

EQUIPOS E INSTALACIONES INDUSTRIALES

COMPRESORES

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° óptimo de etapas de compresión
- ▶ **Elementos que componen una instalación de compresión**
- ▶ **Ejemplo**

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, disponer de fuente de alta presión, 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

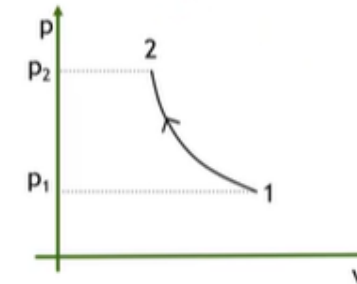
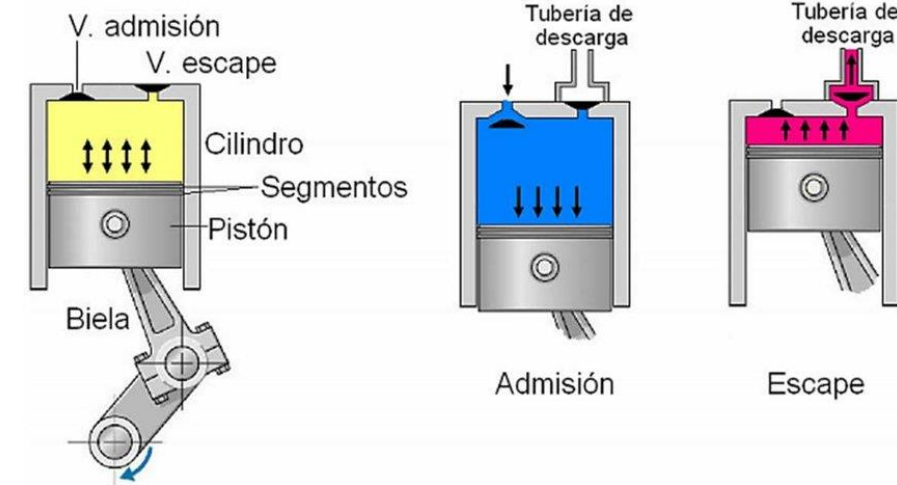
▶ ¿COMO SE ABORDA SU ESTUDIO?

- ▶ 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?

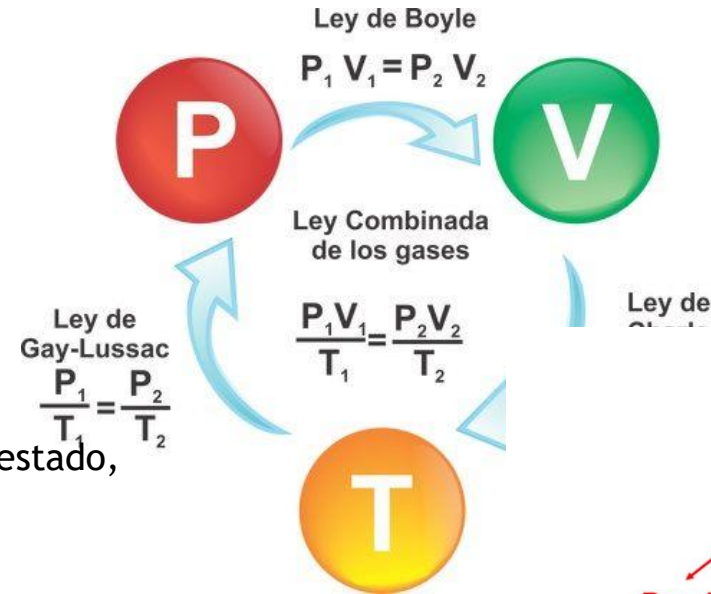
- ▶ El trabajo de circulación específico (l_c) = $\int_{P_1}^{P_2} v dp$



INTRODUCCIÓN

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

Ajuste de ecuación general de gases ideales con ecuaciones de estado, corrigiendo con constantes que dependen de variables críticas
 a: intensidad de atracciones moleculares
 b: asociada al tamaño molecular (volumen de la molécula)



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

$T = t(^{\circ}\text{C}) + 273$ → 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 dm³
 1 mL = 1 cm³

