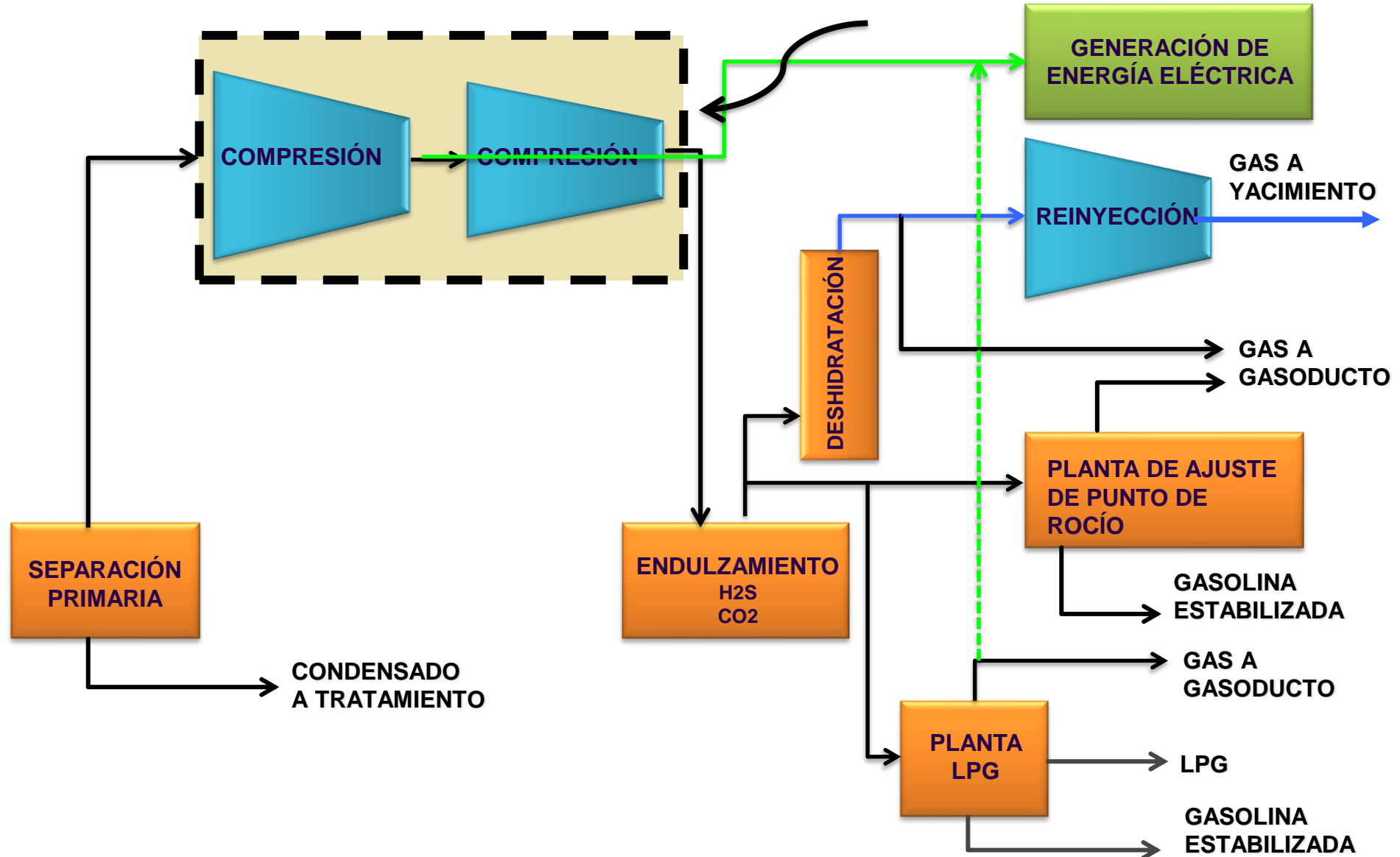


## 3 - • COMPRESION

# ESQUEMA TÍPICO DE PROCESAMIENTO



# Compresión

## ¿QUÉ ES UN COMPRESOR?

*Un equipo que aporta energía a un sistema para mover un fluido gaseoso*

## USO DE COMPRESORES EN UN YACIMIENTO

- *Transportar el gas entre pozo y batería / batería y planta / planta y gasoducto.*
- *Optimizar sistema de transporte.*
- *Mantener la producción pozos de baja presión.*
- *Recuperar gas en baja presión.*
- *Reinyección de gas para almacenamiento o disposición final.*

# Termodinámica de la Compresión

## Recordemos

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

$$P.V^n = \text{CTE} \quad n = \frac{c - c_p}{c - c_v} : \text{POLITROPICA}$$

$$P.V = \text{CTE} \quad n = 1 : \text{ISOTÉRMICA} \quad T_2 = T_1$$

$$P.V^k = \text{CTE} \quad n = k : \text{ISOENTRÓPICA} \quad T_2 = T_1 r^{(k-1)/k}$$

$$-W_{\text{isot}} = \frac{RT}{PM} \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad : \quad \text{Isotérmico (gas ideal)}$$

$$-W_{\text{is}} = \frac{k}{k-1} \frac{RT_1}{PM} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad : \quad \text{Isoentrópico (gas ideal)}$$

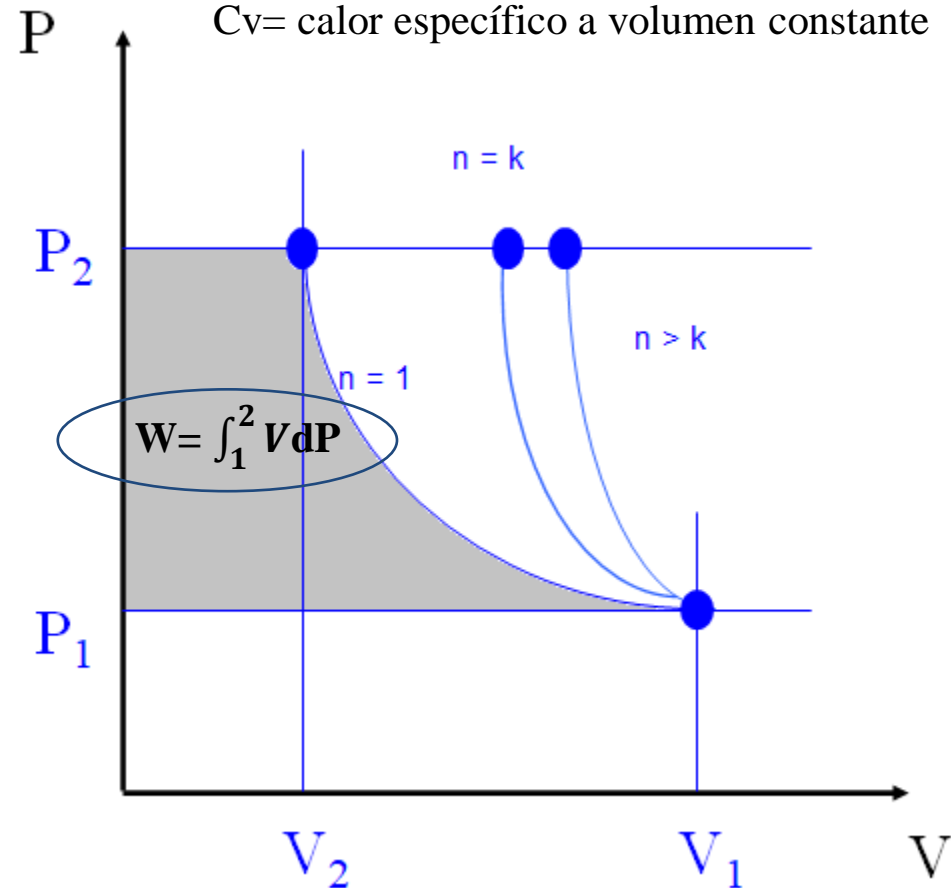
$$-W_{\text{pol}} = \frac{n}{n-1} \frac{RT_1}{PM} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad : \quad \text{Politrópico (gas ideal)}$$

$(k = c_p / c_v)$  exponente adiabático

Donde

$C_p$  = calor específico a presión constante

$C_v$  = calor específico a volumen constante



# Trabajo de Compresión

**La potencia requerida por un compresor es:**

$$P_{(HP)} = f(Q, rc)$$

**Donde:**  $rc = Pd / Pi$  (*relación de compresión*)

**Más exactamente:**

$$P(HP) = R * Q_{STD} * \frac{Z_{ing}}{M} * \left( \frac{K}{K-1} \right) * T_i \left[ \left( \frac{P_d}{P_i} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] * \frac{1}{\eta_c}$$

**Donde:**  $Q_{STD}$  = (MMm3/d Std)

$Z_{ing}$  = Factor de compresibilidad gas de ingreso:  $f(P, T \text{ y } \delta)$

$M$  = Peso Molecular

$K$  =  $C_p/C_v$

$T_i$  = Temperatura ingreso ( °C).

