

EQUIPOS E INSTALACIONES INDUSTRIALES

COMPRESORES

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?

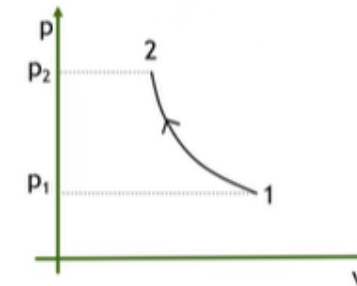
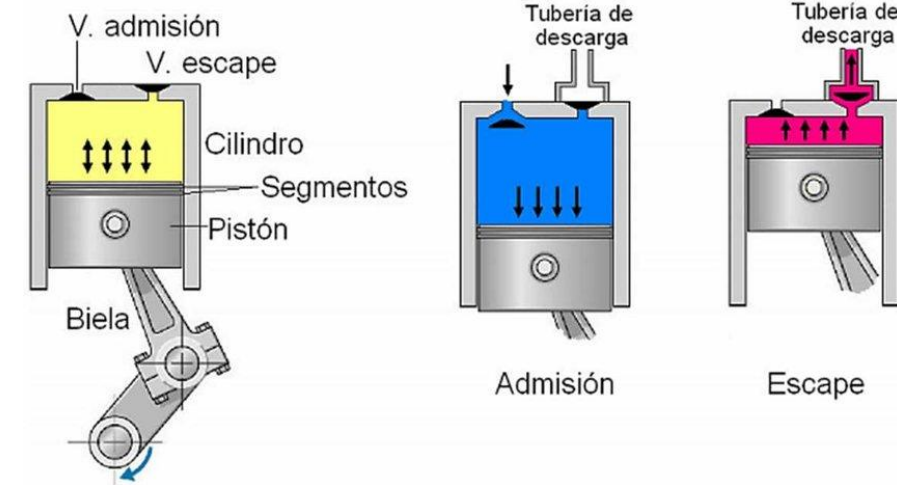
- Dada la rapidez de la transformación, la transmisión de calor puede considerarse nula y pensarse como una transformación adiabática

► ¿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?

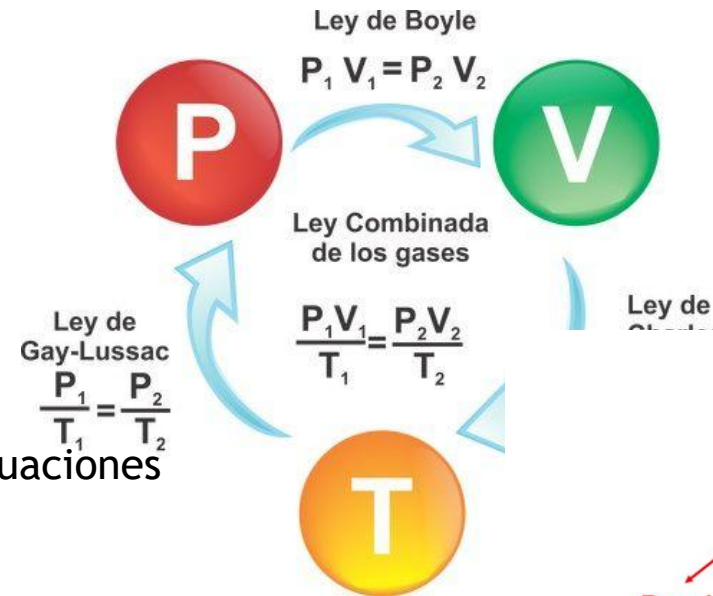
- El trabajo de circulación específico (l_c) = $\int_{p_1}^{p_2} v dp$



INTRODUCCIÓN

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

Corrección de ecuación general de gases ideales con ecuaciones de estado



Equation for the Ideal Gas Law:

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

Where:

- P:** Presión (atm) (Pressure)
- V:** Volumen (L) (Volume)
- n:** N° de moles (moles) (Number of moles)
- R:** $R = 0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ (Gas constant)
- T:** $T = t(^{\circ}\text{C}) + 273$ (Temperature in Kelvin)

Additional conversions:

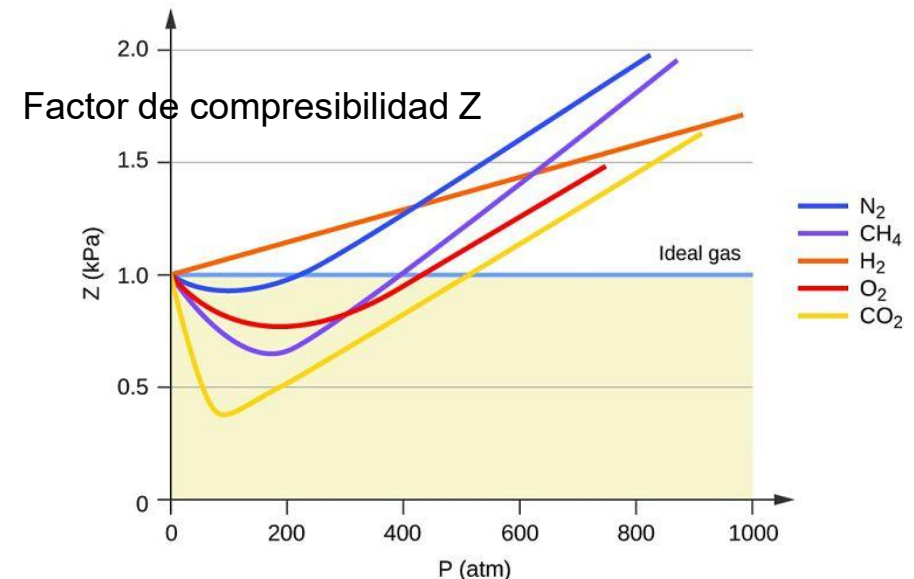
- 1 atm = 760 mm Hg
- 1 L = 1 dm³
- 1 mL = 1 cm³
- $n = \frac{m}{MM}$