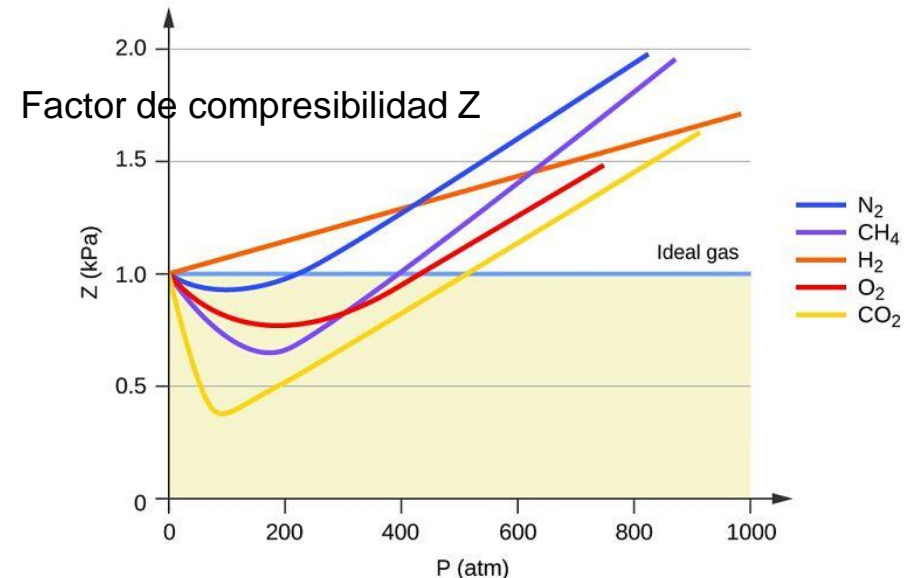
Nº de moles (moles)
 $n = \frac{m}{MM}$

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

Ecuación de Estado de Redlich Kwong, considera variación de "a" con la T

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

Ecuación de Estado de Peng Robinson Modificada, muy adecuada para GN



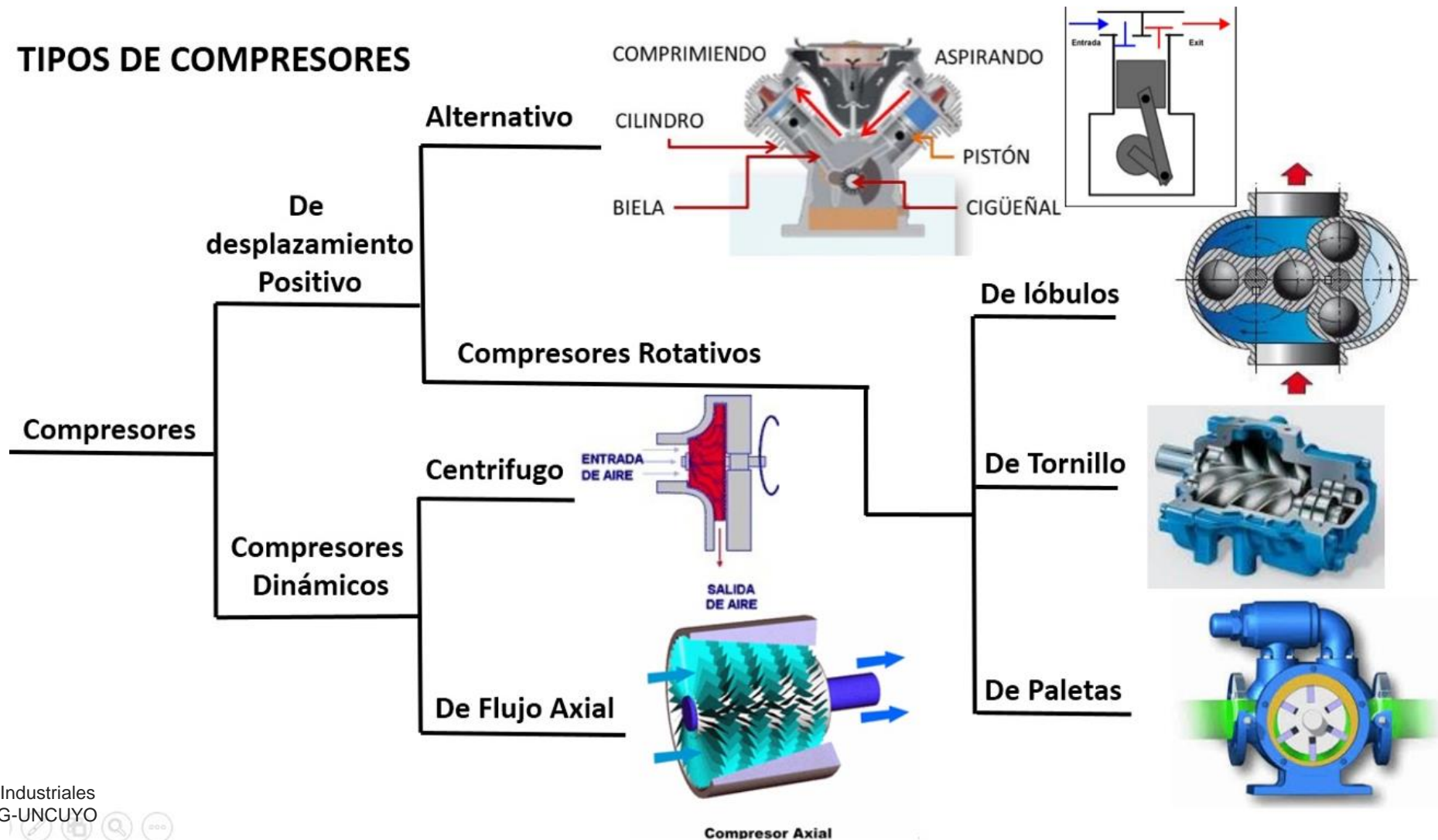
Consideraciones

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

