

# EQUIPOS E INSTALACIONES INDUSTRIALES

## COMPRESORES

2-06-2023

# TEMARIO

- ▶ **Introducción al estudio de compresores**
- ▶ Consideraciones
- ▶ Clasificación y rango operativo
- ▶ Fuerza motriz
- ▶ Trabajo requerido
- ▶ **Trabajo en compresión por etapas con refrigeración intermedia**
- ▶ Trabajo mínimo multietapa
- ▶ Determinación del  $n^{\circ}$  óptimo de etapas de compresión
- ▶ Comparación paramétrica del costo de inversión
- ▶ **Elementos que componen una instalación de compresión**

# INTRODUCCIÓN

## ▶ ¿QUE ES UN COMPRESOR?

- ▶ Dispositivo que transforma energía entregada en forma de trabajo de eje, en energía de presión a un fluido compresible, el cual aumenta su presión y su densidad.

## ▶ ¿PARA QUE SIRVE?

- ▶ Promover el movimiento de fluido gaseoso, comprimir para luego separar mezclas de gases, ciclos de refrigeración, etc

## ▶ ¿QUE TIPO DE MAQUINA ES?

- ▶ Es una máquina térmica que toma el fluido desde una presión de ingreso, lo comprime y lo descarga a mayor presión, operando cíclicamente realizando un ciclo mecánico

## ▶ ¿QUE PRINCIPIOS LO RIGEN?

- ▶ Dada la rapidez de la transformación, la transmisión de calor puede considerarse nula y pensarse como una transformación adiabática

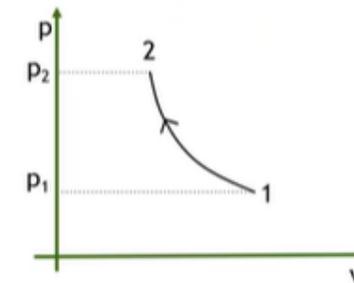
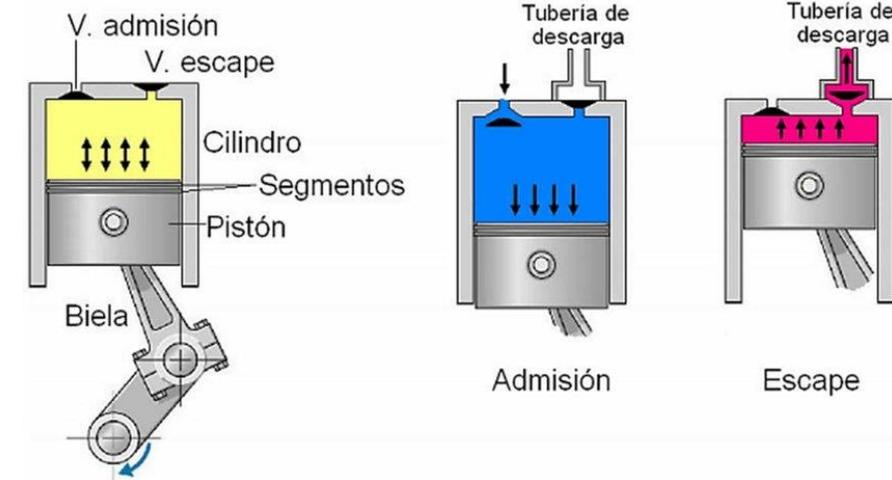
## ▶ ¿COMO SE ABORDA SU ESTUDIO?

- ▶ Dado que no es un sistema cerrado, porque la masa de fluido que ingresa, la descarga y luego incorpora otra, no cumple con un CICLO TERMODINAMICO.

- ▶ Simplificación: Como toda la masa que ingresa es la que egresa, el sistema puede verse como un SISTEMA CIRCULANTE = ABIERTO EN REGIMEN PERMANENTE.

## ▶ ¿CUAL ES SU INTERPRETACIÓN TERMODINÁMICA?

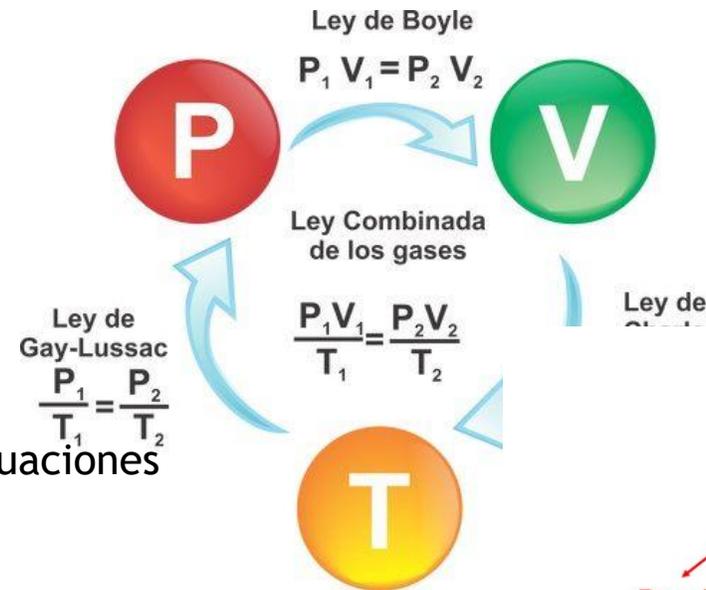
- ▶ El trabajo de circulación específico ( $l_c$ ) =  $\int_{P_1}^{P_2} v dp$



# INTRODUCCIÓN

- ▶ COMPRESION DE FLUIDOS COMPRESIBLES
- ▶ Aplicación de modelo cinético de gases ideales

Corrección de ecuación general de gases ideales con ecuaciones de estado



$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

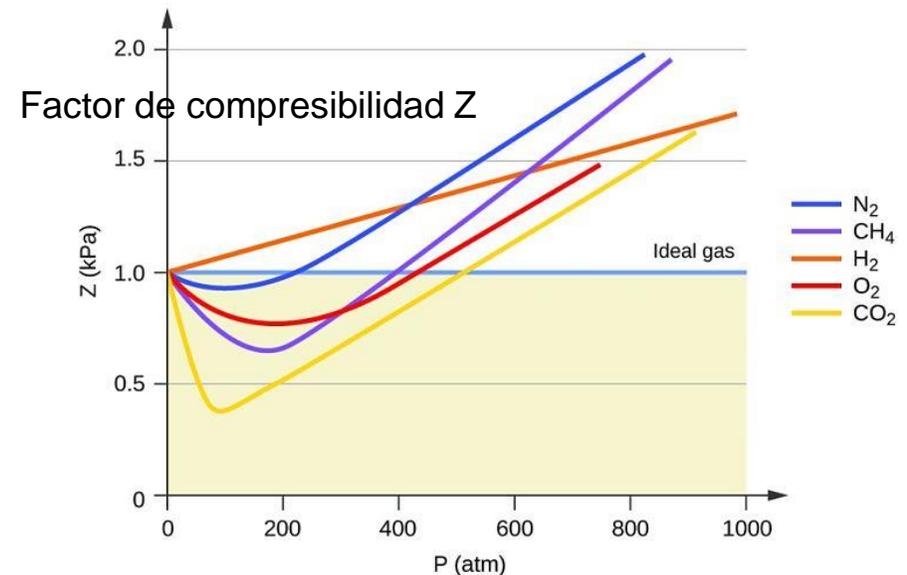
$T = t(^{\circ}\text{C}) + 273$  → Temperatura (K)  
 $R = 0'082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$   
**Presión (atm)**  
 1 atm = 760 mm Hg  
**Volumen (L)**  
 1 L = 1 dm<sup>3</sup>  
 1 mL = 1 cm<sup>3</sup>  
**N° de moles (moles)**  
 $n = \frac{m}{MM}$

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+b)\sqrt{T}}$$

Ecuación de Estado de Redlich Kwong

$$P = \frac{RT}{\bar{v}-\bar{b}} - \frac{a(T)}{\bar{v}^2 + 2\bar{b}\bar{v} - \bar{b}^2} \quad \text{con} \quad \bar{v} = v + c \quad \text{con} \quad \bar{b} = b + c$$