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

Ecuación de Estado de Redlich Kwong

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

Ecuación de Estado de Peng Robinson Modificada



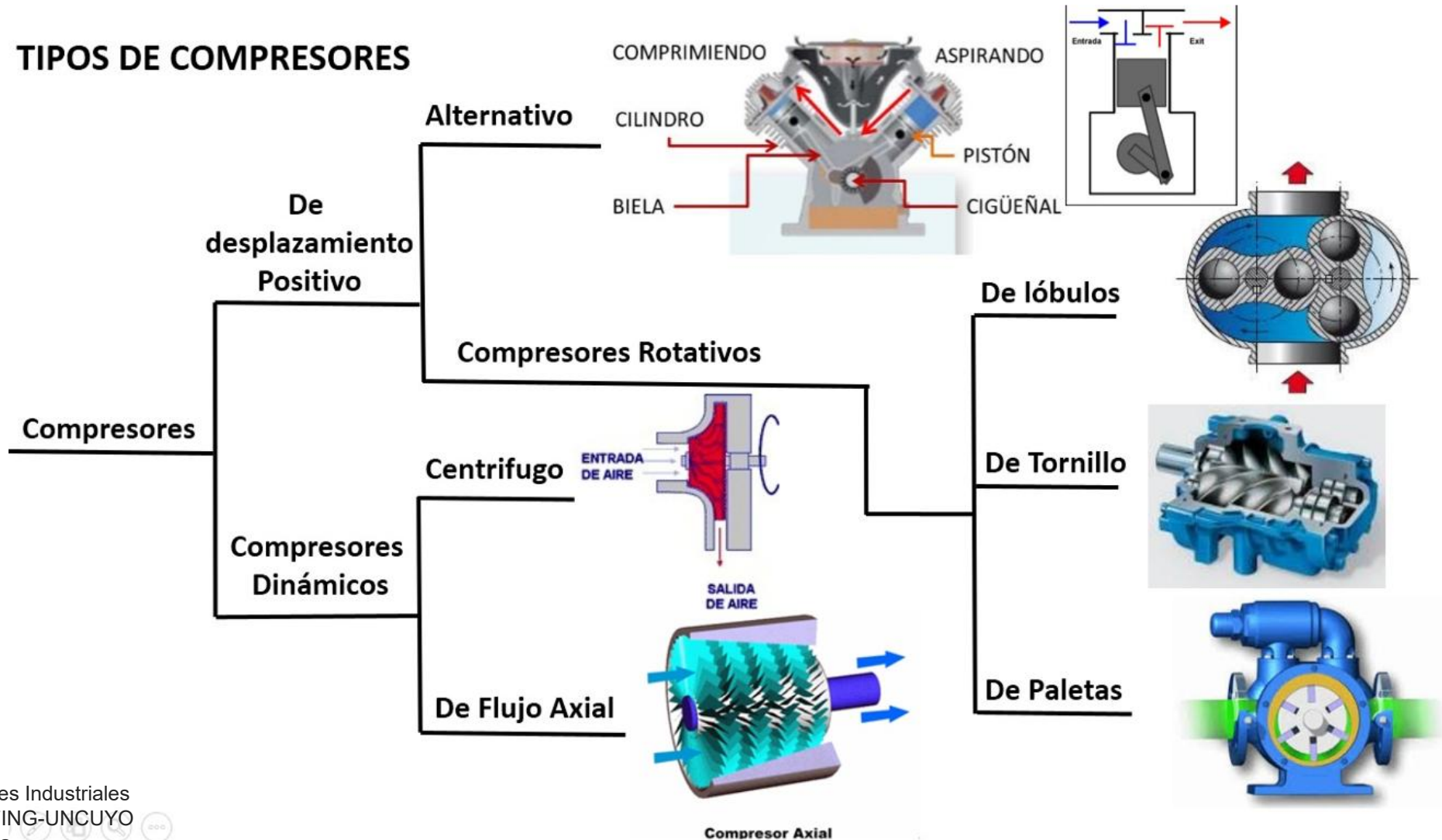
Consideraciones

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

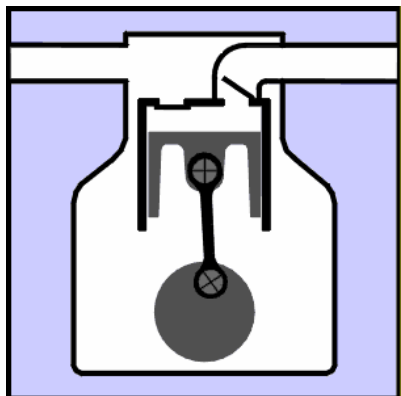


Clasificación y rango operativo

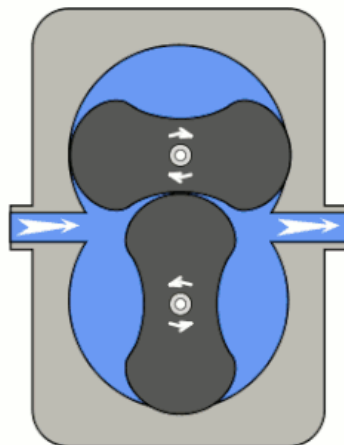