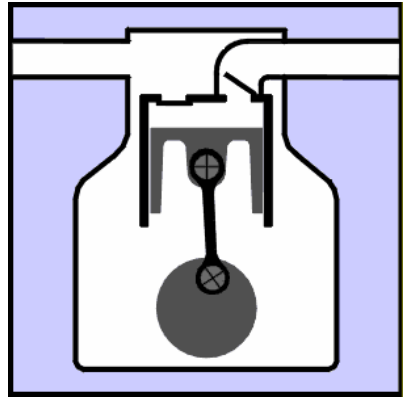


Clasificación y rango operativo

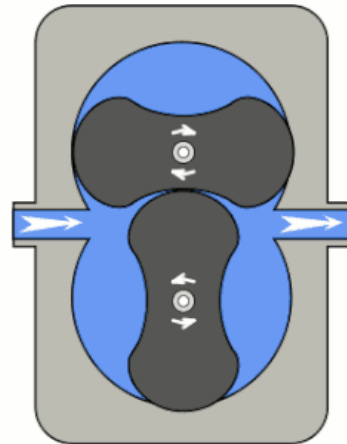
TIPOS DE COMPRESORES



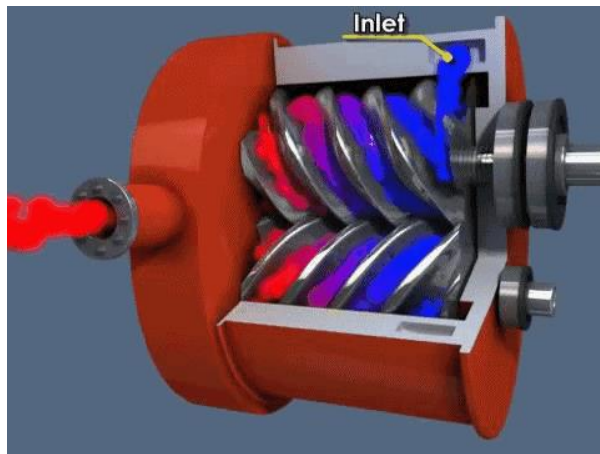
Tipos de compresores



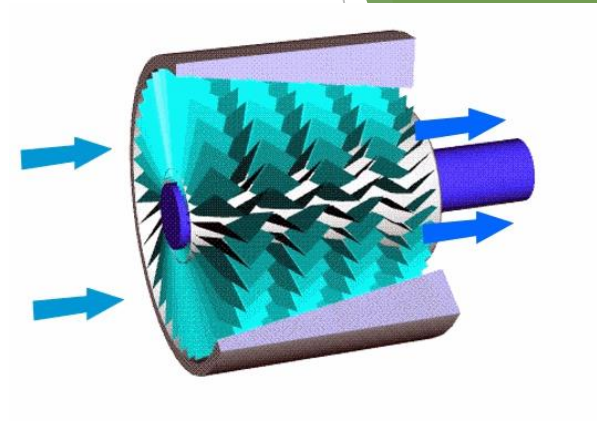
Reciprocante o alternativo (DP)



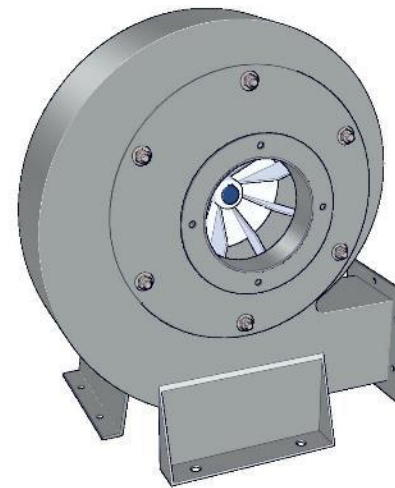
Lobular (DP)



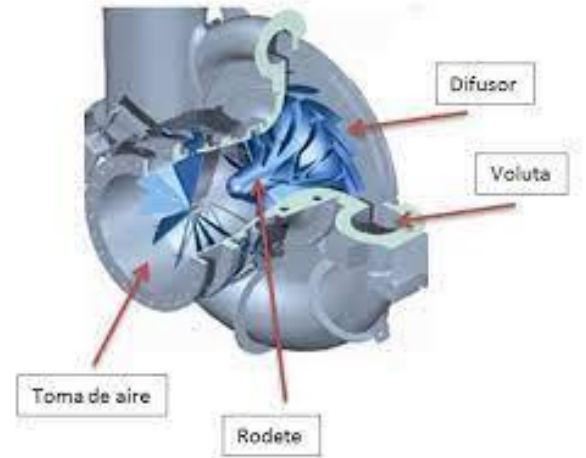
Screw o Tornillo (DP)



