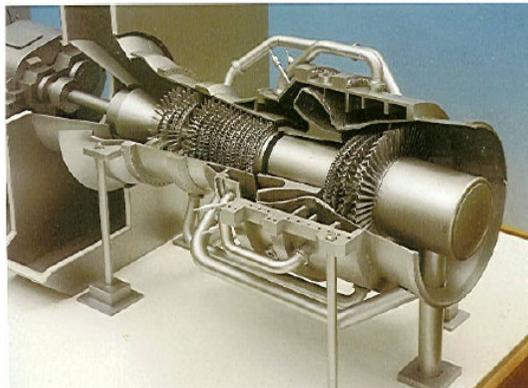
3.- Características Turbomáquinas.

Turbinas a gas.

Las turbinas a gas utilizan gases a altas temperaturas, estos pueden ser gases producto de una combustión o gases inertes calientes.

Las turbinas a gas pueden trabajar en ciclos abiertos o cerrados, en función de la aplicación.

- Ciclos Cerrados: El fluido de trabajo no es enviado a la atmósfera, generalmente estos ciclos operan con gases nobles.
- Ciclos Abiertos: Los gases son liberados a la atmósfera, esto debido a la simplicidad o a la aplicación (turborreactores => aviones).

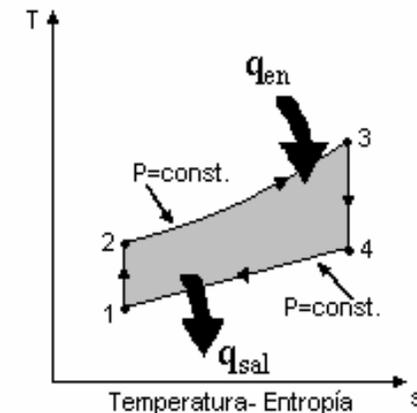
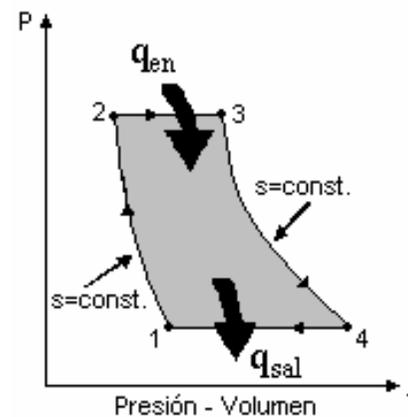
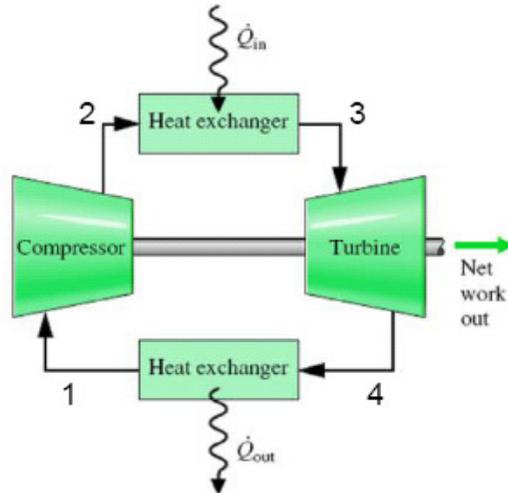




3.- Características Turbomáquinas.

Turbinas a gas.

Las turbinas a gas requieren gas a altas presiones, por lo cual es necesario la utilización de un compresor. Estos trabajan sobre el mismo eje, esto quiere decir que parte de la potencia que la turbina a gas entrega, es consumida por el compresor (aproximadamente el 60%), el restante es potencia útil.



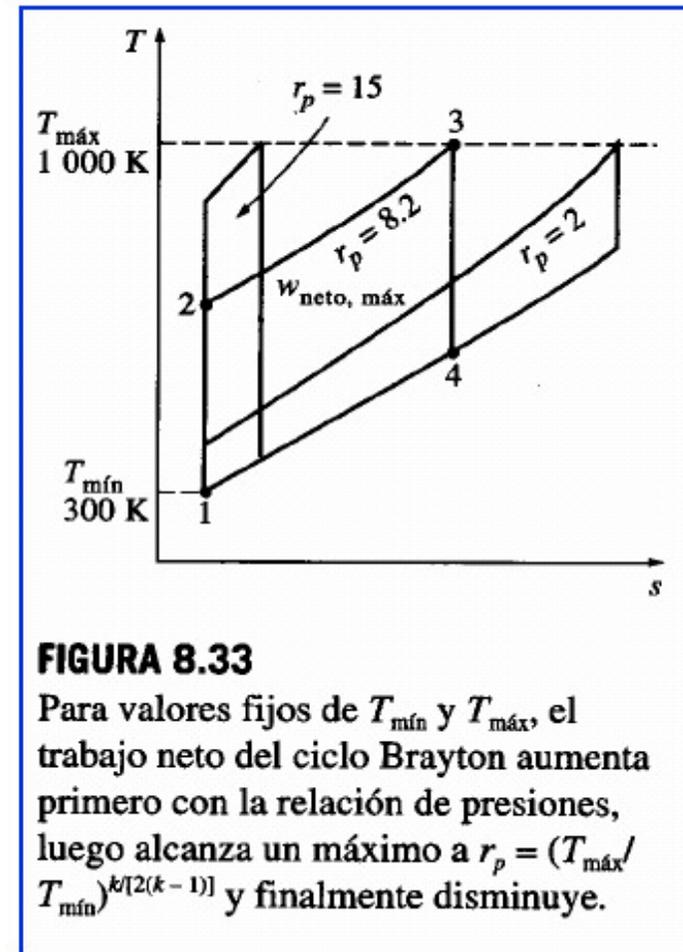
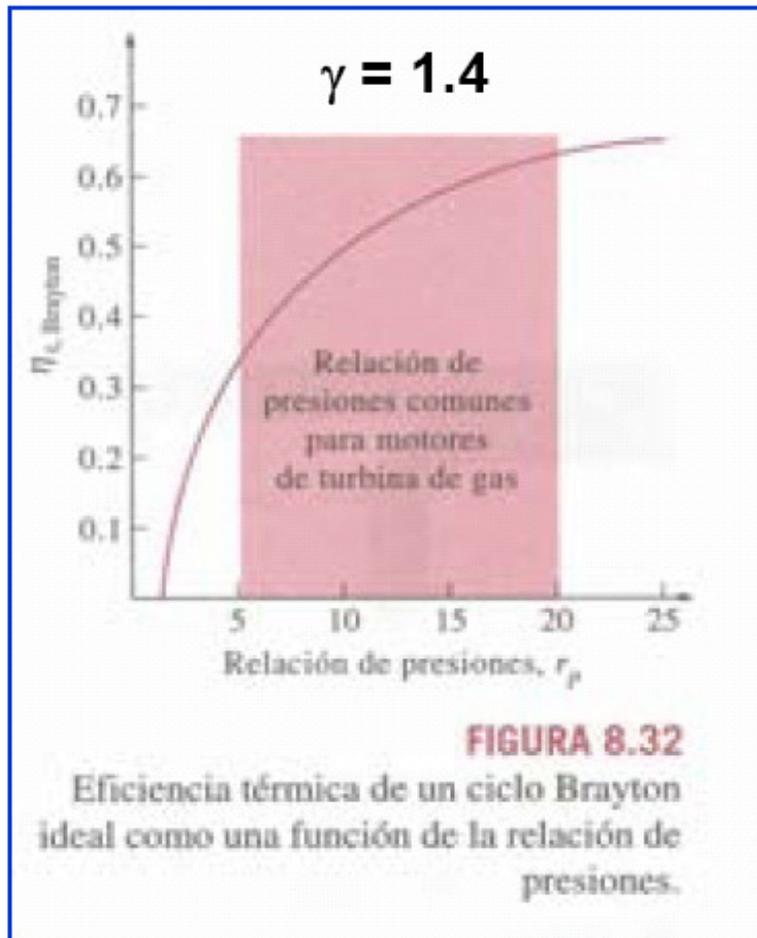
Para el ciclo de Brayton estándar:
$$\eta = \frac{\dot{W}_{NETO}}{\dot{q}_C} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

Luego $(P_2/P_1) \uparrow \rightarrow \eta \uparrow$ Relaciones de comp. Prácticas: 5-20 (11-16)



3.- Características Turbomáquinas.