Ecuación de Estado de Peng Robinson Modificada



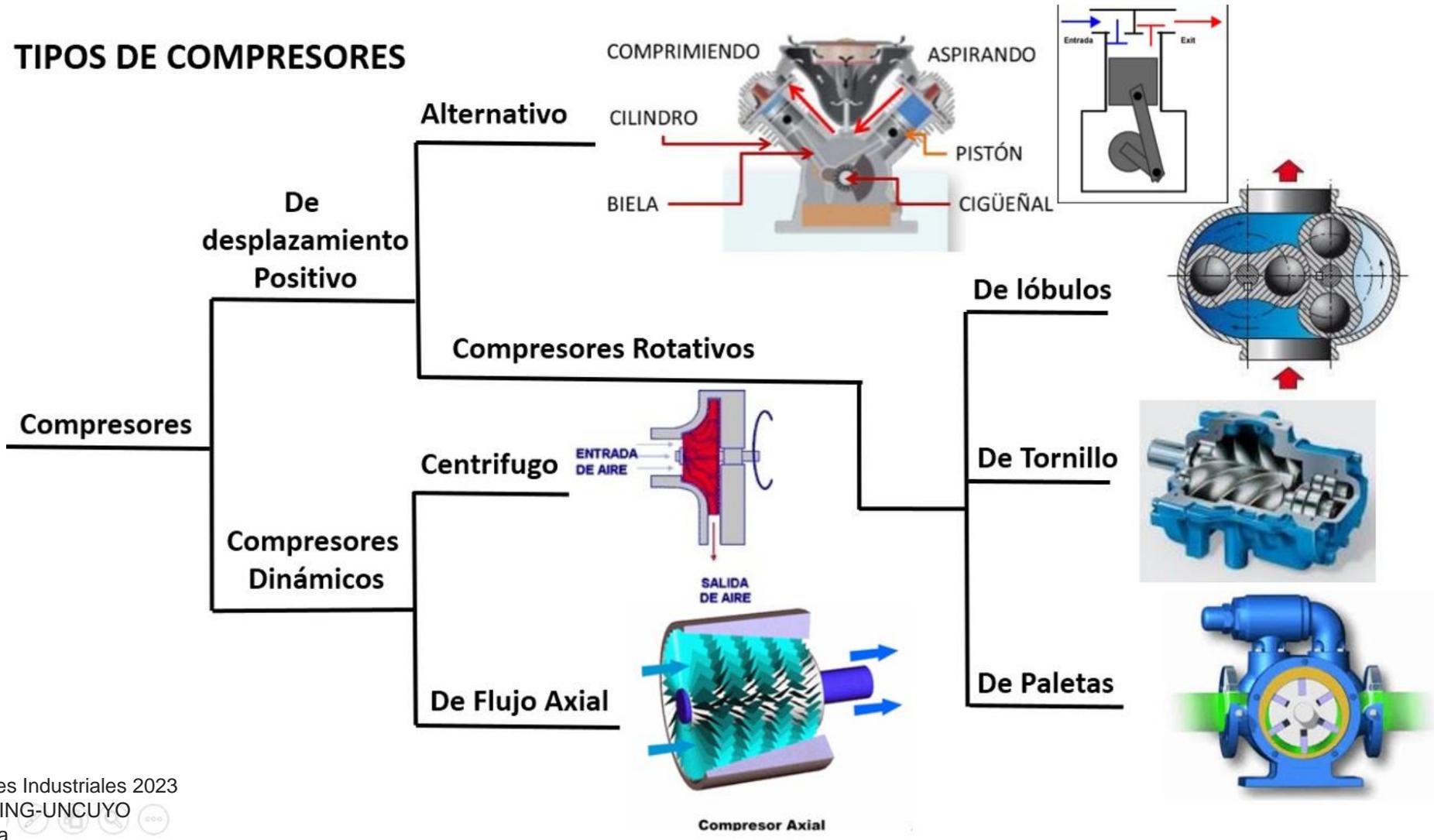
# Consideraciones

- ▶ **VARIABLES DE DISEÑO**
- ▶ Relación de compresión
- ▶ Caudal de gas
- ▶ Presión de descarga
- ▶ Temperatura de alimentación
  - ▶ Ciclo frigorífico  $-40^{\circ}\text{C}$ , plantas de etileno  $-105^{\circ}\text{C}$ , LNG  $-170^{\circ}\text{C}$
- ▶ Peso molecular del gas
- ▶ N° de etapas
- ▶ Sistema de lubricación

