

# MÁQUINAS TÉRMICAS

---

## *Los Compresores y Procesos de Compresión*

**Prof. Miguel ASUAJE**

*Marzo 2012*

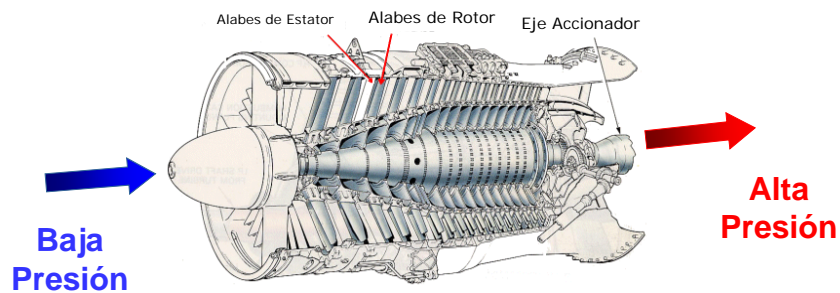
## Contenido

---

- \* **Definición e Importancia de los Compresores**
  - \* Introducción
  - \* Clasificación
    - \* Volumétricos
    - \* Turbocompresores
  - \* Aplicación
  - \* Campo de Operación
  - \* Tipos de Compresores
    - \* Configuración y Componentes
    - \* Fabricación
- \* **Análisis Comparativo**
  - \* Rotodinámicos vs Volumétricos
  - \* Centrífugos vs. Axiales
- \* **Procesos de Compresión**
  - \* Compresión Politrópica
  - \* Compresión Adiabática Reversible
  - \* Compresión con Enfriamiento
  - \* Compresión Isotérmica

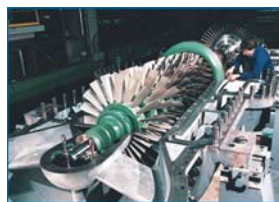
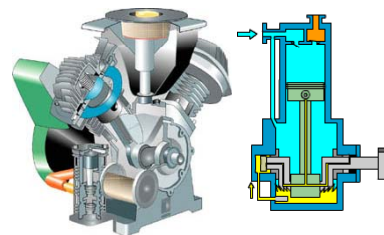
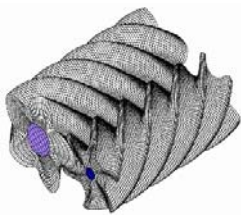
# Los Compresores

Máquina que sirve para hacer ganar una energía a un fluido compresible, generalmente bajo la forma de presión

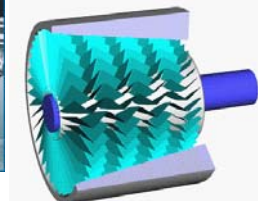


# Clasificación

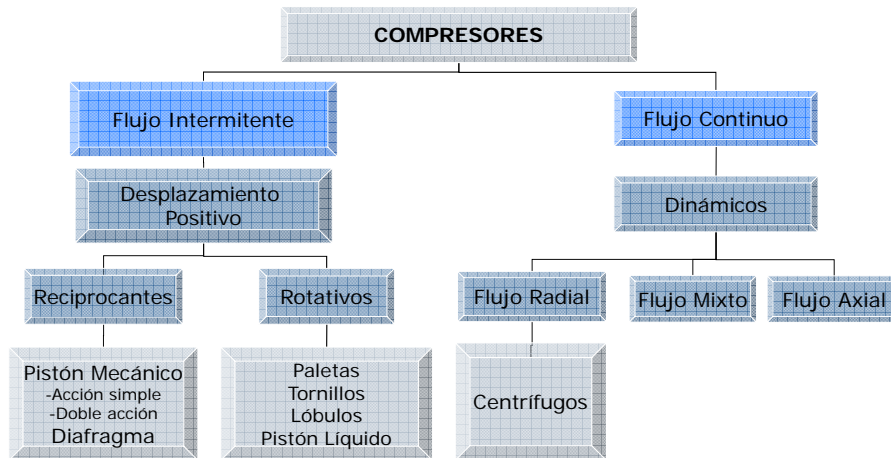
Volumétricos



Rotodinámicos



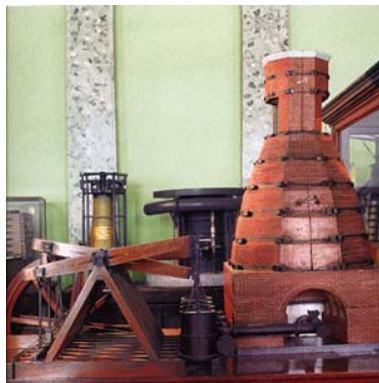
## Tipos de Compresores



## Un poco de Historia...

Los compresores de aire han existido desde hace cientos de años.

Uno de los principales usos de aire comprimido era aumentar la combustión en un horno



Los Compresores de aire antiguos: Los herreros antiguos solían gritar y rugir para intensificar su fuego

Los primeros compresores son Fuelles



## Un poco de Historia...

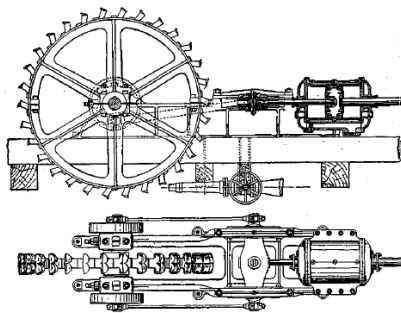
- ✓SXVII, Ing. Físico Alemán Otto von Guericke experimentó y mejoró los compresores de aire. En 1650, Guericke inventó la primera bomba de aire, la cual podía producir un vacío parcial y él mismo uso esto para estudiar el fenómeno del vacío y el papel del aire en la combustión y la respiración.
- ✓En 1829, la primera fase o componente del compresor de aire fue patentada. Dicho componente comprimía aire en cilindros sucesivos.
- ✓Para 1872, la eficiencia del compresor fue mejorada mediante el enfriamiento de los cilindros por motores de agua, que causó a su vez la invención de cilindros de agua.
- ✓Uno de los primeros usos modernos de los compresores de aire fue gracias a los clavadistas de mares profundos, quienes necesitaban un suministro de la superficie para sobrevivir. Conocimiento de clavadistas que emplean compresores de aire tuvieron lugar en 1943.
- ✓Los primeros mineros emplearon motores de vapor para producir suficiente presión para operar sus taladros, incluso cuando dicho dispositivos probaban ser extremadamente peligrosos para los mineros.
- ✓En 1960 los lava-autos de auto-servicios, alta-presión y "hazlo tú mismo" se hicieron populares gracias a los compresores de aire.



Locomotora de Homestake Mining ([Dakota del Sur, USA](#)), funcionaba con aire comprimido y se usaba para minas. (1928 – 1961)

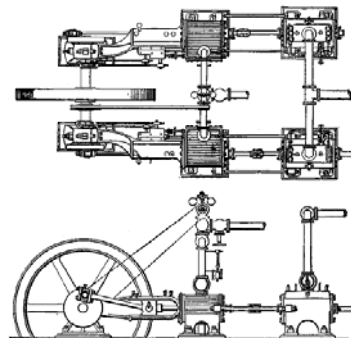
## Un poco de Historia...

AIR COMPRESSOR—  
Patern of the "Ingersoll-Sergeant Drill  
Co." Operated by a Pelton wheel.  
Vertical section



Año 1899?

DUPLEX STEAM ACTUATED AIR  
COMPRESSOR—  
"Ingersoll-Sergeant" model. The air cylinders  
are tandem to each steam cylinder with  
steam and air governors



## Un poco de Historia...



Compresor de Pistón Accionado por Máquina de Vapor (NEA 1935)

Los motores neumáticos también impulsaron el desarrollo de los compresores: Un motor neumático o motor de aire comprimido es un tipo de máquina que puede realizar trabajo mecánico expandiendo aire comprimido



El aeroplano de Victor Tatin (1879) usaba un motor de aire comprimido



El primer submarino propulsado mecánicamente utilizaba, the 1863 Plongeur, usaba una máquina de aire comprimido Musée de la Marine (Rochefort).

## Un poco de Historia... en los Turbo

<1689	Primeras Tubomáquinas	Bombas, Sopladores y Ventiladores
1689	Denis Papin	Origen del compresor centrífugo
1754	Leonhard Euler	Ecuación Fundamental de las Turbomáquinas
1791	John Barber	Primera patente de Turbina a Gas
1899	Dr. A. C. E. Rateau	Primer compresor centrífugo práctico
1927	Aurel Boleslav Stodola	Se define el factor de deslizamiento o factor de disminución de trabajo
1928	Adolf Busemann	Deriva el factor de deslizamiento
1937	Frank Whittle	Primera Turbina a gas usando un compresor centrífugo
>1970	Modern turbomachines	3D-DFC (Dinámica de Fluidos Computacional) Bombas para naves espaciales, Bombas para corazón, compresores de alta potencia

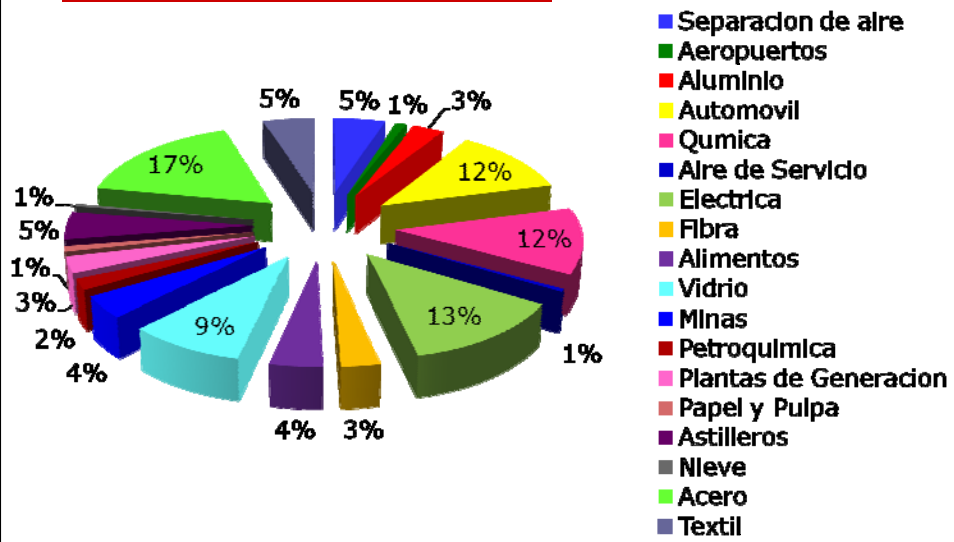


En los últimos 100 años, grandes investigadores aplicados:

Stodola (1903, 1927–1945),  
Pfleiderer (1952),  
Hawthorne (1964),  
Shepard (1956),  
Lakshminarayana (1996),  
Japikse (1997),

Las mejoras en los compresores centrífugos no han sido alcanzadas con grandes descubrimientos. Las mejoras han sido logradas a través de la comprensión y la combinación de los avances en diferentes áreas del conocimiento