Turbinas a gas.





3.- Características Turbomáquinas.

Turbinas a Vapor versus Turbinas de Gas.

Las turbinas de vapor y gas, a pesar de usar fluidos de trabajo muy diferentes, tienen muchos puntos comunes de diseño, construcción y operación.

Las mayores diferencias están en las presiones y temperaturas de trabajo de estas máquinas.

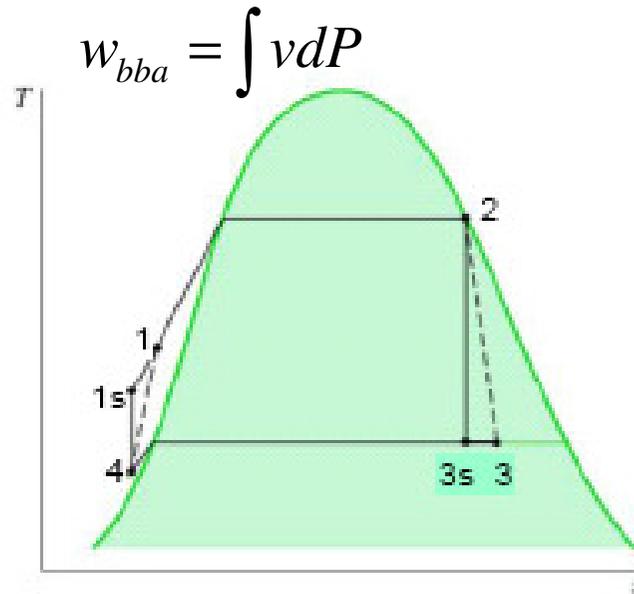
Para turbinas a vapor, la temperatura máxima está hoy limitada a unos 540 a 600°C. En las turbinas de gas en cambio, la temperatura de ingreso de los gases a la turbina es de unos 1000°C para las de uso industrial y hasta unos 1300°C para turbinas a gas de uso aeronáutico y alta performance.

Las presiones máximas son de unos 35 MPa para turbinas a vapor (350 bar), y entre 4 y 2 MPa para turbinas a gas. El tener altas presiones de admisión requiere una construcción robusta para las turbinas de vapor, en cambio las turbinas de gas son de construcción mas liviana.

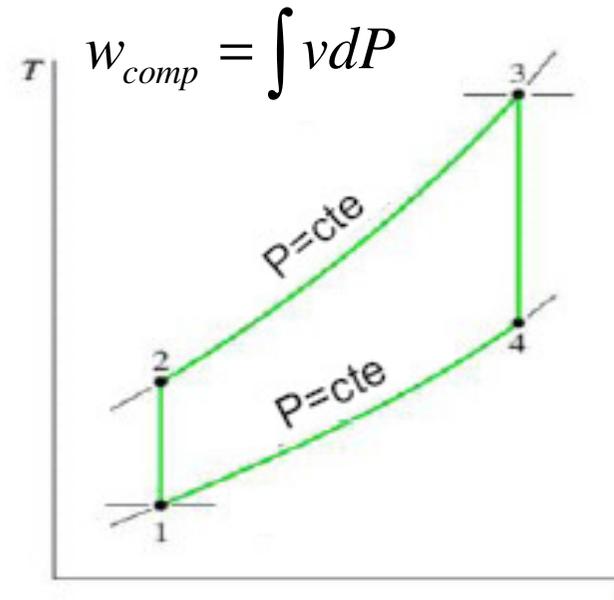


3.- Características Turbomáquinas.

Turbinas a Vapor versus Turbinas de Gas.



Relación $w_{bba}/w_t = 1-2\%$



Relación $w_{comp}/w_t = 40-80\%$

El **compresor de una turbina de gas** exige mayor cantidad de trabajo por unidad de masa de fluido de trabajo que la **bomba de una central a vapor**, porque el volumen específico del gas que atraviesa el compresor es mayor que el del líquido que atraviesa la bomba



3.- Características Turbomáquinas.

Ciclos Combinados.

Como su nombre lo indica, combina 2 ciclos en uno, a saber el ciclo Bryton y el ciclo Rankin.

Utiliza los gases de escape de las turbinas a gas a alta temperatura, y se utilizan para generar vapor, el cual se expande en una turbina a vapor.

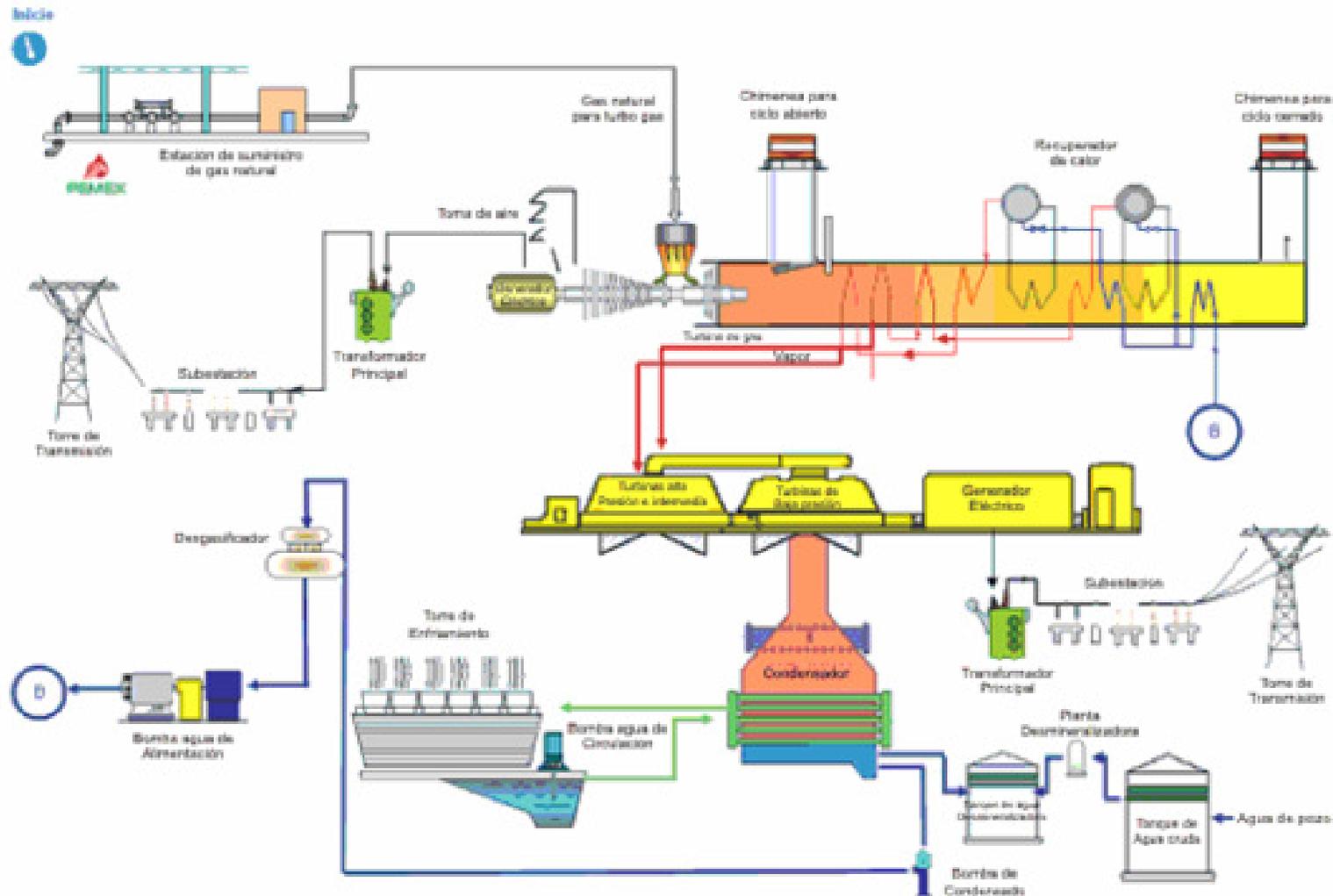
Una planta generadora de Ciclo combinado tiene eficiencias cercanas al 55%, siendo superiores a las de cada ciclo por separado y evitando un consumo extra de combustible.





