

Estado del Arte de la Generación Termoeléctrica

Ing. Rogelio Horacio Baratchart

Presidente de TECNOLATINA S.A.

Buenos Aires, 08 de Noviembre de 2007

TECNOLATINA S.A.

Servicios de Ingeniería y Consultoría

Esmeralda 345 Piso 2° (C1035ABC)

Buenos Aires - Argentina.

Tel. (54-11) 4115-9536 al 39

TECNOLATINA

Generación y Transporte de Energía Eléctrica

Hacia 1500 (d.c.) un hombre dibujó el esquema de un dispositivo que rotaba debido al efecto de los gases calientes que subían por una chimenea.

El dispositivo debía rotar la carne que esta asando.

Dicen que el hombre era Leonardo Da Vinci ...

Mientras que la máquina de vapor fue inventada por el ingeniero escocés James Watt en 1769, la turbina de vapor –como se conoce en la actualidad- fue el resultado del trabajo de una serie de inventores a finales del siglo XIX, entre los que destacaron Carl De Laval, quien fue el primero (en 1884) en diseñar chorros y palas adecuados para el uso eficiente de la expansión del vapor y Charles Parsons, responsable del denominado principio de escalones, mediante el cual se aprovecha la variación de energía interna del vapor al expandirse en varias fases.

GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA

CONTENIDO

- **Turbinas de Vapor**

- **Turbinas de Gas**
 - **Heavy Duty**
 - **Aeroderivadas**

- **Ciclos Combinados**

**Estado del Arte de la Tecnología
Disponible Comercialmente**

En el proceso termoelectrico existe una clasificación de tipos de generación, según la tecnología utilizada para los generadores eléctricos.

– **Vapor**

Con vapor de agua se produce el movimiento de una turbina acoplada al generador eléctrico.

– **Turbogás**

Con los gases de combustión se produce el movimiento de una turbina acoplada al generador eléctrico.

– **Combustión Interna**

Con un motor de combustión interna se produce el movimiento del generador eléctrico.

– **Ciclo Combinado**

Combinación de las tecnologías de turbogás y vapor. Constan de una o más turbogás y una de vapor, cada turbina acoplada a su respectivo generador eléctrico.

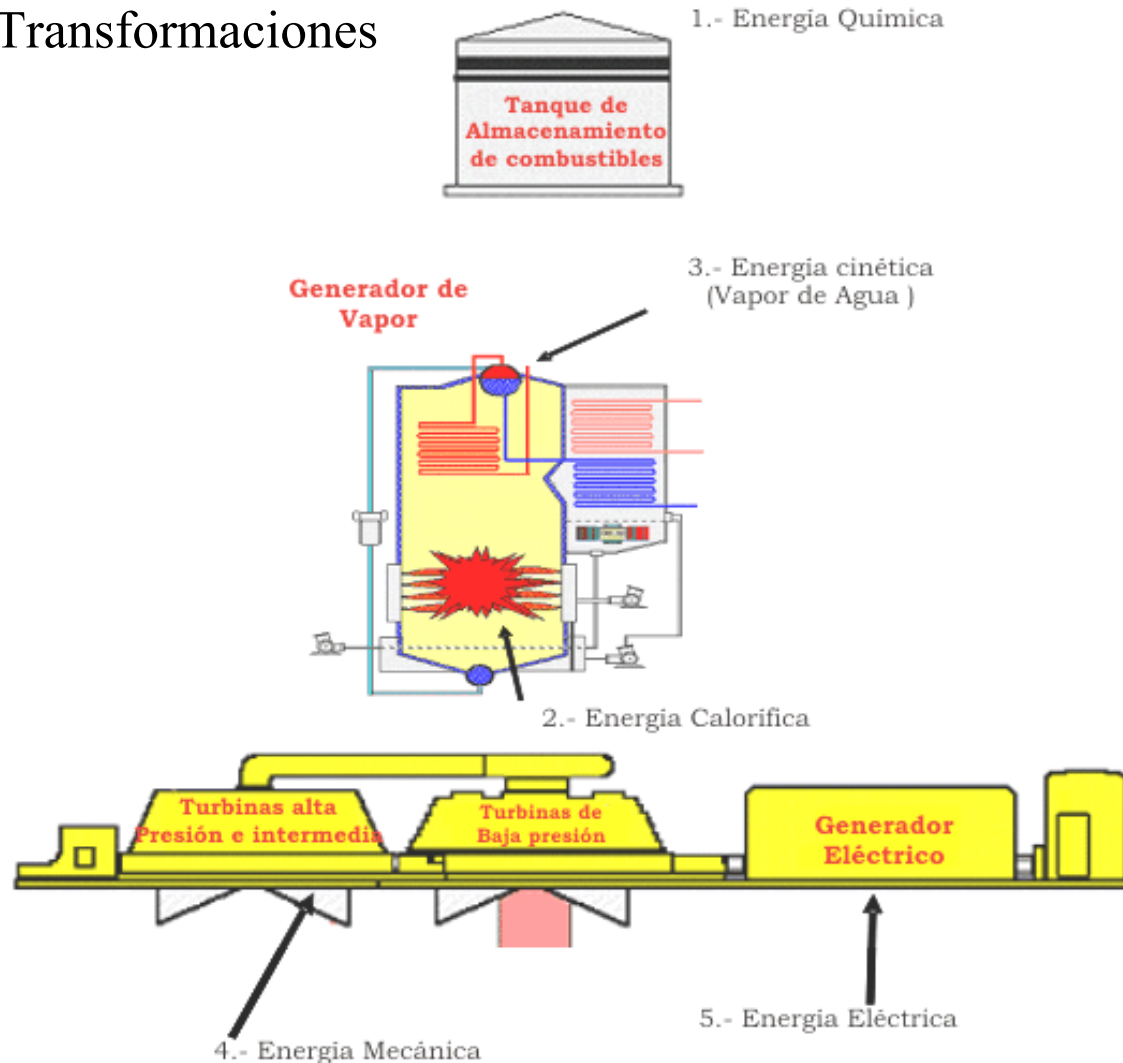
Otra clasificación de las centrales termoeléctricas corresponde al combustible primario para la producción de vapor:

- **Vapor: Fuel-Oil, Gas Natural y Diesel**
- **Carboeléctrica: Carbón**
- **Dual: Fuel-Oil y Carbón**
- **Geotermoeléctrica: Vapor extraído del subsuelo**
- **Nucleoeléctrica: Uranio enriquecido**