# Aplicaciones



# Industria del Automóvil



## Metalurgia

---



## Farmacia y Alimentos

---



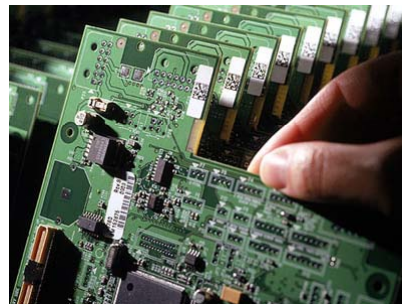
## Vidrio

---



## Electrónica

---





## Textil

---



## Astilleros

---



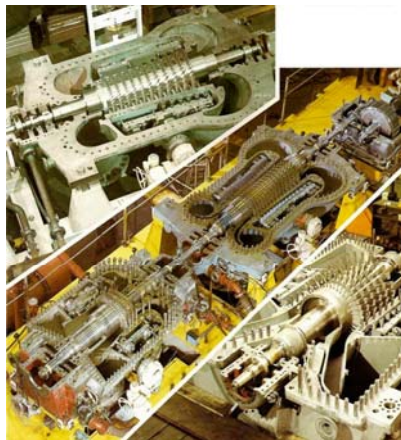
## Petroquímica

---

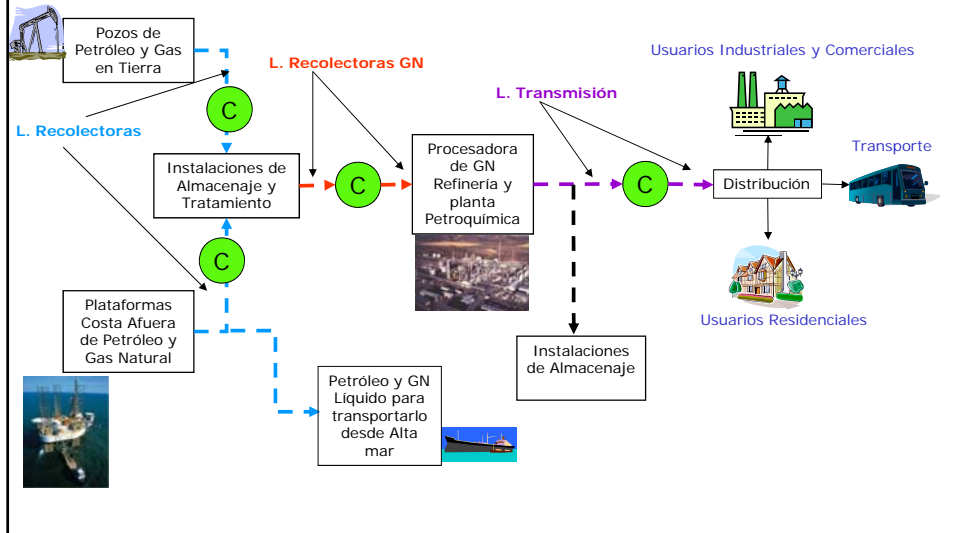


## Generación Eléctrica y Propulsión

---

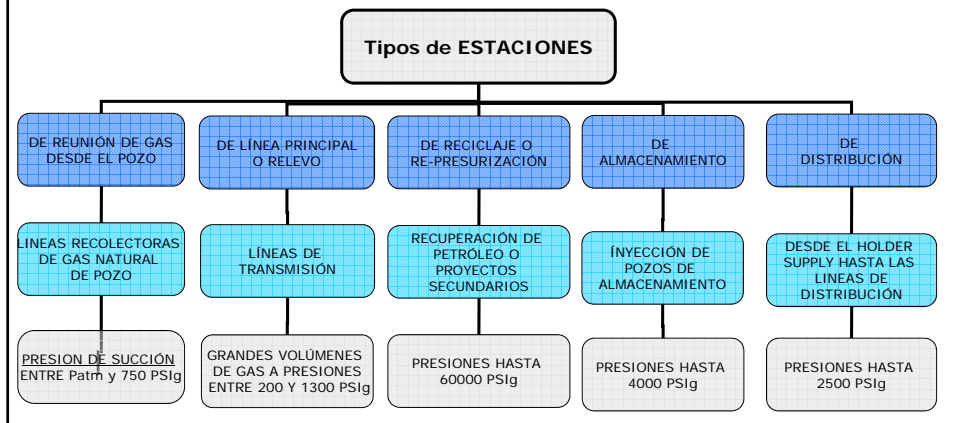


# Estaciones de Compresión INDUSTRIA PETROLERA

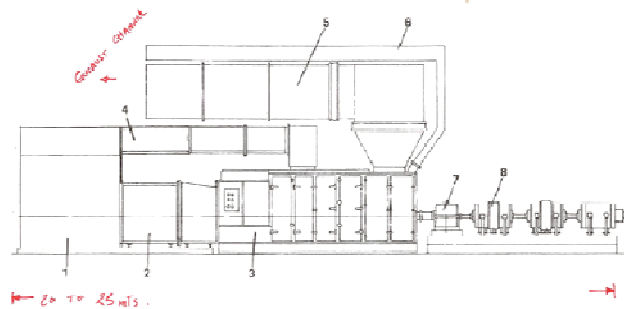


# Aplicaciones. Estaciones de Compresión en la Industria del Gas

**Compresores** → Presión es insuficiente Para llevar el Gas a su destino



## Tren de compresión Lay-out ACCIONAMIENTO POR TAG



- |                                 |                                  |
|---------------------------------|----------------------------------|
| (1) Inlet filter                | (5) Outlet silencer              |
| (2) Inlet silencer              | (6) Outlet enclosure ventilation |
| (3) GT enclosure                | (7) Gear                         |
| (4) Inlet enclosure ventilation | (8) Compressor train             |

## Selección de Compresores REQUERIMIENTOS

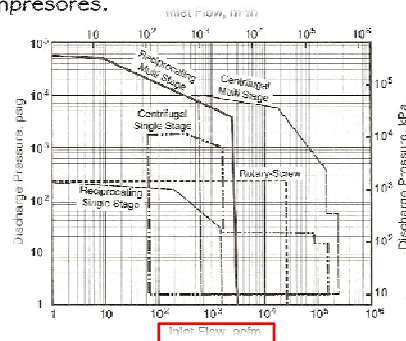
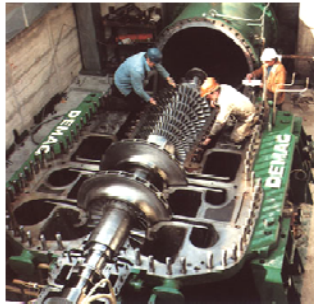
### □ General

- Se deben determinar las condiciones del proceso en cuestión, tales como:
  - composición del gas
  - flujo
  - temperatura y presión de entrada
  - presión de salida
- Establecer los elementos anteriores es una parte importante del desarrollo del balance de masa y energía.
- Si existen condiciones de operación alternativas (arranques/paradas) debe ser definido ya que puede afectar la selección y/o el diseño del compresor.

## Selección de Compresores REQUERIMIENTOS

### Flujo volumétrico

- El flujo volumétrico es uno de los **principales factores** en la selección del compresor.
  - Si se requieren múltiples etapas de compresión, algunos servicios pueden ser mejor desempeñados por la combinación de distintos tipos de compresores.



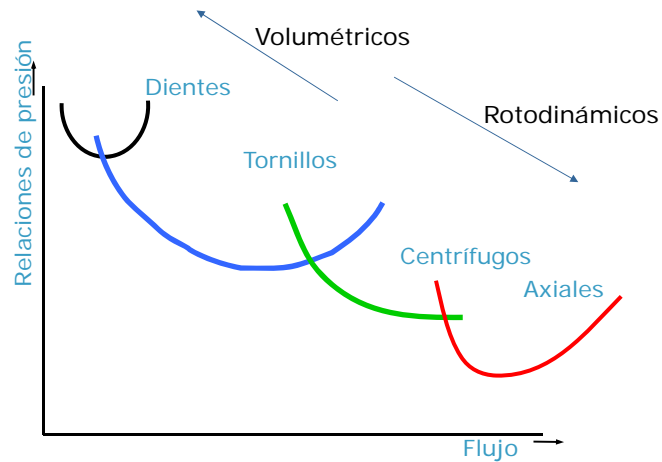
## Selección de Compresores REQUERIMIENTOS

### Presión

- Factor de gran importancia en la selección del tipo de compresor.
- Se debe establecer:
  - Presión en la Succión
  - Presión en la Descarga
- La presión de succión y descarga deben ser establecidas en la hoja de datos → deben ser los límites de entrada y salida del paquete de compresión
  - El fabricante deberá considerar las pérdidas de presión en amortiguadores de pulsaciones, interenfriadores, separadores de condensados interetapas (*knock-out drums*), tuberías, filtros, etc.

# Selección de Compresores

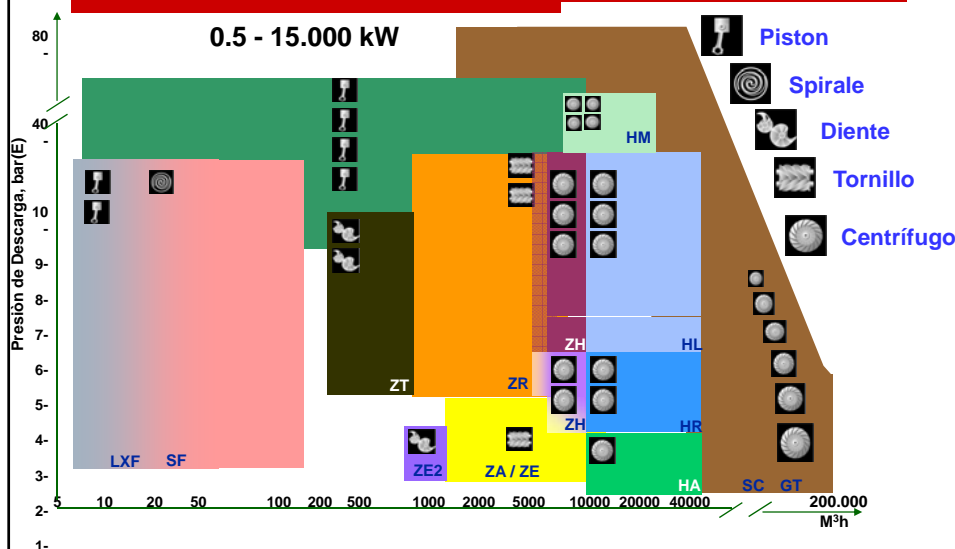
Otros diagramas que nos pueden dar ideas