3.- Características Turbomáquinas.

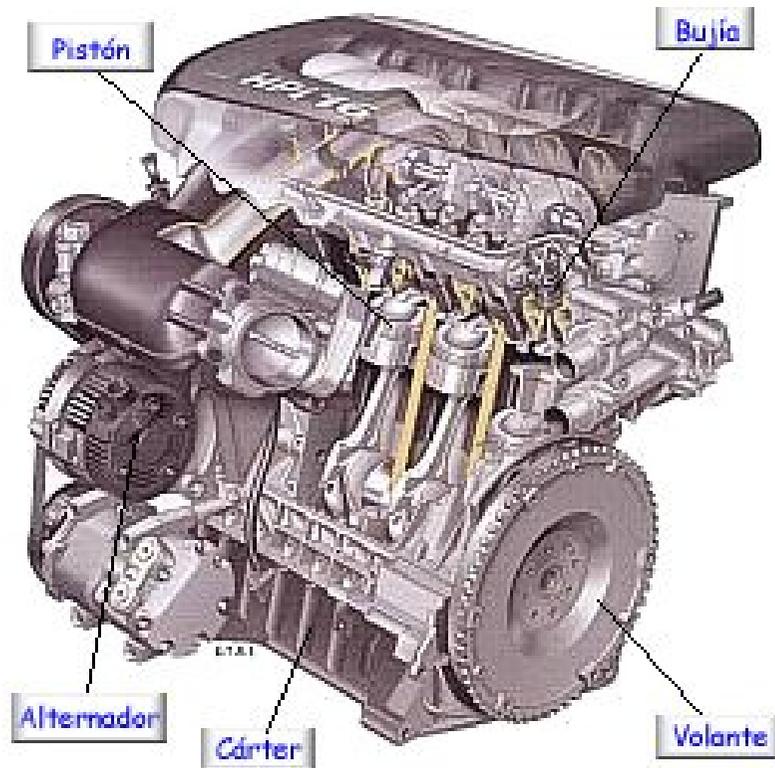
Ciclos Combinados.





4. Máquinas Térmicas.

Motor Otto



Motor Diesel





4.- Máquinas térmicas.

Motores Otto

Es el ciclo ideal para las máquinas reciprocantes (dispositivo cilindro-émbolo) de ENCENDIDO DE CHISPA (la combustión de la mezcla aire-combustible se inicia con una chispa en la bujía)

Máquinas de combustión interna de 4 tiempos

0-1: Admisión de la mezcla a $P = \text{cte}$

1-2: Compresión isentrópica

2-3: Ignición y combustión (adición de calor a $v = \text{cte}$)

3-4: Expansión isentrópica

4-1: Rechazo de calor a $v = \text{cte}$ (escape de gases)

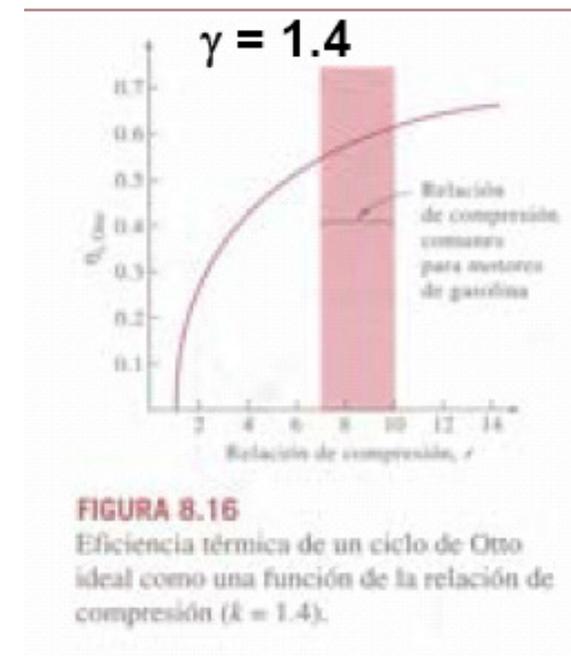
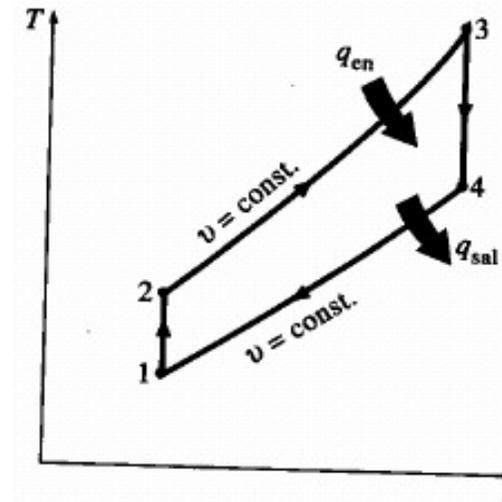
EFICACIA DEL CICLO DE OTTO (suposición aire estándar)

$$\eta = \frac{w_{\text{neto}}}{q_{23}} = 1 - \frac{q_{41}}{q_{23}} = \frac{q_{23} - q_{41}}{q_{23}} = \frac{C_v(T_3 - T_2) - C_v(T_4 - T_1)}{C_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