TURBOVAPOR

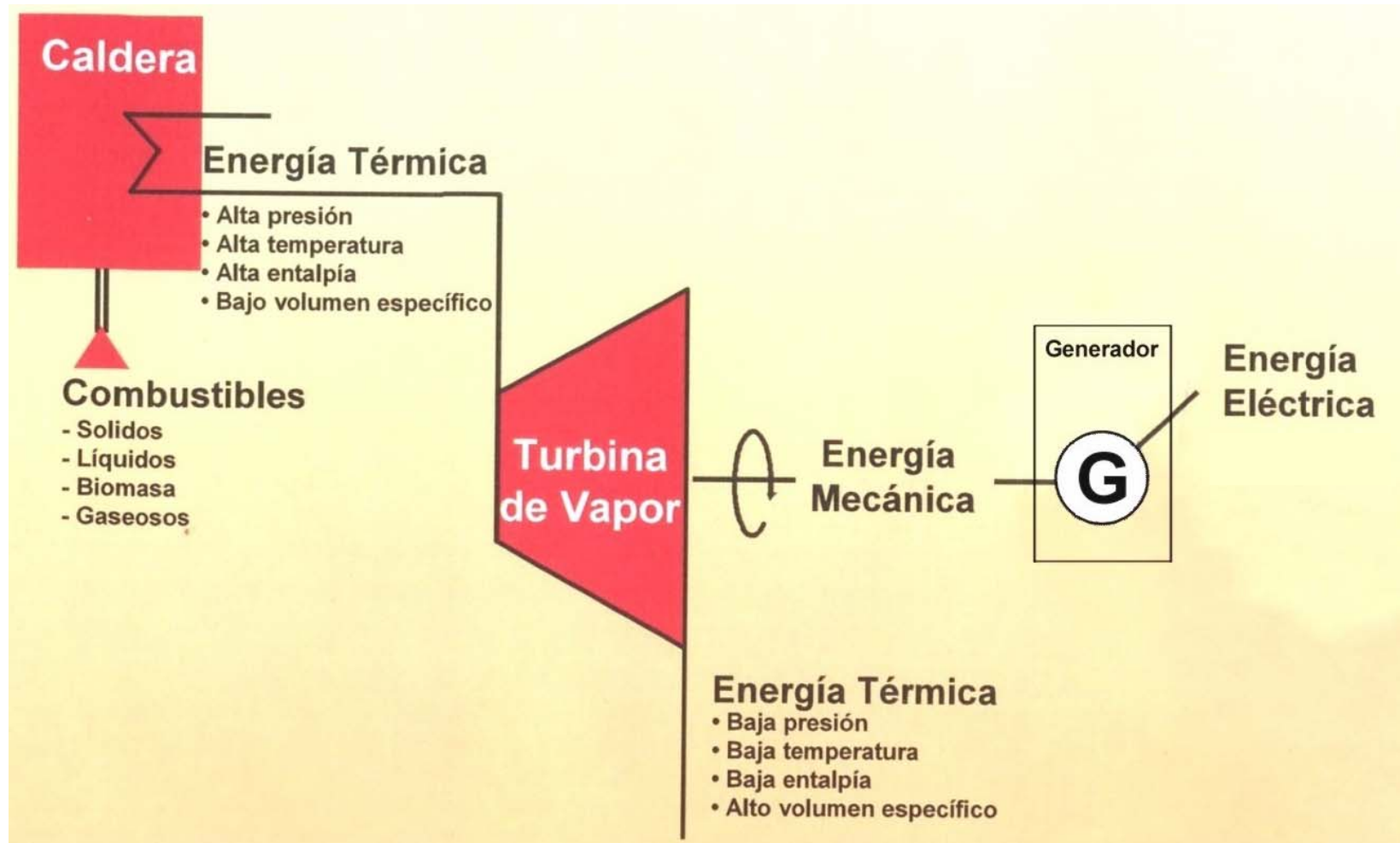
TURBOVAPOR

Secuencia de Transformaciones de Energía



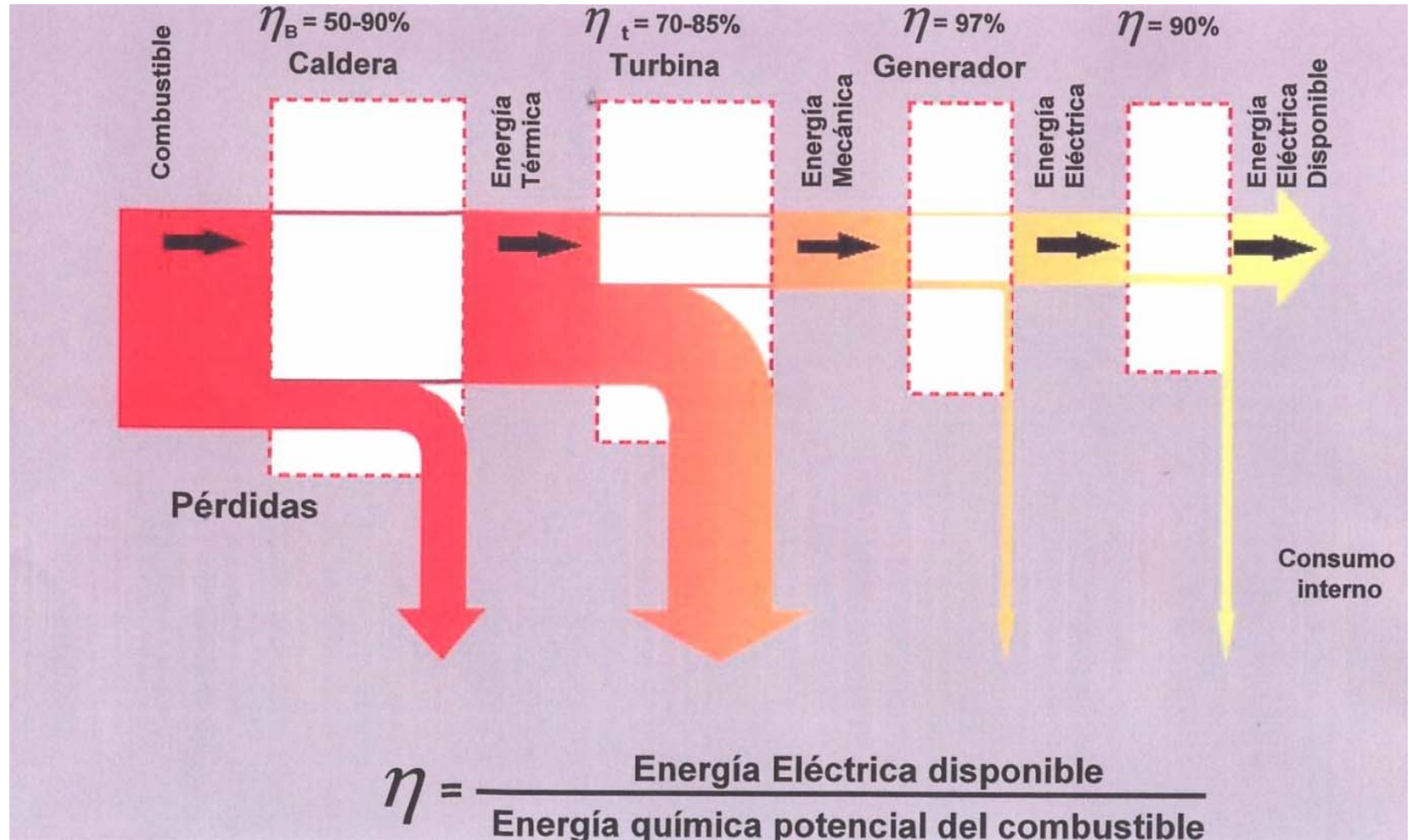
TURBOVAPOR

Transformación de la Energía



TURBOVAPOR

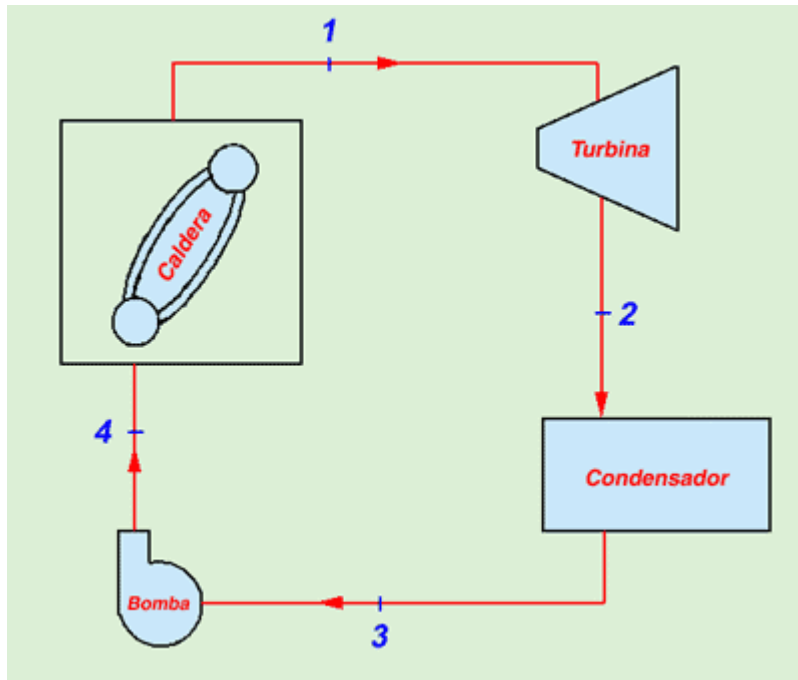
Flujo de la Energía



TURBOVAPOR

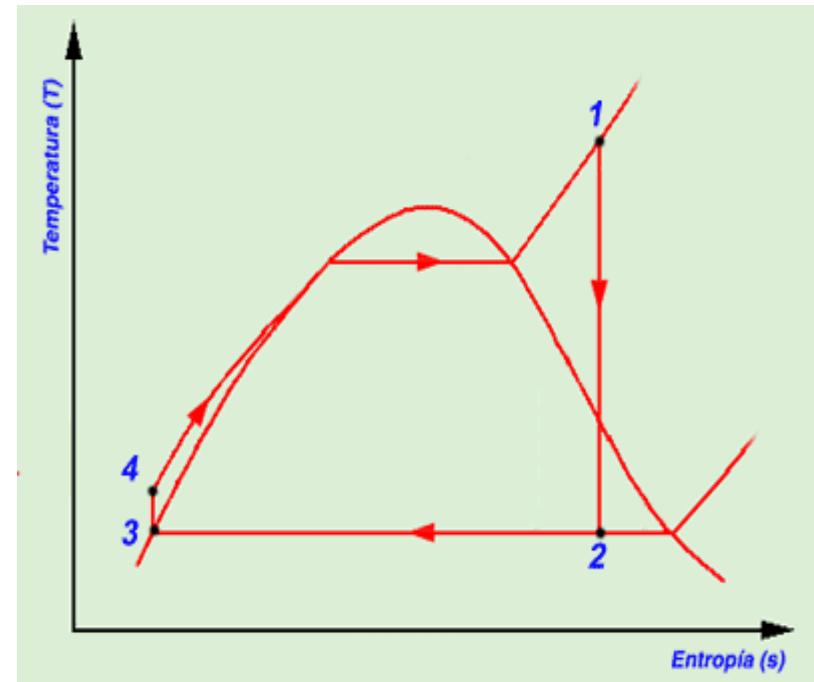
Ciclo Termodinámico (I)

Conceptos Básicos



- 1- Vapor Recalentado a Alta Presión.
- 2- Vapor Húmedo a Baja Presión.

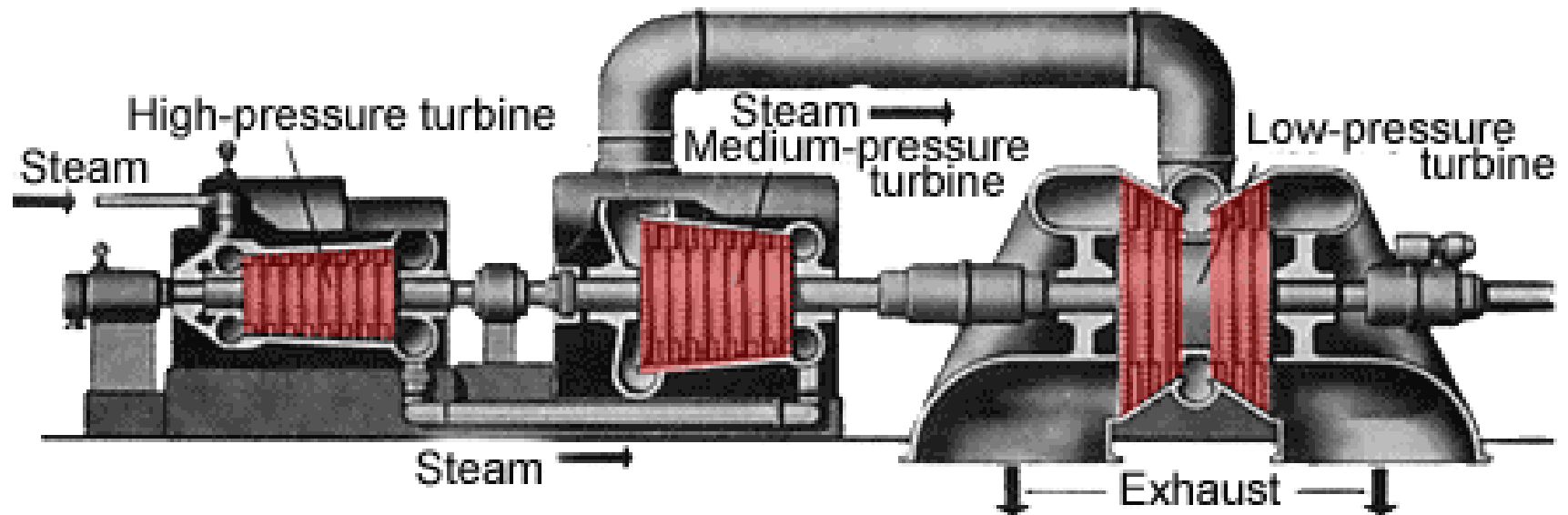
Ciclo Rankine



- 3- Condensado.
- 4- Compresión Isoentrópica.