TIPOS DE COMPRESORES



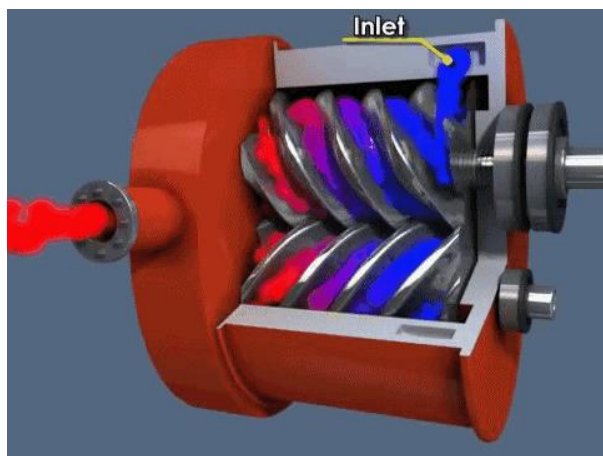
Tipos de compresores



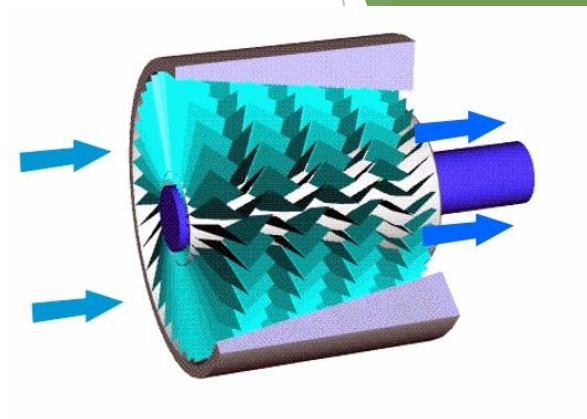
Reciprocante o alternativo



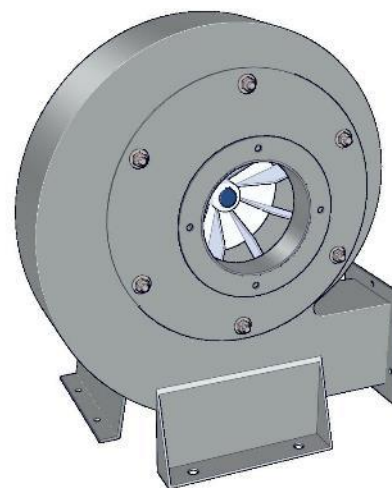
Lobular



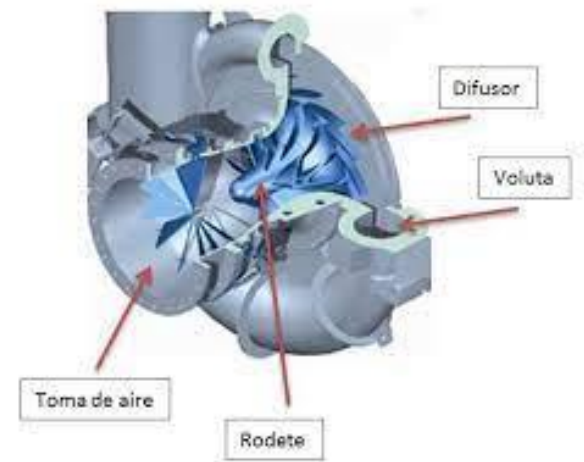
Screw o Tornillo



Axial



Soplador



Centrífugo

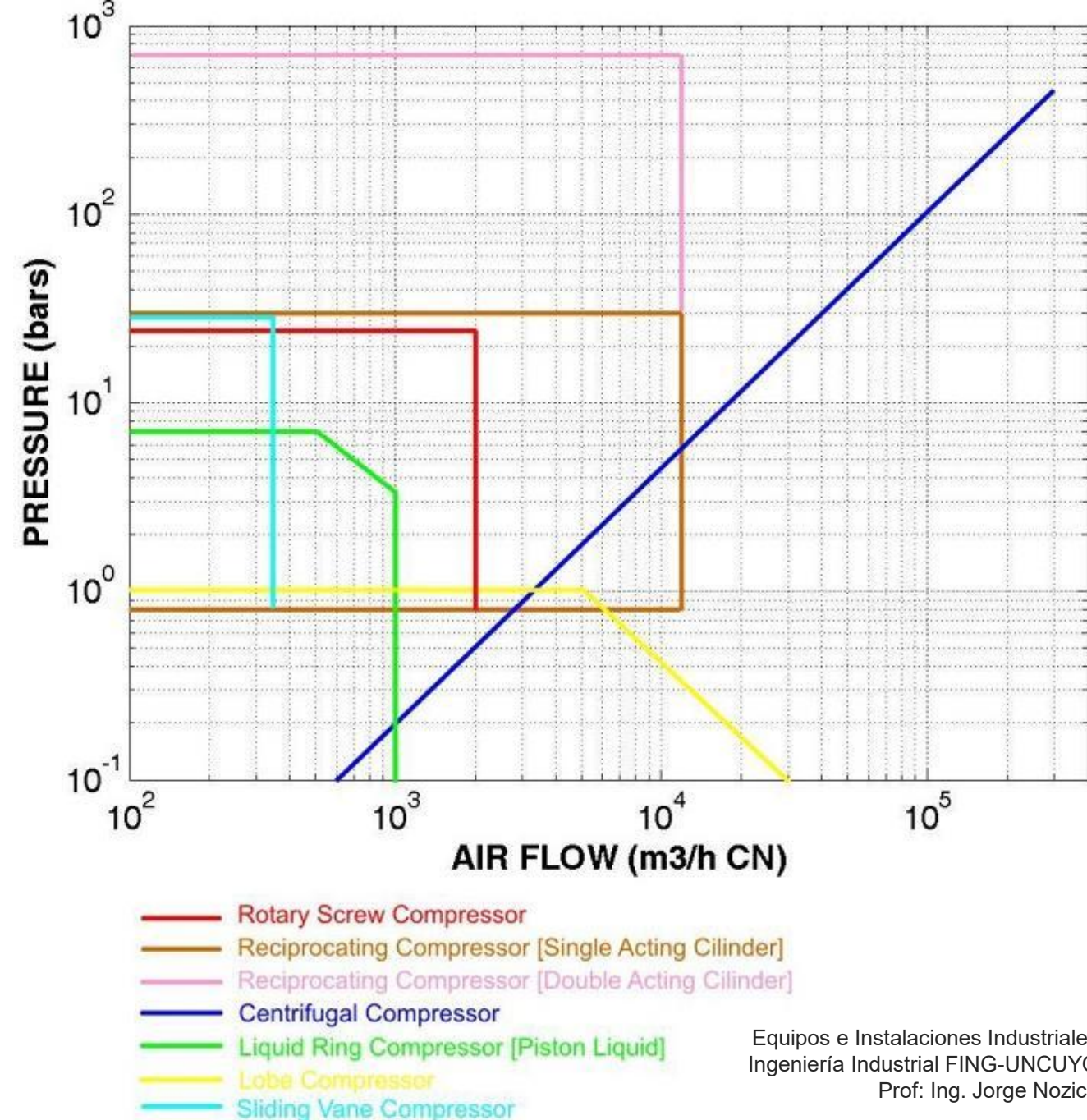
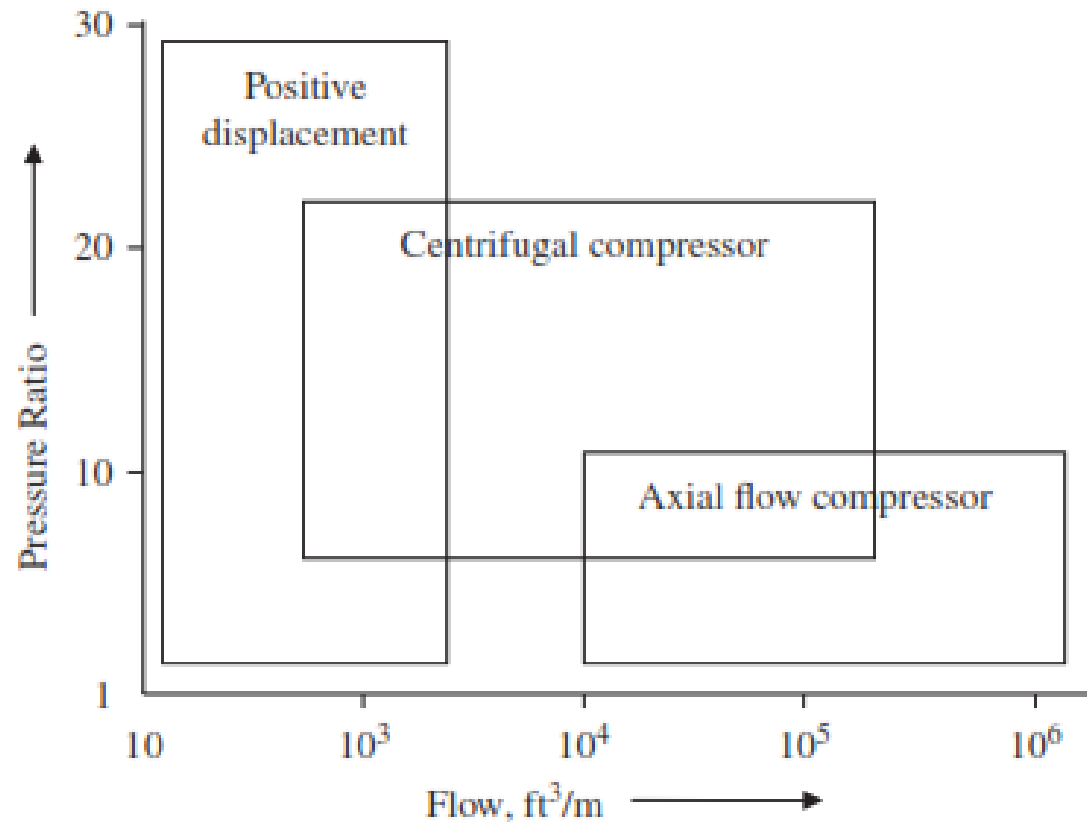
Comportamiento