# Selección de Compresores



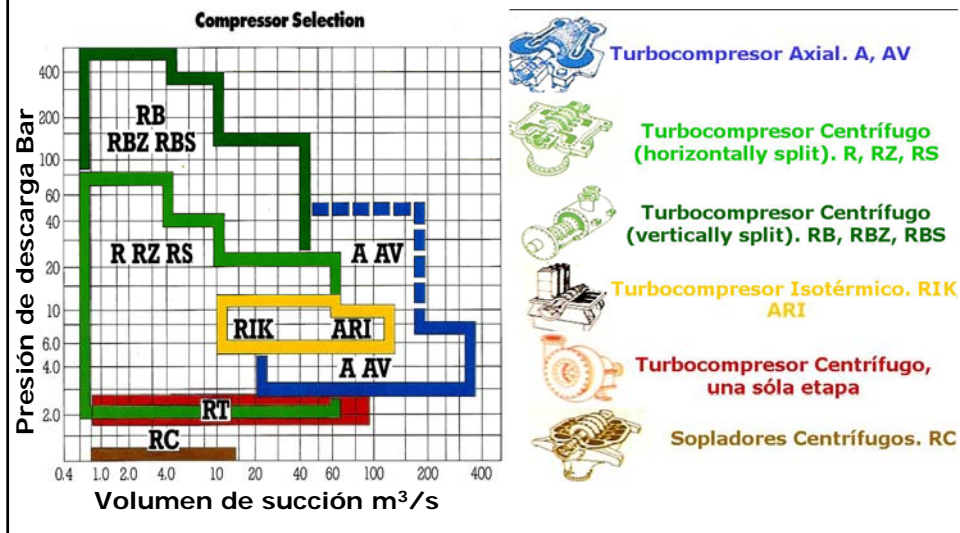
## DIAGRAMAS DE SELECCIÓN



# Selección de Compresores

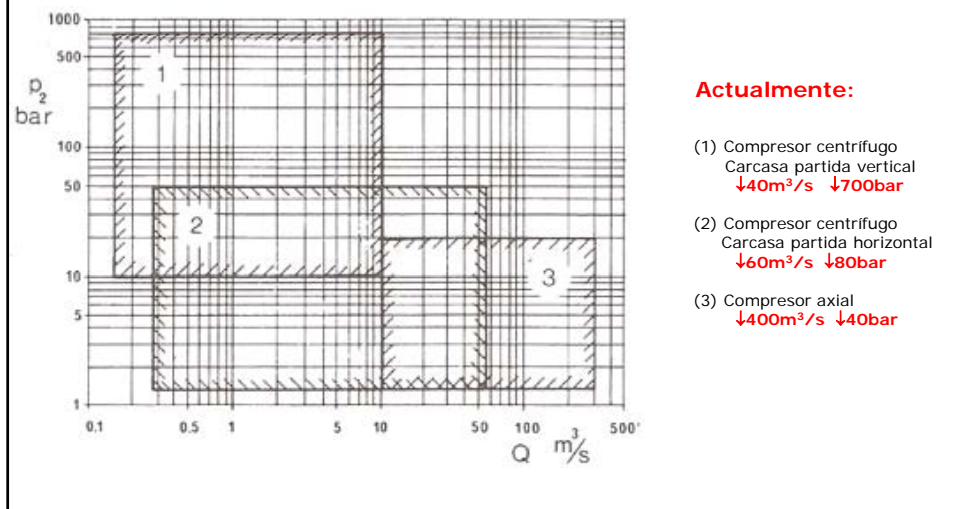
## DIAGRAMAS DE SELECCIÓN

**SULZER**

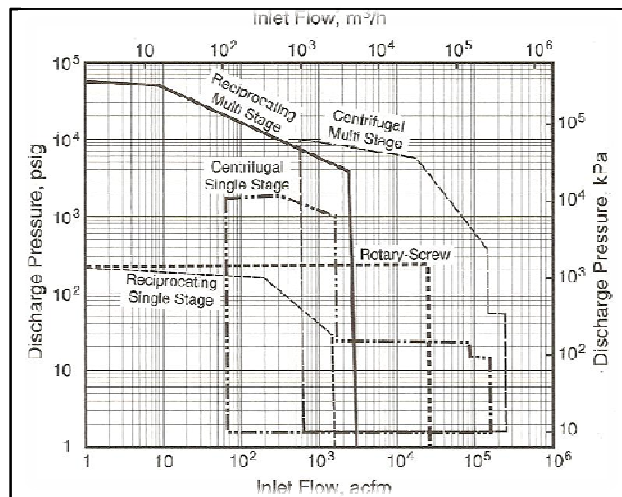


# Selección de Compresores

## DIAGRAMAS DE SELECCIÓN



## Rango General de Aplicación de Compresores



## Guía comparativa para selección de Compresores

Compressor Type	Reliability	Initial Cost	Installation Cost	Efficiency	Maintenance Cost	Weight/Space	Run Length	Ease Movement	Remove Adaptability	Adaptability to Change of Conditions
Low Pressure Screw or Lobe	E	E	E	G	E	E	E	E	E	G
Low Pressure Sliding Vane	G-P	E	E	G	F	E	F	E	E	G
H.S. Recip. Separable	G	E	E	G	G	E	G	E	G	E
L.S. Recip. Separable	E	G-F	G-F	E	E	F	G	P	G	E
Integral Recip Compressor	E	G-P	G-P	E	E	F	E	G-P	G	E
Centrifugal	E	E-F	E	E-G	E	E	E	G-P	E	F-P

E: Excellent; G: Good; F: Fair; P: Poor



## Fabricantes de Compresores

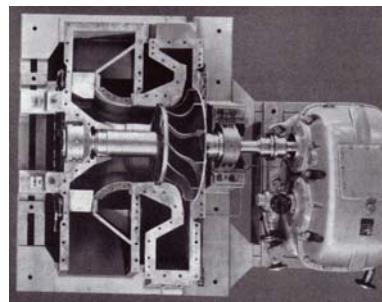
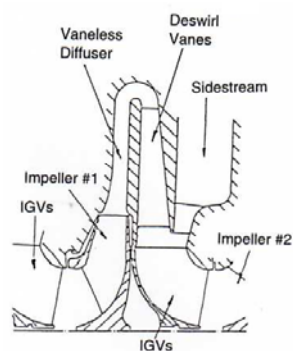
- Siemens
- Atlas-Copco
- Sulzer
- Gardner-Denver
- Man-Turbo
- Howden
- York Refrigeration & Gas Compression
- Worthington
- Quincy
- Ingersol-Rand
- Sullair

## Compresores en Procesos Industriales

- Los más usados en procesos industriales.



Soplador alta presión

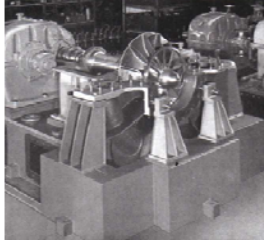


Compresores centrífugos

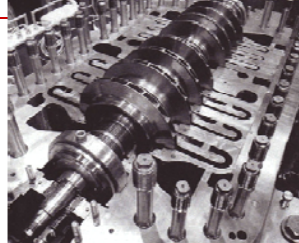
*Componentes principales de una etapa radial.*

# Compresores en Procesos Industriales

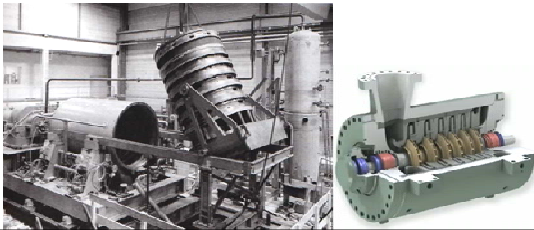
Compresor Centrifugo



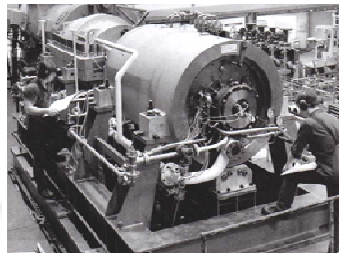
Compresor Centrifugo 8 etapas "back-to-back" refrigeración amoniaco



Compresor de barril forjado – Altas presiones

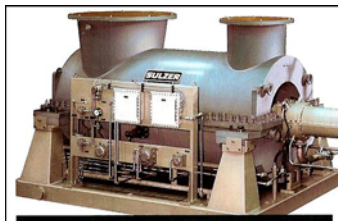


Compresor carcasa partida + barril forjado gas lift

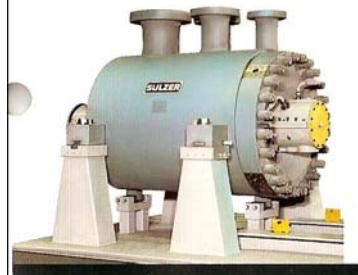


# Tipo de compresores

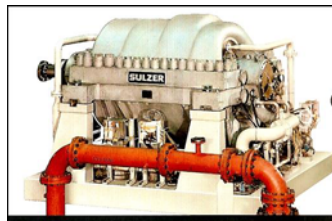
Axial



Tipo barril

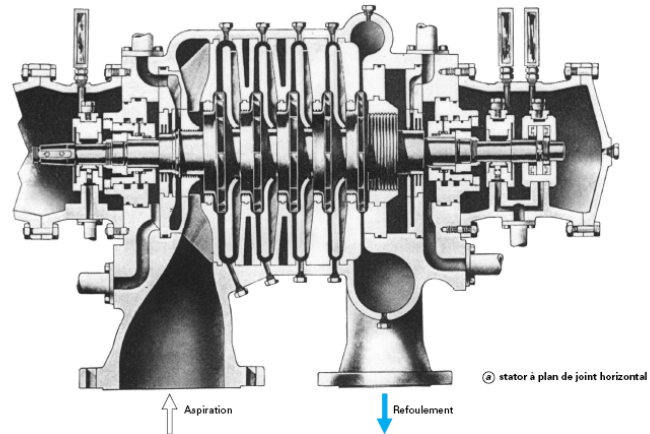


Centrifugo, división horizontal



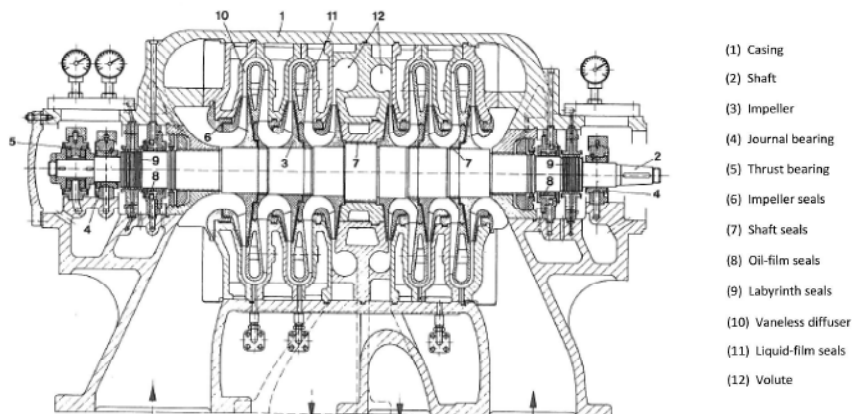
# Tipo de compresores

## De División Horizontal o Carcaza Partida

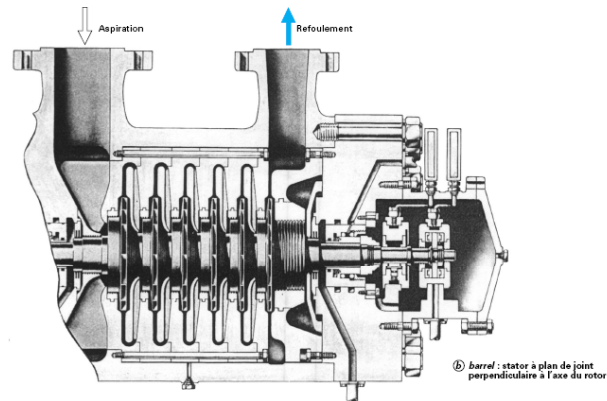


# Corte esquemático CC

## De División Horizontal o Carcaza Partida "back to back"

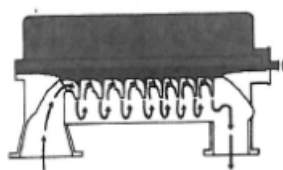


## Tipo de compresores

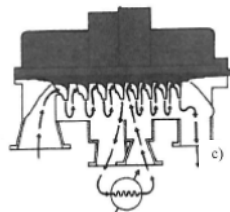


Tipo Barril

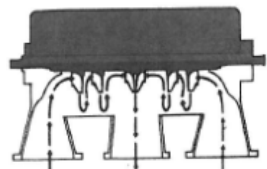
## Arreglos de Flujo Comunes



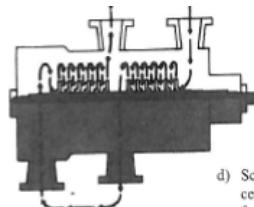
a) Schematic of a straight-through centrifugal compressor.



c) Schematic of a single intercooled centrifugal compressor. This arrangement is actually two compressors in one casing.