$P_i$  y  $P_d$  = Presión de ingreso y de descarga (kg/cm<sup>2</sup> absoluta).

$\eta_c$  = rendimiento compresor

## COMPONENTES BÁSICOS DEL SISTEMA

- COMPRESOR
- ACCIONAMIENTO
  - *MOTOR ELÉCTRICO*
  - *MOTOR A COMBUSTIÓN*
  - *TURBINA*
- DE LUBRICACIÓN (MOTOR / COMPRESOR)
- SISTEMA DE ACOPLAMIENTO
- SELLO
- SISTEMA DE ENFRIAMIENTO (AGUA / AIRE)
- ENFRIADORES (POST / INTERETEPA)
- SCRUBBERS DE SUCCIÓN
- TOMA DE AIRE
- GASES DE ESCAPE
- PANEL DE CONTROL

# COMPONENTES BÁSICOS DEL SISTEMA (cont)

## Servicios Auxiliares

- *GAS COMBUSTIBLE*
- *AIRE DE INSTRUMENTOS*
- *AIRE DE ARRANQUE*
- *ENERGIA ELÉCTRICA*
- *SISTEMA DE DRENAJES*
- *SISTEMA DE VENTEOS*

## SELECCIÓN DE COMPRESORES (Variables)

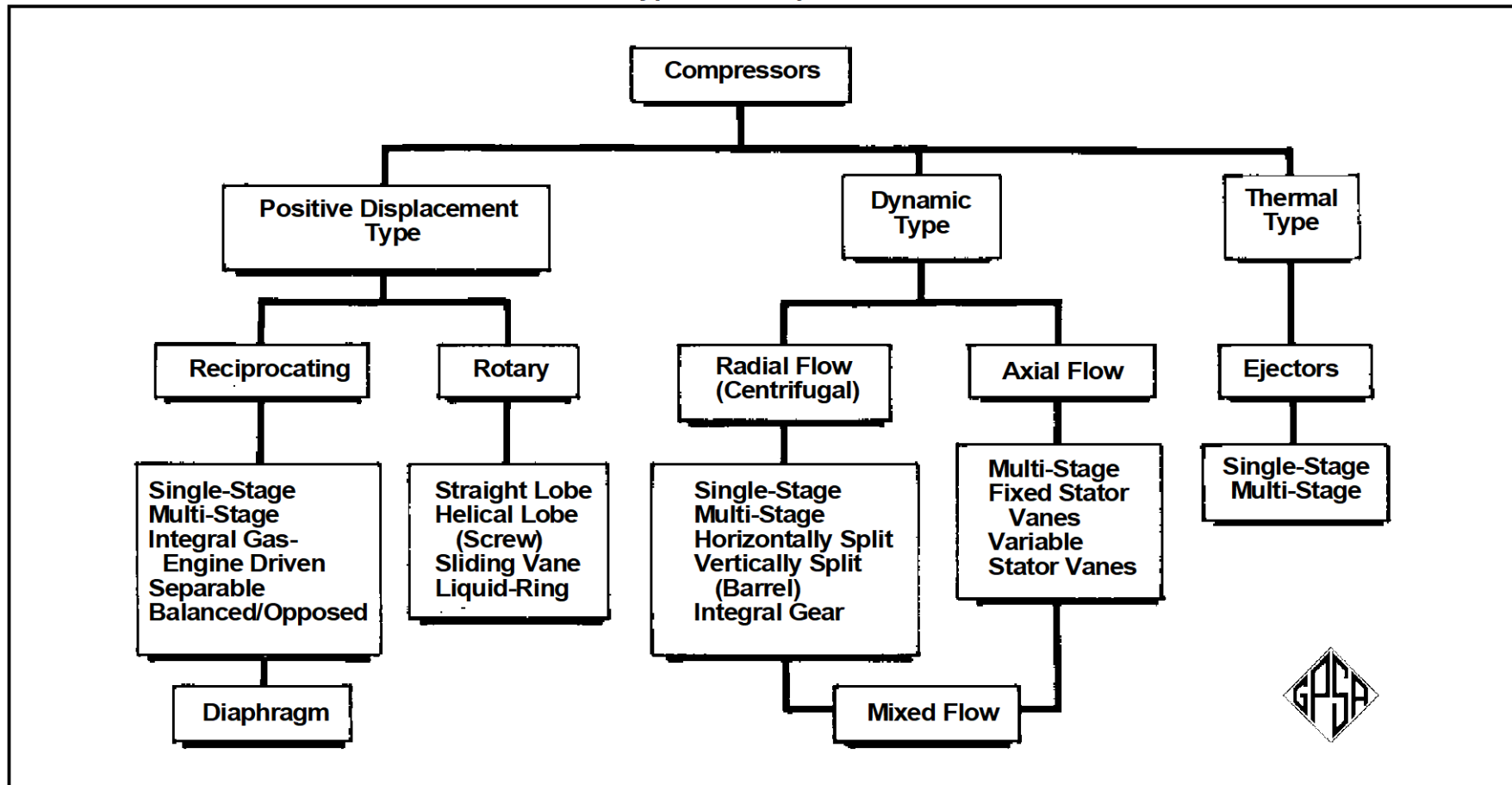
- CAUDAL
- COMPOSICIÓN DEL GAS
- CONDICIONES DE SUCCIÓN (Presión y Temperatura)
- CONDICIONES DE DESCARGA (Presión y Temperatura)
- TEMPERATURA AMBIENTE
- ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR
- DISPONIBILIDAD DE SERVICIOS AUXILIARES (energía eléctrica, gas combustible, agua de enfriamiento, etc.)