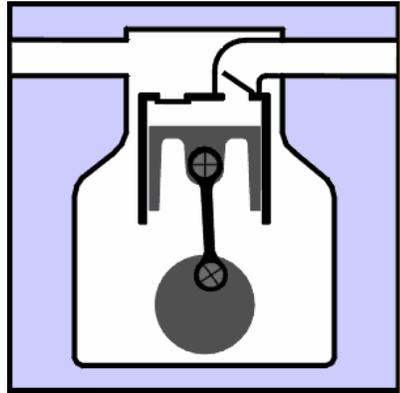


# Clasificación y rango operativo

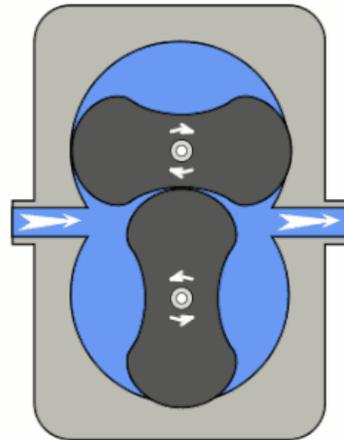
## TIPOS DE COMPRESORES



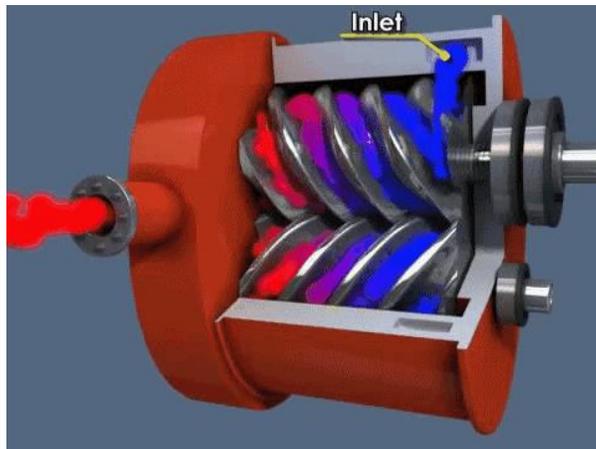
# Tipos de compresores



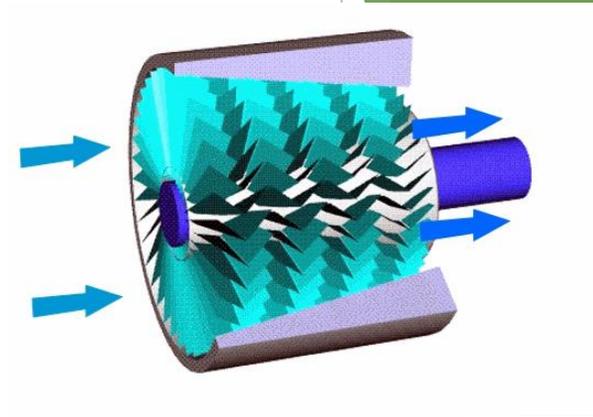
**Reciprocante o alternativo**



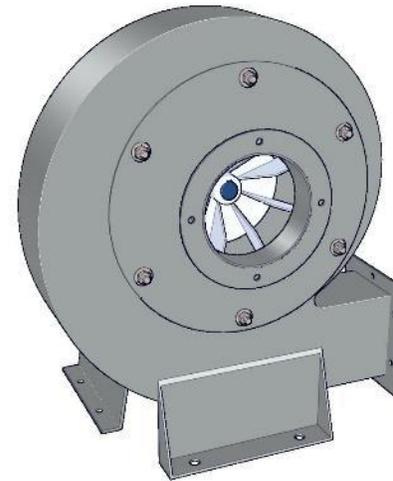
**Lobular**



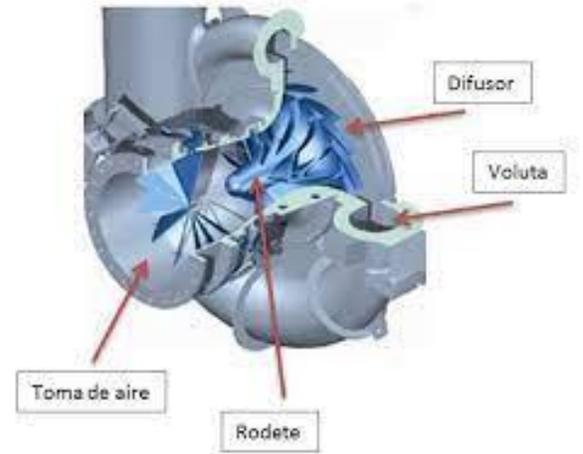
**Screw o Tornillo**



**Axial**



**Soplador**



**Centrífugo**

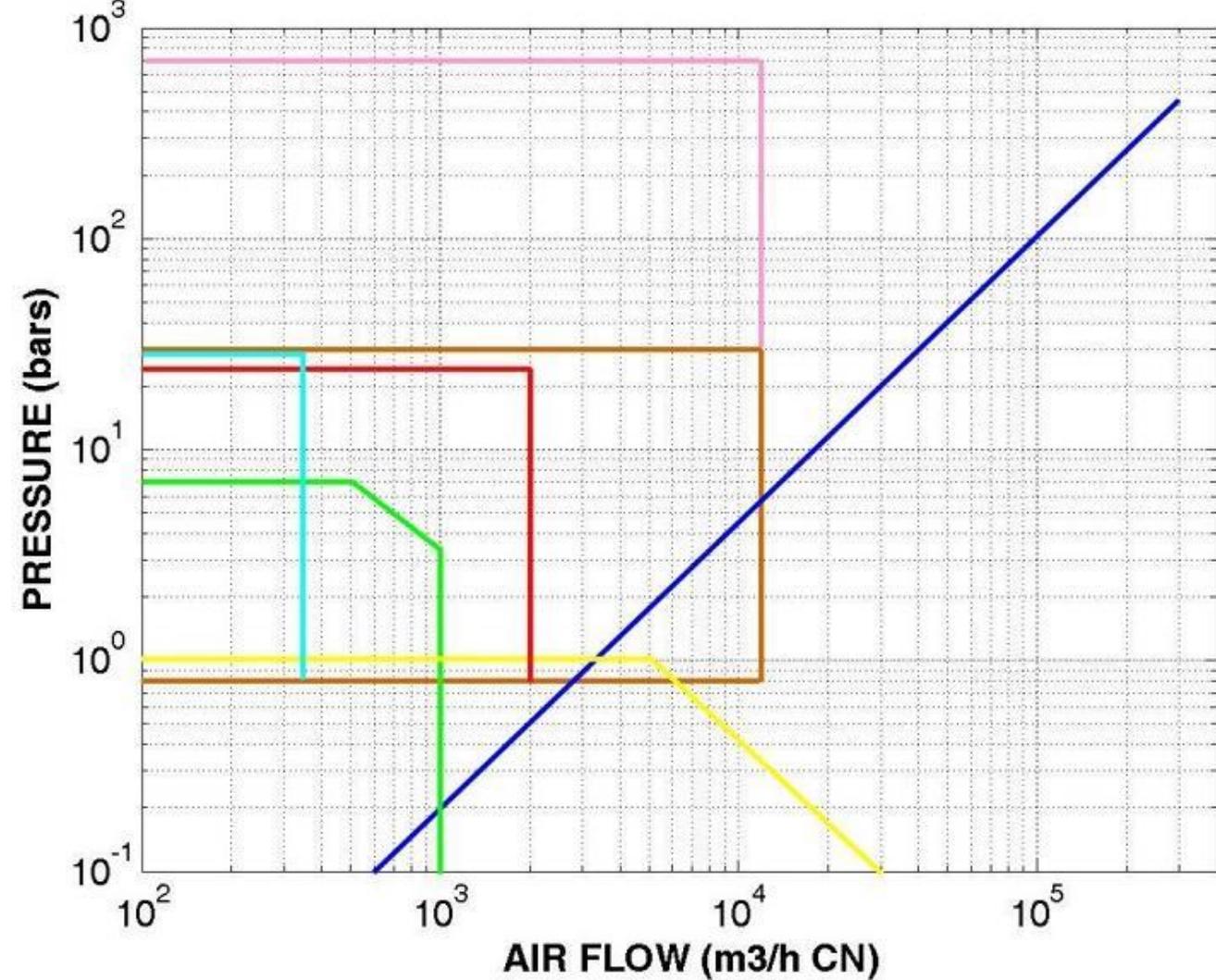
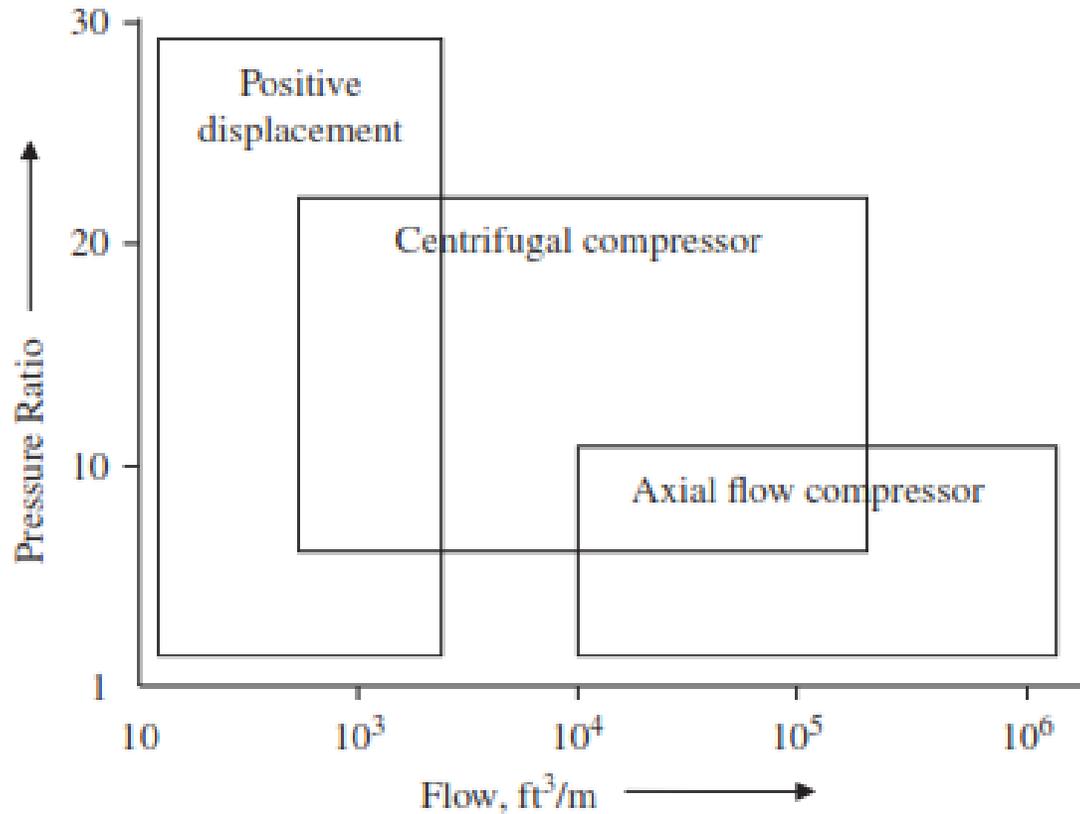
# Comportamiento

**TABLE 10-16 Performance Characteristics of Compressors**

Types of compressors	Pressure ratio per stage			Efficiency, %	Operating range surge – choke, %
	Industrial	Aerospace	Research		
Positive displacement	Up to 30	—	—	75–82	—
Centrifugal	1.2–1.9	2.0–7.0	13	75–87 25	Large
Axial	1.05–1.3	1.1–1.45	2.1	80–91	Narrow 3–10