**Axial
(dinámico)**



**Soplador
(dinámico)**



**Centrífugo
(dinámico)**

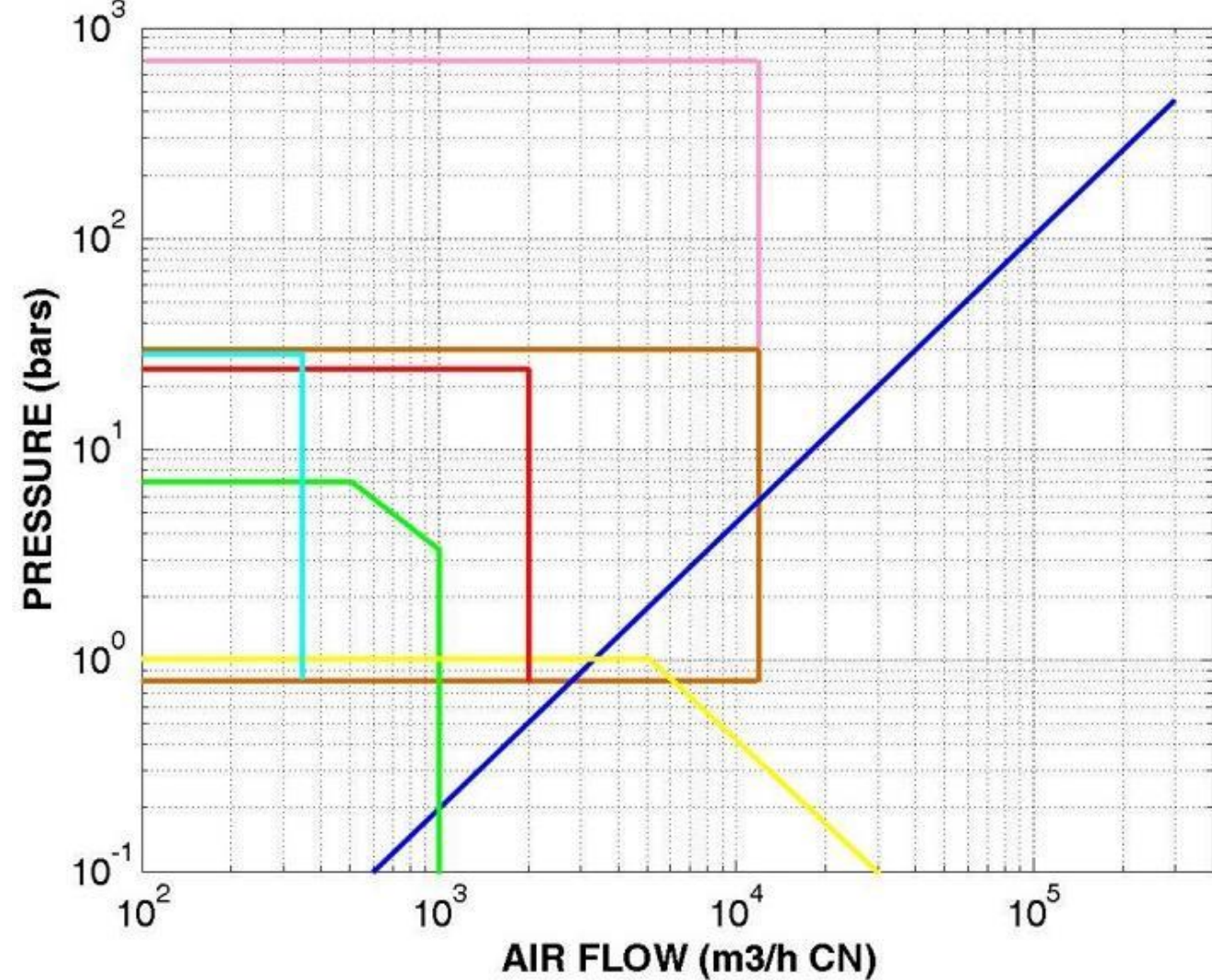
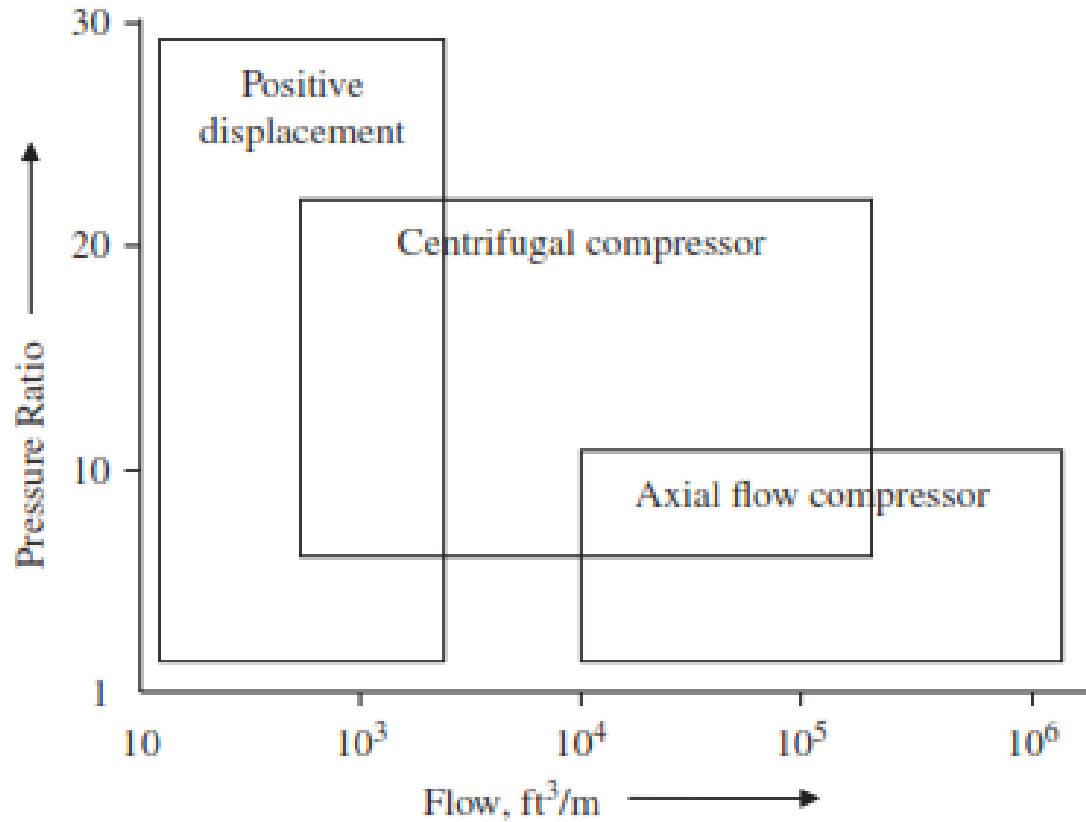
Comportamiento