# Compresión: Tipo de Compresores

FIG. 13-2

Types of Compressors



## Compresión: Tipo de Compresores (cont.)

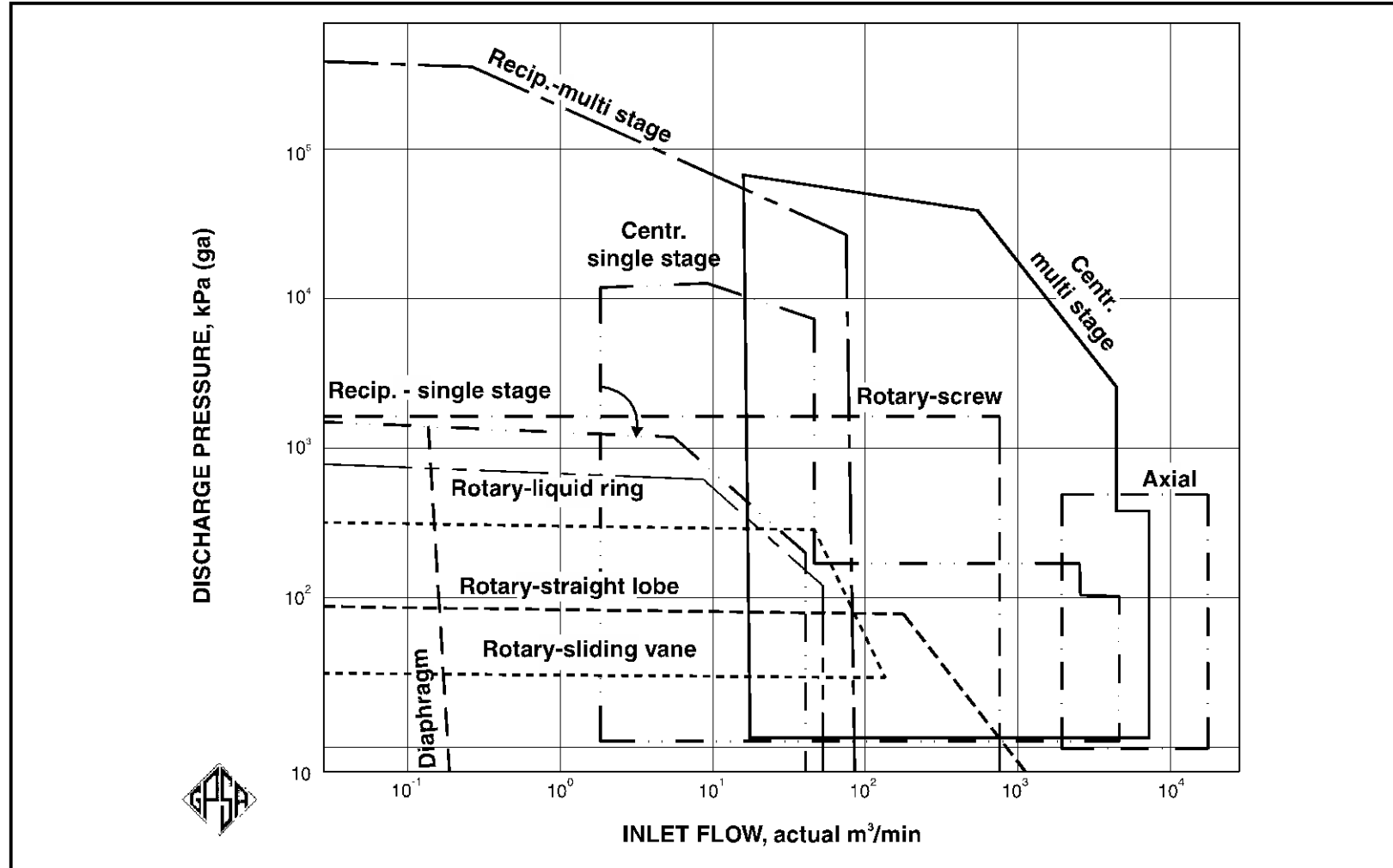
El **compresor de desplazamiento positivo** es aquel cuyo principio de funcionamiento se basa en la disminución del volumen del gas en la cámara de compresión donde se encuentra confinado, produciéndose el incremento de la presión interna hasta llegar al valor de diseño previsto, momento en el cual el gas es liberado al sistema.

En el **compresor dinámico**, el aumento de la presión no se produce por la disminución del volumen, sino mientras el gas fluye. Simplificando, el gas se impulsa a gran velocidad y se descarga a través de unos difusores, donde la energía cinética se transforma en presión estática.

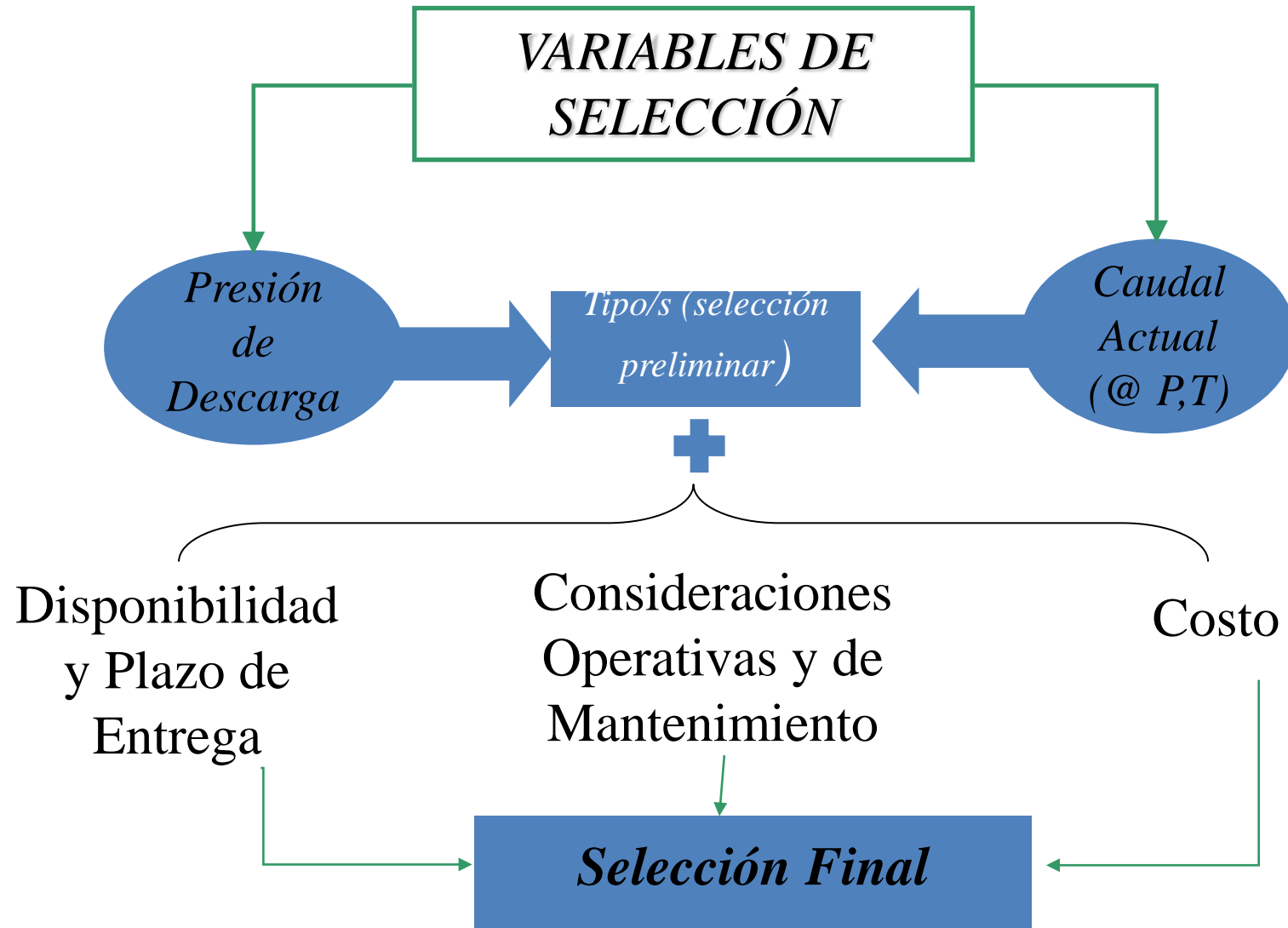
# Compresión: Selección de Compresores

FIG. 13-3

Compressor Coverage Chart



# Compresión: Selección de Compresores



## NORMAS RELEVANTES

- **Compresores Centrífugos**  
**API 617**
- **Compresores Reciprocantes (Baja Velocidad)**  
**API 618**
- **Compresores Reciprocantes (Alta velocidad)**  
**ISO 13631 (ex API 11P)**
- **Compresores Rotativos**  
**API 619**

# Compresores Alternativos

## USOS :

- Compresión en yacimientos: de presión de pozos a plantas de procesamiento o a gasoducto
- Unidades de Refinería y Petroquímica