TABLE 10-16 Performance Characteristics of Compressors

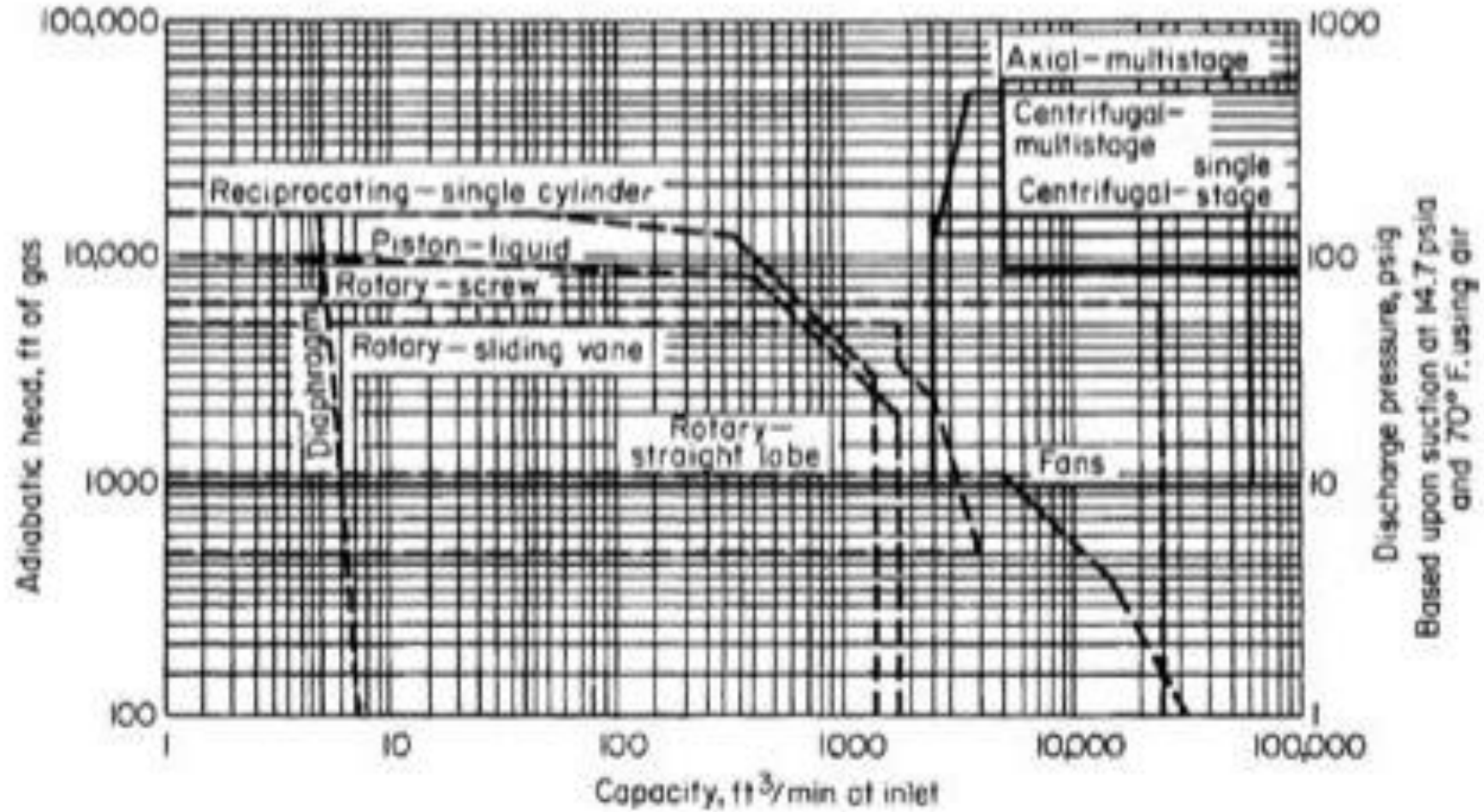
Types of compressors	Pressure ratio per stage			Efficiency, %	Operating range surge – choke, %
	Industrial	Aerospace	Research		
Positive displacement	Up to 30	—	—	75–82	—
Centrifugal	1.2–1.9	2.0–7.0	13	75–87 25	Large
Axial	1.05–1.3	1.1–1.45	2.1	80–91	Narrow 3–10