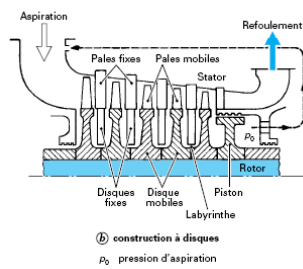
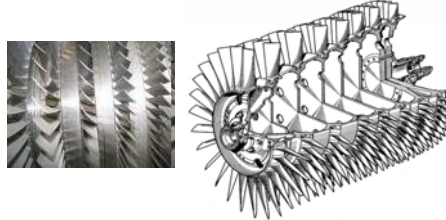
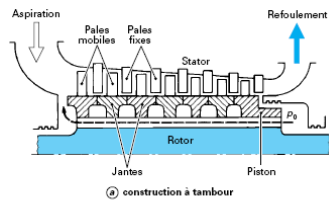
b) Schematic of a double-flow centrifugal compressor. This approach doubles the capacity.



d) Schematic of a back-to-back centrifugal compressor. The thrust from two rotor halves oppose each other.

# Tipo de compresores

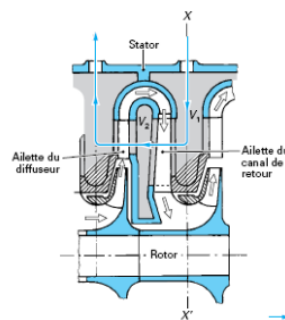
## Compresores Axiales



# Tipos de Compresores



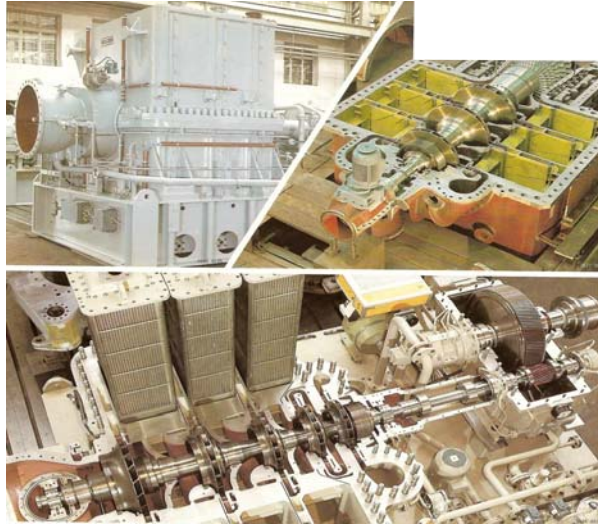
## Turbocompresores isotérmicos



## Compresor Isotérmico

---

- ▣ Bajo consumo de potencia
- ▣ El compresor que menos requiere espacio
- ▣ Simple mantenimiento



## Configuración de Montaje

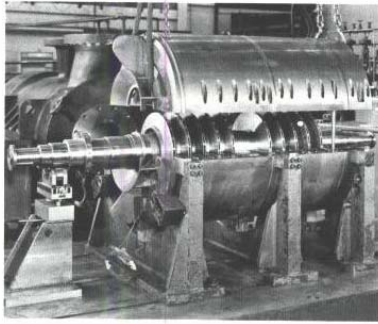
---

De carcasa partida

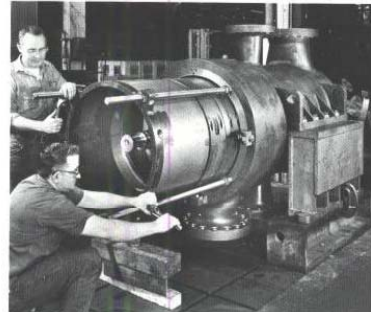


## Montaje de Compresores

### □ Tipos de Carcasa:

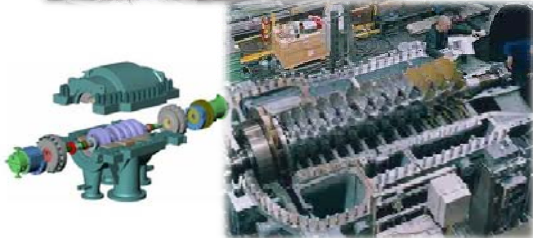
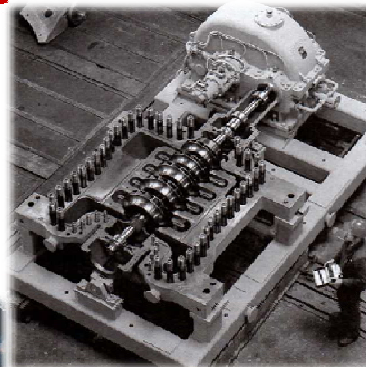
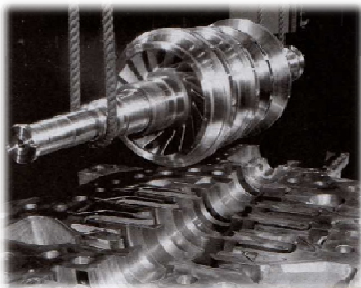


Horizontally  
Split Casing



Vertically  
Split Casing

## Montaje de Compresores

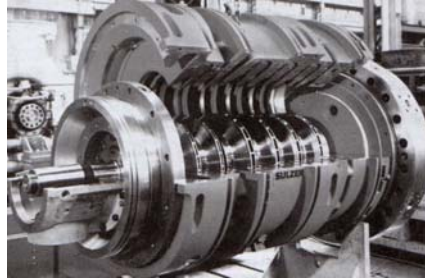


Horizontally Split Casing

## Montaje de Compresores

---

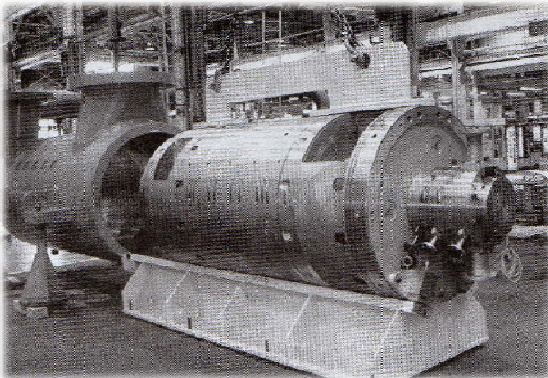
□ Tipos de Carcasa:



Tipo Barril - Vertically Split Casing

## Montaje de Compresores

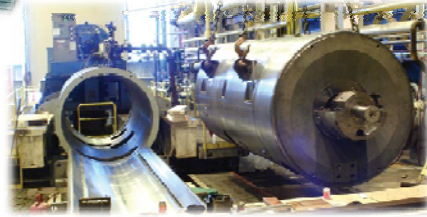
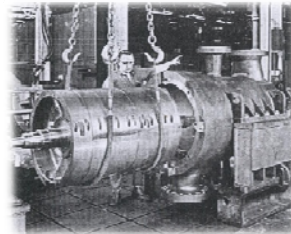
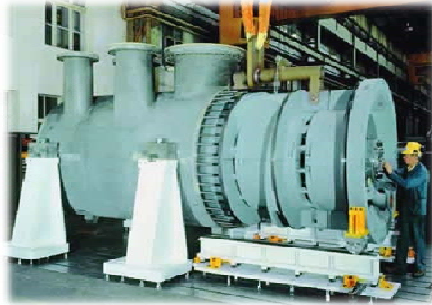
---



Tipo Barril - Vertically Split Casing



## Montaje de Compresores

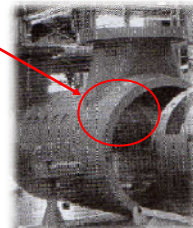
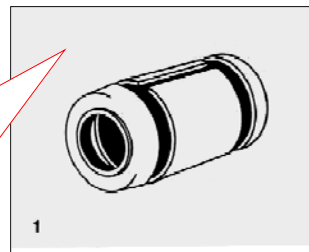


Tipo Barril - Vertically Split Casing

## Fabricación



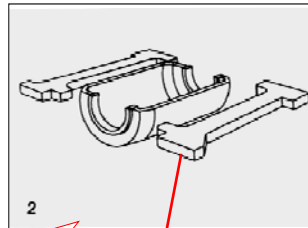
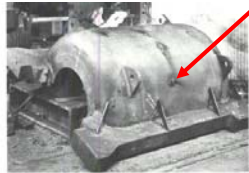
La sección central, una hoja cilíndrica de acero roleado, es unida mediante soldadura a dos "cabezas".



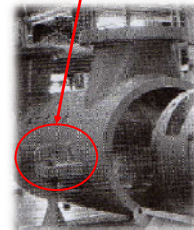
## Fabricación



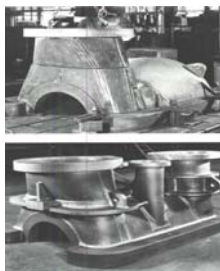
El ensamblaje es cortado de modo longitudinal en dos mitades iguales, para luego soldar un par de bridas de cada lado.



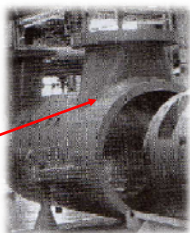
2



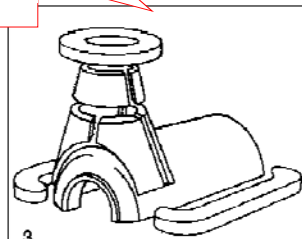
## Fabricación



Hoyos son fabricados en la carcasa y secciones fabricadas son soldadas para formar la succión, descarga y bridas de flujo inter-etapa. Después que la soldadura es completada, se eliminan posibles puntos de concentración esfuerzos y se procede al maquinado.



Soldadura



3

# Fabricación

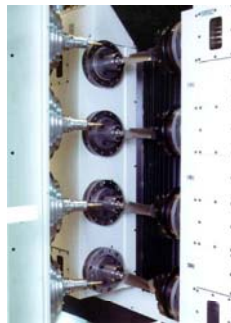
---

Enumeración  
de los álabes



# Fabricación

---



## Fabricación

---



Mecanizado  
del rotor

## Fabricación

---



Balanceo



# Fabricación

---



Acabados

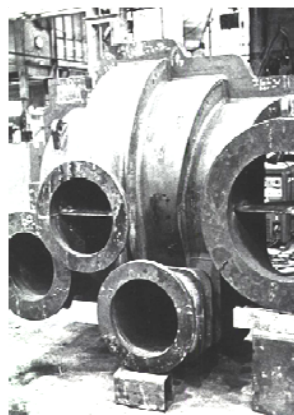
# Fabricación

---

## □ Ejemplo de Construcción:



Defectos tales como porosidad, sucios de colada, huecos de soplado pueden ser difíciles de detectar hasta las fases finales de maquinado con consecuencias fatales en el proceso



Los Fabricantes han desarrollado precisas técnicas de diseño en ingeniería, a fin de solventar problemas de esfuerzos y deflexión en formas complejas; conocimientos en metalurgia para enfrentar exigencias en fatiga y temperaturas; procesos de soldadura para crear estructuras exitosas y comerciales.

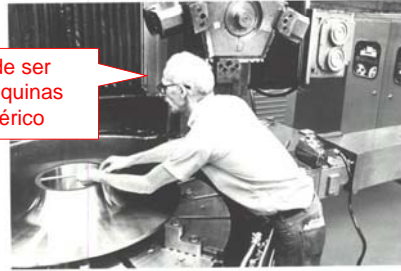
# Fabricación

## □ El Rotor



Después de que los álabes son soldados al soporte, el ensamblaje es preparado para la bóveda.

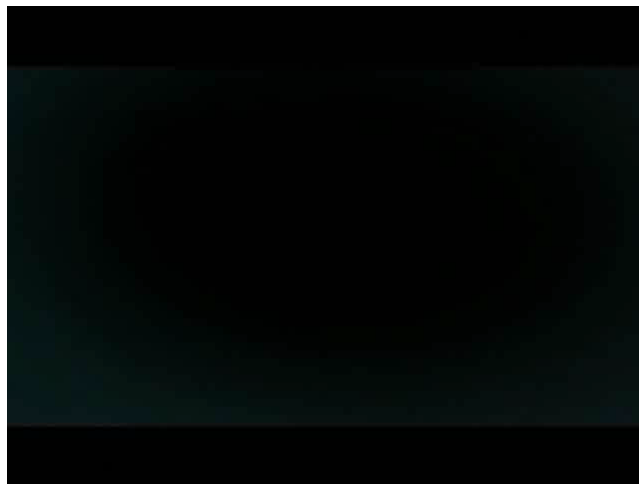
La bóveda puede ser realizada con máquinas de control numérico



El rodete soldado de forma continua (unión entre los álabes, bóveda y plataforma),.