## RANGOS DE APLICACIÓN:

- Caudales: < 6000 m<sup>3</sup>/h (en condiciones de succión)
- Relación de Compresión: 1,0 a 4,0 (por etapa)
- Temperatura de descarga: < 150 °C

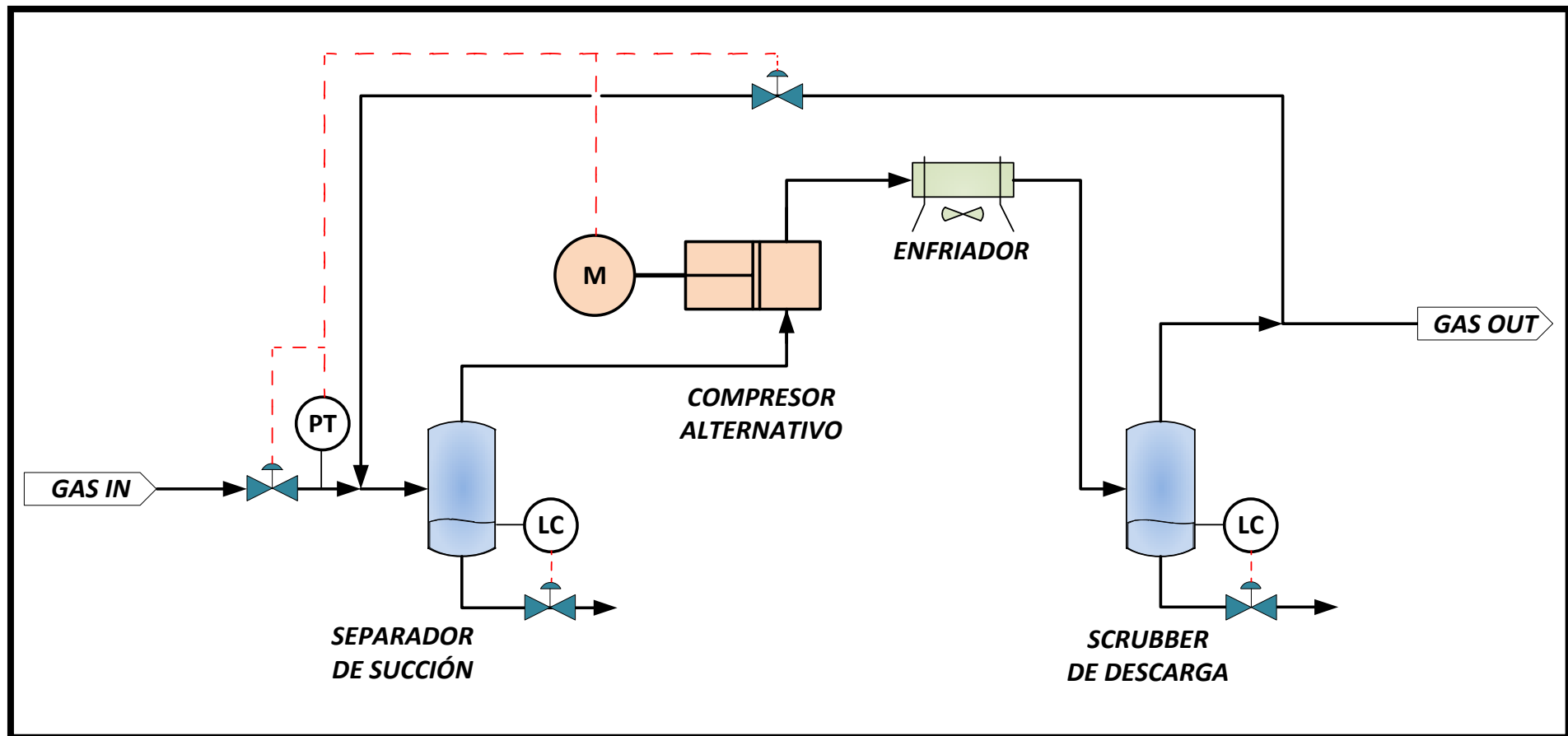
# Compresores Alternativos

## Parámetros para la Selección

- *Potencia*
- *Cantidad de Pistones*
- *Diámetro de Pistones*
- *Carrera*
- *Desplazamiento (Espacios nocivos)*
- *Velocidad de rotación*
- *Eficiencia volumétrica (Tipos de válvulas)*
- *Carga en bielas.*
- *Temperatura de descarga*

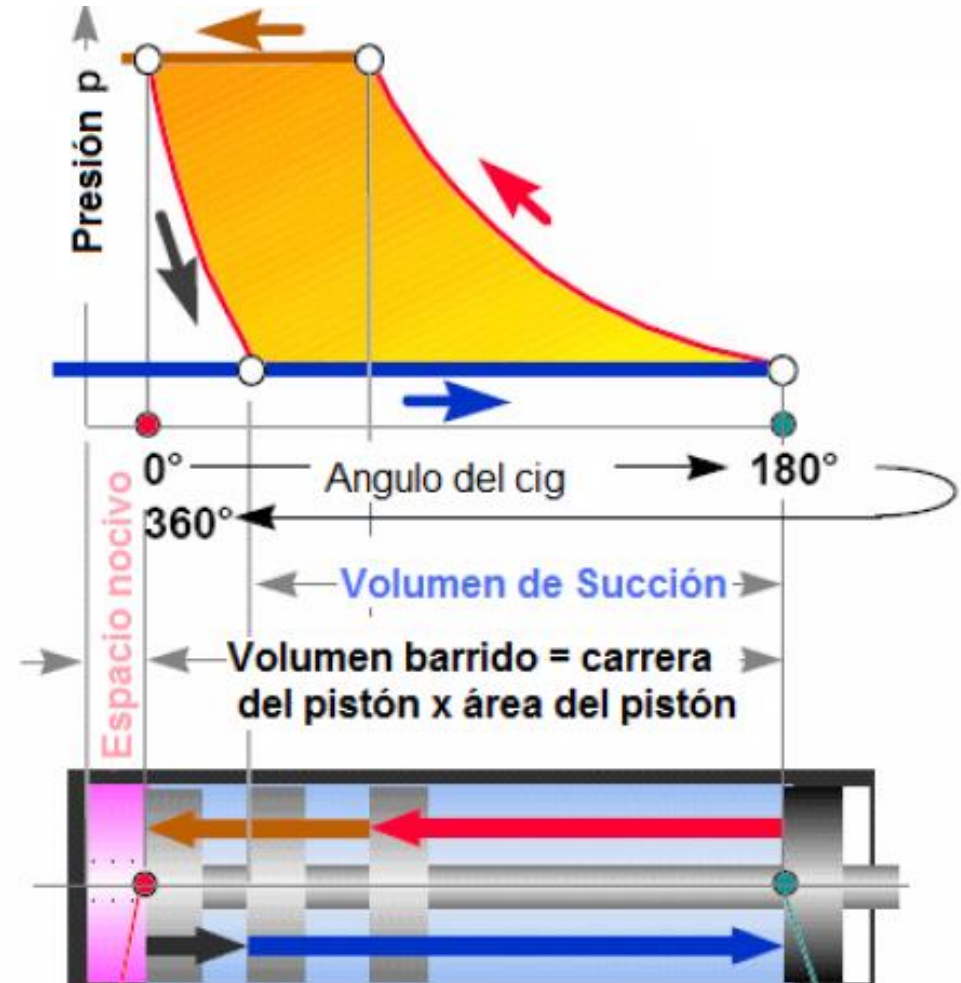
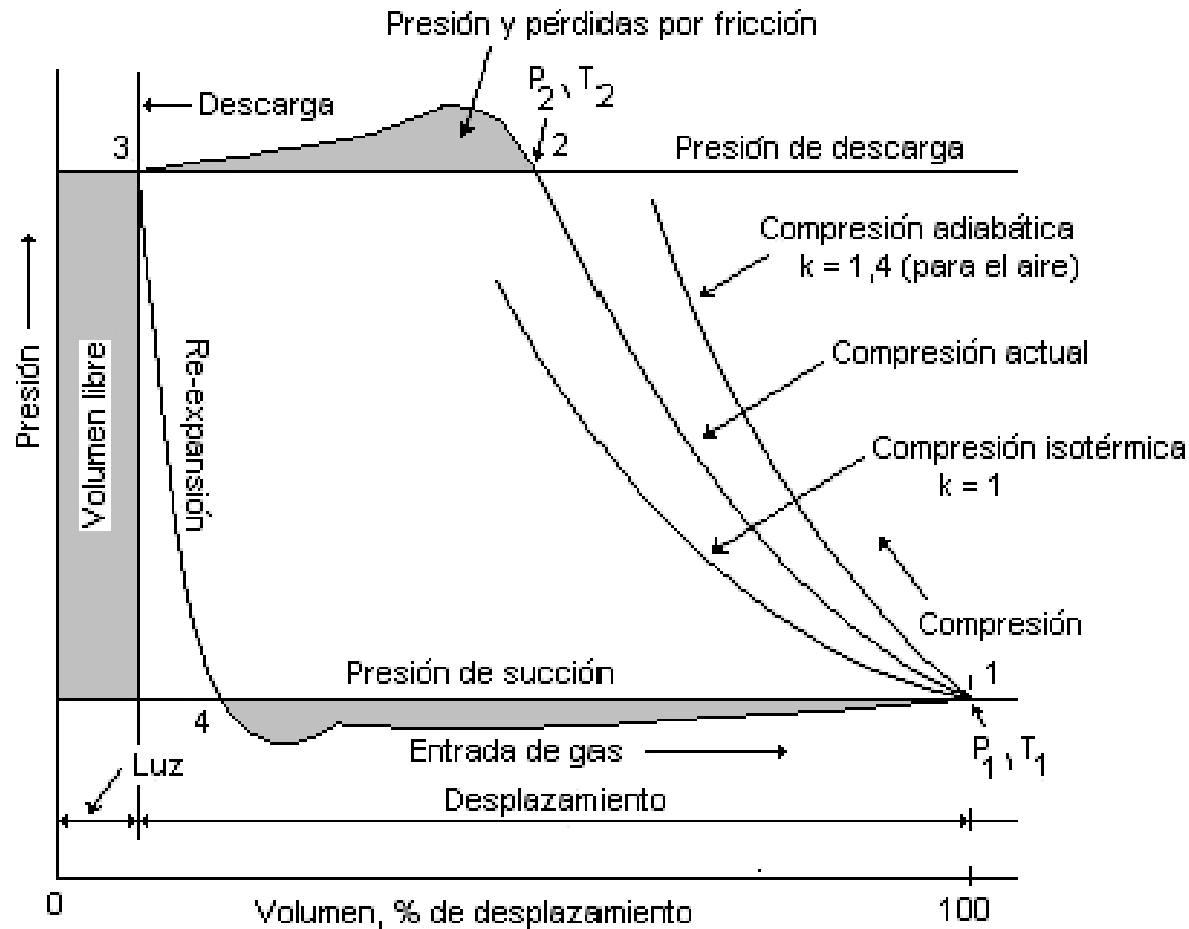
# Compresores Alternativos