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

Rango operativo



Selección



Fuerza motriz



MOTORES ELÉCTRICOS

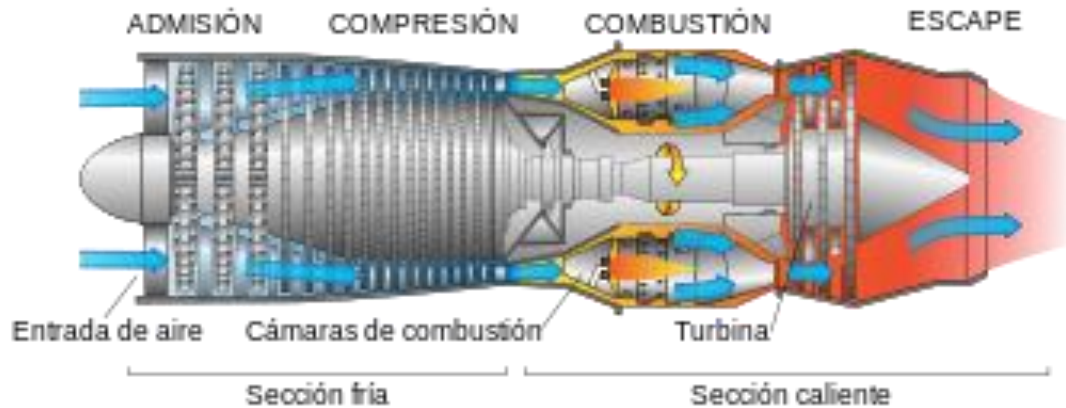
- Pequeñas potencias, velocidad sin variación, disponibilidad de EE
- Bajo costo de mantenimiento, poco equipamiento auxiliar y pocas piezas móviles



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.

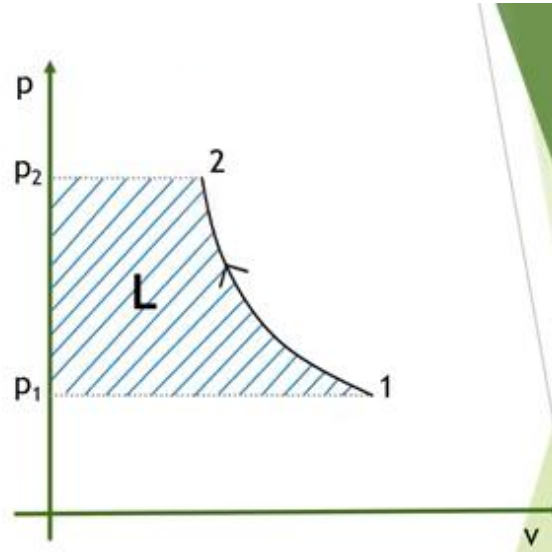


TRABAJO REQUERIDO EN COMPRESIÓN

Trabajo de circulación

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

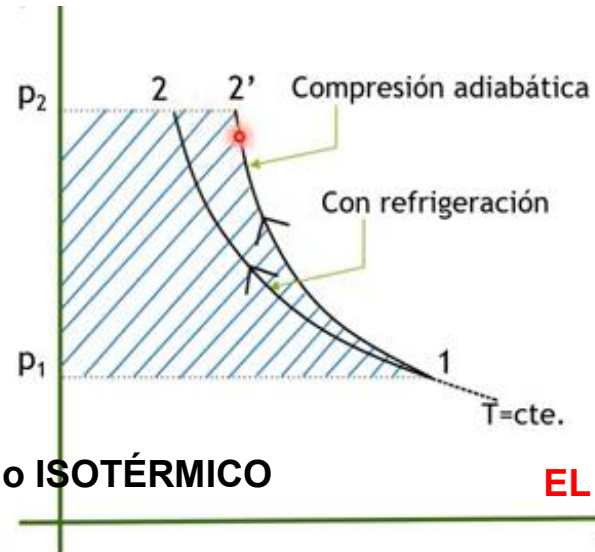
l_c = Trabajo específico (trabajo / unidad de masa)
 v = volumen específico (m³/kg)



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.

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

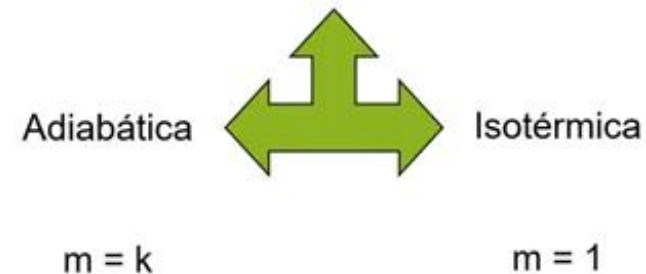
Trabajo específico de una compresión POLITRÓPICA.

- 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)

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

$$\eta_{\text{isoentrópico}} = L_{\text{isoentrópico ideal}} / L_{\text{Real}}$$

$$\eta_{\text{isotérmico}} = L_{\text{isotérmico ideal}} / L_{\text{Real}}$$

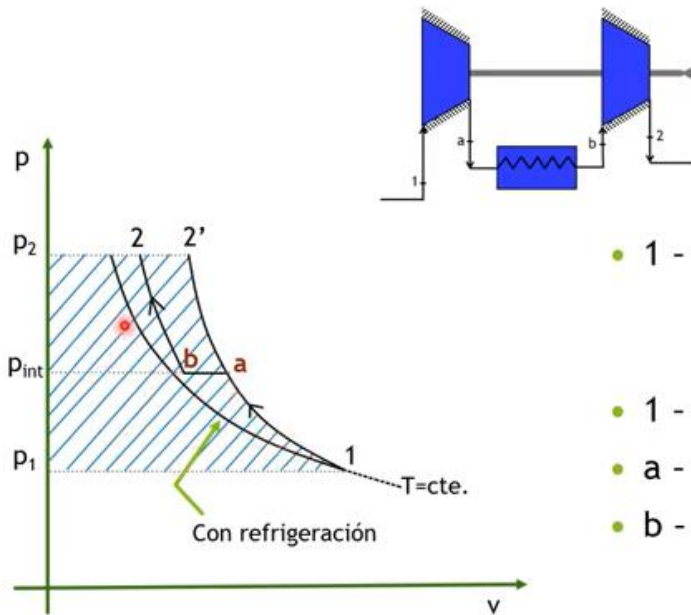


Isotérmica
 $Pv^1 = \text{cte}$

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

Compresión por etapas con refrigeración intermedia

Compresión en 2 etapas



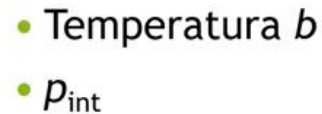
- 1 - 2': Politrópica en único compresor
- 1 - a: Politrópica compresor de baja
- a - b: Enfriamiento
- b - 2: Politrópica compresor de alta