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

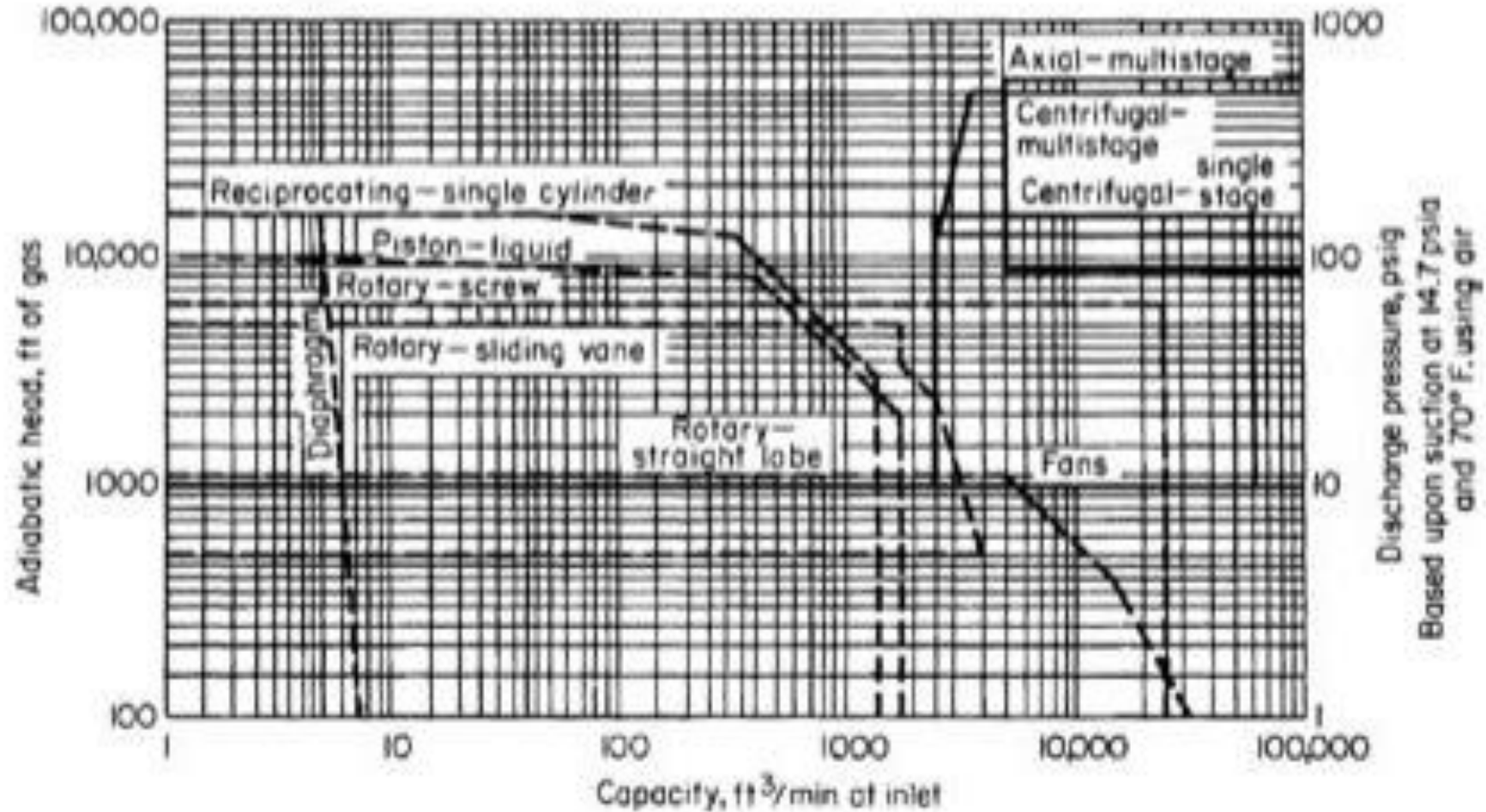
- **Presiones de descarga**
- Compresores: $\Delta P > 3$ Bar
- Soplantes o sopladores: $1 < \Delta P < 3$ Bar
- Ventiladores: $\Delta P < 1$ Bar

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

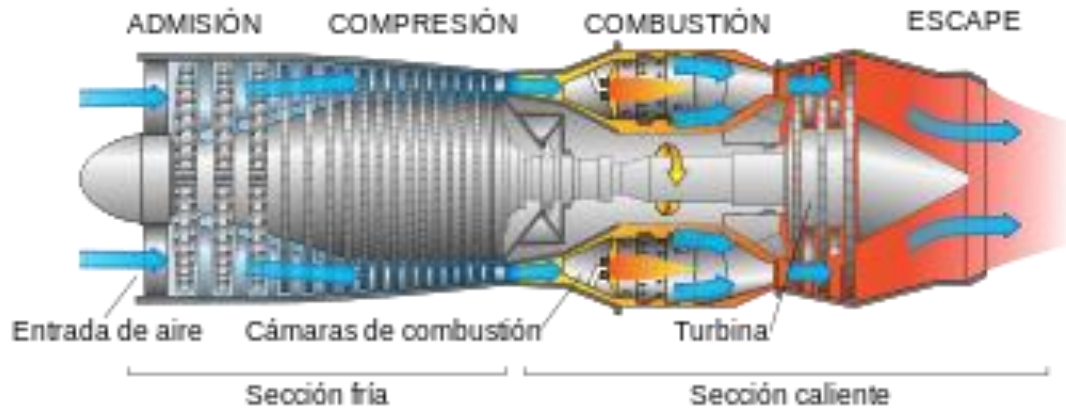
- Pequeñas potencias, velocidad sin variación, disponibilidad de EE
- Bajo costo de mantenimiento, poco equipamiento auxiliar y pocas piezas móviles



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.



Ejercicio

Dado un caso práctico, deberá determinar que tipo de equipo es aconsejable para el servicio solicitado.

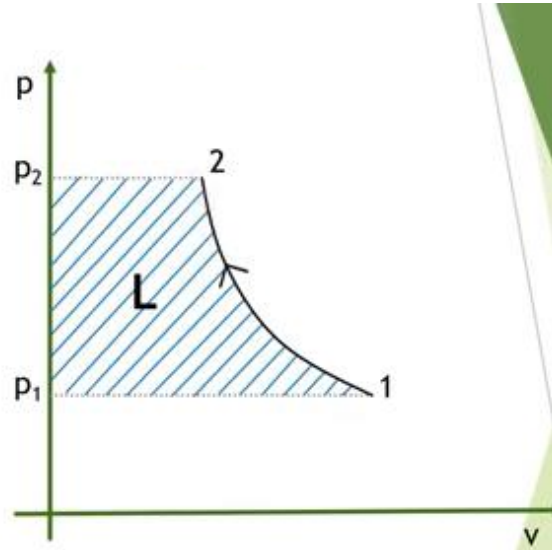
Debe desarrollar una tabla de especificación de equipo que indique:

- ▶ Tipo de compresor elegido, detallando el criterio adoptado
- ▶ Rango operativo del equipo
- ▶ Clasificación del servicio, particularidades de la actividad
- ▶ Materiales aptos para el equipo
- ▶ Fuerza motriz escogida
- ▶ Demanda de potencia del compresor

TRABAJO REQUERIDO EN COMPRESIÓN

Trabajo de circulación

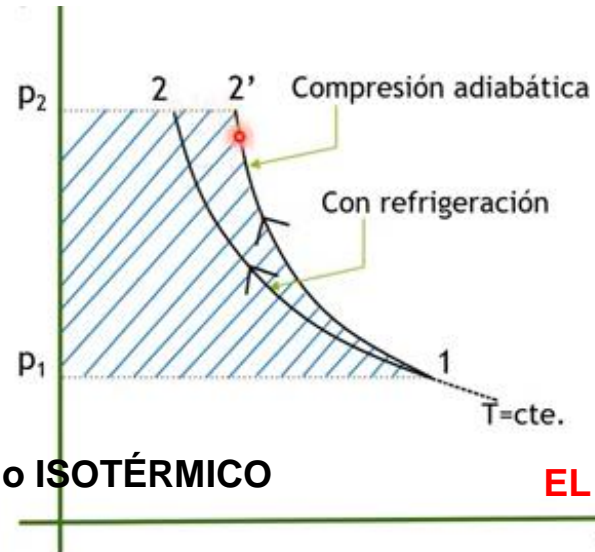
$$l_c = \int_{P_1}^{P_2} -v dP$$



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 (m³/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

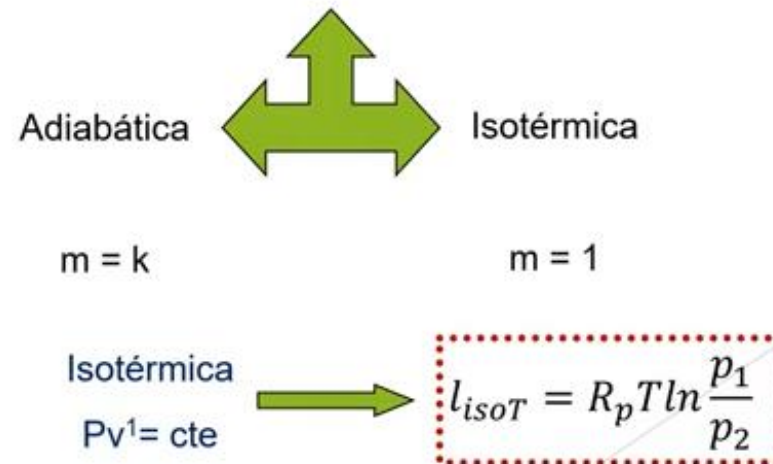
Trabajo específico de una compresión POLITRÓPICA.

- 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)

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

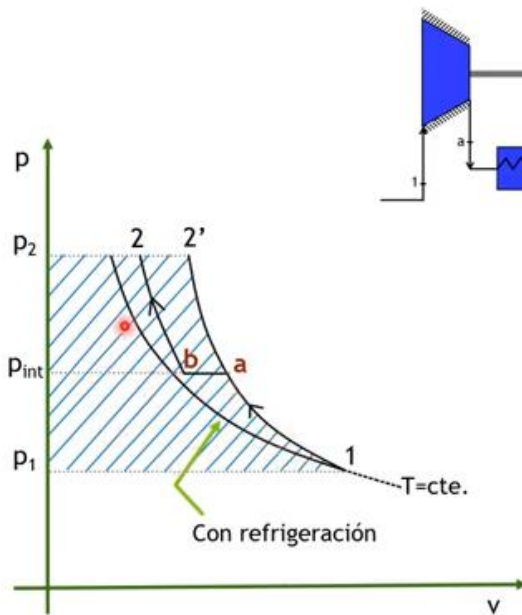
η isoentrópico = L **isoentrópico ideal** / L Real

η 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

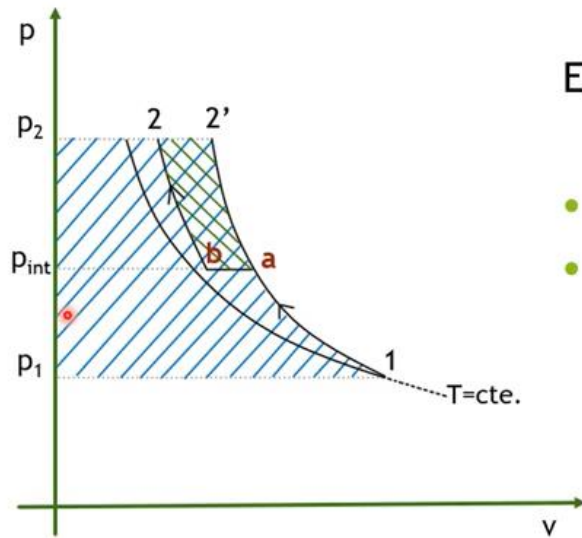
- Compresión adiabática en una sola etapa demanda L muy grande
- La temperatura de salida es desaconsejablemente alta, para proceso adiabático, la temperatura de descarga es:

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

- 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 como la raíz del producto de las presiones
- Ej: Si se quiere incrementar la presión desde 1 barg hasta 100 barg, $P_i = \sqrt{1 \times 100} = 10$
- $P_i/P_1 = 10/1 = P_2/P_i = 100/10 = R_c = \frac{\sqrt{100}}{1}$