TURBOVAPOR

Esquema Típico Turbina de Vapor



TURBOVAPOR

Principios de Funcionamiento (I)

- **Es una máquina de fluido (el vapor), en la que parte de la energía del fluido pasa al eje de la máquina.**
- **La energía mecánica transferible al eje proviene de:**
 - la energía mecánica de la corriente de vapor
 - la energía térmica disponible, transformada (en parte) en mecánica, por expansión del fluido.
- **El trabajo disponible en la turbina es igual a la diferencia de entalpía entre el vapor de entrada a la turbina y el de la salida.**

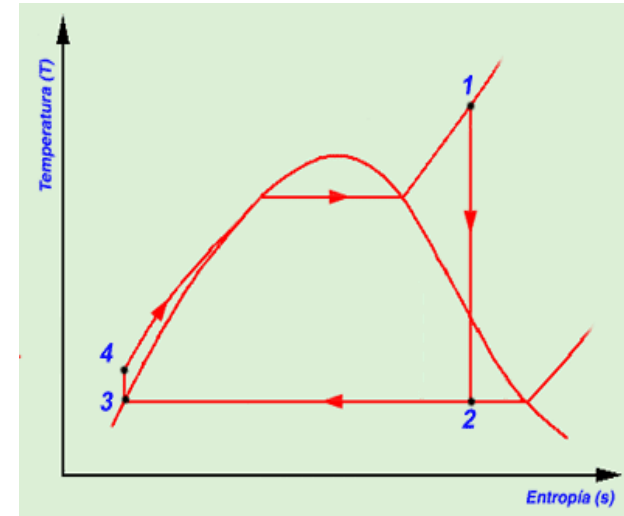
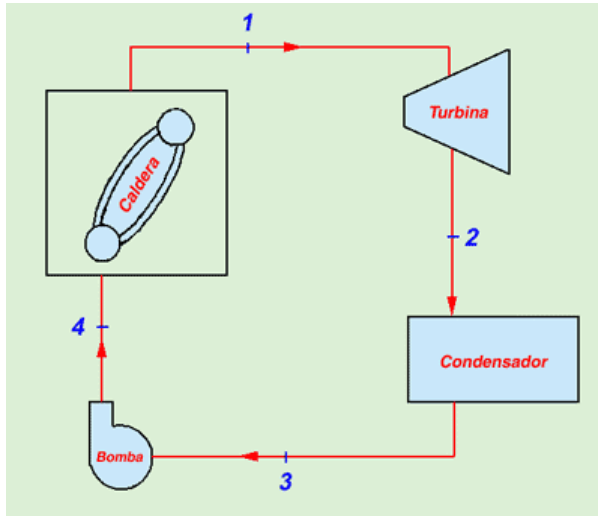
TURBOVAPOR

Las Razones del Vapor

	Metros por segundo.	Kilómetros por minuto,
Trenes de vapor	9 a 30	0,48 a 1,92
Vapor a través de una tubería	30 a 60	1.6 a 3,20
Agua saliendo de una tobera a una presión de 30 metros de desnivel	24	1,44
Dardo lanzado desde un aeroplano a la altura de una milla (fuerte rozamiento del aire) en el momento de chocar con la Tierra	176,75	10,60
Ondas sonoras a través de la atmósfera	335	19,20 - 20,80
Velocidad ecuatorial de la Tierra debida a la rotación diurna	463,30	37,68
Bala de escopeta de caza	762	48
Bala de fusil alemán Mannlicher		
Velocidad máxima	1.143	72
Velocidad ordinaria	838,20	76,40
Bala de fusil canadiense (Ross)		
Velocidad máxima.	1.280	76,40
Velocidad ordinaria	960	
Vapor saturado con expansión a través de la tobera desde 17 kilogramos a 0,07 kilogramos	1.280	76.40
Vapor recalentado desde 42,18 kilogramos y 329° C a 0,07 kilogramos	1.435	85,44

TURBOVAPOR

Ciclo Termodinámico (II)



- 1-2 Turbina de vapor, adiabática reversible.
- 2-3 Condensador, isobárico.
- 3-4 Bomba, adiabática reversible.
- 4-1 Caldera, isobárica.

- Calor aportado al Ciclo = $(h1 - h4)$
- Trabajo producido por el Ciclo = $(h1 - h2)$
- Trabajo Útil = $(h1 - h2) - (h4 - h3)$
- Calor rechazado = $(h2 - h3)$
- Trabajo recibido por el Ciclo = $(h4 - h3)$

$$\eta \text{ Térmico Ciclo} = \frac{\text{Trabajo Útil}}{\text{Calor Aportado al Ciclo}}$$

$$= \frac{(h1 - h2) - (h4 - h3)}{h1 - h4}$$

$$= 1 - \frac{(h2 - h3)}{(h1 - h4)} = 1 - \frac{\text{Calor Rechazado}}{\text{Calor Aportado}}$$

TURBOVAPOR

Principios de Funcionamiento (II)

- La **expansión** es posible por la variación del volumen específico del fluido que evoluciona en la turbina.
- La utilización de vapor como fluido de trabajo se debe a la elevada cantidad de energía disponible por kg de fluido (el ratio para el agua es tres veces mayor que para el aire).
- La gran diferencia que se debe obtener entre la presión de entrada y de salida, requiere producir la expansión en etapas (para mejorar el rendimiento).
- La eficiencia de expansión de las turbinas modernas de varios escalones es alta, dado el avanzado estado de desarrollo de sus componentes.
- Es posible recuperar las “pérdidas” de un escalón en el siguiente.

TURBOVAPOR

Principios de Funcionamiento (III)

- **Sin embargo, a mayor número de escalones, mayor es el costo por kW.**
- **El rendimiento teórico de la turbina supera el 90%, pero la eficiencia termodinámica de la generación con vapor es significativamente inferior (30/40%), debido a la pérdida de energía implícita en el proceso de condensación del vapor que sale de la turbina.**

TURBOVAPOR

Rendimiento

- **Consumo Especifico Típico (Turbina):** **3,1 / 3,4 tn Vapor / MWh**
- **Producción de Vapor (Caldera):** **15 tn Vapor / tn fuel oil.**

$$\Rightarrow \eta_{>150MW} = 38 \div 41\% \left(2300 \div 2100 \frac{kCal}{kWh} \right)$$

$$\Rightarrow \eta_{<150MW} = 30 \div 38\% \left(2900 \div 2300 \frac{kCal}{kWh} \right)$$

TURBOVAPOR

Oferta

Fabricantes

- GENERAL ELECTRIC
- SIEMENS
- ALSTOM
- MITSUBISHI

Potencias

- 45 kW a 1600 MW (*)
- Hasta 500 MW para CC
- (*) para Plantas Nucleares

Temperaturas y Presiones

- 530° / 600°
- <225 bar (Subcríticas)
- 225 a 250 bar (Supercríticas)
- >250 bar (Ultra Supercríticas)

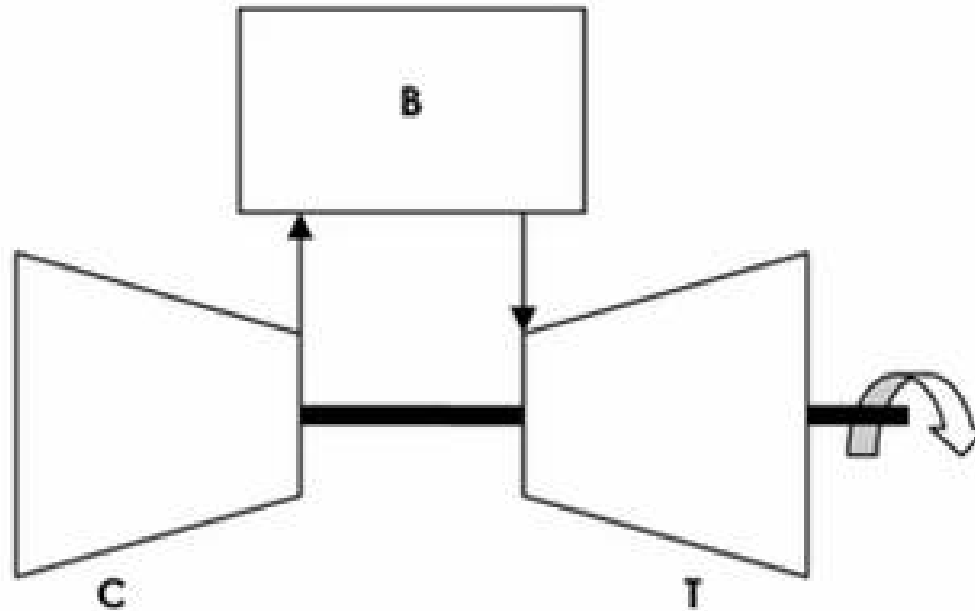
Combustibles

- Gas Natural
- Fuel Oil
- Carbón (Pulverizado / Lecho Fluidizado)