$$r = \frac{V_1}{V_2}$$

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

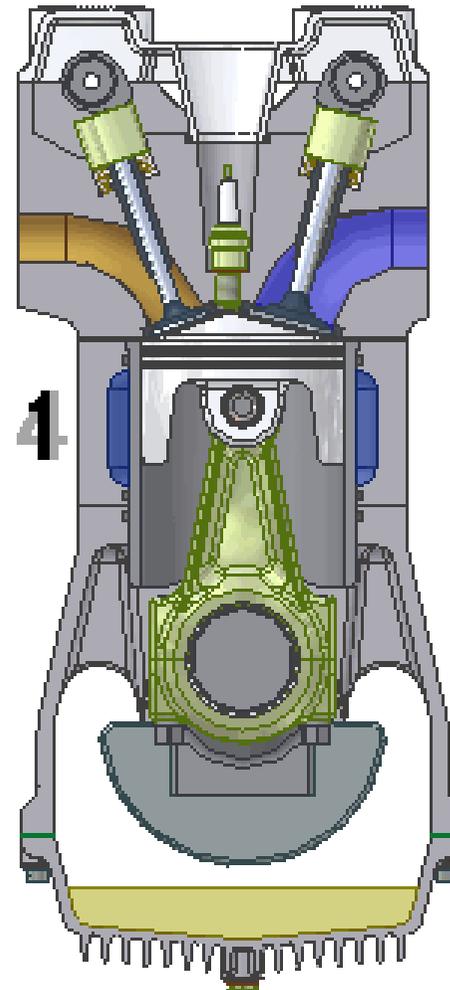
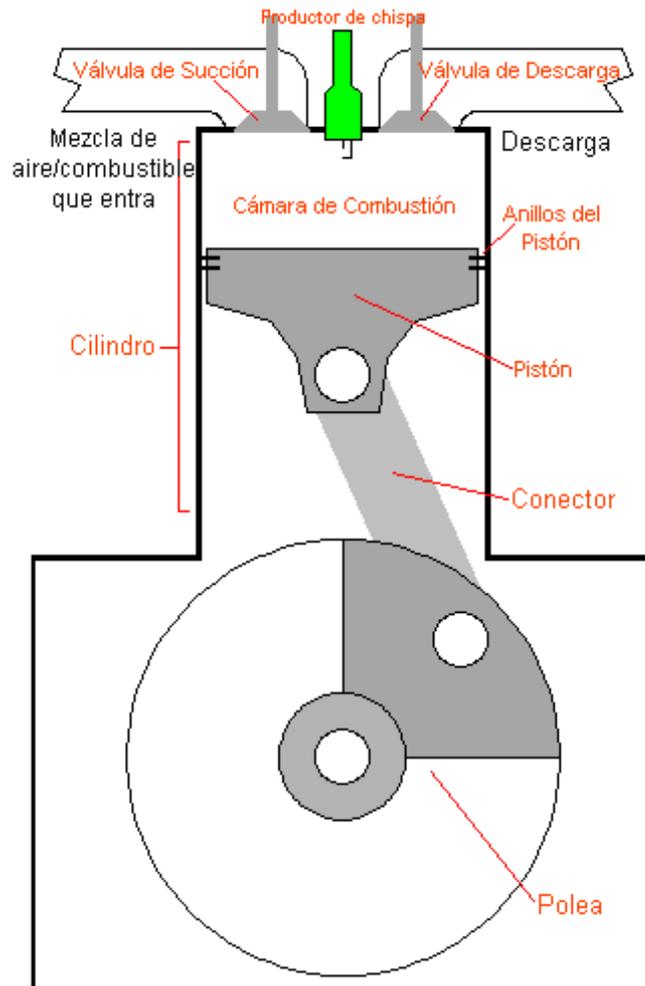
$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$





4.- Máquinas térmicas.

Motor Otto



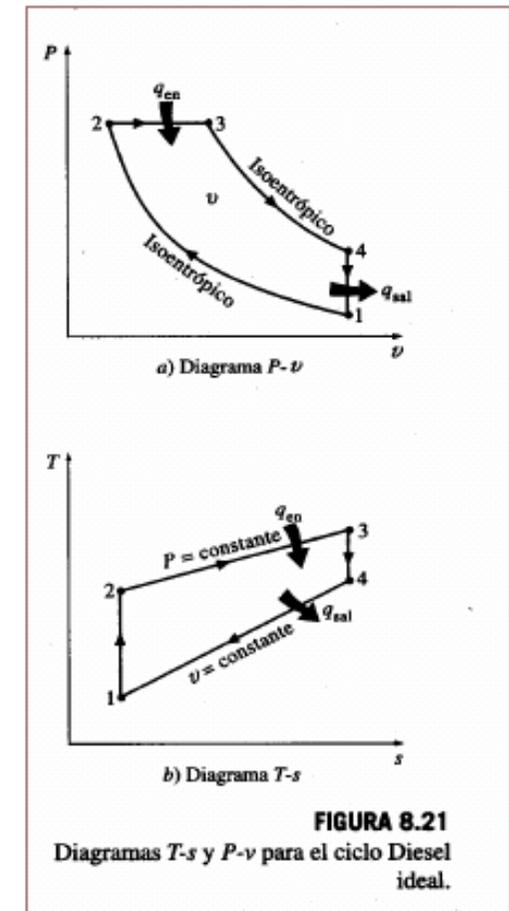


4.- Máquinas térmicas.

Motores Diesel

- Ciclo ideal para las máquinas reciprocantes de encendido por compresión
- Son los motores más extendidos para usos industriales (unidades de generación de electricidad de emergencia; grandes barcos, pesados camiones...)
- Menos vivos que los motores de encendido de chispa; más caros y más duraderos
- r es mucho más elevada (12-24)
- **CICLO DIESEL:** (similar al de Otto)
 - 1-2:** Compresión isoentrópica
 - 2-3:** Adición de calor a $P = \text{cte}$
 - 3-4:** Expansión isoentrópica
 - 4-1:** Rechazo de calor a $V = \text{cte}$

Diferencia con el motor de encendido de chispa: Período de admisión a $P = \text{cte}$: la inyección del combustible se realiza a P elevada





4.- Máquinas térmicas.

Motores Diesel

- EFICACIA DEL CICLO DE DIESEL (suposición aire estándar)

$$\eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \left[\frac{r_c^\gamma - 1}{k(r_c - 1)} \right]$$

$$r = \frac{V_1}{V_2} \quad r_c = \frac{V_3}{V_2}$$

Cuando:

$$r_{Otto} = r_{Diesel} \Rightarrow \eta_{Otto} > \eta_{Diesel} \quad () > 1$$

$$r_{c,Diesel} = 1 \Rightarrow \eta_{Otto} = \eta_{Diesel}$$

$$r_{Diesel} \text{ elevadas} \Rightarrow \eta_{Otto} < \eta_{Diesel}$$

r_c Relación de corte:
volúmenes de cilindro
después y antes del
proceso de combustión

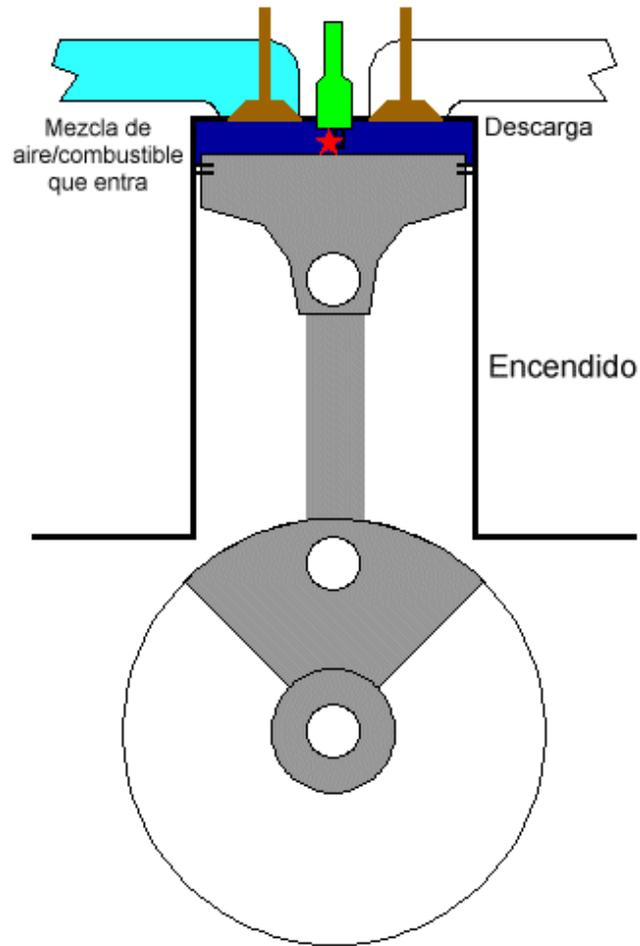
Las eficacias de las máquinas térmicas de **encendido de chispa** suelen ser **25-40%**