# Fabricación

Engineering PLM-Product Lifecycle Management Siemens



## PRINCIPALES COMPONENTES

- Componentes:
  - Rotor
  - Difusor
  - Cubierta del Compresor (Carcasa)
  - Caja de Engranajes
  - Cojinetes
  - Inter-Enfriadores
  - Separadores de Condensado

## COMPRESORES CENTRIFUGOS

- Componentes:

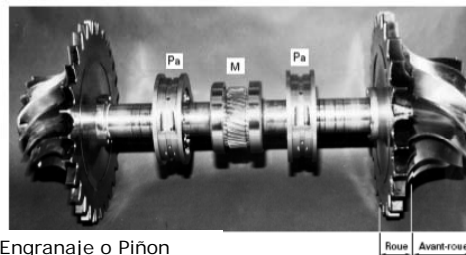
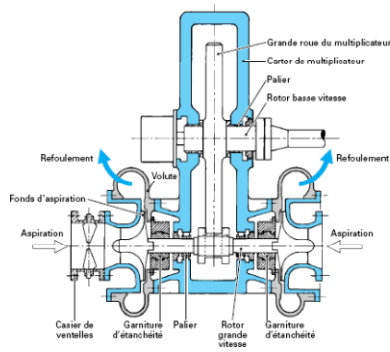
- Rotor

Elemento funcional primario, el cual transfiere energía desde el elemento motriz hacia el fluido.



F1 Boveda  
F2 Cubo

# Compresores Centrífugos



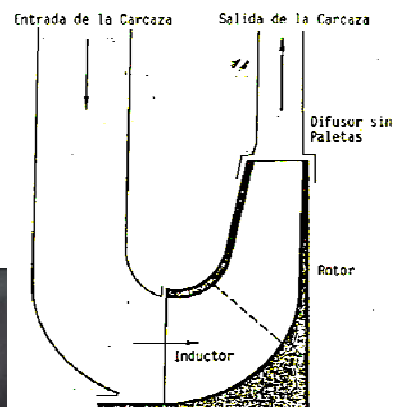
M Engranaje o Piñon  
Pa Cojinetes

## COMPRESORES CENTRIFUGOS

### Componentes:

#### ➤ Difusor

El cual convierte la energía cinética en entalpía. Constituye el segundo elemento vital en un compresor





## COMPRESORES CENTRIFUGOS

---

### □ Componentes:

#### ➤ Carcasa

Constituye la parte externa del compresor que envuelve el rotor y el difusor.



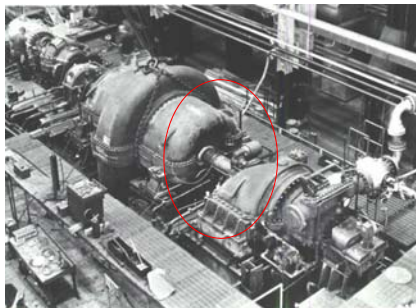
## COMPRESORES CENTRIFUGOS

---

### □ Componentes:

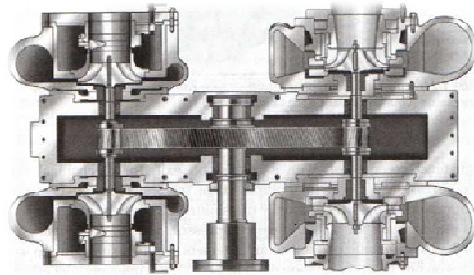
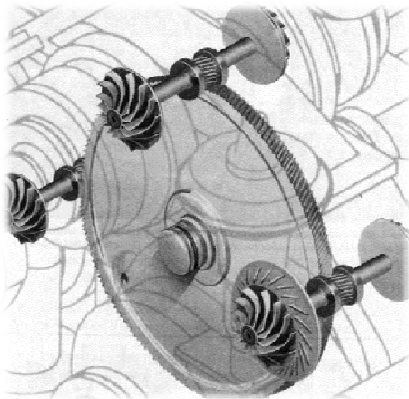
#### ➤ Caja de Engranajes

Se compone de los siguientes componentes mecánicos: engranajes, ejes, sellos y cojinetes. Puede estar dividida horizontal o verticalmente.



## COMPRESORES CENTRIFUGOS

### ➤ Caja de Engranajes



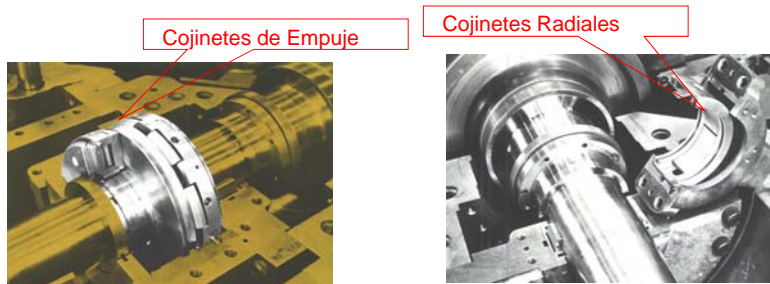
No solo usadas para relaciones específicas de velocidad, también son usadas para acomodar varias etapas de manera compacta.

## COMPRESORES CENTRIFUGOS

### □ Componentes:

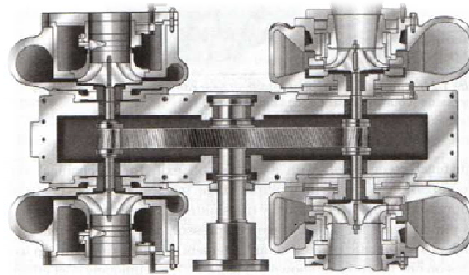
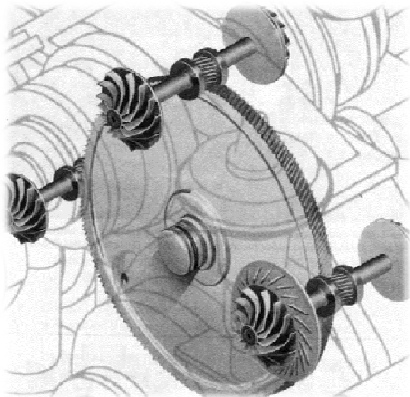
#### ➤ Cojinetes

Proveen el soporte y posicionamiento adecuado a la parte rotativa dentro de la carcasa.



## COMPRESORES CENTRIFUGOS

### ➤ Caja de Engranajes



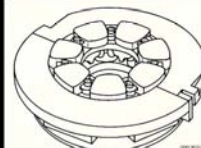
No solo usadas para relaciones específicas de velocidad, también son usadas para acomodar varias etapas de manera compacta.



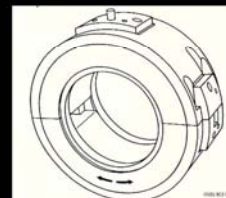
### Rodamientos



Δ Fig. 20 Solid quill-shaft coupling.



Δ Fig. 21 Tilting pad self-leveling or self-equalizing thrust bearing with individual oil injection for each pad for flexible shafts. For stiff shafts, such as gearbox shafts, self-leveling pad support is not required.



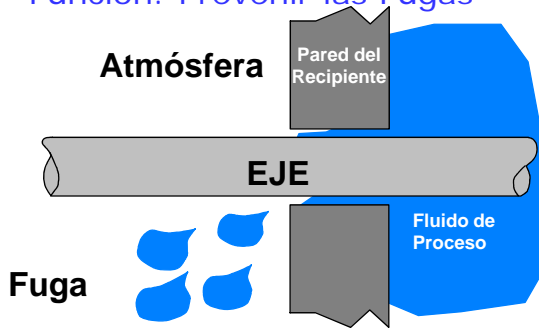
Δ Fig. 22 Two-lobe radial bearing, type R 2F, for heavy rotors and speeds normally below 7000 rpm.



Δ Fig. 23 Four-tilting-pad radial bearing, type R 4K, for high speeds and normally used in barrel compressors.

# Sellos

Función: Prevenir las Fugas



Características deseadas en un sello:

- Larga vida
- Fácil mantenimiento
- Bajo costo

Aplicación

Tipo de sello	Presión aproximada, psig
Laberinto	15
Anillo de carbón	100
Contacto mecánico	500
Película de aceite	3 000 0 mayor

## COMPRESORES CENTRIFUGOS

### ➤ Sellos

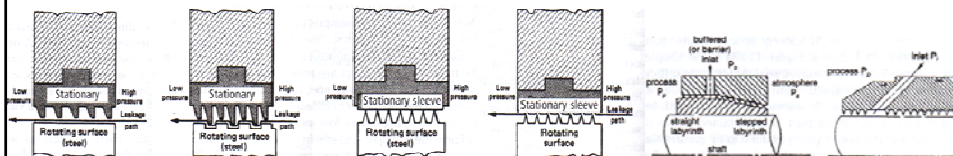
Componentes importantes y críticos en especial en equipos de alta presión.

➤ **Sellos Laberínticos:** Dispositivo de sellado simple. Usado en aplicaciones dinámicas y estáticas. En aplicaciones dinámicas se usa en sellos inter etapas y sellos finales.

Estos sellos son confiables, flexibles, resisten el sucio, consumen poca energía, se puede hacer en muchos materiales. Efecto mínimo en la dinámica del rotor.

Entre sus desventajas se tienen las altas fugas, pérdidas en la eficiencia del equipo, bloqueo de las cavidades.

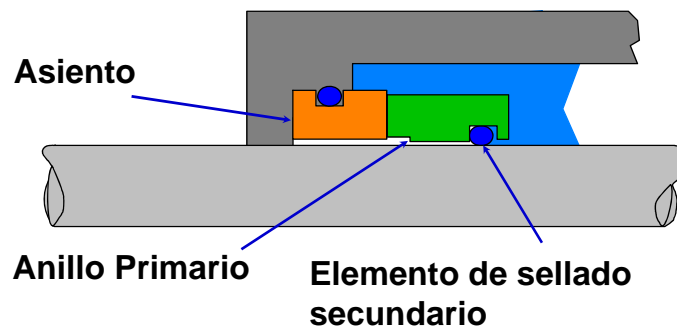
Se recomienda para  $P_{max} < 15$  psi



## El Sello Mecánico más Sencillo

---

- ❑ Carga Hidrostática
- ❑ Elementos de sellado secundarios
- ❑ Piezas reemplazables



## Simplemente un sello mecánico es:

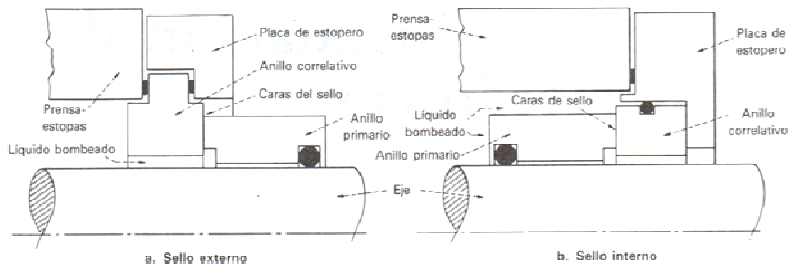
---

1. Un elemento de sellado primario desgastable y estacionario.
2. Un elemento de sellado primario desgastable y rotativo.
3. Elementos de sellado secundario.
4. Uno o varios elementos de empuje para mantener los elementos de sellado primario 1 y 2 en contacto permanente uno contra el otro, y por último,
5. Componentes auxiliares para completar el sello mecánico.
6. Hay variantes de estos sellos. Por ejemplo, si el gas de proceso contiene un componente "agrio" como el  $H_2S$ , se puede utilizar un gas "dulce" o neutro como el nitrógeno, para amortiguar la zona entre el sello de contacto mecánico o de película de aceite y el gas del proceso

## COMPRESORES CENTRIFUGOS

### ➤ Sellos

➤ **Sellos Mecánicos:** previenen de manera mecánica que escapen todo tipo de fluidos mediante 2 superficies de sellamiento, una estática y otra móvil. Este tipo de sello presenta la ventaja de producir un sello mas positivo, elimina ajustes manuales y solo se reemplaza el sello no el eje o la camisa del eje

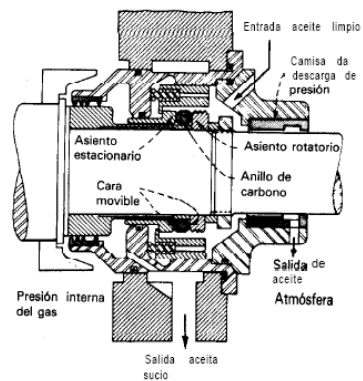


## COMPRESORES CENTRIFUGOS

### ➤ Sellos

➤ **Mecánico de contacto:**  
Película de aceite. Minimiza el paso de aceite al gas  
Controles complicados, bombas, enfriador y filtros de aceite.