TURBOGAS

TURBOGAS

Componentes Básicos



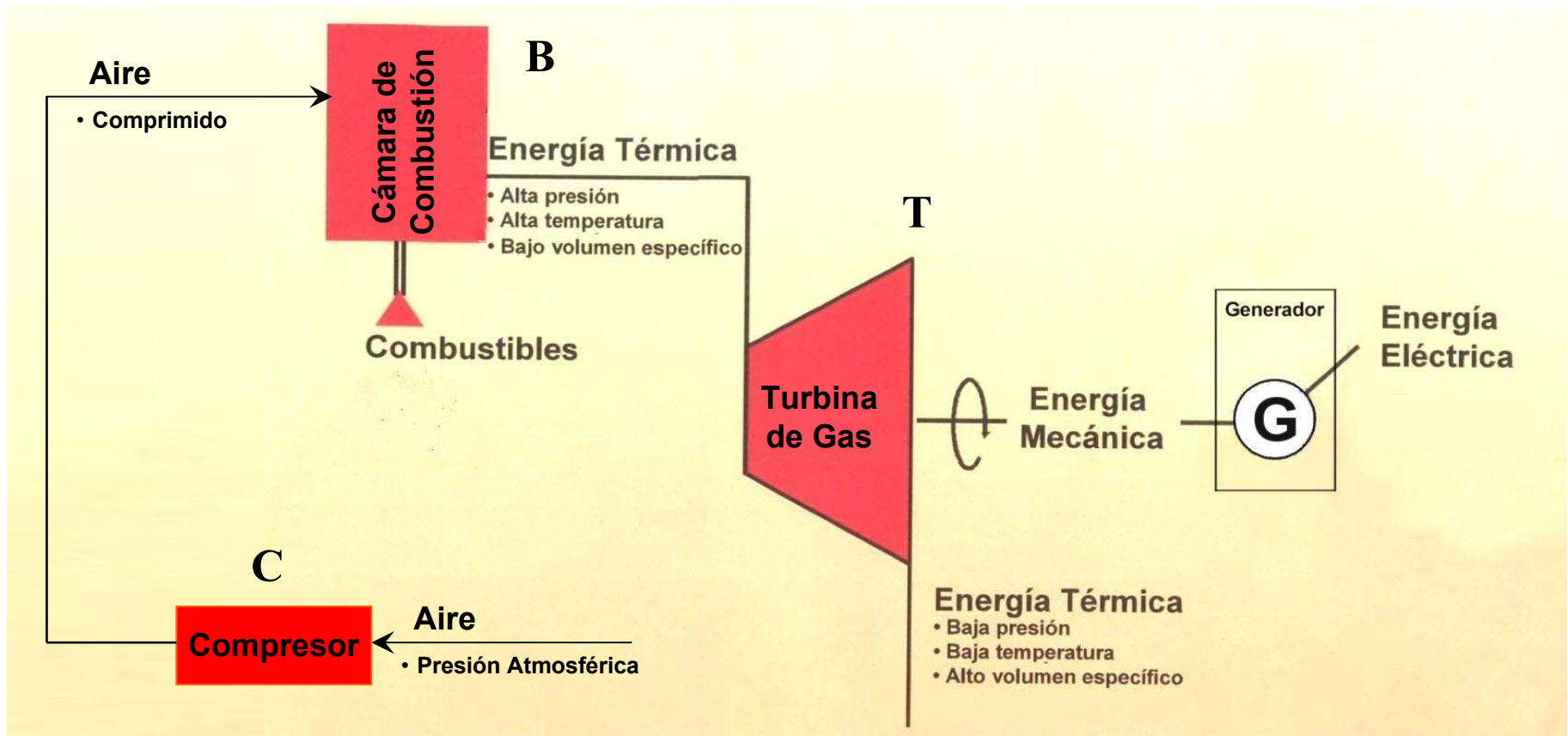
C – Compresor

B – Cámara de Combustión

T – Turbina

TURBOGAS

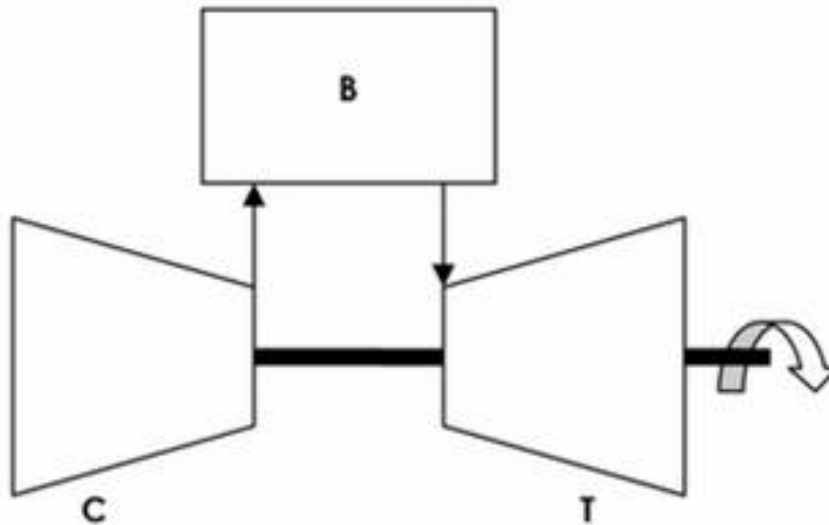
Transformación de la Energía



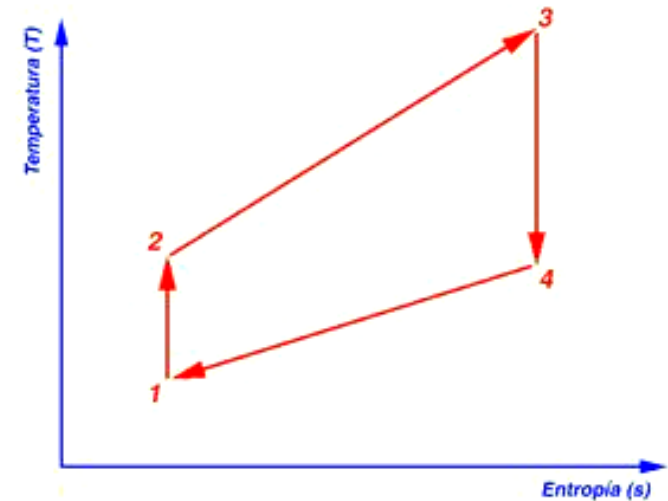
TURBOGAS

Ciclo Termodinámico (I)

Conceptos Básicos



Ciclo Brayton

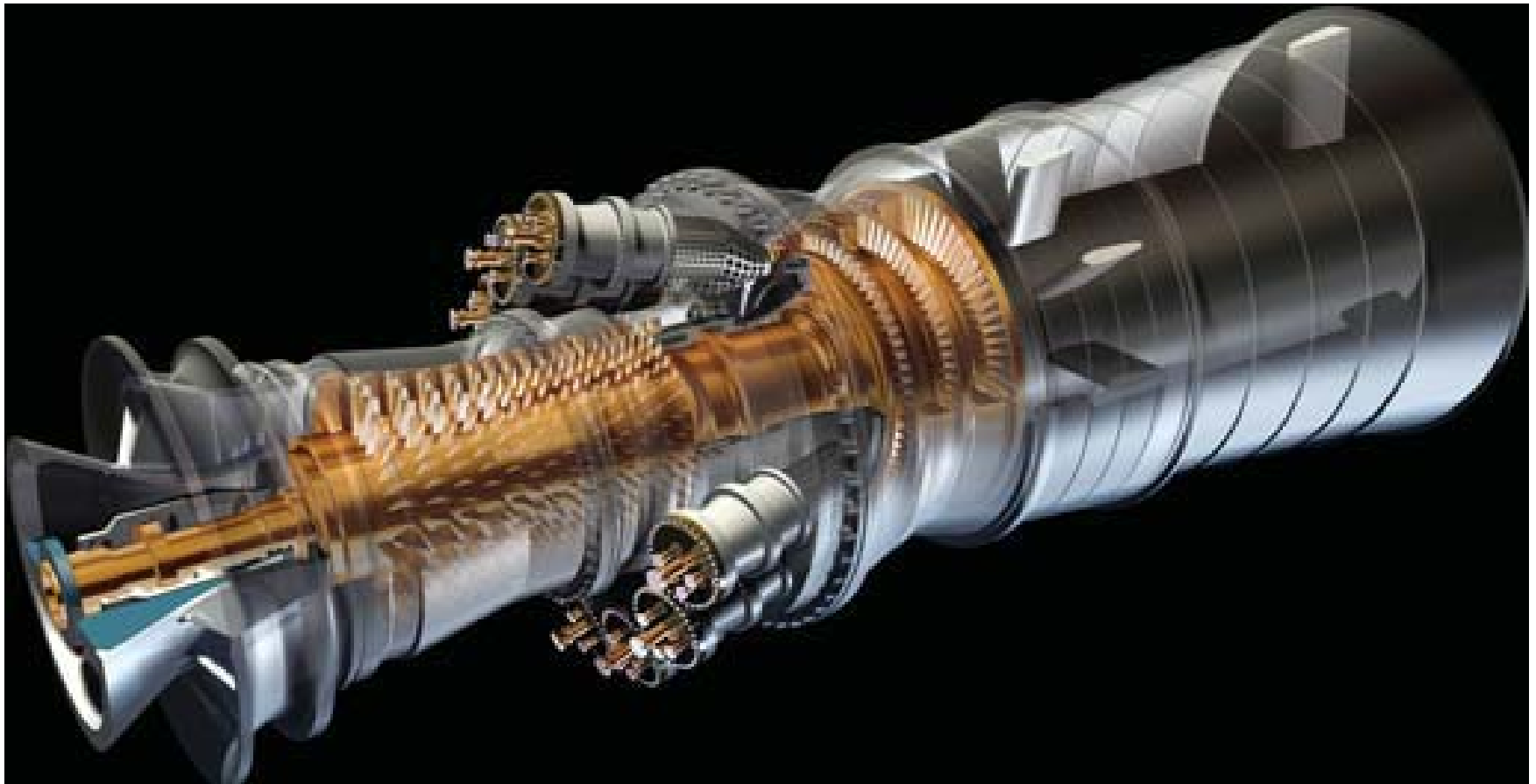


1- Aire a Presión Atmosférica.
2- Aire a Alta Presión.

3- Gases de Combustión (Alta Presión y Temperatura)
4- Gases de Escape (Baja Presión / Alta Temperatura)

TURBOGAS

Disposición Típica



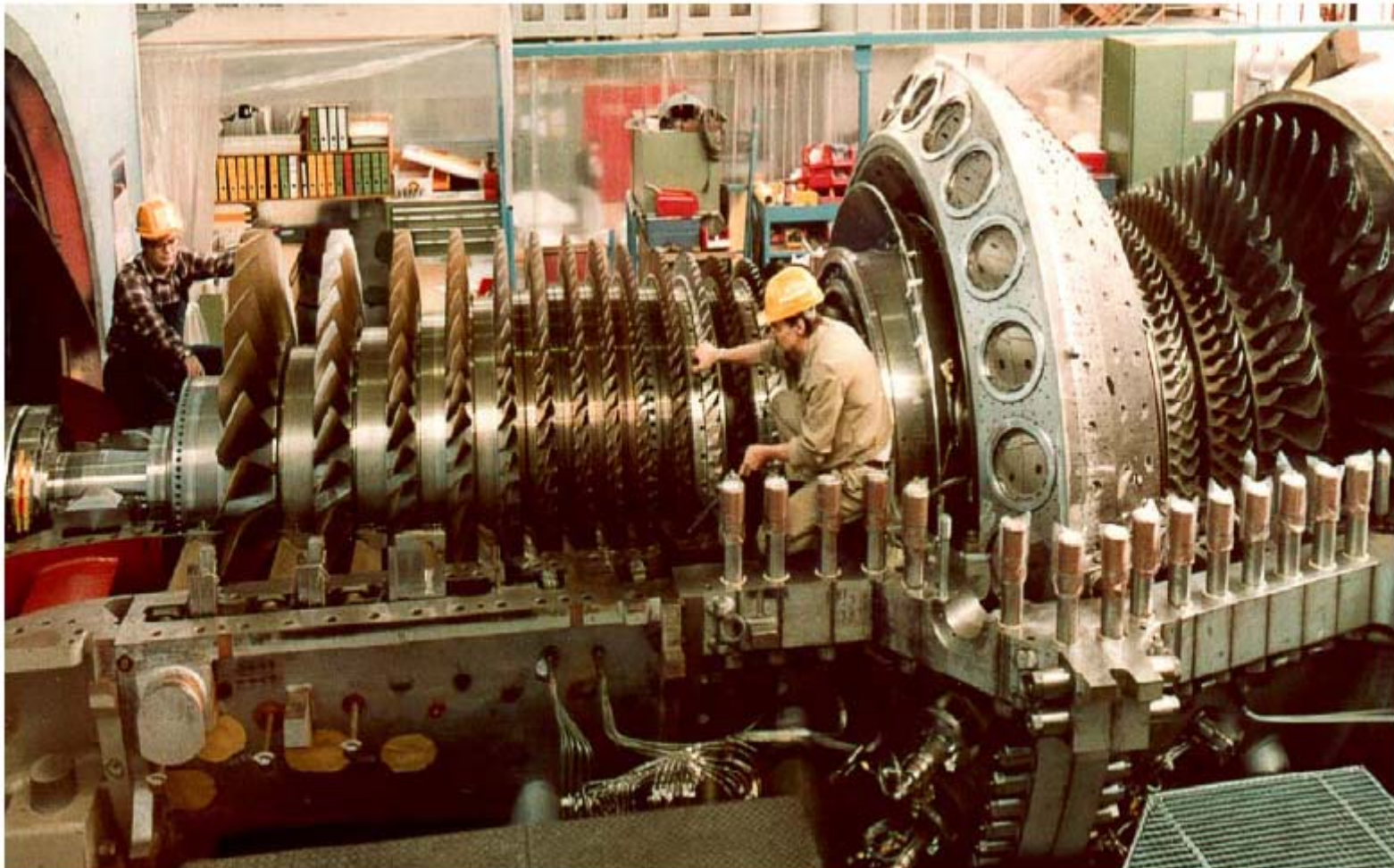
TURBOGAS

Principios de Funcionamiento (I)