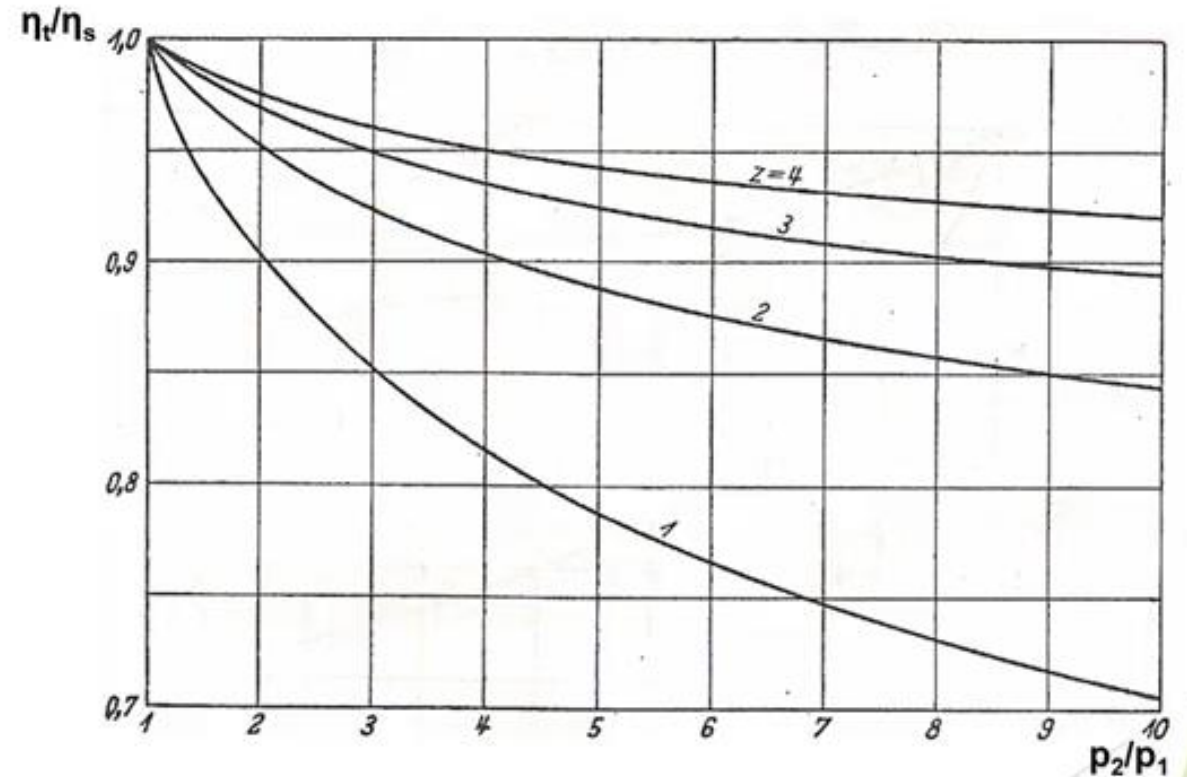
P_i óptima debe verificar T_s Adiabática para número óptimo de etapas.

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
- η_s = rendimiento isentrópico
- Expresión utilizada para compresiones adiabáticas, de lo contrario el rendimiento isoentrópico es 1
- El trabajo de cada etapa es equivalente

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



- 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

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**

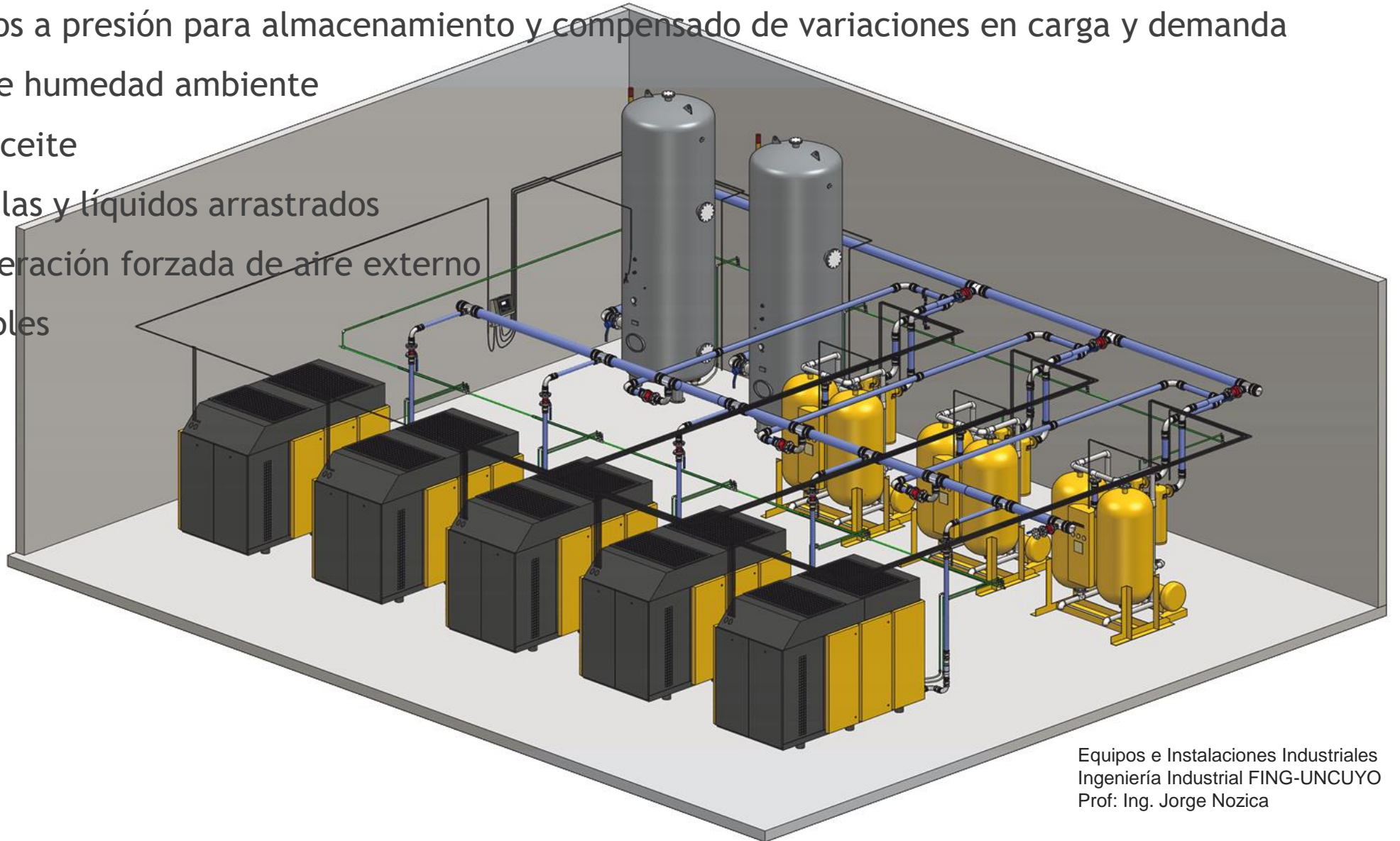
- ▶ Definir condiciones de servicio: Flujo másico, presión de descarga, temperatura de ingreso
- ▶ Determinar tipo de compresor
- ▶ Definir fuerza motriz y necesidad de potencia
- ▶ Evaluar comportamiento del del tipo de flujo de servicio
- ▶ Costo inversión vs costo operativo