Se recomienda para  
 $P_{max} < 500 \text{psi}$



Mecánico (de contacto)

Fue

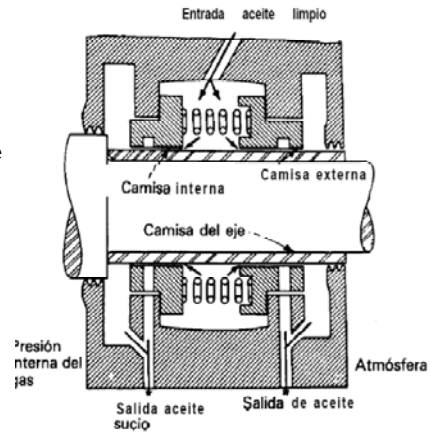
## COMPRESORES CENTRIFUGOS

### Sellos

➤ **Película de Aceite:** Posee holguras reducidas. Se necesita una diferencia precisa entre la presión interna del gas y el aceite para evitar fugas. Recomendado para gases tóxicos.

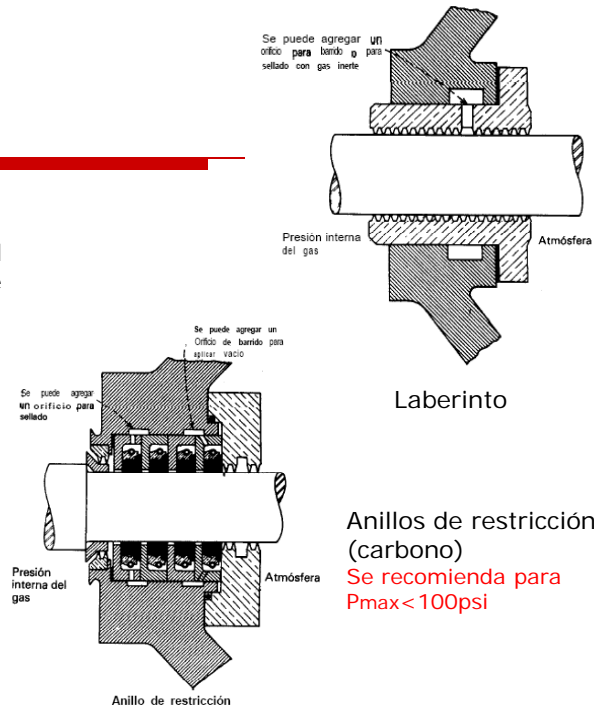
Controles complicados, bombas, enfriador y filtros de aceite.

Se recomienda para  $P_{max} < 3000 \text{psi}$  ó mayor



## Sellos

Hay variantes de estos sellos. Por ejemplo, si el gas de proceso contiene un componente "agrio" como el  $\text{H}_2\text{S}$



## COMPRESORES CENTRIFUGOS

---

A la hora de considerar los sellos mecánicos se deben tener presente las siguientes consideraciones:

- El Producto: las propiedades físicas y químicas del producto. Además de considerar la lubricación, abrasión y la corrosión producida por el mismo.
- La presión: la presión de trabajo determina el tipo de sello a usar.
- La Temperatura: la temperatura de trabajo determina el tipo de sello a usar.
- Arreglo del sello: especial cuidado en sellos dobles cara a cara, y el ambiente de trabajo. Considerar normas API

## COMPRESORES CENTRIFUGOS

---

### □ Componentes:

#### ➤ Inter-Enfriadores

Reducen la temperatura del fluido de proceso mediante la transferencia de calor desde este hacia un fluido de enfriamiento

#### ➤ Separadores

Usados corriente abajo de los Inter-Enfriadores, impiden que el condensado pase a la siguiente etapa del impulsor y cause erosión.



## ANÁLISIS COMPARATIVO

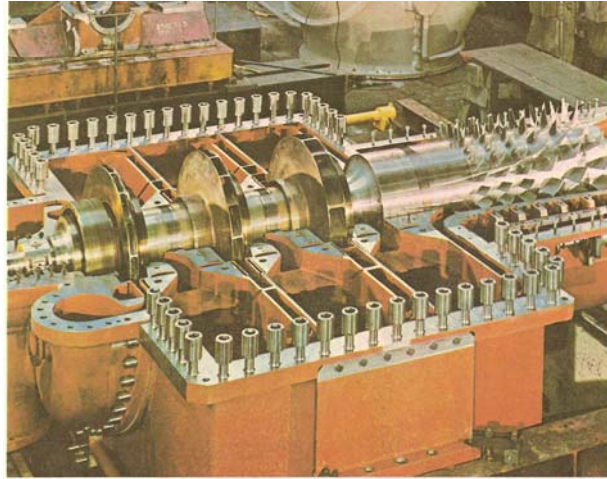


Figura 4.5 Turbocompresor axial-radial, tipo ARI, para un gasto de 50 m<sup>3</sup>/s, una relación de presiones  $\pi = 6.4$  y una potencia de 14,020 kw con 6 escalonamientos axiales y 3 centrifugos (cortesía SULZER).

## Ventajas de los Compresores Rotodinámicos sobre los de Pistón

### Rotodinámicos frente a los Volumétricos

- ✔ Construcción compacta
- ✔ Mayor Seguridad en el funcionamiento
- ✔ Mantenimiento "Reducido"
- ✔ Desgastes de partes "despreciables"
- ✔ Fácil instalación y operación
- ✔ Funcionamiento con grado mínimo de vibraciones
- ✔ Fácil Regulación
- ✔ Débil consumo al arranque
- ✔ Poca contaminación de aceite lubricante
- ✔ Mayores gastos volumétricos



## Ventajas de los Compresores Centrífgos sobre los Axiales

---

### Ventajas del Centrífgo frente al Axial

- ✔ Mayor robustez. Mayor seguridad y relativos bajos costos de fabricación
- ✔ Menor número de etapas para la misma Rc
- ✔ Mayor facilidad para la instalación de interenfriadores
- ✔ Mayor estabilidad en su funcionamiento (Bombeo)
- ✔ Mayores presiones de trabajo
- ✔ Rendimiento menos variante con el punto de funcionamiento



## Ventajas de los Compresores Axiales sobre los Centrífgos

---

### Ventajas del Axial frente al Centrífgo

- ✔ Mayores relaciones de presión obtenibles mediante múltiples etapas de compresión
- ✔ Una menor área frontal y en consecuencia menor resistencia al avance
- ✔ Menores pérdidas de energía debido a que no existen cambios considerables en la dirección del flujo de aire
- ✔ Mayor rendimiento en el punto de diseño
- ✔ Menores tamaños para la misma potencia
- ✔ Mayores velocidades de giro
- ✔ Mayores flujos máscicos



## Ventajas de los Compresores Volumétricos sobre los Rotodinámicos

---

### Volumétricos frente a los Rotodinámicos

- ✔ Mayores presiones de trabajo
- ✔ Rendimiento menos variante con el punto de funcionamiento
- ✔ Pueden alcanzar relaciones de presiones más elevadas
- ✔ Pueden trabajar con presiones de succiones inferiores a la atmosférica
- ✔ Algunos diseños especiales son utilizados en procesos especializados



## Consideraciones Importantes

---

Los compresores normalmente son utilizados en procesos industriales, después de su selección basada en su capacidad y la potencia requerida se deben tomar en cuenta diferentes factores para poder obtener el máximo desempeño de ellos.

En primer lugar se tiene la **DISPONIBILIDAD** y la **CONFIABILIDAD** en muchos casos estos factores son mas importantes que la eficiencia.

**Requerimientos de potencia:** depende de las circunstancias.

**Espacio disponible:** dependiendo de las condiciones se pueden lograr diferentes arreglos de equipos

**Fundaciones:** dependiendo del equipo seleccionado se debe realizar un correcto dimensionamiento de las fundaciones para prevenir vibraciones y desalineaciones que afecten el funcionamiento del equipo

## Consideraciones Importantes

---

**Costos:** el costo en las plantas es principalmente debido a la energía requerida, mientras mas eficiente el equipo mayor será el ahorro.

En una planta compresora el costo se divide de la siguiente manera: compresor 35%, Sistema de Propulsión 30%, Sistemas Mecánicos 10%, Sistemas Eléctricos 12%, Estructura 10%, Controles 3%.

A nivel global de funcionamientos: Costo inicial 12%, Repuestos 18% y combustible 70%.

**Considerar sistemas multietapas:** Se reduce el consumo de potencia de un 10 a 15%

**Tipo de Gas:** las características físicas y químicas del gas tienen mucha influencia en la selección del compresor.

**Tipo de Propulsión:**

**Turbina a Vapor**

**Turbina a Gas**

**Motor Eléctrico**

Su selección depende de la locación de la planta, tipo de proceso y magnitud del compresor.

## Consideraciones Importantes

---

➤ **Turbinas a Vapor:** Ampliamente usada en industrias químicas ya que producen o necesitan vapor.

➤ **Turbinas a Gas:** empleadas en lugares remotos, bajo mantenimiento, uso variado de combustible, compactas.

➤ **Motor Eléctrico:** Aplicaciones pequeñas y ampliamente usados en sistemas de respaldo y arranque.

**Tipo de Combustible.**

**Cerramientos físico.** Depende de las condiciones de la planta, otorga facilidades de mantenimiento. Por lo general las turbinas de vapor no están en lugares cerrados.

**Ciclo de Trabajo:** es importante tomar en cuenta el ciclo de trabajo y la carga de trabajo. Comúnmente los sistemas funcionan 24x7 y no pueden ser detenidos ya que crean pérdidas sustanciales. Si se requiere trabajar en diferentes condiciones de carga se deben tomar las previsiones necesarias.

## Mantenimiento

---

El mantenimiento es una de las operaciones mas importantes que se puede realizar a un equipo ya que se mantiene el correcto funcionamiento del equipo y se prolonga la vida útil del equipo.

Los procesos de mantenimiento siempre son controversiales pues dependen de la persona que realice esta tarea. Este abarca la planeación, ejecución, inspección y revisión además de la generación de reportes de funcionamiento y costos.

Los equipos actuales están hechos para durar 30-40 años pero para esto es importante llevar un registro de mantenimiento y datos relevantes.