- **La turbina de gas es un motor térmico rotativo, de reacción, y de flujo continuo.**
- **Es una máquina de fluido (el gas producto de la combustión) en la que parte de la energía térmica pasa al eje de la máquina.**
- **La energía mecánica transferida al eje proviene de**
 - **la energía mecánica de la corriente del gas de combustión.**
 - **la energía térmica disponible, transformada (en parte) en mecánica, por la expansión del gas producto de la combustión.**
- **La etapa de compresión de aire absorbe -aproximadamente- 2/3 del trabajo producido por la turbina.**
- **El trabajo útil específico disponible en la turbina es igual a la diferencia entre el calor suministrado y el calor extraído.**

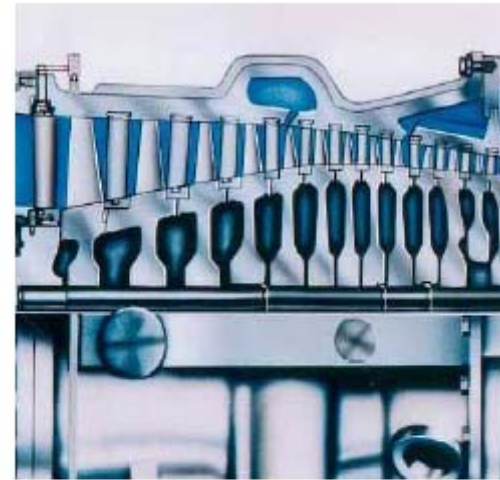
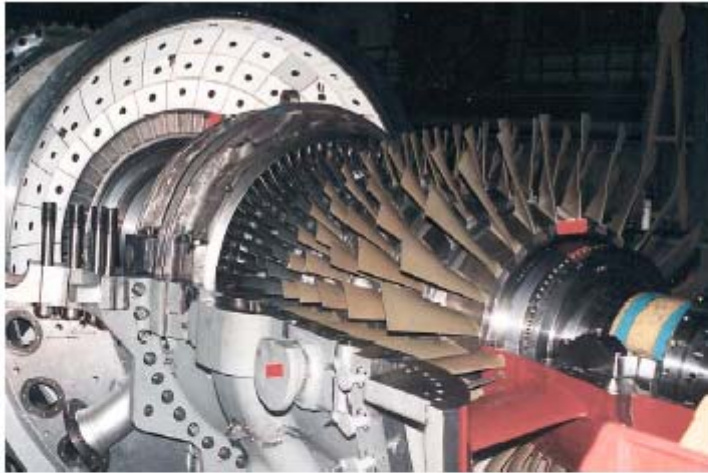
TURBOGAS

Aspectos Constructivos (I) - Conjunto



TURBOGAS

Aspectos Constructivos (II) - Compresor



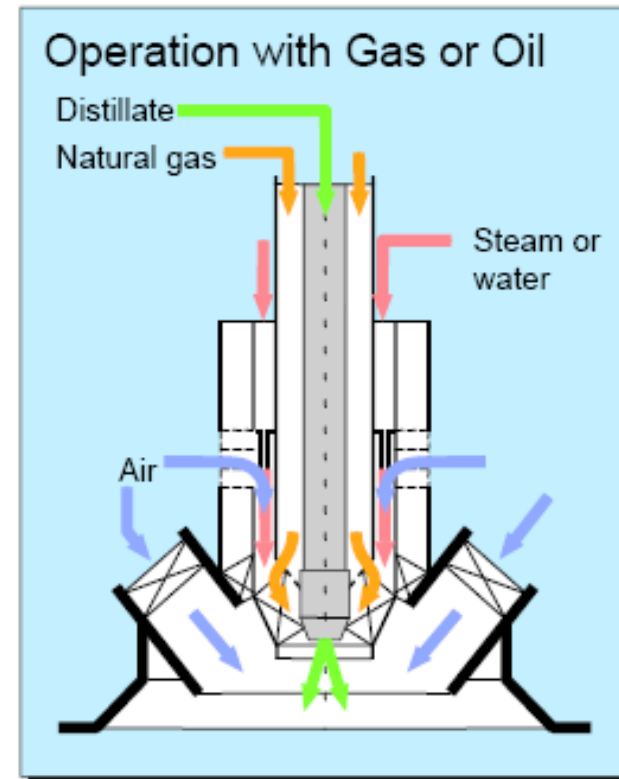
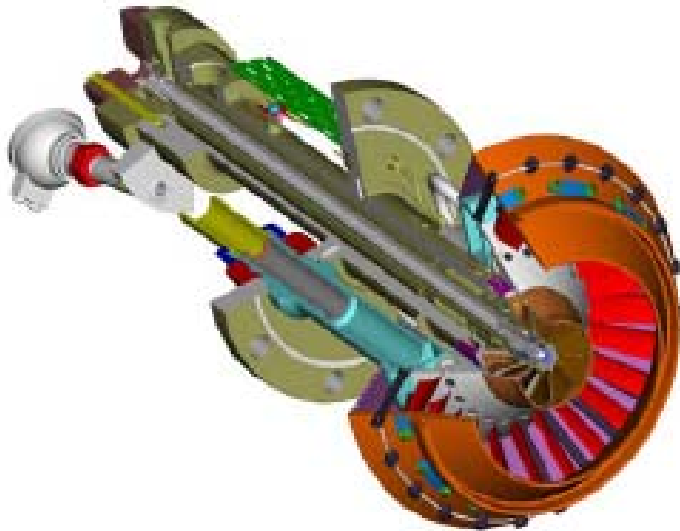
TURBOGAS