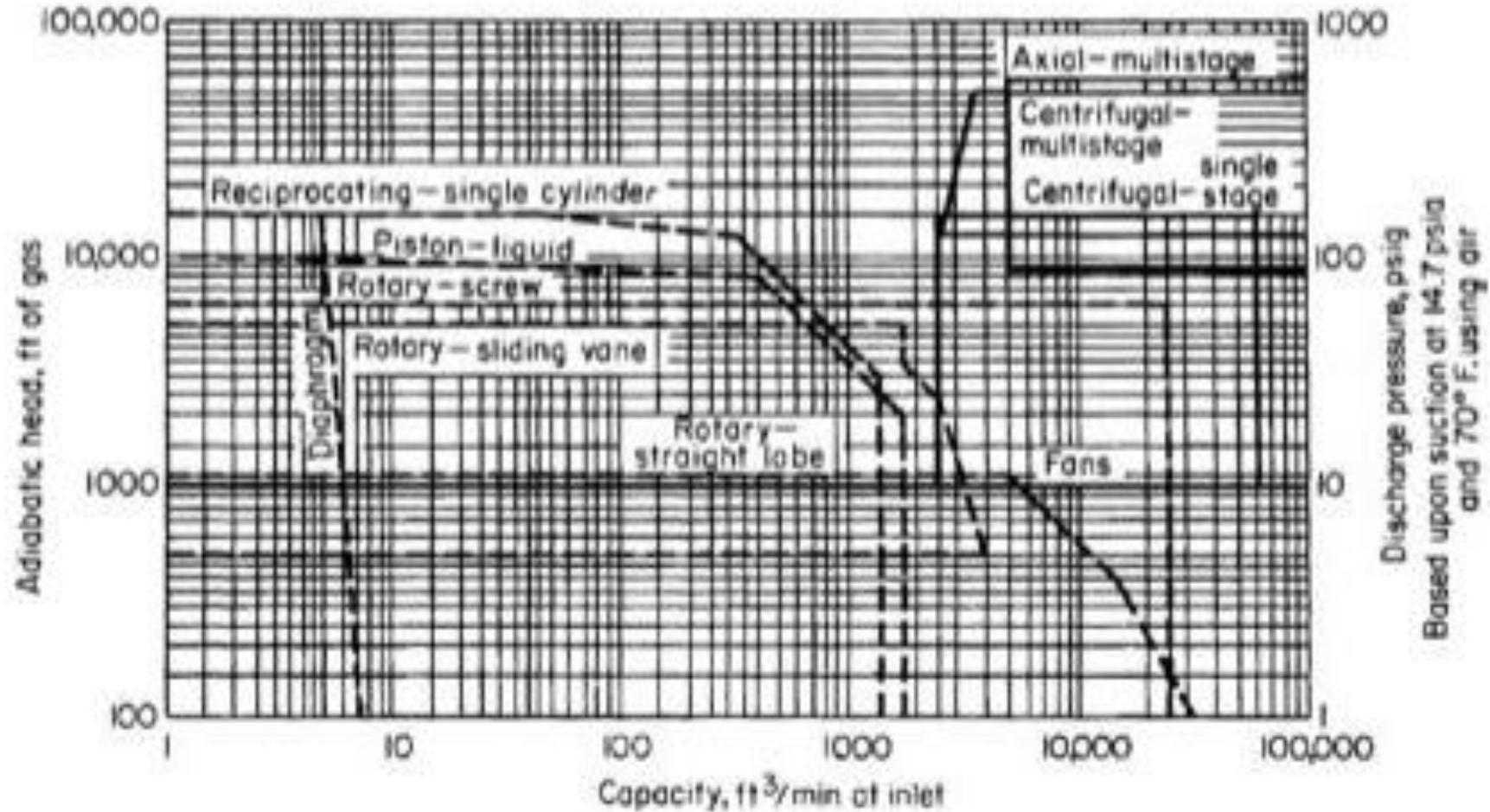
- **Presiones de descarga**
- Compresores:  $\Delta P > 3$  Bar
- Soplantes o sopladores:  $1 < \Delta P < 3$  Bar
- Ventiladores:  $\Delta P < 1$  Bar

# Rango operativo



- Rotary Screw Compressor
- Reciprocating Compressor [Single Acting Cilinder]
- Reciprocating Compressor [Double Acting Cilinder]
- Centrifugal Compressor
- Liquid Ring Compressor [Piston Liquid]
- Lobe Compressor
- Sliding Vane Compressor

# Selección



# Fuerza motriz



## MOTORES ELÉCTRICOS

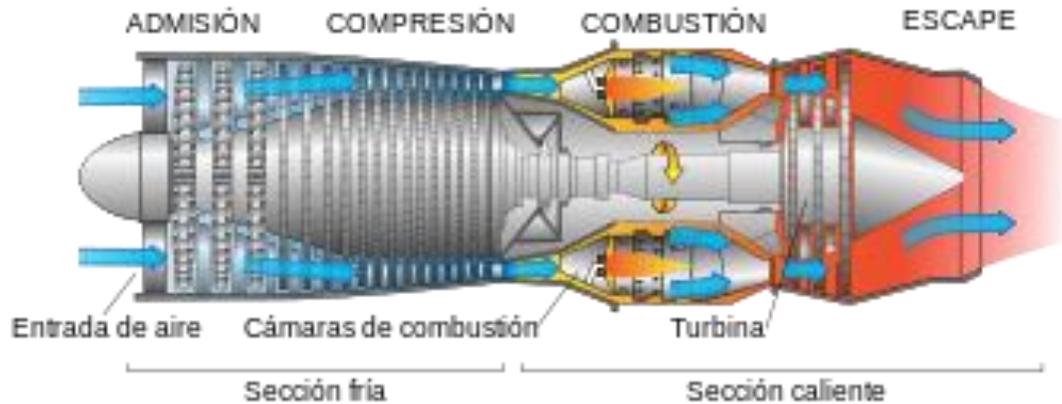
- Pequeñas potencias, velocidad sin variación, disponibilidad de EE
- Bajo costo de mantenimiento, poco equipamiento auxiliar y pocas piezas móviles



## MOTORES A EXPLOSIÓN

- Mediana potencia, velocidad flexible, muchos casos el combustible es el fluido que impulsan.
- Alto costo de mantenimiento, necesario equipamiento auxiliar, muchas piezas móviles, mayor tasa de fallos.
- Alta relación peso / potencia

# Fuerza motriz



## TURBINAS A GAS

- Mediana a gran potencia, velocidad sin variación, disponibilidad de EE
- Bajo costo de mantenimiento, alta necesidad de equipamiento auxiliar y buena relación peso / potencia

## TURBINAS A VAPOR

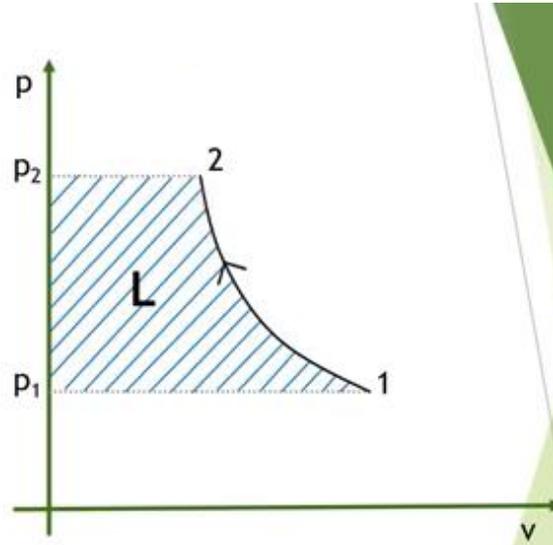
- Altísima potencia, velocidad invariable, bajo costo de combustible .
- Muy alto costo de mantenimiento, infraestructura de equipamiento auxiliar de gran desarrollo.



# TRABAJO REQUERIDO EN COMPRESIÓN

**Trabajo de circulación**

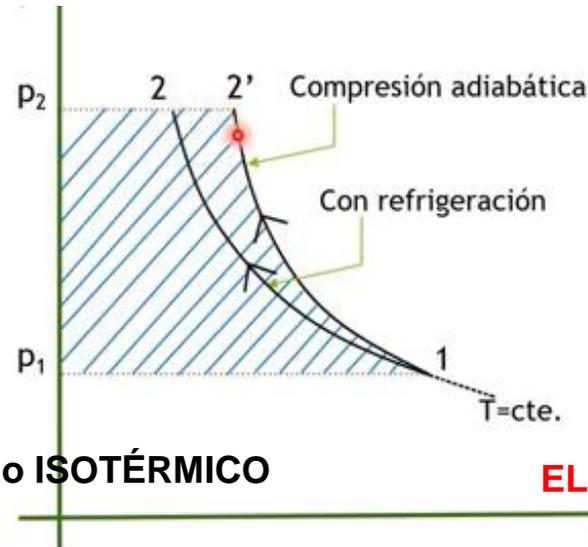
$$l_c = \int_{P_1}^{P_2} -v dP$$



Sistema Abierto: EL trabajo (L) es el área bajo la curva de ordenadas.

- Si v disminuye, también disminuye el trabajo requerido, esto es lo buscado.