## DIAGRAMA





# COMPRESOR ALTERNATIVO: Curva de Funcionamiento



# Compresores Alternativos

ESTACIÓN COMPRESORA



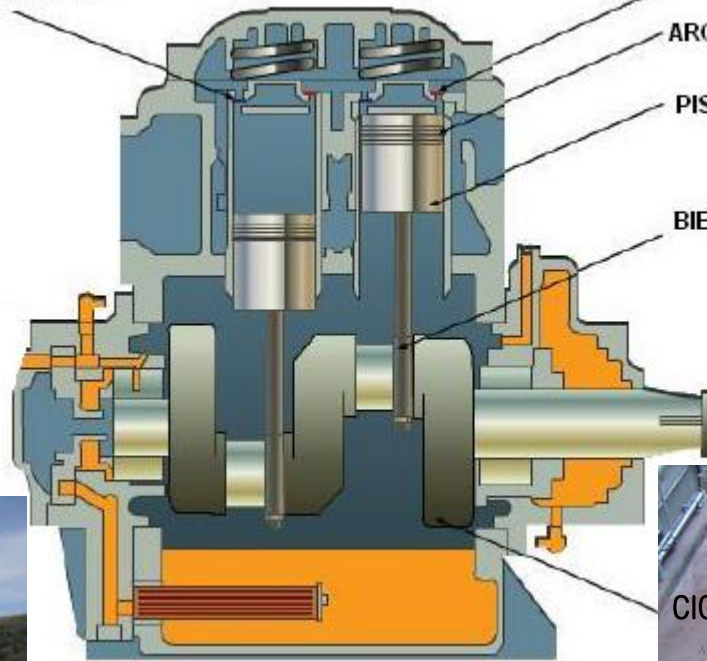
VALVULA ASPIRACION

VALVULA DESCARGA

AROS DE PISTÓN

PISTON

BIELA



MOTOR A COMBUSTIÓN

CIGUEÑAL



# Compresores Centrífugos

## USOS :

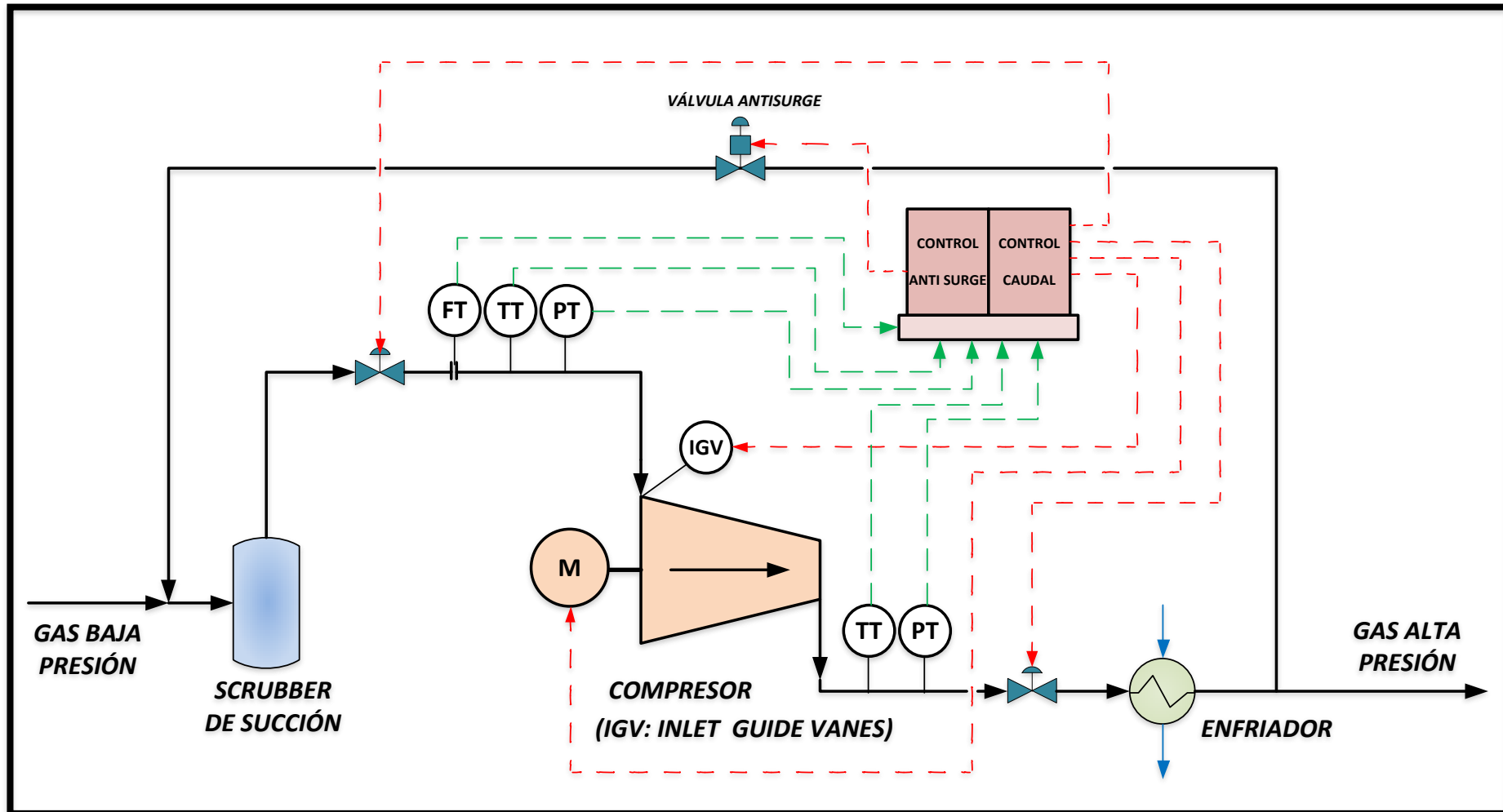
- Estaciones de Compresión de Gasoductos
- Compresión en plantas de yacimientos
- Refrigeración
- Unidades de Refinería y Petroquímica