- 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

El trabajo es función de:



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

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

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

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

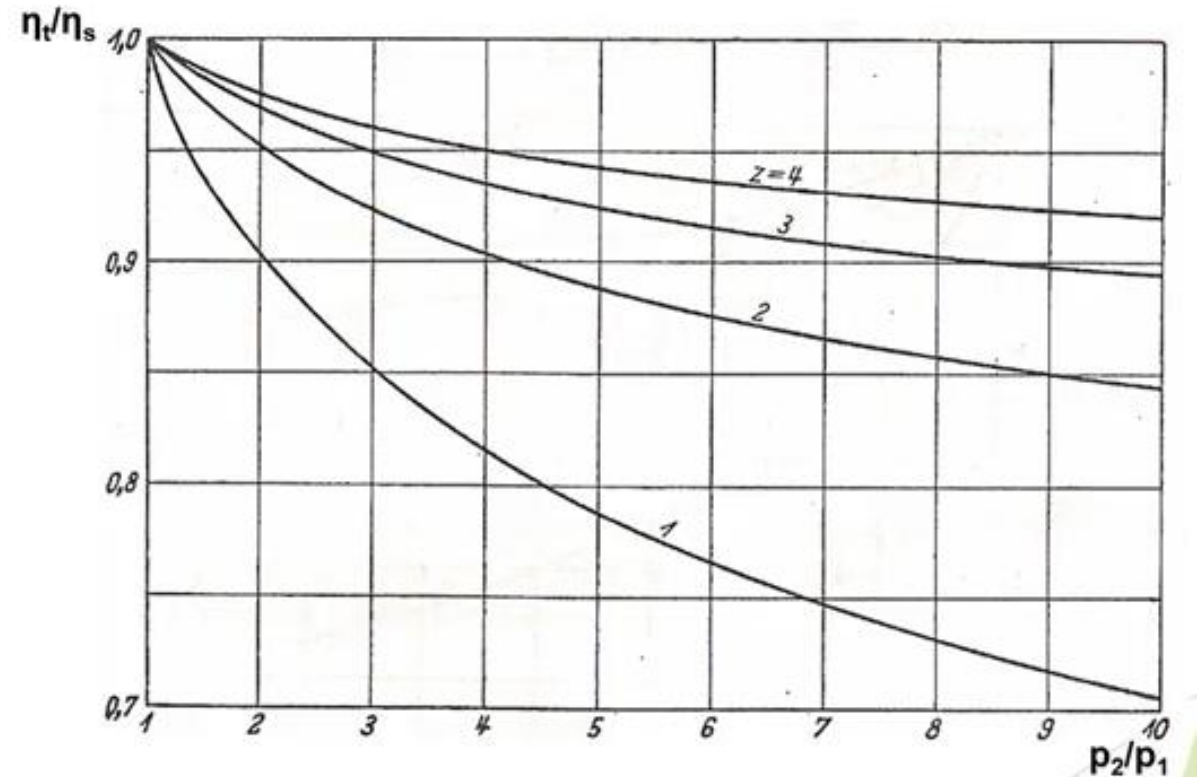
- m = exponente de la politrópica (n)
- Minimizando la función (Derivando = 0) se obtiene un valor de P_i óptimo
- Ej: Si se quiere incrementar la presión desde 1 barg hasta 100 barg, $P_i = \sqrt{1 \times 100} = 10$
- $P_i/P_1 = 10/1 = P_2/P_i = 100/10 = R_c = \frac{\sqrt{100}}{1}$

Pi óptima debe verificar Ts Adiabática para número óptimo de etapas.