$l_c$  = Trabajo específico (trabajo / unidad de masa)  
 $v$  = volumen específico (m<sup>3</sup>/kg)



## TIPOS DE COMPRESIONES

ADIABÁTICA: 1-2'

ISOTÉRMICA: 1-2

- |   |                       |
|---|-----------------------|
| • Materiales aislantes térmicos perfectos | • Paredes diatérmicas |
| • Tiempo casi nulo                        | • Tiempo muy grande   |

IMPOSIBLES

No existe un comportamiento puro ADIABÁTICO o ISOTÉRMICO

**EL COMPORTAMIENTO ES POLITRÓPICO INTERMEDIO**

# TRABAJO DE CIRCULACION REQUERIDO

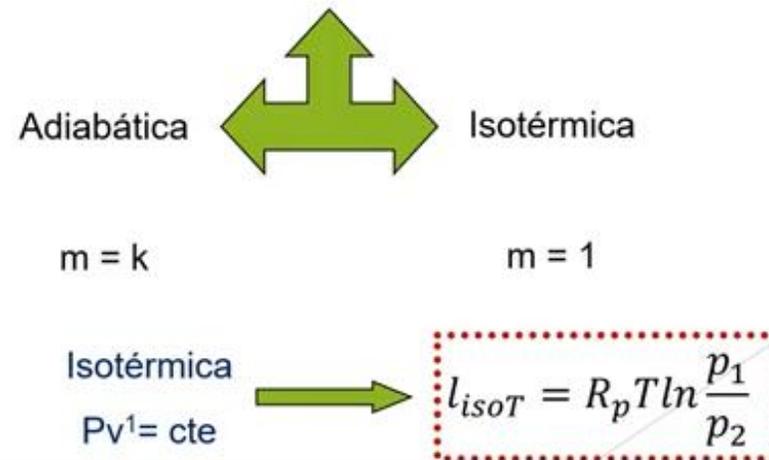
## Trabajo específico de una compresión POLITRÓPICA.

- $m$  = exponente de politrópica ( $n$ ), para aire y gases diatómicos = 1,4
- El trabajo mínimo es el trabajo de circulación para una compresión isotérmica (proceso ideal)

$$l_c = \frac{m}{m-1} RT_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} \right]$$

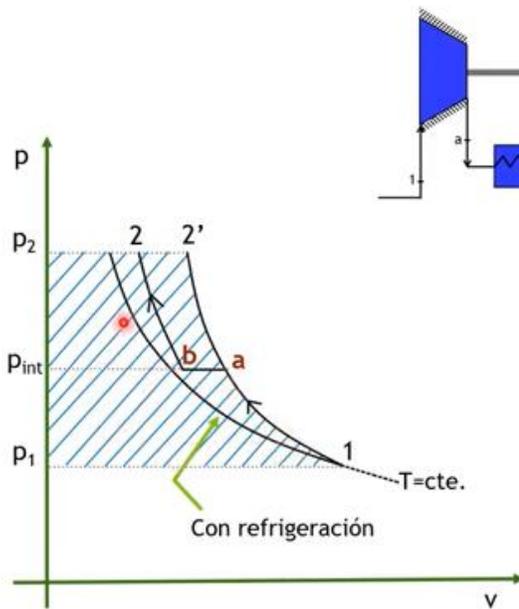
$\eta$  isoentrópico = L **isoentrópico ideal** / L Real

$\eta$  isotérmico = L isotérmico ideal / L Real



# Compresión por etapas con refrigeración intermedia

## Compresión en 2 etapas



- 1 - 2': Politrópica en único compresor
- 1 - a: Politrópica compresor de baja
- a - b: Enfriamiento
- b - 2: Politrópica compresor de alta

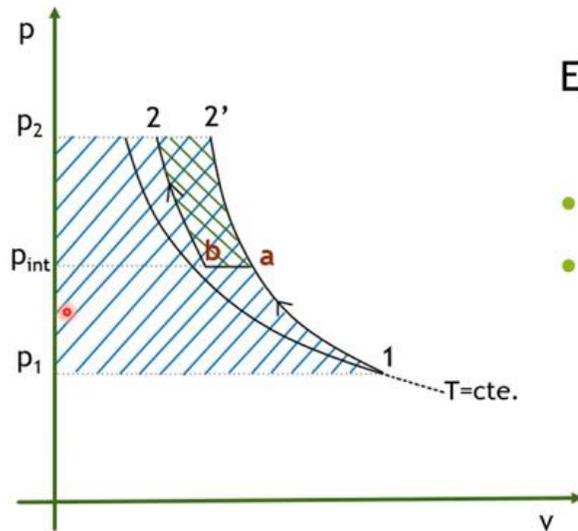
- Compresión adiabática en una sola etapa demanda L muy grande
- La temperatura de salida es desaconsejablemente alta, para proceso adiabático, la temperatura de descarga es:

$$T_2 = T_1 (P_2/P_1)^{(k-1)/k}$$

- Aplicar refrigeración constante, implica una compresión isotérmica, no viable técnicamente
  - Se refrigera a  $P=\text{cte}$  entre etapas, para acercarse a la compresión ideal.
  - Proceso 1-2' Politrópica en una etapa
  - 1 - a politrópica de etapa 1
  - a - b enfriamiento isobárico (para enfriamiento ideal b es la misma temperatura de la isoterma inicial)
  - b - 2 Politrópica segunda etapa
- Area a-b-2-2' es el trabajo ahorrado por incorporar una etapa

# Trabajo mínimo de compresión - Presión intermedia

## Compresión en 2 etapas



El trabajo es función de:

- Temperatura  $b$
- $P_{int}$

$$P_i = \sqrt{P_1 \cdot P_2}$$

$$\frac{P_i}{P_1} = \frac{P_2}{P_i} = \sqrt[2]{\frac{P_2}{P_1}}$$

El trabajo mínimo se logró con etapas de igual  $R_c$  y el trabajo es el mismo en cada etapa

- El trabajo es función de la temperatura a la cual pueda enfriarse, nunca menor a la  $T$  ambiente
- Presión intermedia ( $P_i$ ): presión de salida de 1° etapa
- El valor óptimo de  $P_i$  será el que entregue el mínimo trabajo de compresión

$$l_{CT} = \frac{m}{m-1} RT_1 \left\{ 2 - \left[ \left( \frac{P_i}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} + \left( \frac{P_2}{P_i} \right)^{\frac{m-1}{m}} \right] \right\}$$

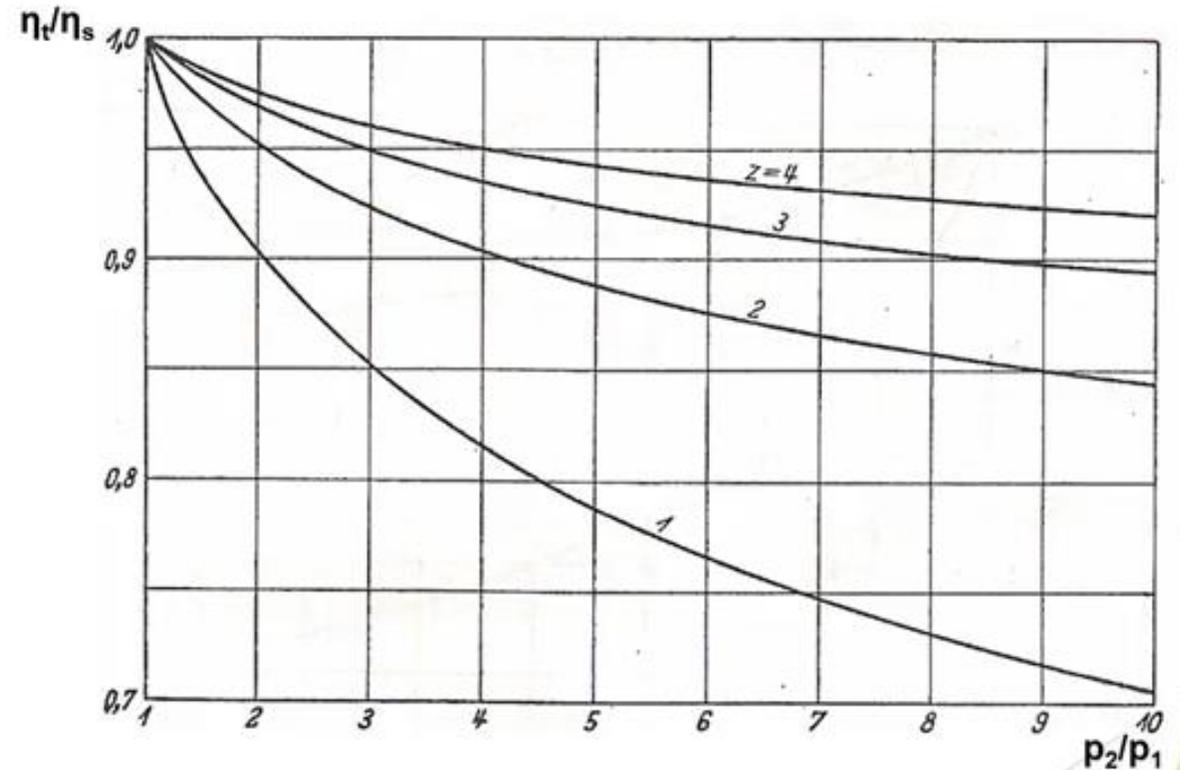
- $m$  = exponente de la politrópica ( $n$ )
- Minimizando la función (Derivando = 0) se obtiene un valor de  $P_i$  óptimo
- Ej: Si se quiere incrementar la presión desde 1 barg hasta 100 barg,  $P_i = \sqrt{1 \times 100} = 10$
- $P_i/P_1 = 10/1 = P_2/P_i = 100/10 = R_c = \frac{\sqrt{100}}{1}$