Las eficacias de las máquinas térmicas de **motores diesel** suelen ser **35-40%**

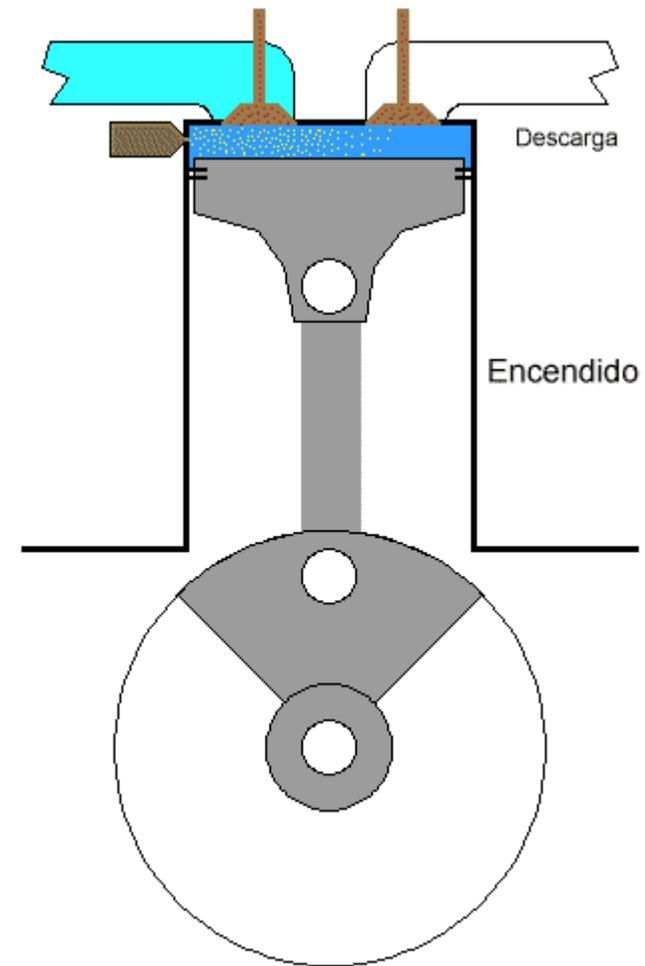


4.- Máquinas térmicas.

Motor Otto



Motor Diesel





4.- Máquinas térmicas.

Principales Diferencias Motores Otto y Diesel

- Un motor a gasolina aspira una mezcla de gas y aire, los comprime y enciende la mezcla con una chispa. Un motor diesel sólo aspira aire, lo comprime y entonces le inyecta combustible al aire comprimido. La temperatura del aire comprimido enciende el combustible espontáneamente.
- Un motor diesel funciona con mayores relaciones de compresiones, 14:1 – 25:1, mientras que un motor a gasolina trabaja con 8:1 a 12:1. Las altas relaciones de compresión implican mejor eficiencia.



4.- Máquinas térmicas.

Principales Diferencias Motores Otto y Diesel

Respecto del tipo de combustible:

El combustible diesel se evapora más lento porque es más pesado. Contiene más átomos de carbón en cadenas más largas que la gasolina (la gasolina típica es C_9H_{20} mientras el diesel es típicamente $C_{14}H_{30}$). *Toma menos tiempo refinar para crear el combustible diesel..*

El combustible diesel tiene una densidad de energía más alta que la gasolina. En promedio, un galón de combustible diesel (3,87 L.) contiene aproximadamente 147×10^6 [J], mientras que un galón de gasolina contiene 125×10^6 [J].



5.- Cogeneración.

¿Qué es?

La cogeneración es un proceso mediante el cual se generan dos o más formas de energía de manera simultánea, agotando únicamente una fuente principal de energía

¿Dónde puede aplicarse?

La cogeneración es aplicable a plantas térmicas de generación eléctrica, ciclos combinados, motores de generación, calderas generadoras de vapor, grupos electrógenos, industria del cemento, siderurgia, vidriera y química.

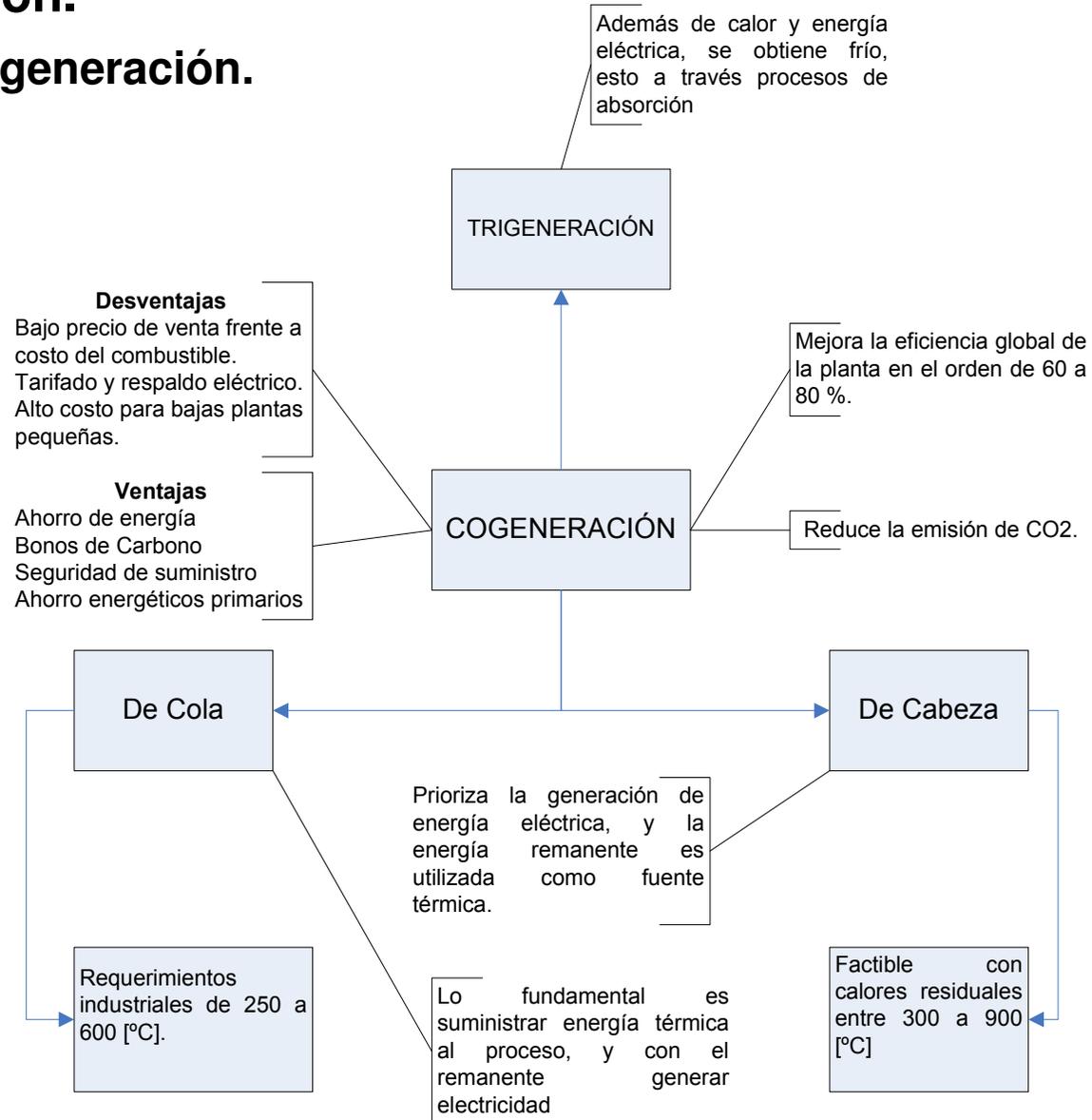
¿Qué impacto tiene?