Aspectos Constructivos (III) – Cámara de Combustión



TURBOGAS

Aspectos Constructivos (IV) – Inyección de Combustible



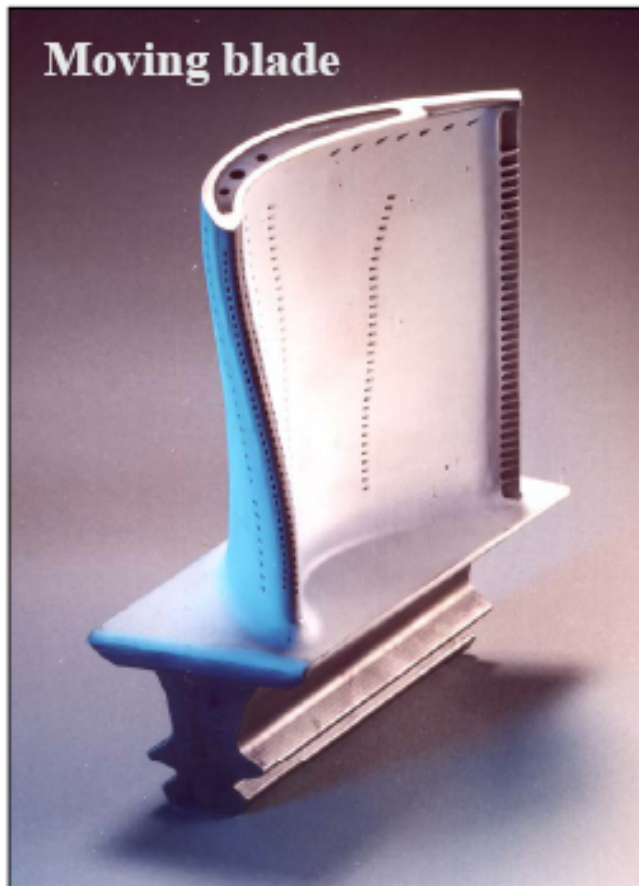
TURBOGAS

Aspectos Constructivos (V) - Turbina



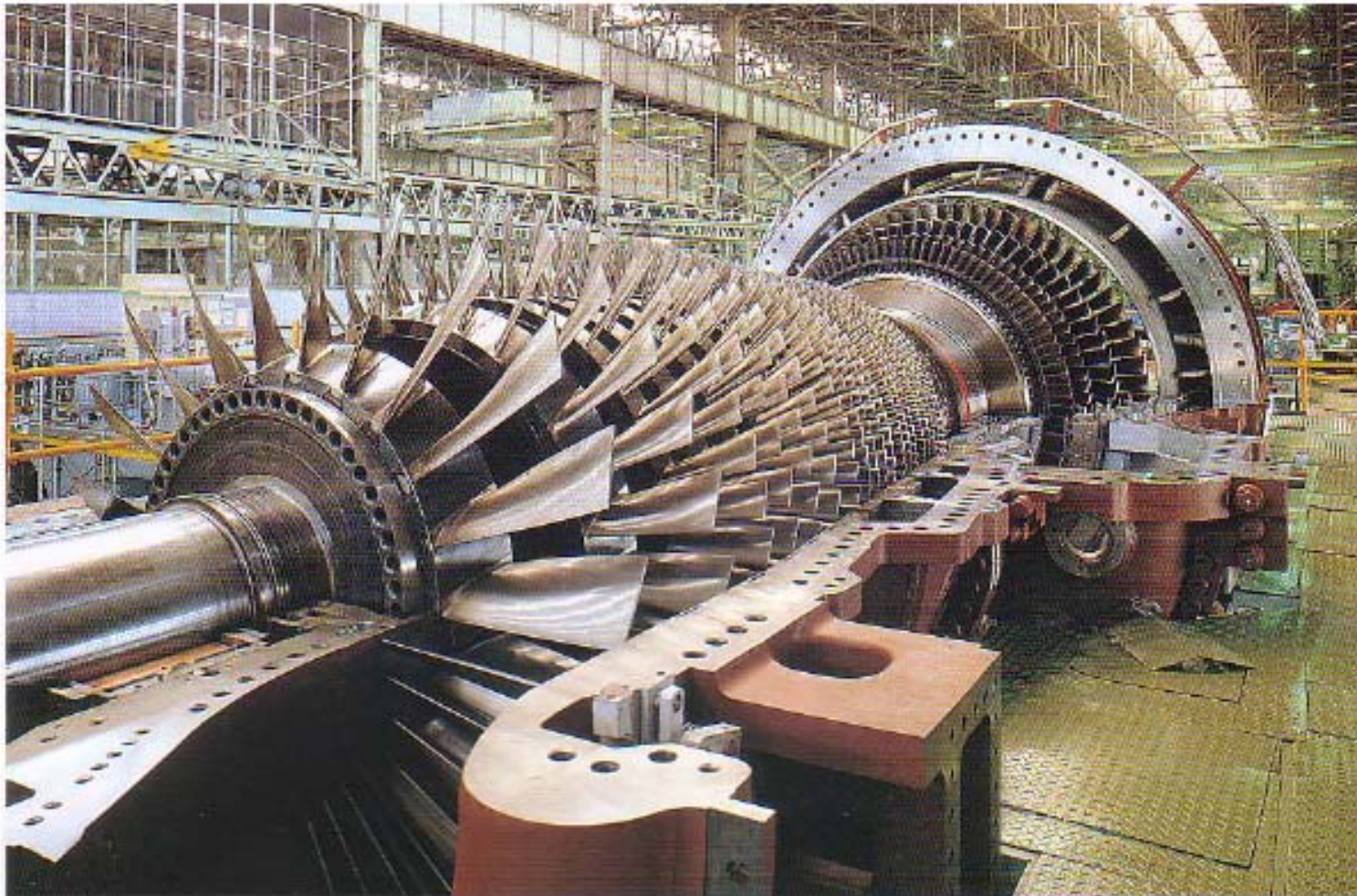
TURBOGAS

Aspectos Constructivos (VI) - Turbina



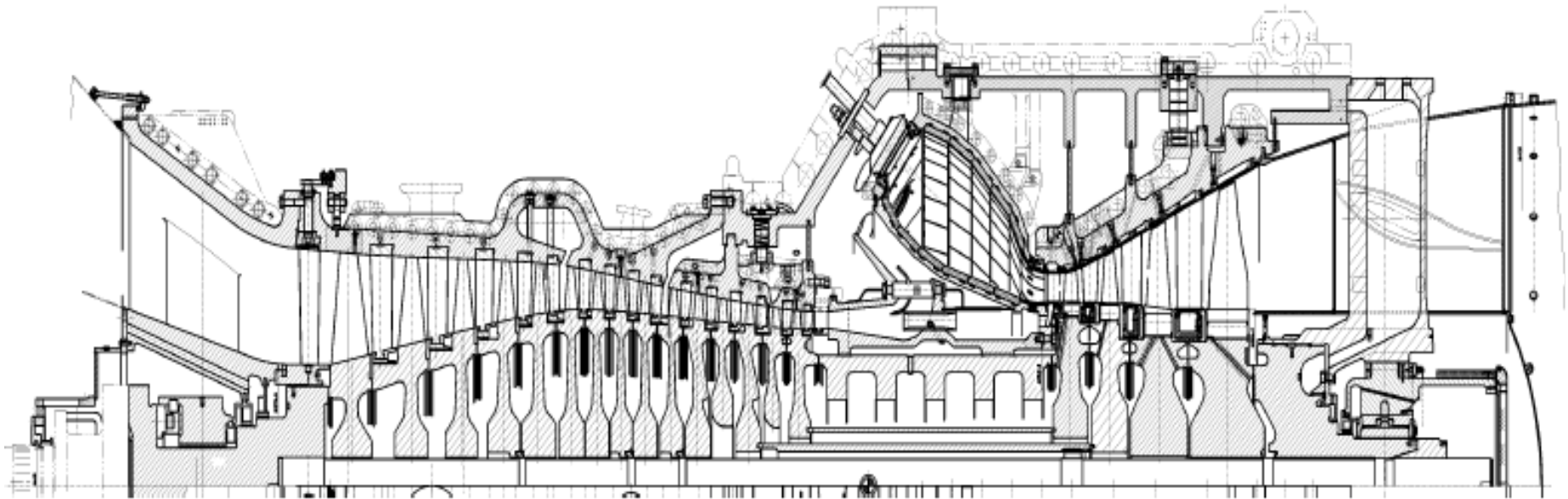
TURBOGAS

Aspectos Constructivos (VII) - Conjunto



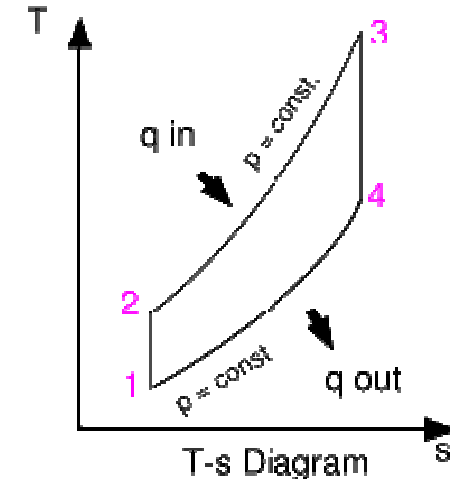
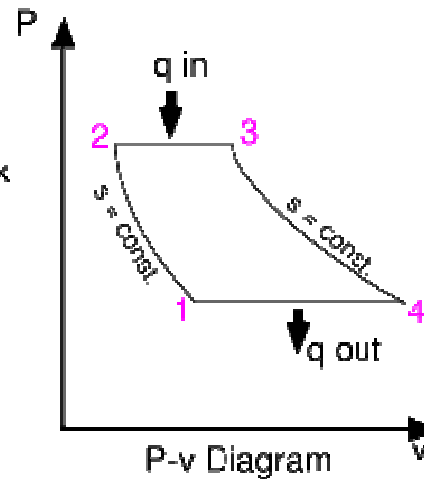
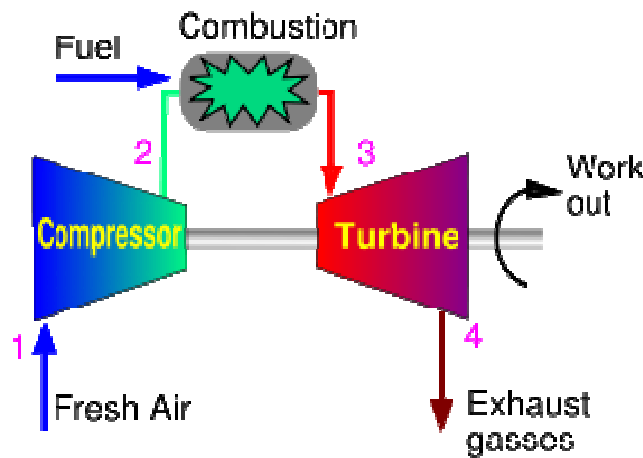
TURBOGAS

Aspectos Constructivos (VIII) – Conjunto / Vista en Corte



TURBOGAS

Ciclo Termodinámico (II)



Idealized Brayton Cycle

$$\eta_{\text{Térmico Ciclo}} = \frac{\text{Trabajo Útil}}{\text{Trabajo Aportado}}$$

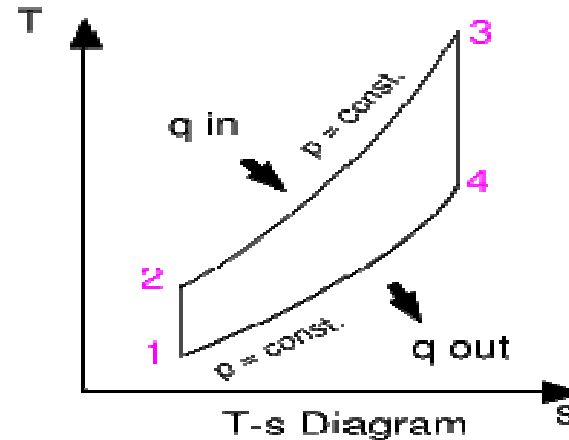
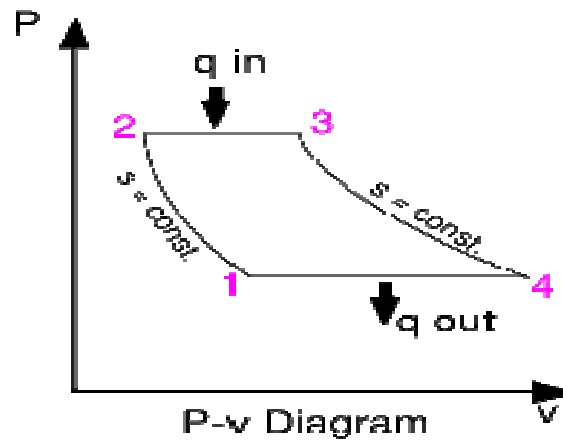
$$= \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2}$$

$$= 1 - \frac{(h_4 - h_1)}{(h_3 - h_2)} = 1 - \frac{q_{\text{out}}}{q_{\text{in}}}$$

- 1-2 Compresión isentrópica (=proceso adiabático reversible) en el compresor.
- 2-3 Adición de calor al fluido de trabajo a presión en la cámara de combustión.
- 3-4 Expansión isentrópica en la turbina.
- 4-1 Extracción del calor de trabajo a presión constante en la atmósfera.

TURBOGAS

Ciclo Termodinámico (III)

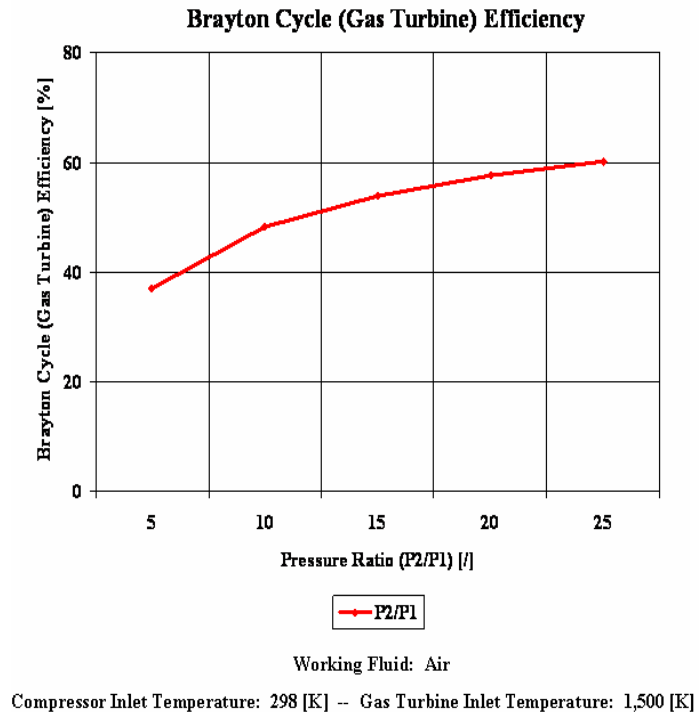


- El “ciclo” (abierto) consta de compresión adiabática, calentamiento a presión constante y expansión adiabática
- Debido a que los gases que se expanden están más calientes, el trabajo que puede obtenerse del proceso de expansión es mayor que el de compresión; el trabajo neto del ciclo es la diferencia entre los dos.
- Si se agrega un regenerador para recobrar el calor de escape de la turbina se mejora la eficiencia. Añadiendo además enfriamiento en el compresor y recalentamiento del fluido de trabajo, durante la expansión se incrementa la salida de potencia.