**$P_i$  óptima debe verificar  $T_s$  Adiabática para número óptimo de etapas.**

# Trabajo mínimo de z etapas de compresión

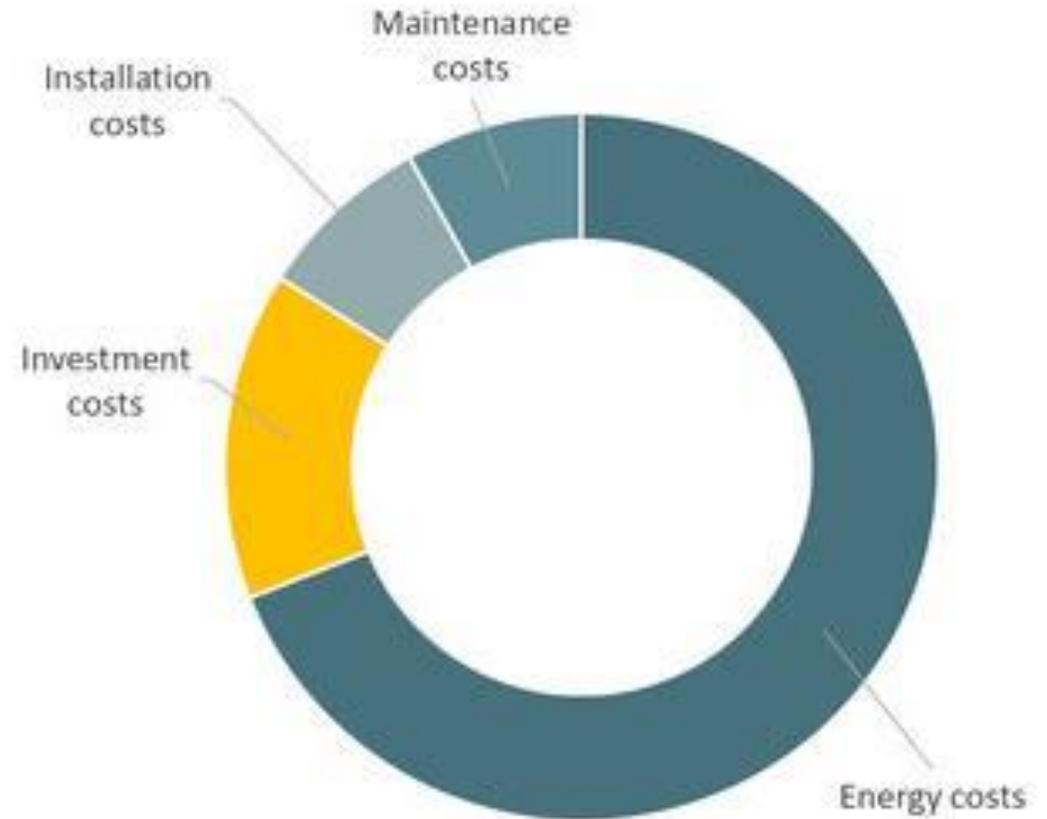
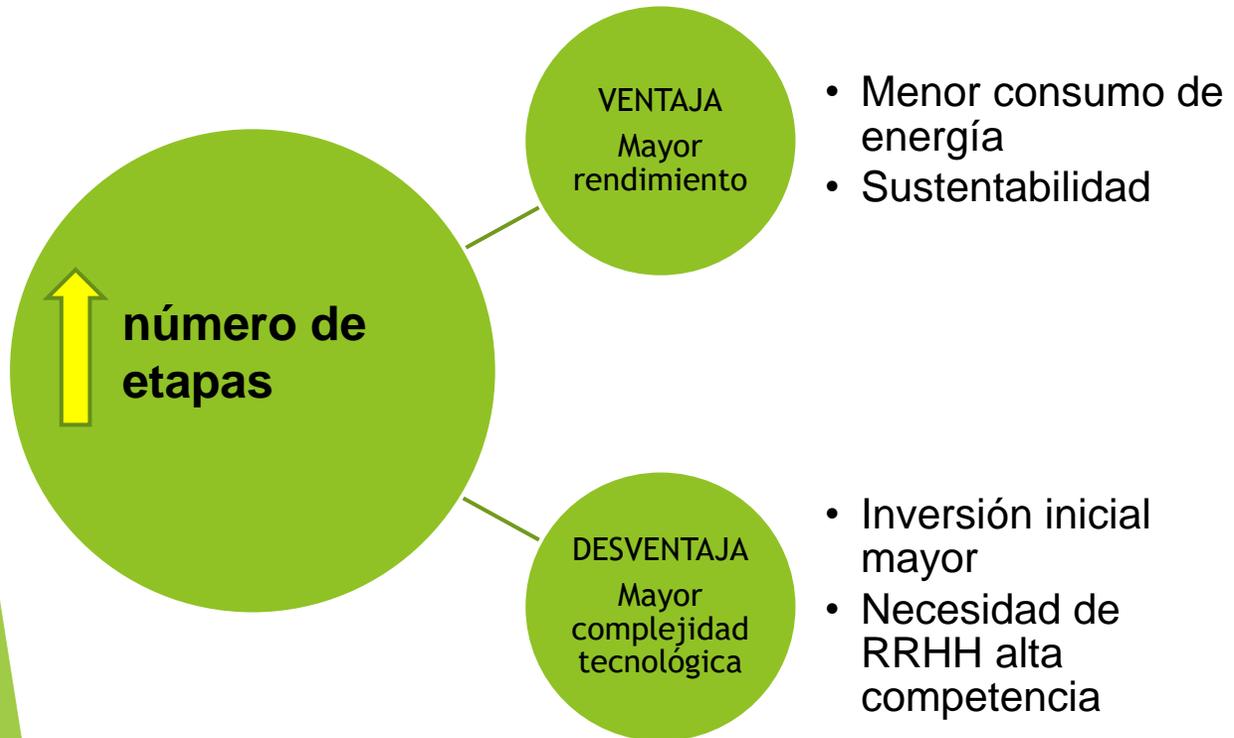
$$l_{CT} = \frac{m}{m-1} \frac{zRT}{\eta_s} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{zm}} \right]$$

- $m$  = exponente de la politrópica ( $n$ ) = 1,4 para el aire
- $z$  = n° de etapas
- $\eta_s$  = rendimiento isentrópico
- Expresión utilizada para compresiones adiabáticas, de lo contrario el rendimiento isoentrópico es 1
- El trabajo de cada etapa es equivalente