Aumenta considerablemente la utilización del combustible, por ejemplo en un ciclo combinado, los gases de escape de una turbina a gas son aprovechados para generar vapor y utilizarlo en una turbina a vapor. Esto aumenta la eficiencia del ciclo, en otras aplicaciones, no necesariamente aumenta la eficiencia, pero si se reducen costos.



5.- Cogeneración.

Tipos de Cogeneración.

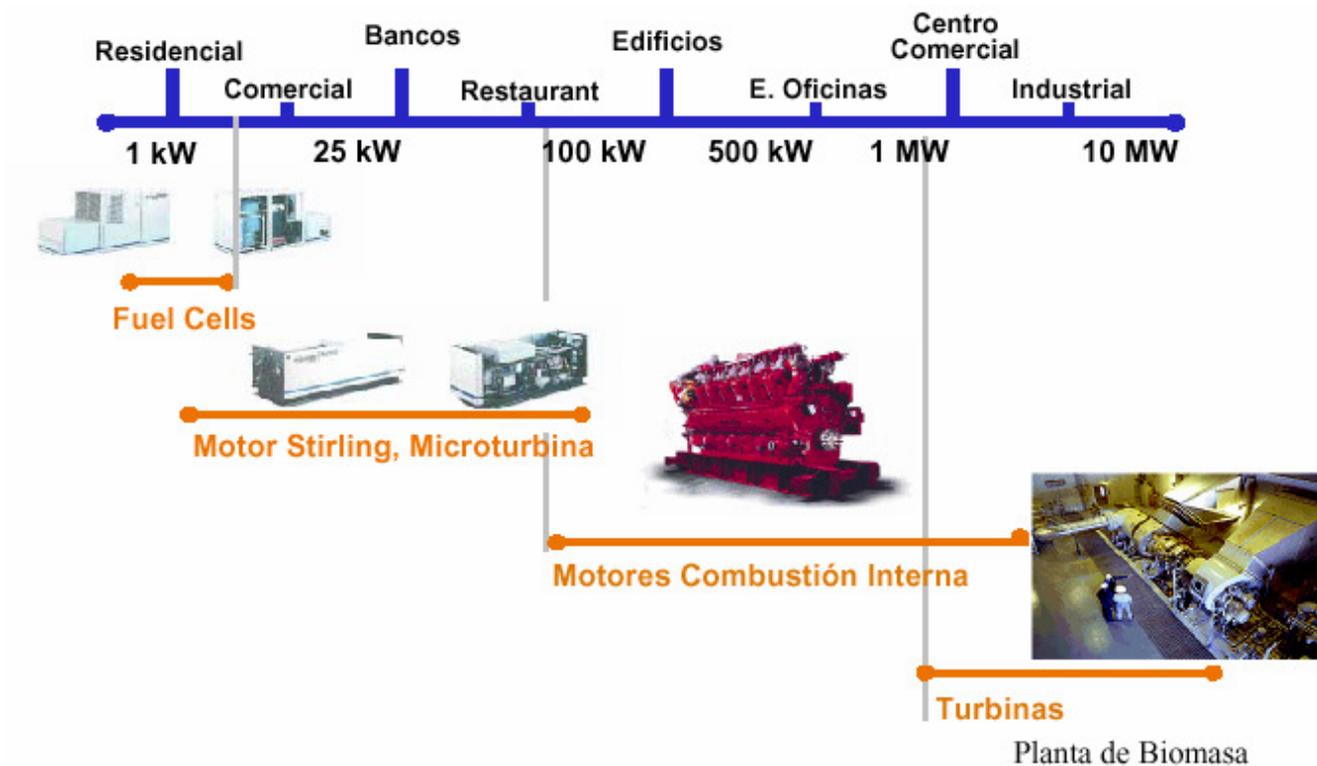




5.- Cogeneración.

De Cabeza.

Este tipo es el más frecuente y depende del equipo primario que genera la energía eléctrica. El siguiente esquema muestra las aplicaciones de la cogeneración, en función del equipo primario.



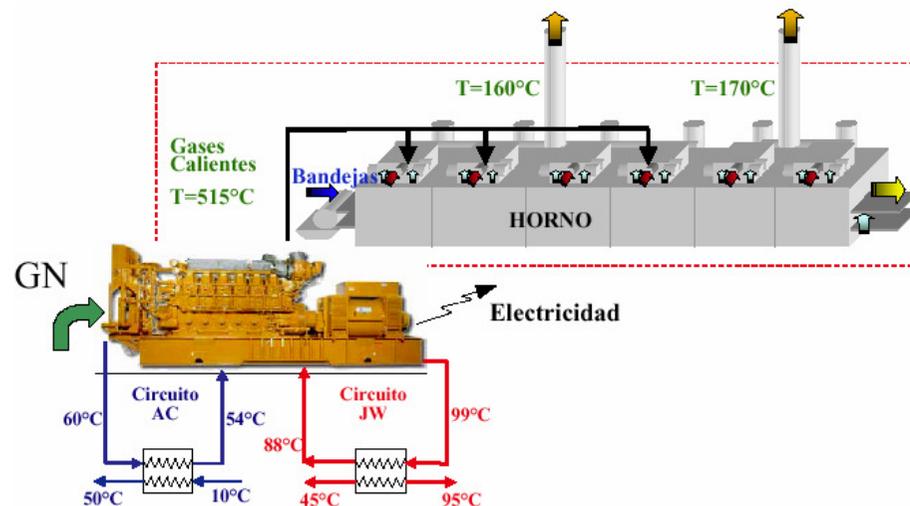


5.- Cogeneración.

¿Qué fuentes existen en los diferentes equipos?

La energía remanente más evidente está en los gases de escape de los diferentes equipos, turbinas, motores, grupos electrógenos, etc. Donde se cuenta con gases a altas temperaturas.