## RANGOS DE APLICACIÓN:

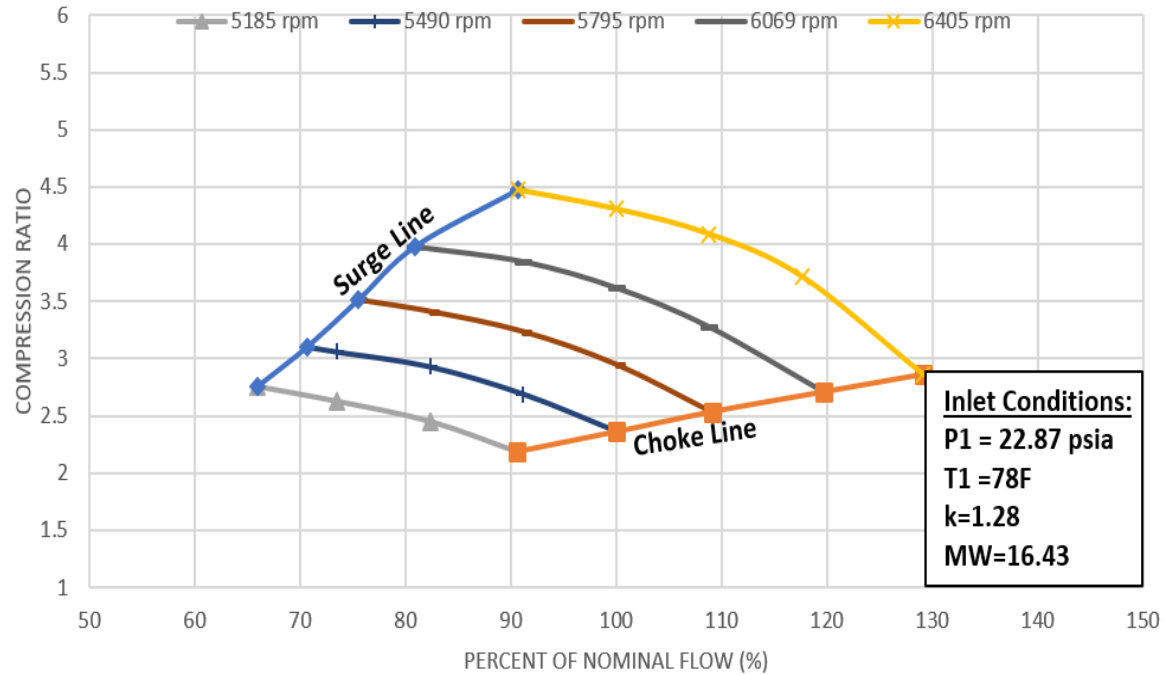
- Caudales: 1.000 a 400.000 m<sup>3</sup>/h
- Relación de Compresión: < 2,5 (por etapa)
- Temperatura de descarga: < 150°C
- Límites de caudal: mín por “surge”; máx por “stone wall”