Es importante recordar que los gastos de mantenimiento pueden ser reducidos con el correcto uso de los equipos. Uso impropio de los mismos adelanta los servicios de mantenimiento programados y acorta la vida útil del equipo.

## Mantenimiento

---

En tiempos actuales se esta implementando una nueva filosofía de mantenimiento. Esta basado en el monitoreo total de las condiciones de trabajo y los principios de mantenimiento del mantenimiento total productivo.

**RESULTADO** → Sistema de Mantenimiento Total Productivo Basado en el Desempeño.

El sistema puede ser dividido en 5 partes:

- Mantenimiento de Pánico basado en las Paradas
- Mantenimiento Preventivo
- Mantenimiento Basado en el Desempeño
- Mantenimiento de Rendimiento Productivo
- Mantenimiento Total Productivo Basado en el Desempeño

# Procesos de Compresión

- ★ Compresión Politrópica
- ★ Compresión Adiabática Reversible
- ★ Compresión con Enfriamiento
- ★ Compresión Isotérmica
- ★ Consumo de Potencia

# Procesos de Compresión

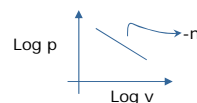
En un compresor suelen ser de tres formas:

Compresión { Politrópica sin enfriamiento  
Politrópica con enfriamiento  
Isotérmica

El proceso de compresión de referencia... Compresión Isentrópica

Proceso en gas que ocurre de forma reversible con TFC. En un Log-Log se grafica una línea recta

$$pv^n = cte$$



## Diagramas de procesos de compresión

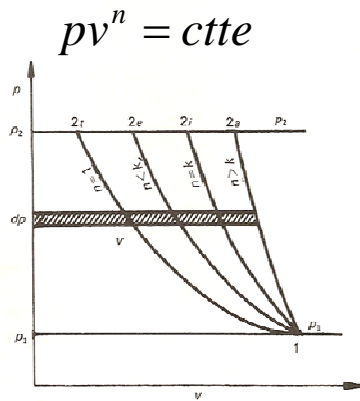


Figura 5.1 Procesos de compresión en el diagrama  $p-v$ .

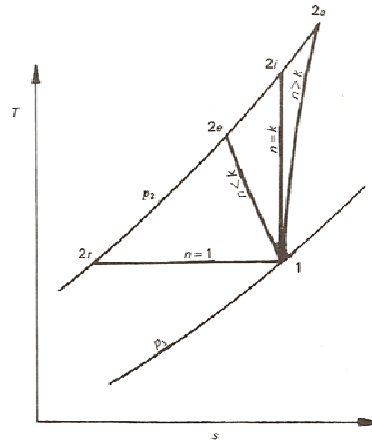


Figura 5.2 Procesos de compresión en el diagrama  $T-s$ .

$n \wedge ctte$  Pueden ser determinados experimentalmente

## Compresión Isentrópica

$$n = k \text{ ó } \gamma$$

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

Sabemos que:

$$k > 1$$

$$C_p > C_v$$

K aire = 1,4  
K gases = 1,33

$$pv^k = ctte$$

En Condiciones Normales

$$\left. \begin{array}{l} p = 1 \text{ [bar]} \\ T = 273 \text{ [k]} \end{array} \right\}$$

En Condiciones Standard

$$\left. \begin{array}{l} p = 1 \text{ [bar]} \\ T = 298 \text{ [k]} \end{array} \right\}$$

## Valores de k(T)

Gas	T °K	$c_p$ kJ/kg·K	$c_v$ kJ/kg·K	k
Aire**	273	1,004	0,717	1,400
	298	1,009	0,722	1,398
	300	1,009	0,722	1,398
	400	1,028	0,741	1,387
	500	1,047	0,760	1,378
	600	1,065	0,778	1,369
	700	1,082	0,796	1,361
	800	1,099	0,812	1,354
	900	1,115	0,828	1,347
	1 000	1,130	0,843	1,340
1 500	1,190	0,911	1,315	
2 000	1,251	0,954	1,298	
Óxido de carbono	100	0,664	0,475	1,398
	200	0,738	0,516	1,416
	300	0,846	0,627	1,388
	400	0,939	0,750	1,282
	500	1,014	0,828	1,229
	600	1,075	0,886	1,213
	700	1,126	0,937	1,202
	800	1,168	0,979	1,198
	900	1,204	1,016	1,196
	1 000	1,241	1,051	1,191
1 500	1,326	1,137	1,166	
2 000	1,371	1,182	1,160	
Hidrógeno	100	11,200	7,076	1,583
	300	13,336	9,417	1,438
	500	14,317	10,103	1,405
	700	14,806	10,362	1,398
	900	14,833	10,399	1,397
	1 100	14,856	10,422	1,395
	1 300	14,612	10,488	1,393
	1 500	14,718	10,594	1,389
	1 700	14,845	10,721	1,385
	1 900	14,992	10,868	1,379
2 100	15,033	11,009	1,346	
2 300	17,019	12,805	1,320	
Monóxido de carbono	100	1,040	0,743	1,400
	200	1,040	0,743	1,400
	300	1,041	0,744	1,399
	400	1,043	0,751	1,395
	500	1,045	0,765	1,387
	600	1,048	0,791	1,376
	700	1,114	0,817	1,364
	800	1,140	0,849	1,352
	900	1,164	0,867	1,342
	1 000	1,185	0,888	1,334
1 500	1,238	0,961	1,309	
2 000	1,285	0,998	1,298	
Nitrógeno	100	1,040	0,744	1,398
	200	1,040	0,744	1,398
	300	1,040	0,744	1,398
	400	1,045	0,749	1,395
	500	1,051	0,765	1,387
	600	1,076	0,789	1,380
	700	1,099	0,803	1,369
	800	1,123	0,827	1,358
	900	1,146	0,850	1,348
	1 000	1,168	0,872	1,339
1 500	1,245	0,949	1,312	
2 000	1,286	0,990	1,299	
Oxígeno	100	0,910	0,650	1,400
	200	0,911	0,651	1,400
	300	0,919	0,659	1,395
	400	0,942	0,682	1,382
	500	0,972	0,712	1,366
	600	1,004	0,744	1,350
	700	1,031	0,771	1,337
	800	1,055	0,796	1,327
	900	1,074	0,814	1,319
	1 000	1,091	0,831	1,313
1 500	1,148	0,903	1,294	
2 000	1,181	0,921	1,282	

Para Gas Natural, existe una correlación empírica

$$k = 1.3 - 0.31(\gamma_g - 0.55)$$

**k...** importante para el tamaño y desempeño de un compresor

## Compresión

$$-W_{teorico} = \int v \cdot dP$$

Isoentrópica

$$n = k$$

Sin enfriamiento

$$n > k \text{ ó } \gamma$$

Con enfriamiento

$$n < k \text{ ó } \gamma$$

Isotérmica

$$n = 1$$

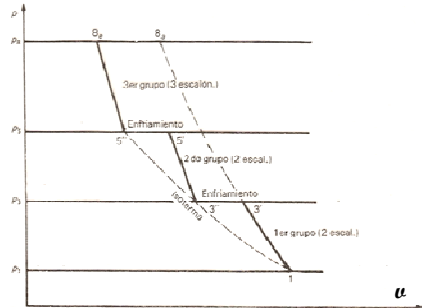
Para calcular el trabajo de compresión:

$$W = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

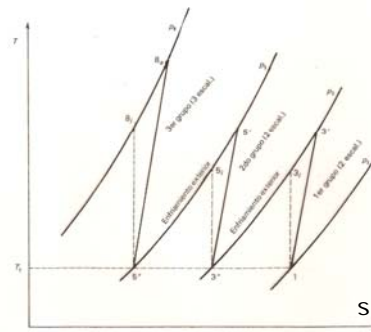
$$W = RT_1 \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right)$$



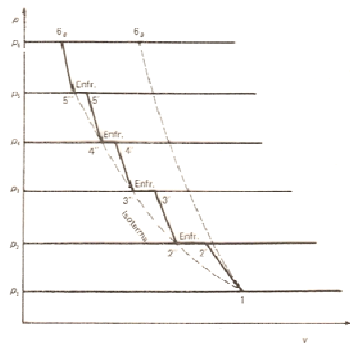
## Proceso de Compresión Isotérmica



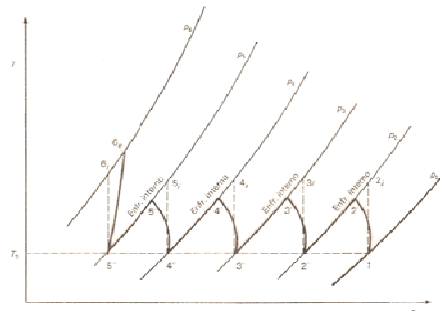
Con enfriamiento intermedio externo:



## Proceso de Compresión Isotérmica



Con enfriamiento intermedio interno:



## Potencia Requerida en Compresores

✓ La cantidad teórica de energía necesaria para comprimir una cantidad de gas dada entre unas condiciones de succión y descarga específica.

✓ La cantidad de energía real depende de la eficiencia del compresor y del tipo de accionamiento.

$$\Delta H = \int v \cdot dP = -W_{teorico}$$

## Potencia Requerida en Compresores

La ecuación general es:

$$\text{Potencia} = \frac{(\text{Masa} \cdot \text{de} \cdot \text{gas} \cdot \text{unidad} \cdot \text{tiempo}) \cdot (\Delta h_{teorica} \cdot \text{Unidad} \cdot \text{de} \cdot \text{masa})}{(\text{eficiencia})(\text{Factor de conversión} \cdot \text{de} \cdot \text{energía})}$$

Las eficiencias global de los compresores varían con el tipo de compresor, tamaño, y rendimiento.

Compresores	Eficiencia
Centrifugos	0.65-080
Reciprocantes (Altas velocidades)	0.65-075
Reciprocantes (Bajas velocidades)	0.75-085
Tomillo	0.65-075

# Potencia Requerida en Compresores

## Uso de Correlaciones de Entalpía

$$Pot_{teorica} = \dot{m}(h_{2s} - h_1)$$

### Donde:

m: flujo másico de gas

$h_{2s}$ : Entalpía isoentrópica a la salida del compresor por unidad de masa

$h_1$ : Entalpía de entrada por unidad de masa

### Procedimiento:

Paso 1: Determinar  $h_1$  y  $s_1$  de  $T_1$  y  $P_1$

Paso 2: Asumir Proceso Isoentrópico,  $s_2 = s_1$

Paso 3: De  $s_2$  y  $P_2$  Determinar  $h_{2s}$

Paso 4:  $\Delta h_s = h_{2s} - h_1$

Valores de Entropía y Entalpía son calculados de la ecuación de estado o diagramas h-s para gases

Diagrama de entropía y entalpía para gas natural (densidad relativa 0.65-0.75)