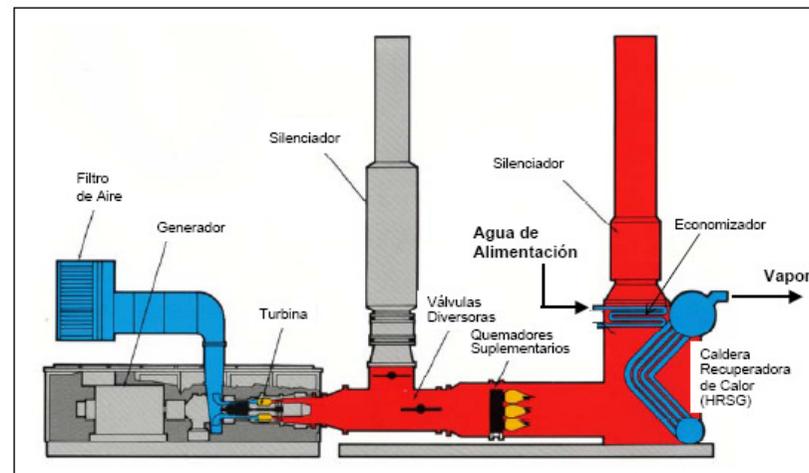
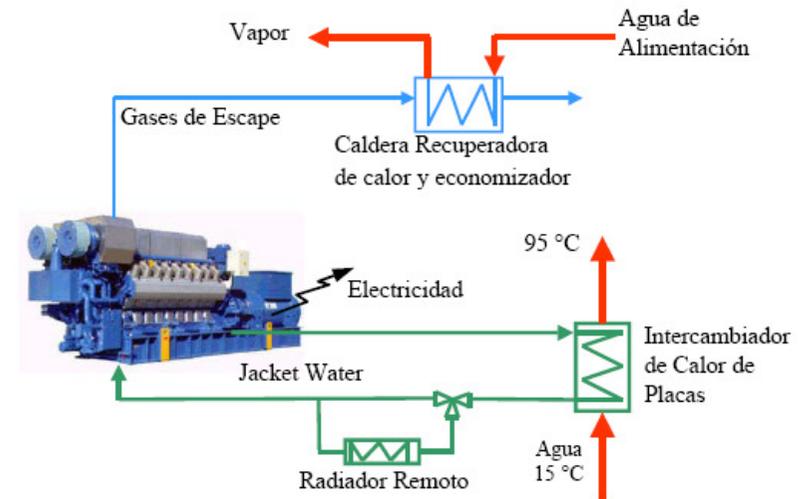
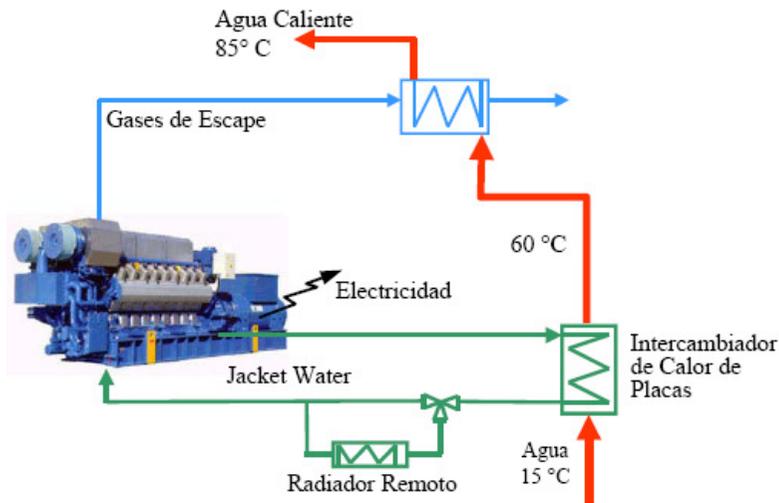
Pero también es posible aprovechar otras “pérdidas” de energía, por ejemplo, las aguas de diferentes circuitos de refrigeración de diversos equipos.





5.- Cogeneración.

Algunos ejemplos.



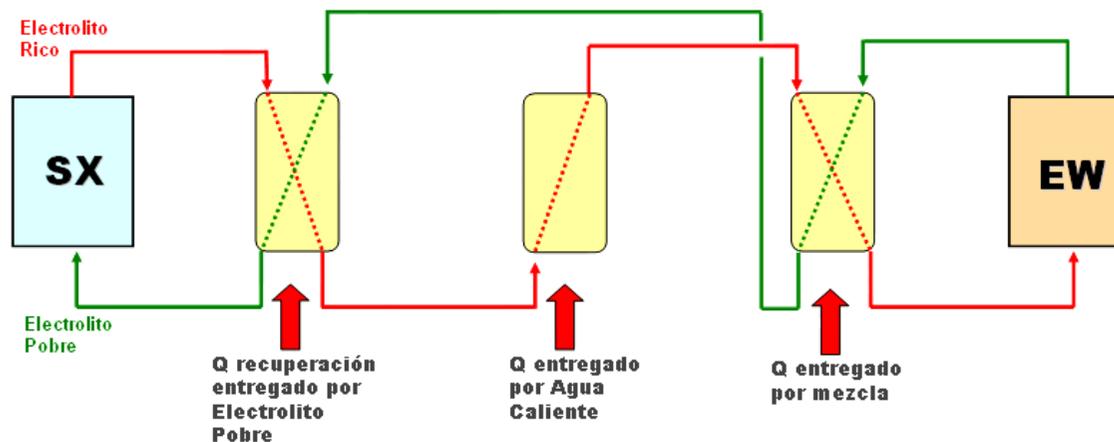


5.- Cogeneración.

Caso real.

Para el proceso productivo de una empresa, se tienen los siguientes requerimientos térmicos.