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

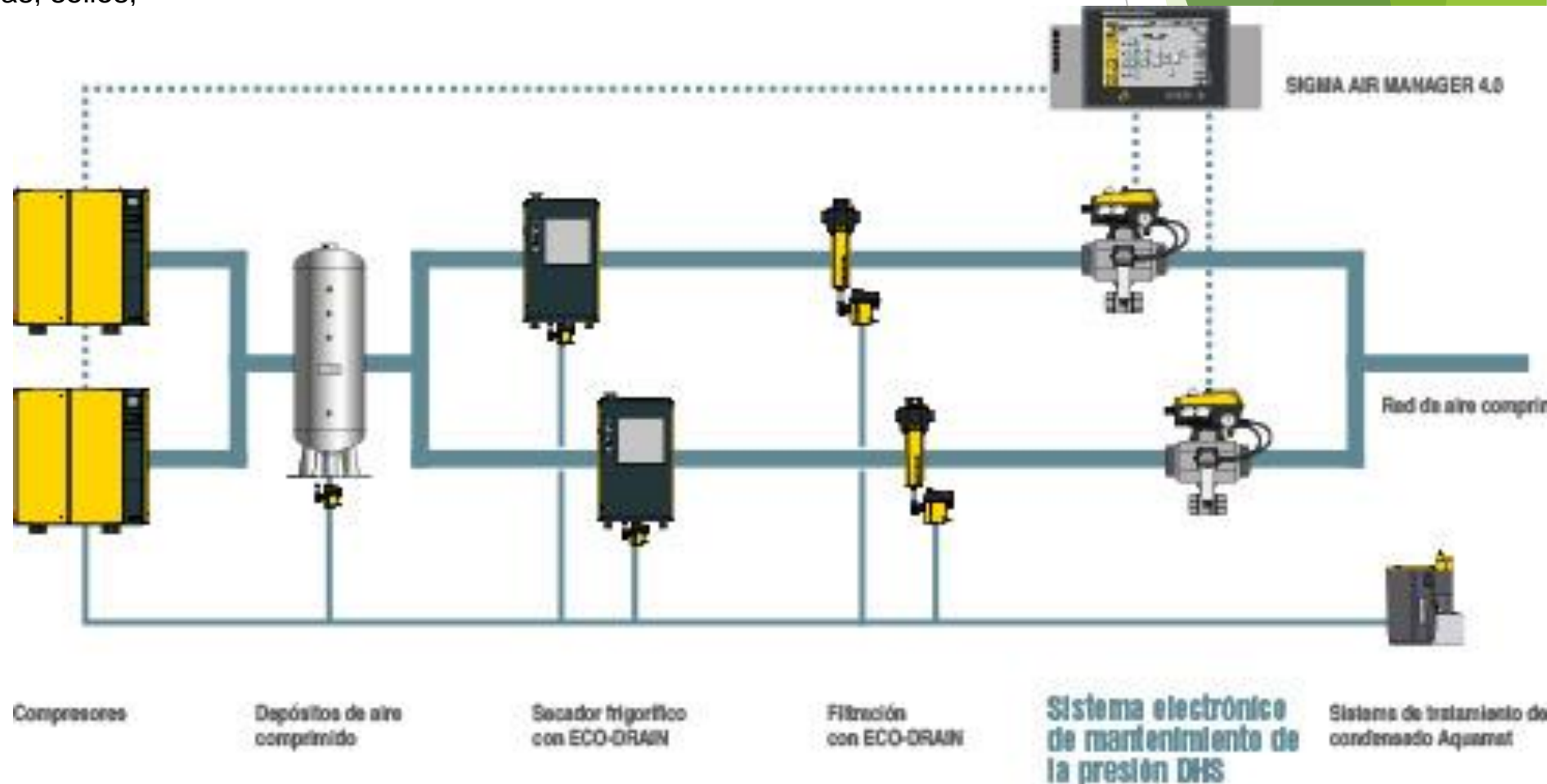
Elementos de una instalación de compresión de aire

- ▶ 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
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° ambiente 20°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°C
- 3 - η_{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