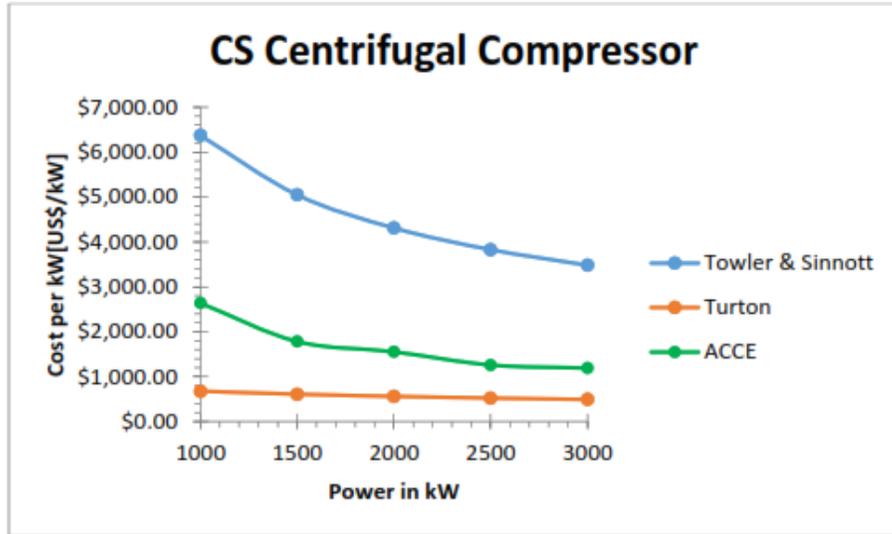


- Rendimiento térmico/rendimiento isoentrópico en ordenadas
- $R_c$  en abscisas
- El rendimiento mejora en cuanto aumenta el n° de etapas
- El rendimiento decrece cada vez más lento
- Al aumentar el n° de etapas, el comportamiento se asemeja a isotérmico

# Determinación del n° óptimo de etapas



# Estimación paramétrica de Costo de Inversión



ACCE: Aspen Capital Cost Estimator (software simulador)  
Turton: Método Gutrie actualizado  
Towler: Método factorial para plantas de proceso

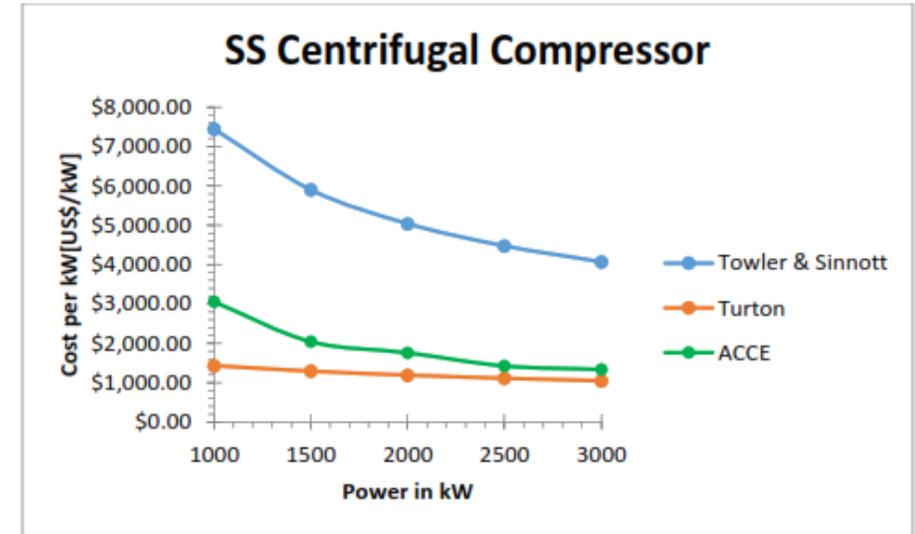


Figure 22: Cost per unit capacity plot for a carbon steel centrifugal compressor

Figure 23: Cost per unit capacity plot for a stainless steel centrifugal compressor

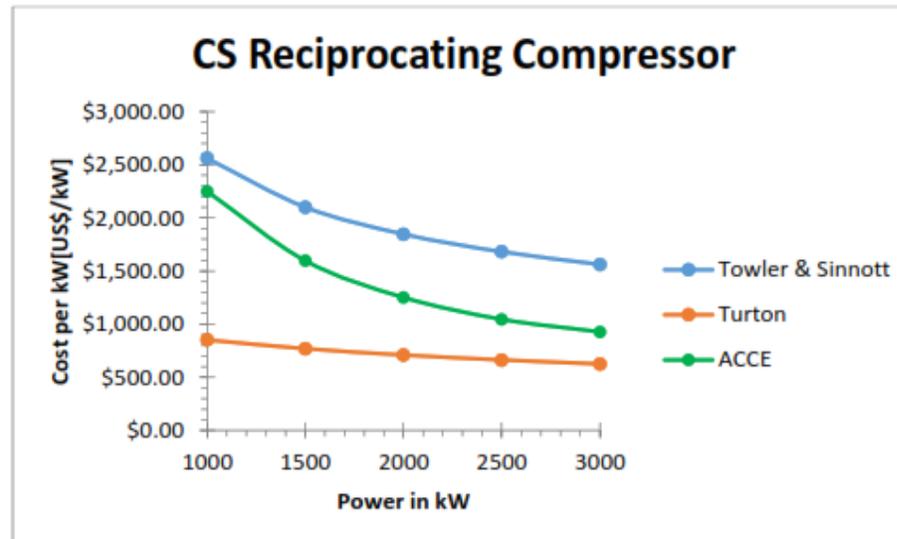


Figure 25: Cost per unit capacity plot for a carbon steel reciprocating compressor

# Resumen:

## ▶ Objetivos del diseño de compresión por etapas refrigeradas

- ▶ Disminuir el trabajo que requiere el compresor
- ▶ Disminuir la  $T_s$  del gas
- ▶ Determinar una  $P_i$  que minimice el trabajo requerido
- ▶ Suma del trabajo por etapas o uso ecuación con  $z$  etapas

## ▶ Selección

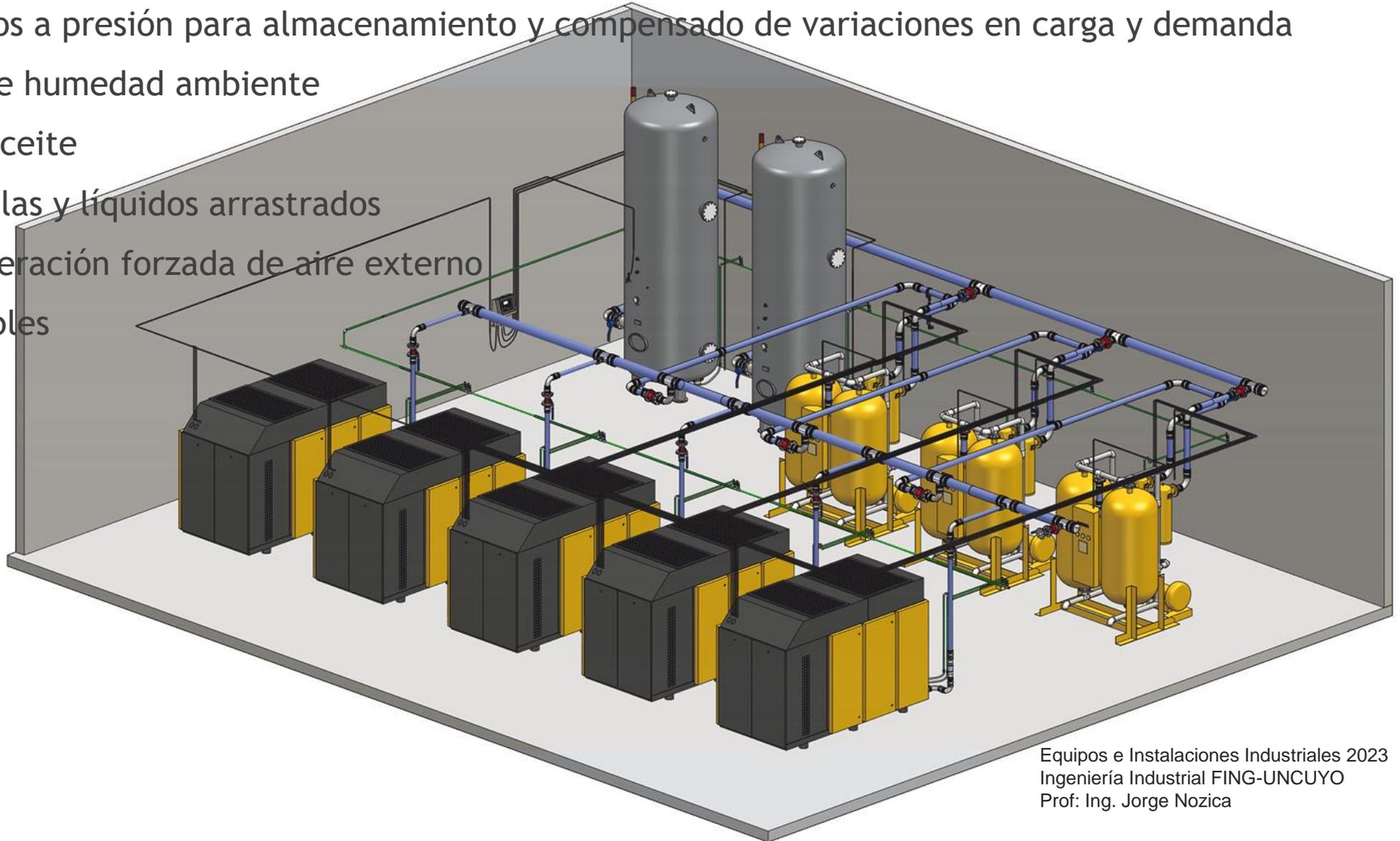
- ▶ Definir condiciones de servicio: Flujo másico, presión de descarga
- ▶ Determinar tipo de compresor
- ▶ Calcular costo operativo
- ▶ Estimar costo de Inversión