# Compresores Centrífugos

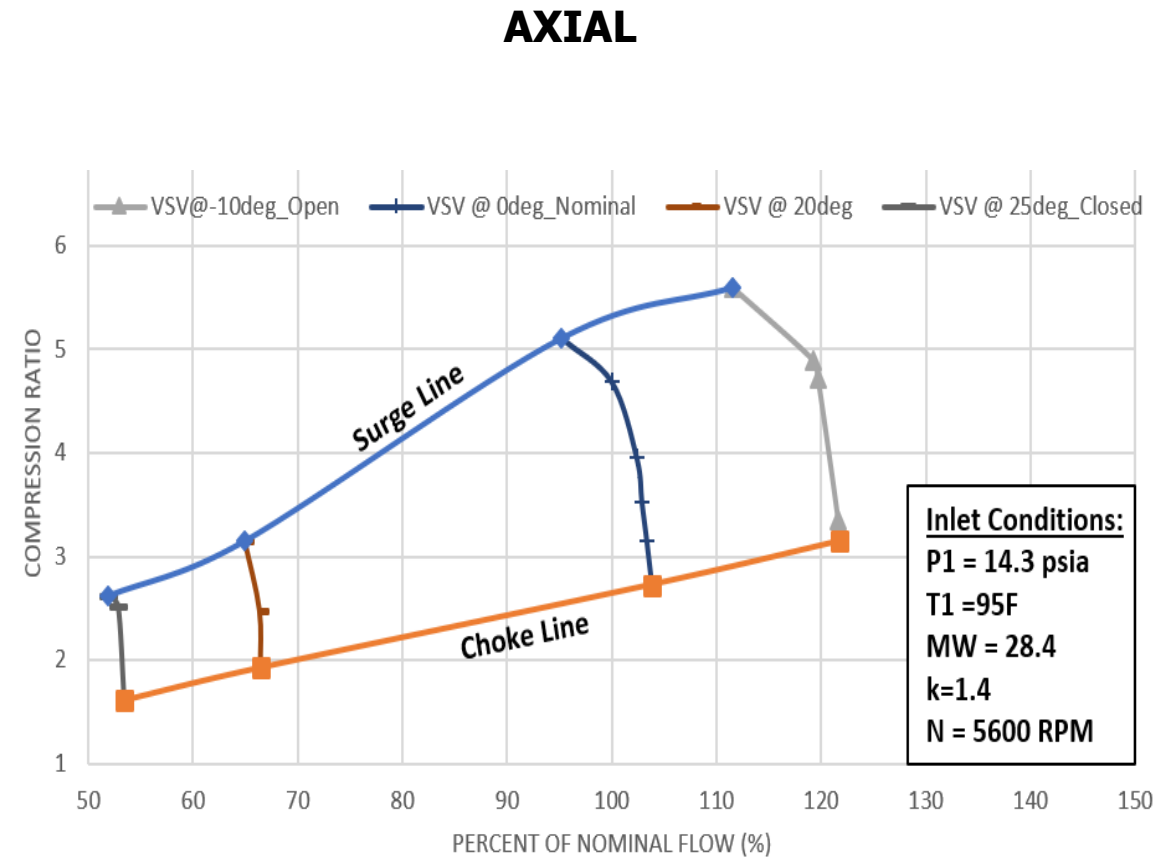
## DIAGRAMA



# COMPRESOR CENTRÍFUGO: Curvas de Funcionamiento

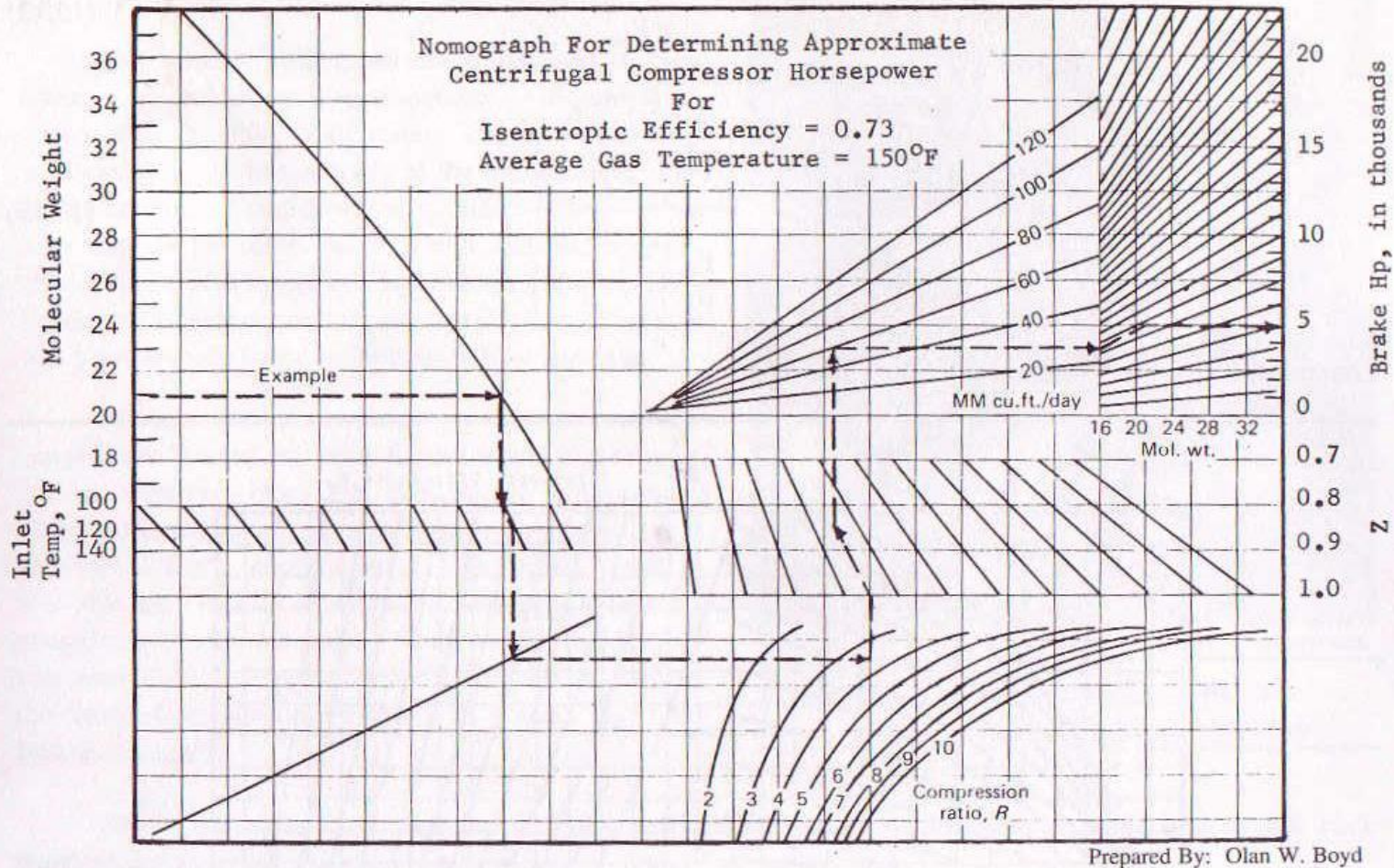


**RADIAL**

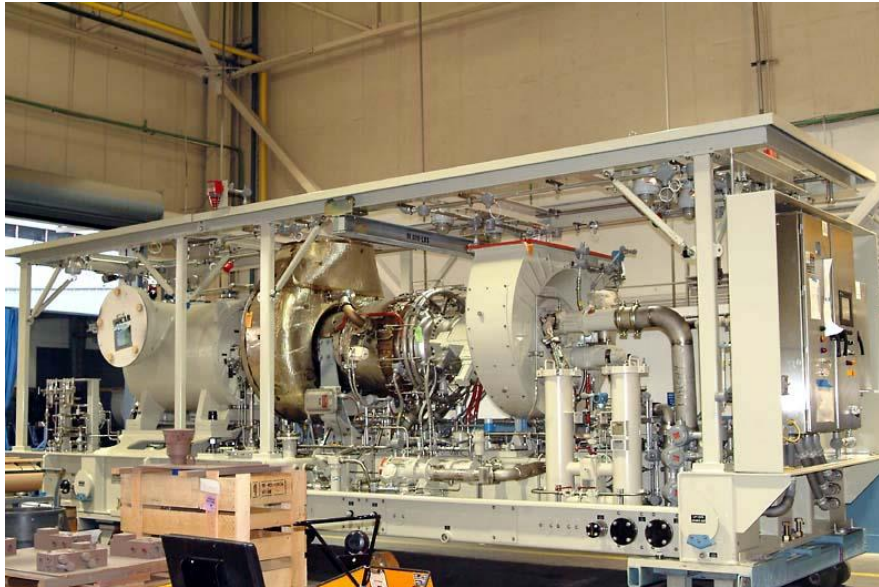


# Compresores Centrífugos: Monograma para estimar Potencia

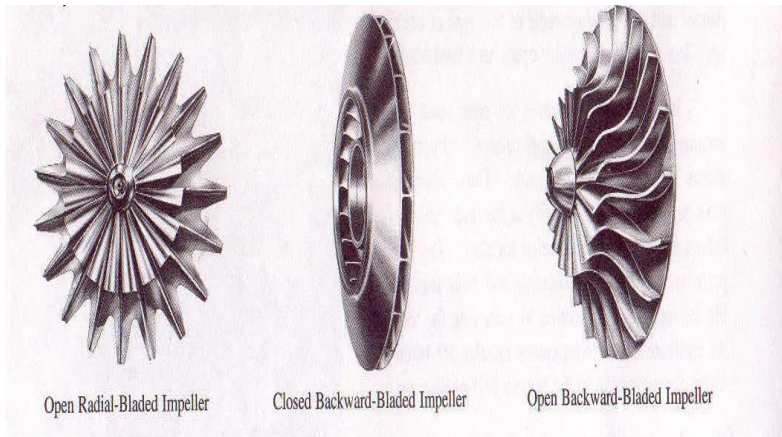
Figure 15.5 is a nomograph for estimating BHP. It is for an overall efficiency of 0.73. For another efficiency multiply the BHP found by  $(0.73/E)$ .



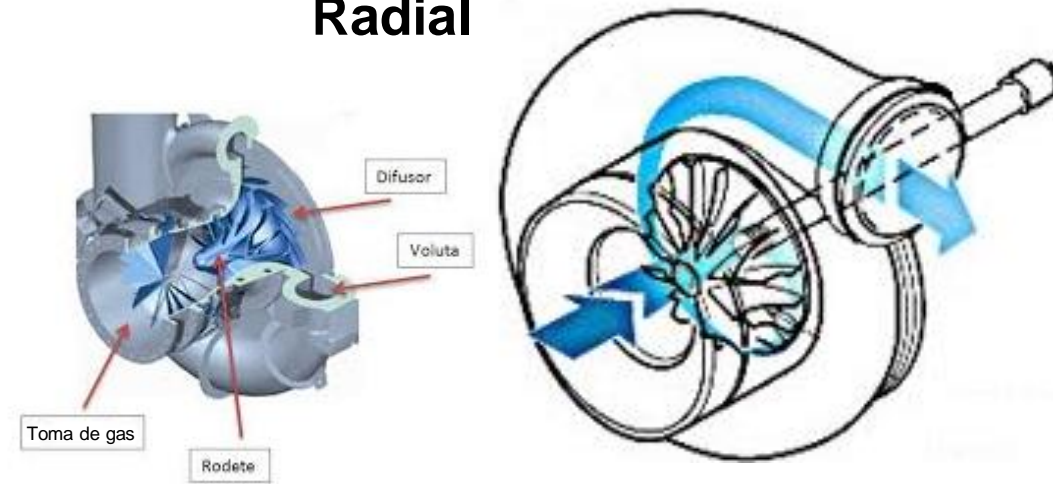
# Compresores Centrífugos



## Axial



## Radial



# Compresores Centrífugos: Comparación

Función	Radial	Axial
<b>Tipo de Motor</b>	Pequeño	Grande
<b>Flujo másico</b>	< 15kg/s	>100kg/s
<b>Eficiencia</b>	Baja 86-87%	Alta 94%
<b># de Etapas</b>	Pocas	Muchas
<b>Presión por etapa</b>	Alta (5-7)	Baja (<1.5)
<b>Mantenimiento</b>	Sencillo	No sencillo
<b>Costo</b>	Barato	Muy caro