TURBOGAS

Ciclo Termodinámico (IV)

- La eficiencia térmica del ciclo de Brayton depende principalmente de la relación de presiones, de la temperatura de admisión a la turbina, y de las pérdidas parásitas (en especial las eficiencias del compresor y de la turbina).
- En el caso de un aire estándar ideal - sin pérdidas internas- se puede demostrar que la eficiencia térmica depende sólo de la relación de presiones en el compresor ($P2 / P1$).
- $\eta_{Br} = 1 - 1/(P2/P1)$



TURBOGAS

Principios de Funcionamiento (II)

- La **expansión** es posible por la variación del volumen específico del gas de combustión que evoluciona en la turbina.
- La gran diferencia que se debe obtener entre la presión de entrada (P1) y de salida (P2), requiere producir la expansión en etapas (para mejorar el rendimiento).
- El rendimiento teórico de la turbina supera el 50%, pero la eficiencia termodinámica es **significativamente inferior (32/34%)** debido a la pérdida de energía implícita en los gases de escape.

TURBOGAS

Parámetros Ciclo Abierto

			POTENCIAS				
			76 MW	126 MW	170 MW	255 MW	345 MW
Clase E	Consumo Especifico	Kcal/kWh		2545			
	Rendimiento	%		33,8			
	Ratio Presiones			13:1			
	Temperatura in	°C		1250			
	Temperatura out	°C		540			
Clase F	Consumo Especifico	Kcal/kWh	2460		2360	2280	
	Rendimiento	%	34,9		36,4	37,7	
	Ratio Presiones		16:1		16:1	17:1	
	Temperatura in	°C	1280		1300	1320	
	Temperatura out	°C	570		600	600	
Clase H	Consumo Especifico	Kcal/kWh					2150
	Rendimiento	%					39,9
	Ratio Presiones						23:1
	Temperatura in	°C					1430
	Temperatura out	°C					610

TURBOGAS

Oferta (I)

Fabricantes

- GENERAL ELECTRIC
- SIEMENS
- ALSTOM
- MITSUBISHI
- HITACHI (Lic. GE)

Potencias

- 4,5 MW a 50 MW
- 65 MW a 285 MW (F)
- 340 MW (H)

Combustibles

- Gas Natural
- Fuel Oil
- Carbón Gasificado

TURBOGAS

Oferta (II) - Aeroderivadas

Fabricante

- GENERAL ELECTRIC
- PRATT & WHITNEY
- ROLLS ROYCE

Potencias

- 10 MW a 50 MW
- 100 MW (GE/LMS100)

Rendimiento / Temp Salida

- <40% / 450°C
- 45% / 420°C

CICLO COMBINADO

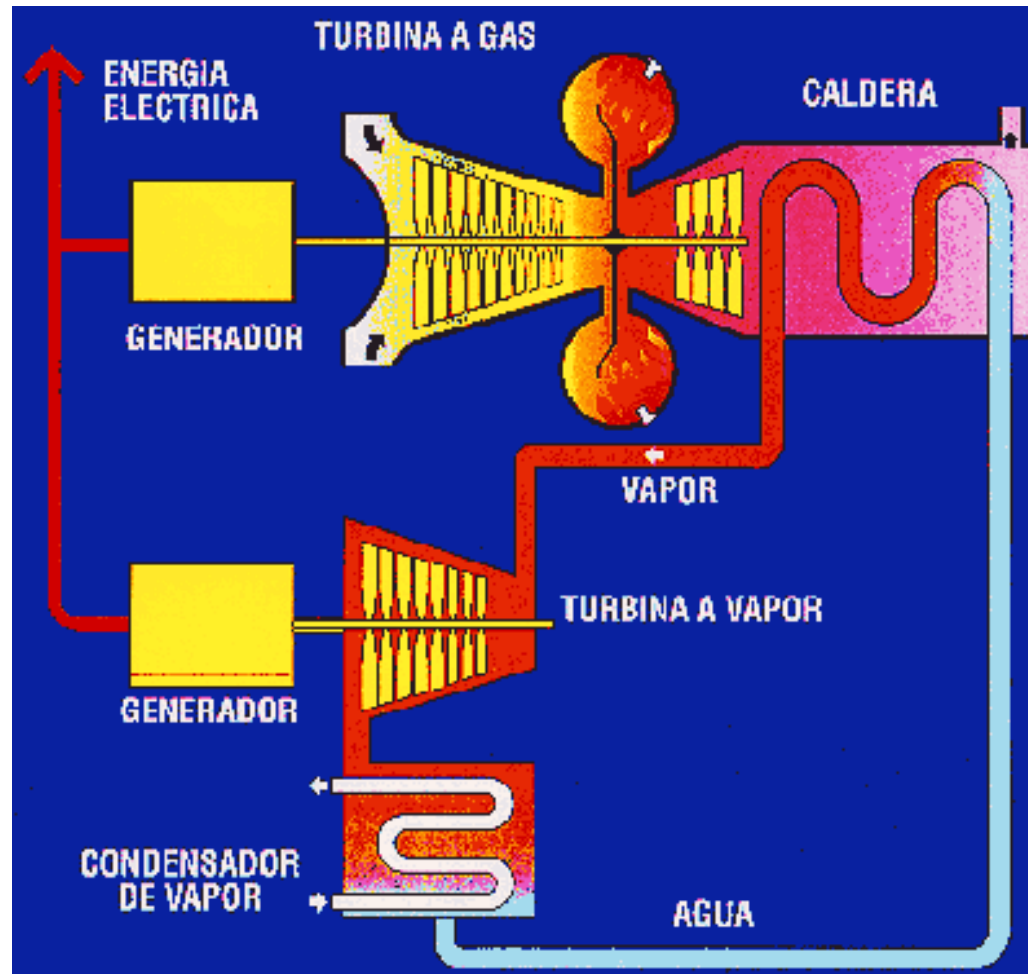
CICLO COMBINADO

Concepto

- **Un Ciclo Combinado es la infraestructura de generación de energía que mejor combina la eficiencia y el respeto por el medio ambiente.**
- **En la generación de energía, se denomina Ciclo Combinado a la co-existencia de dos ciclos termodinámicos en un mismo sistema:**
 - **uno cuyo fluido de trabajo es el vapor de agua**
 - **y otro en el que el fluido es un gas, producto de una combustión.**

CICLO COMBINADO

Esquema Básico



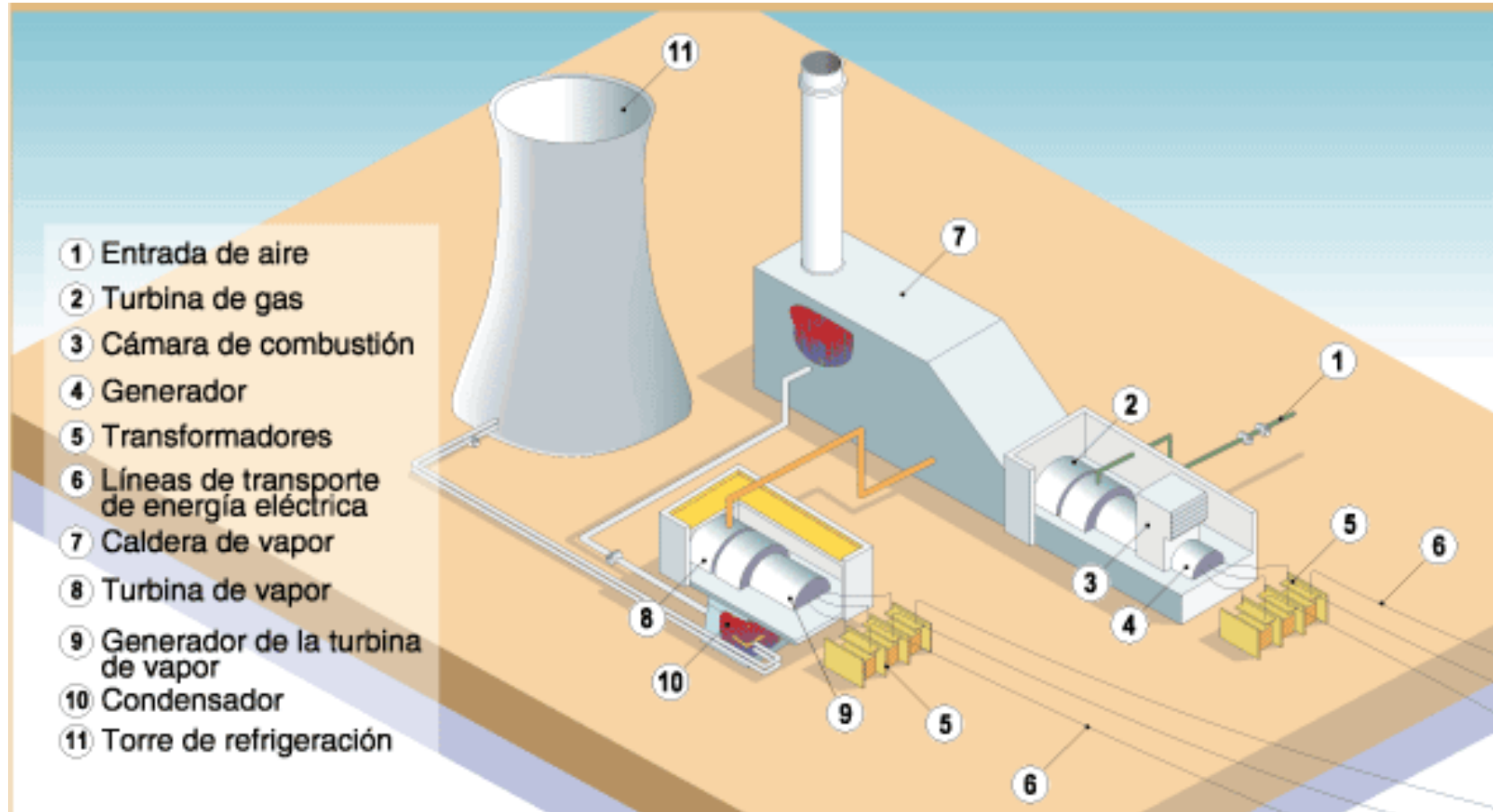
CICLO COMBINADO

Configuración / Componentes (I)