# Elementos que componen una instalación de compresión

- ▶ Instalaciones de aire comprimido para servicio e instrumentos
- ▶ Instalaciones de aire comprimido para servicios farmacéuticos y alimenticios
- ▶ Instalaciones de compresión de GNC
- ▶ Instalaciones de Plantas de Procesos .
  - ▶ Compresión de gases mezclas de hidrocarburos
  - ▶ Reciclo de Hidrógeno
  - ▶ Etileno y polipropileno
- ▶ Instalaciones de Plantas Compresoras de gas
- ▶ Instalaciones de GNL

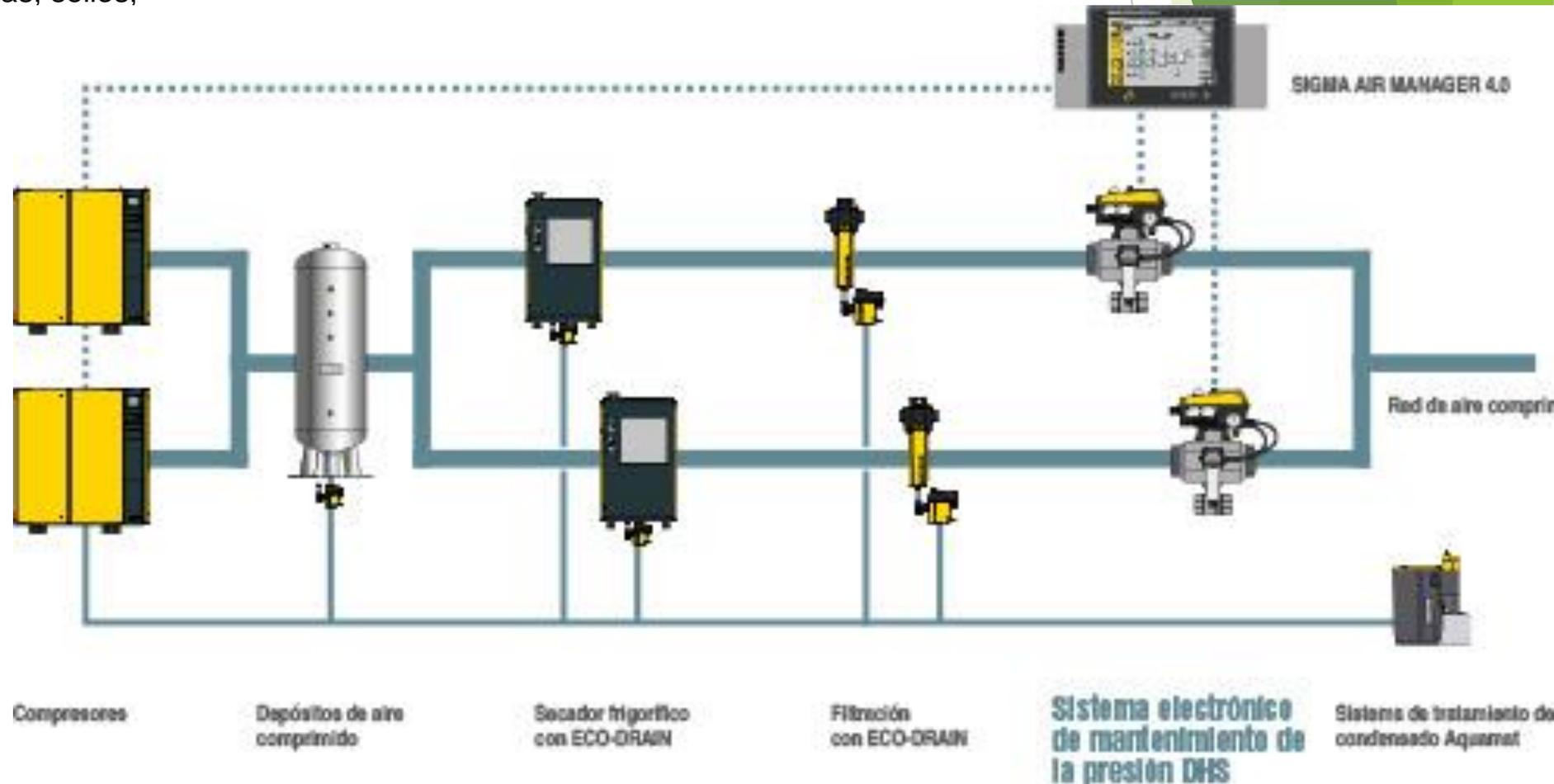
# Elementos de una instalación de compresión de aire

- ▶ Tanques sometidos a presión para almacenamiento y compensado de variaciones en carga y demanda
- ▶ Condensadores de humedad ambiente
- ▶ Separadores de aceite
- ▶ Filtros de partículas y líquidos arrastrados
- ▶ Equipos de refrigeración forzada de aire externo
- ▶ Conexiones flexibles



# Consideraciones para el diseño

- ▶ Espacios adecuados para mantenimiento y maniobras de los equipos.
- ▶ Instalación eléctrica capaz de alimentar la potencia
- ▶ Ventilación de una estación de compresores enfriados por aire sin contaminación cruzada
- ▶ Interconexión de los equipos
  - ▶ Piping adecuado. Diámetros, uniones, soportería, espesores, materiales resistentes a producto
  - ▶ Sistemas de seguridad, válvulas, sellos,
  - ▶ Tuberías flexibles
  - ▶ Aislación acústica urbanos
- ▶ Tratamiento de condensados



# Instalación de Planta Compresora de Gas de Yacimiento

Equipos e Instalaciones Industriales 2023  
Ingeniería Industrial FING-UNCUYO  
Prof. Ing. Jorge Nozica



## MOTOCOMPRESORES RECIPROCANTES A COMBUSTIÓN DE GAS DE LÍNEA

- Altas potencias, media presión y caudal medio
- Bajo costo del combustible
- Despliegue de Facilites para servicios
  - Aeroenfriadores
  - Refrigeradores de etapas
  - Refrigeradores de Motores
  - Chimeneas
  - No poseen depósito de combustible para el gran consumo específico



# EJERCICIO PRÁCTICO

Se necesita comprimir aire desde 1 bar hasta 200 bar

$T^\circ$  ambiente  $20^\circ\text{C}$

Calcular:

- 1- Trabajo específico necesario suponiendo compresión isotérmica reversible
- 2 - Trabajo específico necesario si la compresión es adiabática de 4 etapas, con  $h_s = 0.72$   
Considere que en cada etapa intermedia el aire debe ser enfriado a  $20^\circ\text{C}$
- 3 -  $\eta_{\text{isoT}}$  de la compresión

► 1- Compresión isotérmica

Calculamos el trabajo específico isotérmico

$$l_{isoT} = R_p T \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$l_{isoT} = 0,287 \frac{kJ}{kgK} 293K \ln \frac{1bar}{200bar}$$

$$l_{isoT} = -445,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$l_{adiab} = -1.043,5$$

Trabajo específico Z= 4 etapas /  $\eta_s = 0.72$

$$l_{CT} = \frac{m}{m-1} \frac{zR_p T}{\eta_s} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{z.m}} \right]$$

$$l_{CT} = \frac{1,4}{1,4-1} \frac{4.0,287kJ.293K}{0,72kgK} \left[ 1 - \left( \frac{200}{1} \right)^{\frac{1,4-1}{4.1,4}} \right]$$

$$l_{CT} = -752,2 \frac{kJ}{kg}$$

►  $\eta_{isoT} = \frac{445.5}{752.2} = 0.59$  Rendimiento isoentrópico