Trabajo mínimo de z etapas de compresión

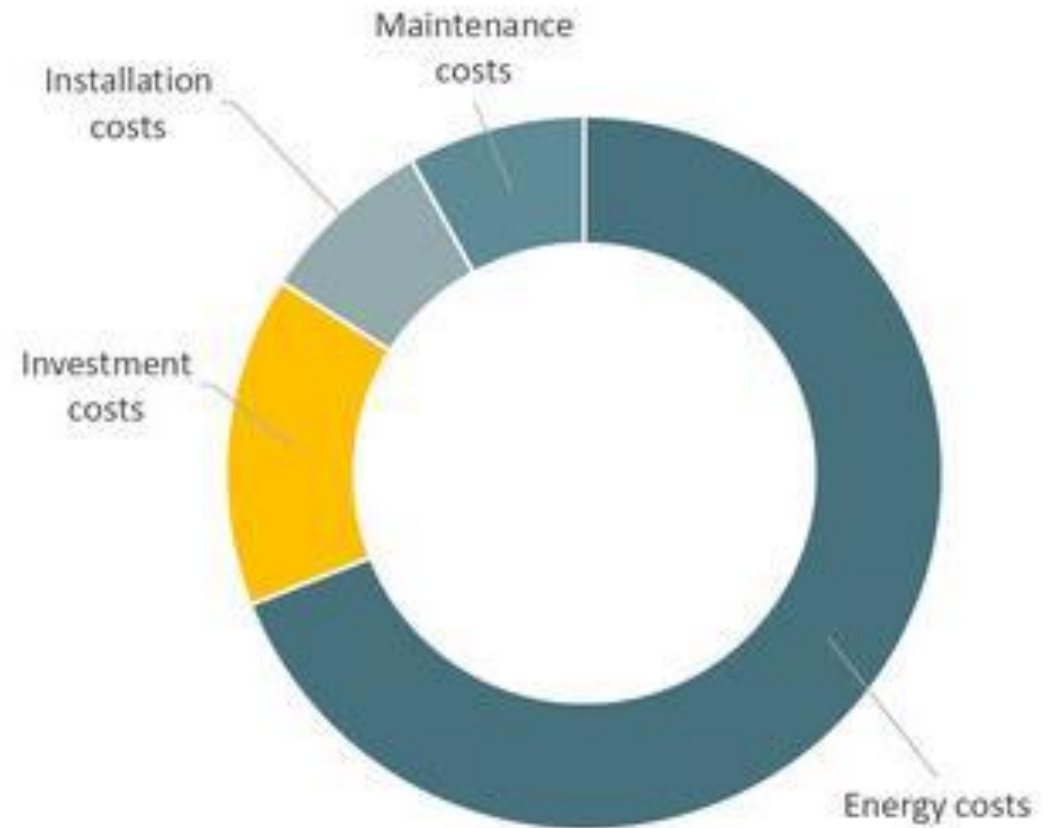
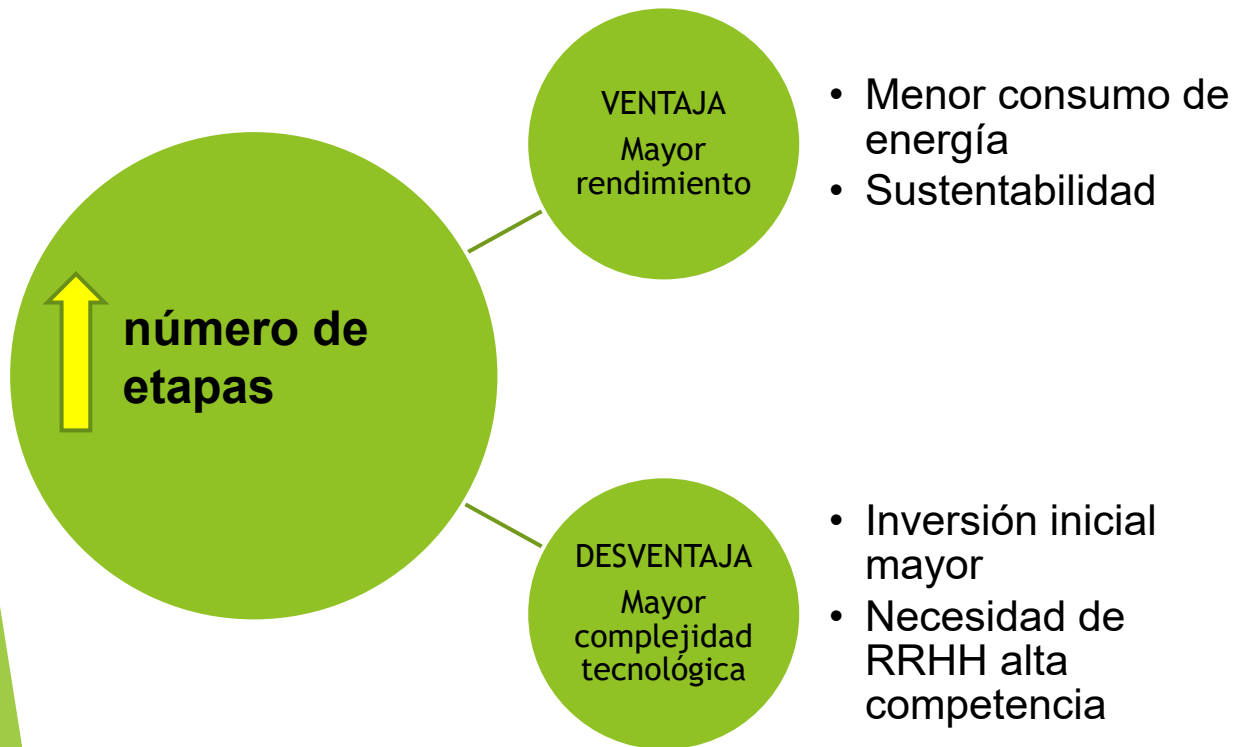
$$l_{CT} = \frac{m}{m-1} \frac{zRT}{\eta_s} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{zm}} \right]$$

- 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 isentrópico es 1
- El trabajo de cada etapa es equivalente



- Rendimiento isotérmico/rendimiento isentrópico 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



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

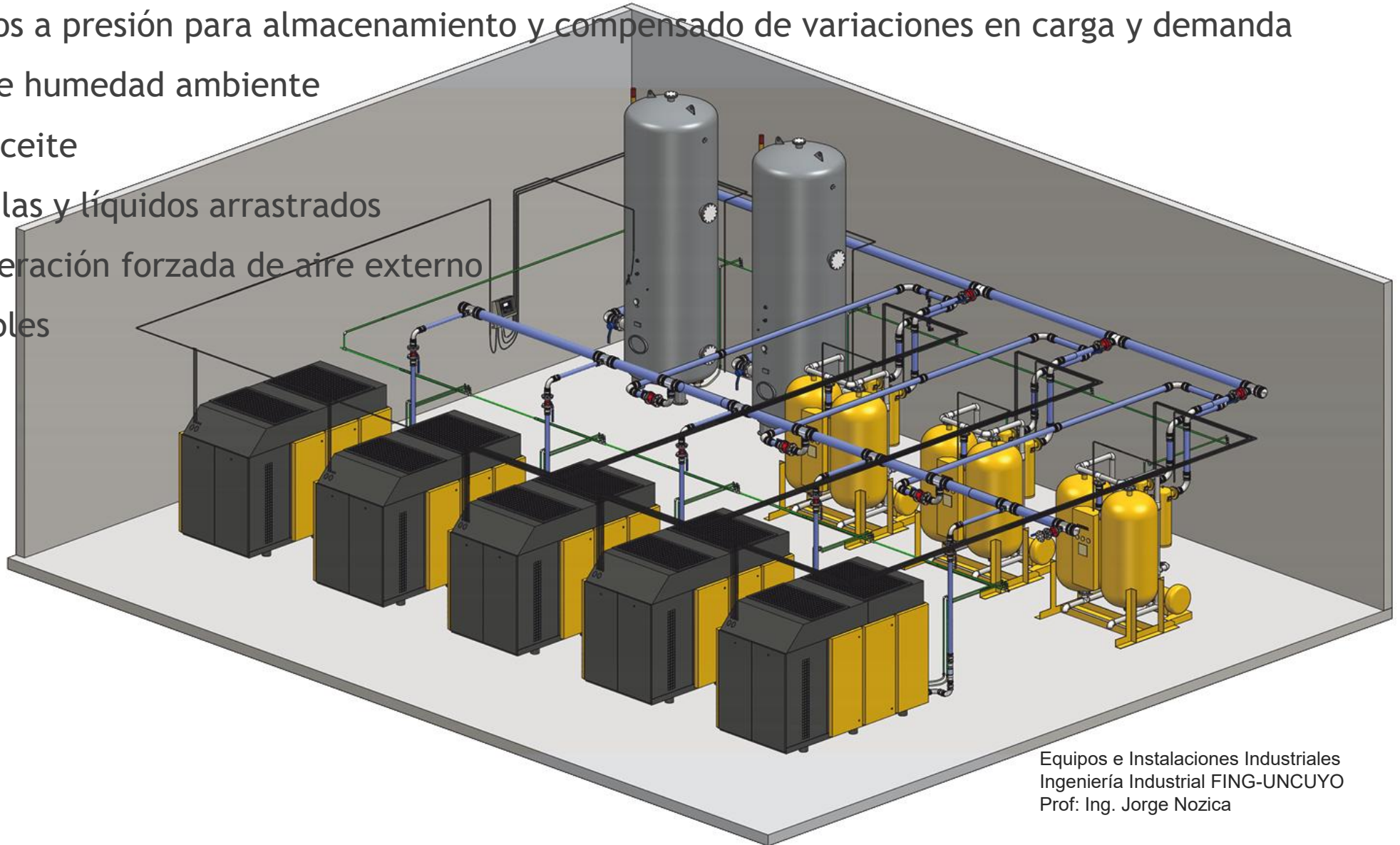
- Definir condiciones de servicio: Flujo másico, presión de descarga, temperatura de ingreso
- □Determinar tipo de compresor
- □Definir fuerza motriz y necesidad de potencia
- □Evaluar comportamiento del tipo de flujo de servicio
- □Costo inversión vs costo operativo