- **Una o más Turbinas de Gas, que proporcionan 2/3 de la potencia total de la planta de generación.**
- **Una o más Turbinas de Vapor, que proporcionan 1/3 de la potencia total de la planta.**
- **Una o más Calderas de Recuperación (HRSG) de calor. Este equipo genera vapor de agua aprovechando la energía disponible en el escape de la Turbina de Gas, el cual se expansiona en la Turbina de Vapor.**
- **Estación medidora y reductora de la presión del gas natural.**
- **Sistema de control basado en microprocesadores para la central.**
- **Sistema de refrigeración cuyo fin último es condensar el vapor expansionado en la Turbina de Vapor de forma que el agua condensada pueda ser alimentada de nuevo en la Caldera de Recuperación.**

CICLO COMBINADO

Disposición Típica (I)



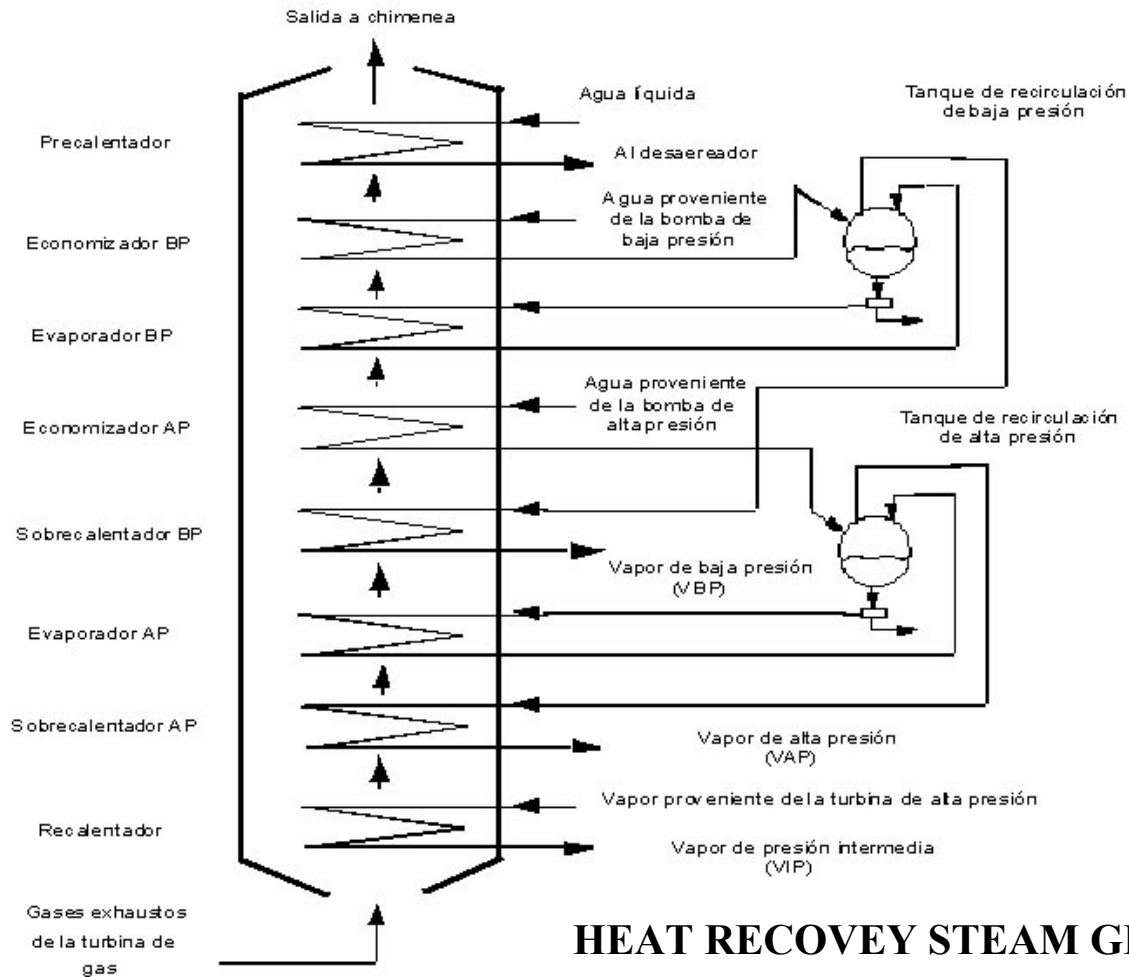
CICLO COMBINADO

Configuración / Componentes (II)

- **La configuración de una planta de Ciclo Combinado puede responder a distintos criterios.**
- **El número de unidades Turbogas (TG) por unidad de Turbovapor (TV) varía de 1 a 1 hasta 4 a 1.**
- **Para la fase de vapor existen tres alternativas:**
 - Sin “fuego adicional”
 - Con “fuego adicional” para control de la temperatura.
 - Con “fuego adicional” para aumento de la temperatura y de la presión de vapor.

CICLO COMBINADO

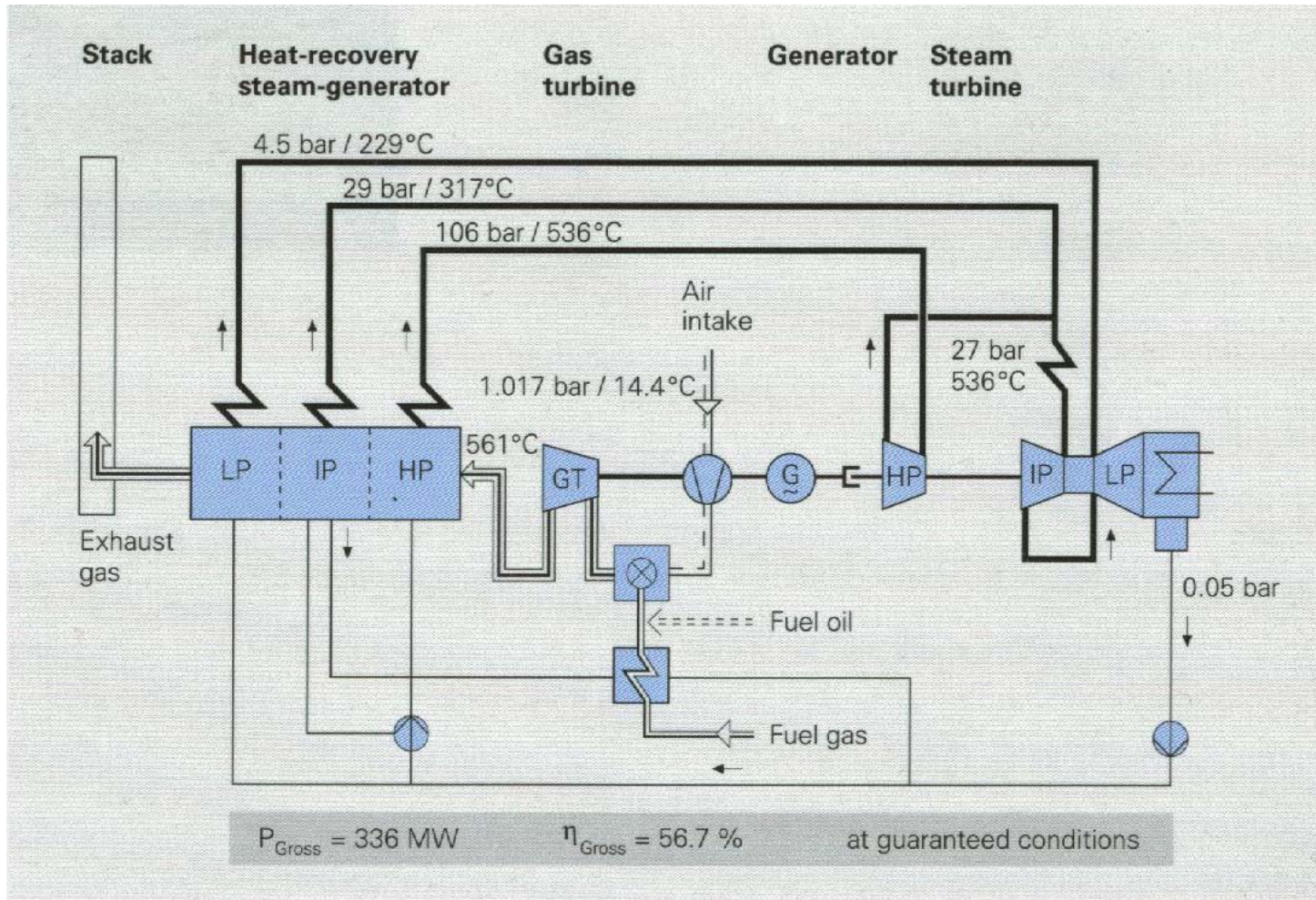
Caldera de Recuperación



HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR / HRSG

CICLO COMBINADO

Ciclo Térmico



CICLO COMBINADO

Aspectos Ambientales

- **El gas natural es el combustible fósil más limpio de la naturaleza.**
- **El Ciclo Combinado operando con gas natural es el equipos más adecuado para cumplir los objetivos del Protocolo de Kioto (sobre reducciones de CO₂).**
- **Las emisiones de SO₂ son inapreciables.**
- **El consumo de combustible es un 35% inferior al de una Central Turbovapor de igual potencia.**
- **El consumo de agua es 1/3 de lo que demanda una Central Turbovapor convencional.**

CICLO COMBINADO

Oferta

Fabricantes

TV + TG

- GENERAL ELECTRIC
- SIEMENS
- ALSTOM
- MITSUBISHI

TG

- HITACHI

HRSG

- BABCOCK
- FOSTER WHEELER
- ALSTOM

Potencias

- 67MW a 830 MW (*)
- (*) 2TG x 275MW + 1TV x 280 MW

Combustibles

- Gas Natural
- Gas Oil
- Carbón Gasificado

Uso del Carbón

□ Tecnologías “Limpias” del Carbón

✓ Lecho Fluidizado:

- Circulante, a presión atmosférica

- Bajo presión

✓ IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle)

□ “Carbon Sequestration”

Generación y Transporte de Energía Eléctrica Desafíos Actuales y Soluciones

F i n

Muchas Gracias por la atención

Estado del Arte de la Generación Termoeléctrica

Ing. Rogelio Horacio Baratchart
Presidente de TECNOLATINA S.A.

Buenos Aires, 08 de Noviembre de 2007

TECNOLATINA S.A.

Servicios de Ingeniería y Consultoría

Esmeralda 345 Piso 2° (C1035ABC)

Buenos Aires - Argentina.

Tel. (54-11) 4115-9536 al 39

TECNOLATINA