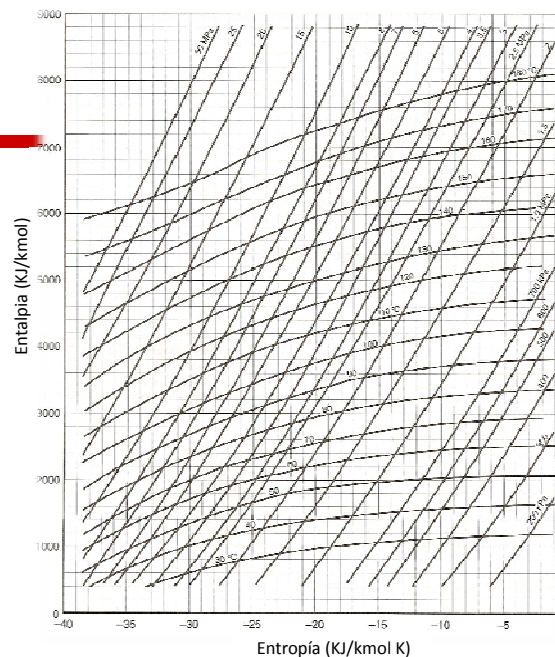
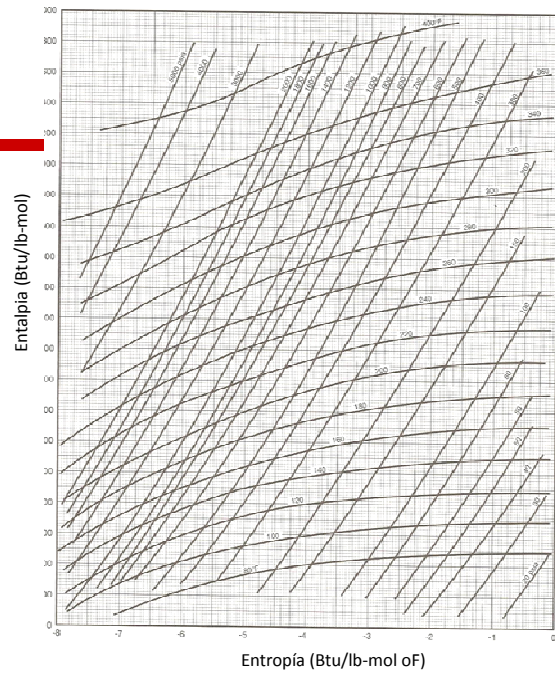


Diagrama de entropía y entalpia para gas natural (densidad relativa 0.65-0.75)



## Potencia Requerida en Compresores

### Uso del Integral PV

Para compresión **adiabática-reversible** de un **gas (real)** se puede usar la siguiente expresión:

$$Pv^k = ctte$$

$$\Delta h_s = \frac{T_1 z_{av} R}{k-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

Expresión para la variación de entalpía para un proceso isoentrópico de un gas real

Donde:

- $\Delta h_s$ : Cambio de Entalpía isoentrópica
- $T_1$ : Temperatura de Succión
- $z_{av}$ : Promedio del factor de compresibilidad  $(z_1+z_2)/2$
- $R$ : Constante del gas
- $k$ : Radio de Calores Específicos
- $P_2/P_1$ : Radio de compresión

# Potencia Requerida en Compresores

## Uso del Integral PV

Para compresión **no-adiabática reversible** de un **gas (real)** se puede usar la siguiente expresión:

$$Pv^n = cte$$

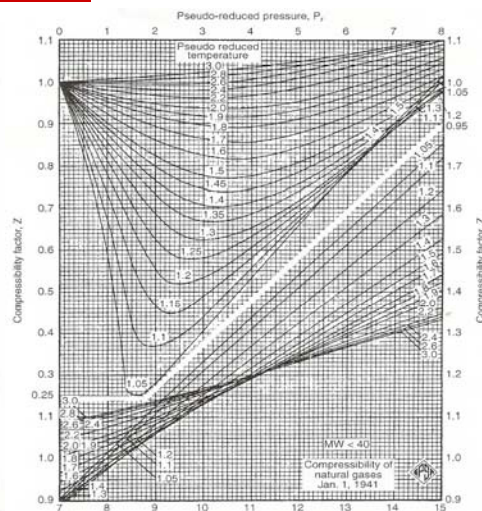
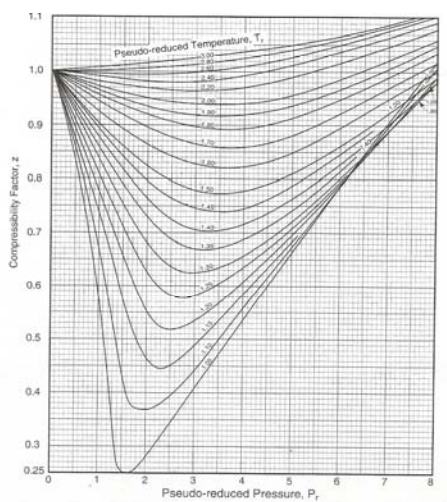
$$\Delta h_p = \frac{T_1 z_{av} R}{\frac{n-1}{n}} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Expresión para la variación de entalpía para un proceso politrópico de un gas real

Donde:

- $\Delta h_p$ : Cambio de Entalpía politrópica
- $T_1$ : Temperatura de Succión
- $z_{av}$ : Promedio del factor de compresibilidad  $(z_1+z_2)/2$
- $R$ : Constante del gas
- $n$ : Coeficiente politrópico
- $P_2/P_1$ : Radio de compresión

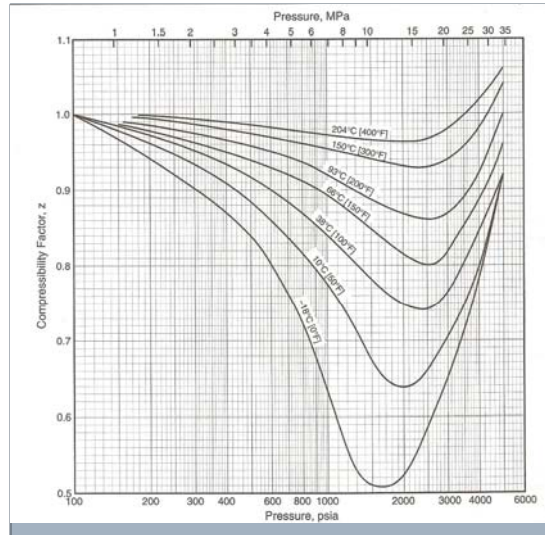
# Gráfica de Factor de Compresibilidad



# Potencia Requerida en Compresores

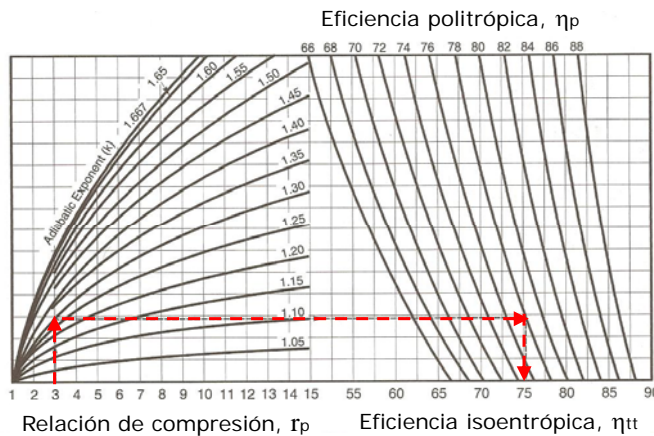
## Uso del Integral PV

Grafico de z aproximado para gas natural (densidad relativa 0.65-0.75)



# Potencia Requerida en Compresores

## Relación entre Eficiencia Isoentrópica y Eficiencia Politrópica



$$\frac{n-1}{n} = \frac{k-1}{k \cdot \eta_p}$$

$$\eta_{tt} = \frac{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1}$$

## Potencia Requerida en Compresores

Altura o Cabezal Politrópico

El término cabezal politrópico se refiere a:

$$H_p = \frac{\Delta h_p}{g} = \frac{T_1 z_{av} R}{g} \frac{n}{n-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

La potencia en el eje se puede calcular como:

$$Pot = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_p}{\eta_p \cdot \eta_m}$$

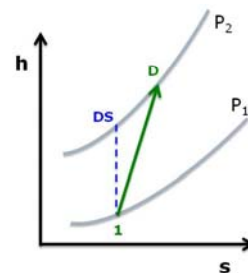
En general:  $\eta_m \approx 98\%$

**Donde:**

- $H_p$ : Cabezal politrópico
- $g$ : Gravedad

## Temperatura de Descarga del Compresor

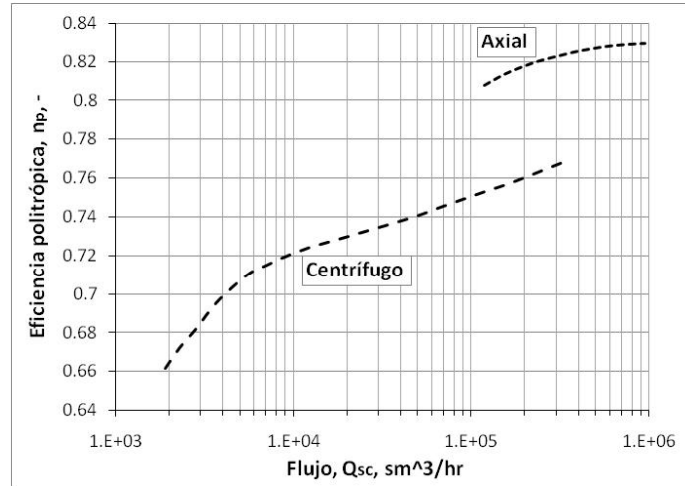
$$T_D = T_1 \left[ 1 + \frac{\left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{tt}} \right]$$



$$T_D = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k \cdot \eta_p}} = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

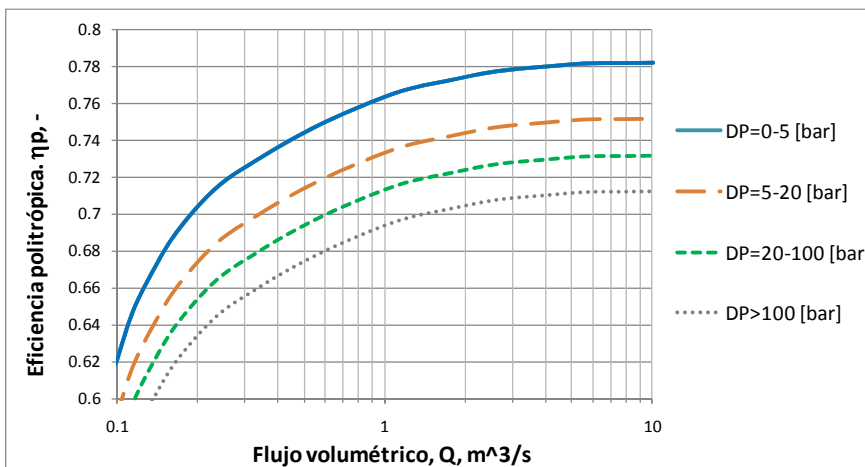
# Rendimiento politrópico, $\eta_p$

Valores Referenciales



# Rendimiento politrópico, $\eta_p$

Relaciones empíricas válidas para **Compresores Centrífugos**:





# Cálculo de un compresor

## EXAMPLE CALCULATION

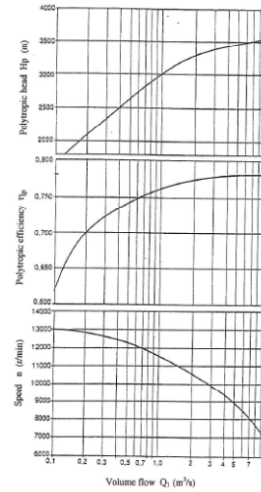
When designing the compressor the following data are given:

Inlet pressure: 70 bar  
 Discharge pressure: 170 bar  
 Inlet temperature: 30 °C  
 Mass flow: 220 kg/s

The following natural gas mixture is given (mol %):

Methane: 85 %  
 Propane: 15 %

1. Determine compressor inlet flow (m<sup>3</sup>/s).
2. Which speed would you select for the compressor?
3. How many stages (rotors) would you select?
4. Determine compressor discharge (exit) temperature.
5. Calculate the required shaft power by assuming the mechanical losses.



# Corrección del rendimiento

$\Delta P = P_2 - P_1$ [bar]	$\Delta \eta_p$ [%]
0-5	-0
5-20	-3
20-100	-5
> 100	-7