Elementos que componen una instalación de compresión

- ▶ Instalaciones de aire comprimido para servicio e instrumentos
- ▶ Instalaciones de aire comprimido para servicios farmacéuticos, biotecnológicos y alimenticios
- ▶ Instalaciones de compresión de GNC (vehicular)
- ▶ 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

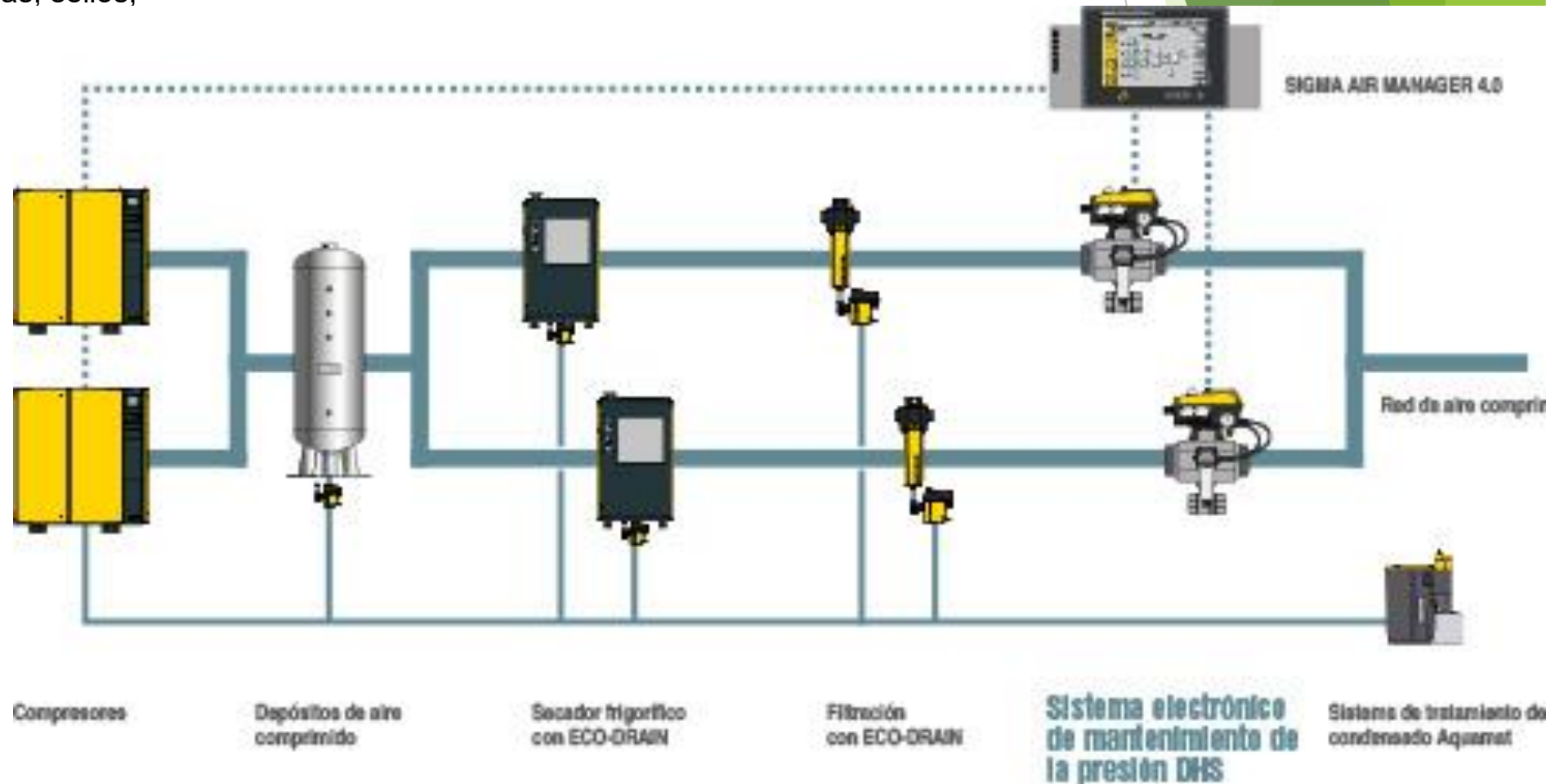
Elementos de una instalación de compresión de aire

- ▶ 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 / $\eta_s = 0.72$

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

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

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

► $\eta_{IsoEnt} = \frac{445.5}{752.2} = 0.59$ Rendimiento Isoentrópico