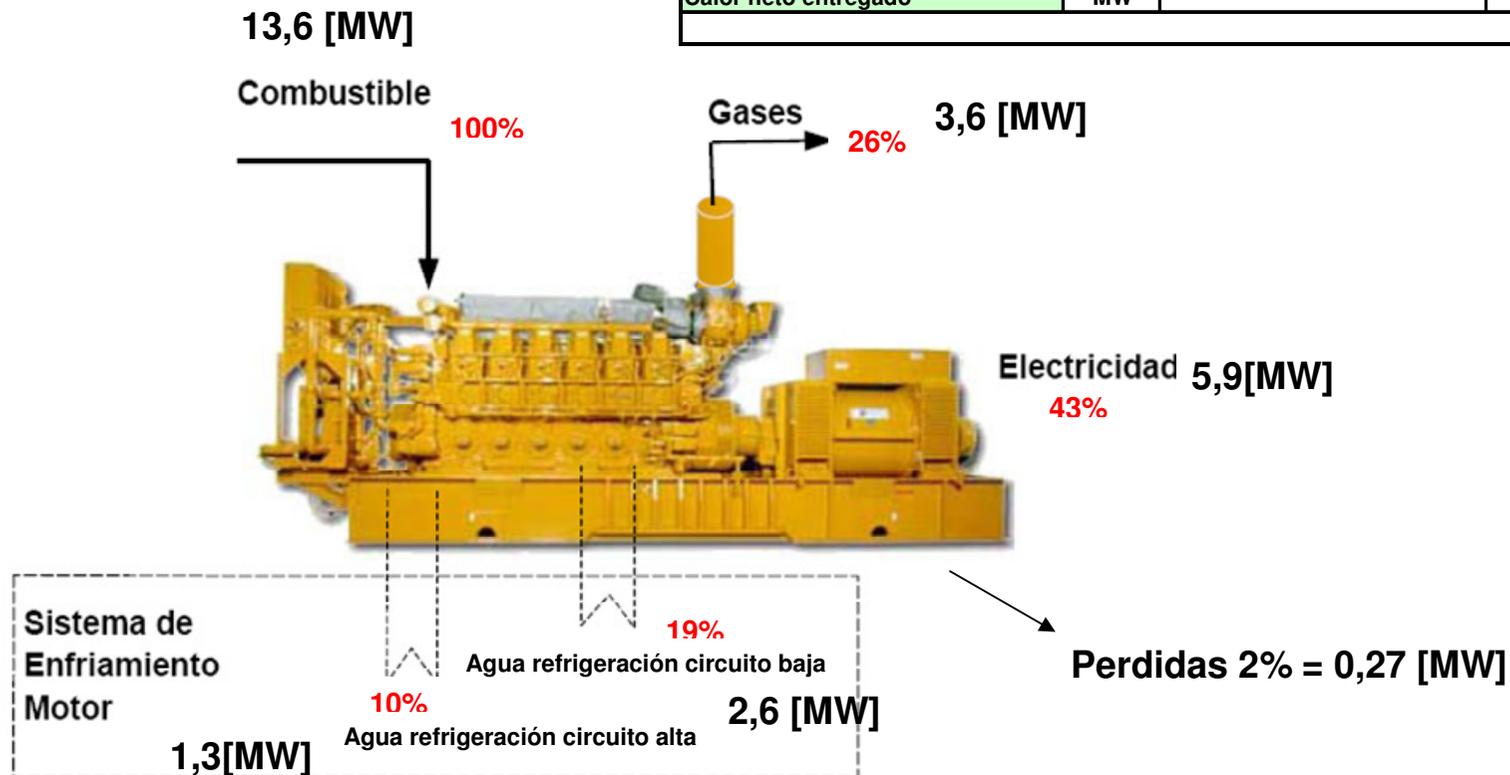
1.- Elevar la temperatura de 720 [m³/h] de 70 a 78 [°C], para lo cual se utilizan 3 calentadores de agua a base de petróleo diesel. Potencia consumida 6,2 [MW].





5.- Cogeneración. Caso real.

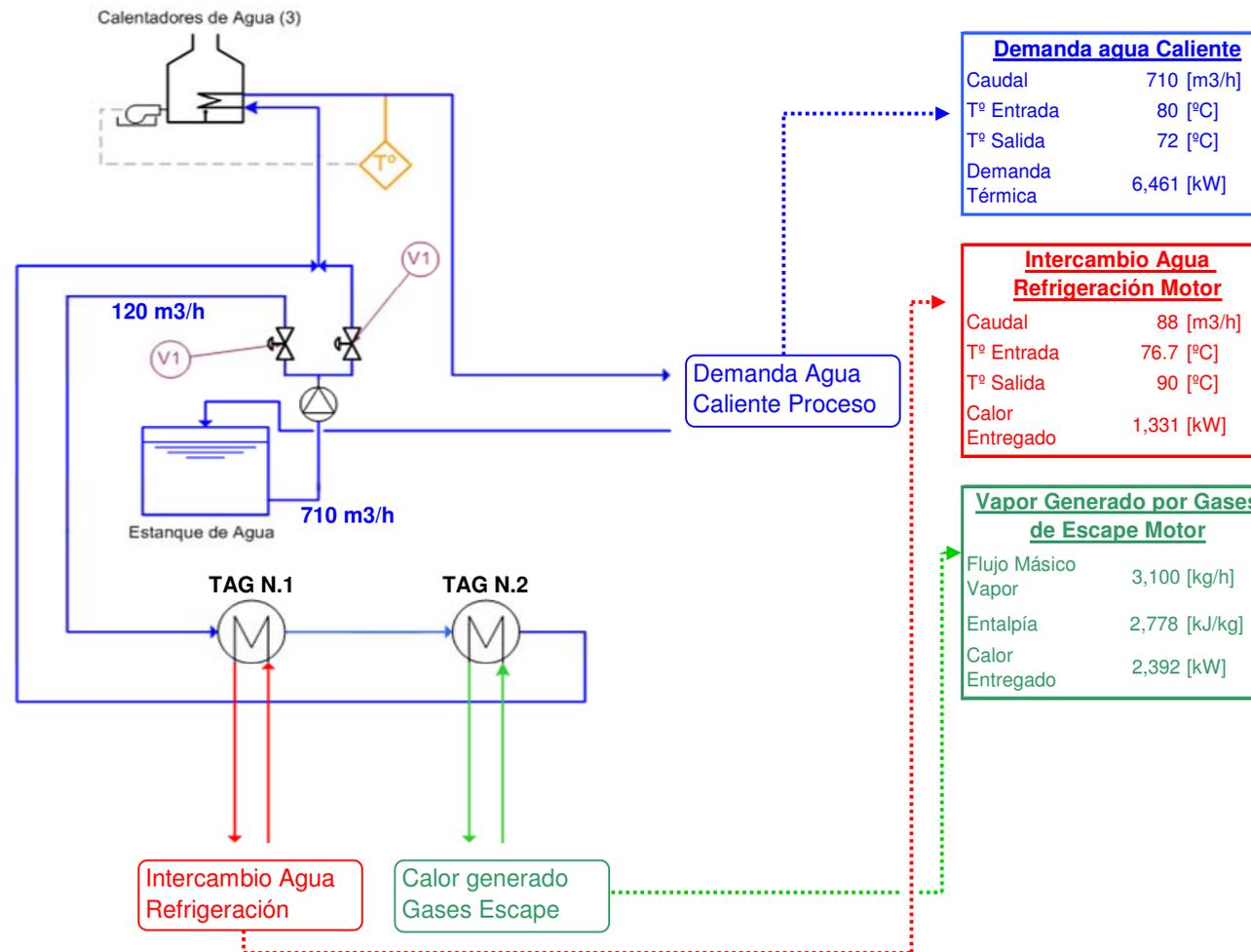
CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y ENTREGA DE CALOR x MOTOR						
Energía eléctrica generada =	5.9 [MW]					
Combustible:	Petróleo N°6					
Poder calorífico =	9,860 [kcal/kg]					
Consumo específico =	201 [kg/MWh]					
Calor entrada Motor =	13.59 [MW]					
Consumo Combustible =	1,186 [kg/h]					
		Unidad	Valor	% Disponible *	Valor Neto	Fluido generado
Salida de gases calientes		MW	3.6	67%	2.4	Vapor 10 BAR
Refrigeración motor circuito baja		MW	2.6	100%	2.6	Agua Caliente
Refrigeración motor circuito alta		MW	1.3	100%	1.3	Agua Caliente
Calor neto entregado		MW			6.3	





5.- Cogeneración.

Caso real.





5.- Cogeneración.

Caso real.

Sin la planta de cogeneración se gastaban anualmente 3,3 [MMUS\$], en la compra de Petróleo Diesel. Este se utilizaba tan solo para operar los calentadores de agua.

Con la planta de cogeneración se gastarían 3,8 [MMUS\$], en la compra de Petróleo N° 6. Esto se utilizaría para calentar el agua de proceso y además generar 5,9 [MW] de energía Eléctrica.

Estos 5,9[MW] de electricidad significan un ahorro de 2,9 [MMUS\$] anuales.

Por lo tanto, al trabajar con cogeneración, el calentamiento del agua de proceso costaría solo 0,9 [MMUS\$] anuales.



Muchas Gracias

JHG Ingeniería.
www.jhg.cl