# Compresión: Alternativos vs. Centrífugos

## ALTERNATIVOS

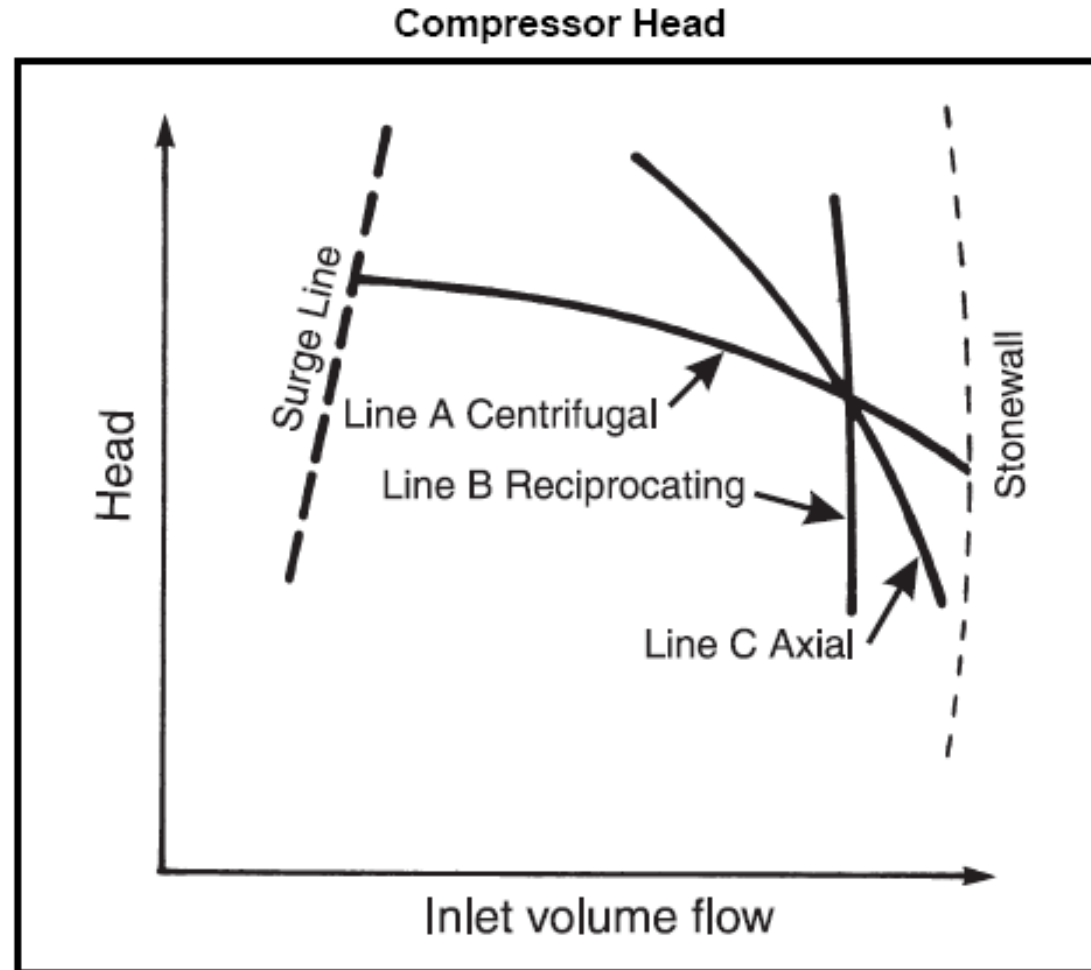
- *Bajos caudales*
- *Altas presiones*
- *Altas relaciones de compresión*
- *Alta eficiencia*
- *Flexibilidad en capacidad y rangos de presión*
- *Baja sensibilidad a composición del gas*
- *Alta disponibilidad de equipos en alquiler*

## CENTRÍFUGOS

- *Grandes caudales*
- *Menor costo inicial por HP*
- *Menores costos de mantenimiento*
- *Mayor índice de disponibilidad*
- *Menor atención operativa*
- *Menor tamaño, a igual capacidad*
- *Velocidad de giro: acorde con accionamientos de alta velocidad y bajo mantenimiento*

# Compresión: Alternativos vs. Centrífugos

## Comparación Curvas Características



- Comp. Centrifugo : Máquina de altura de carga cte. y caudal variable.
- Comp. Alternativo: Máquina de altura de carga variable y caudal cte.

# Compresores a Tornillo

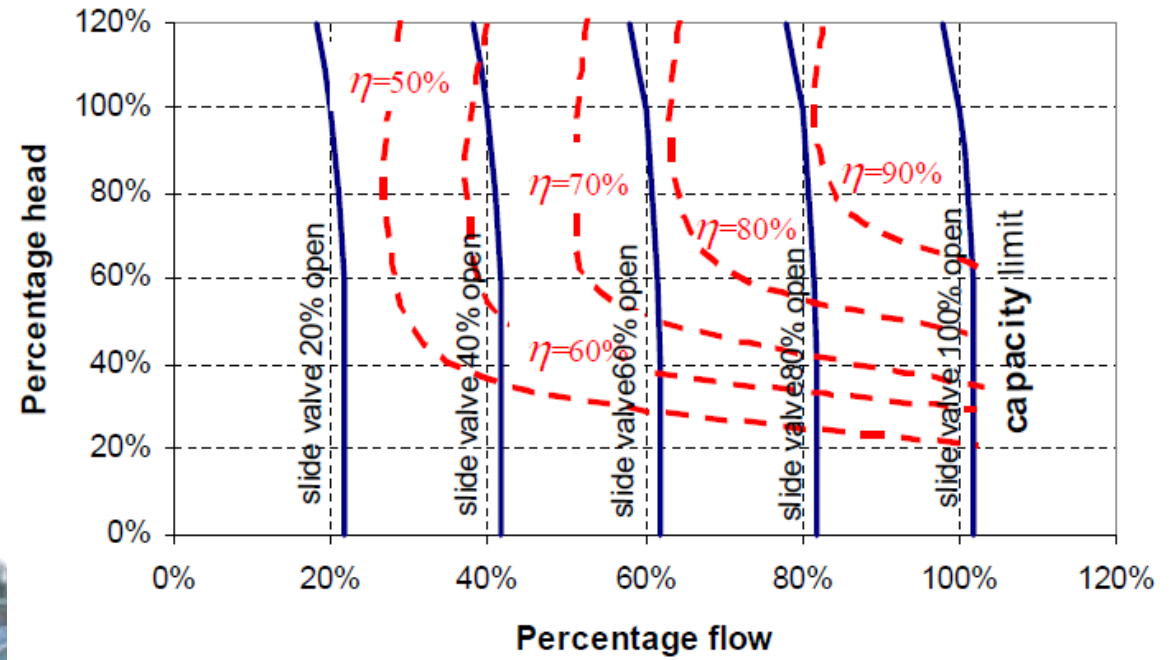
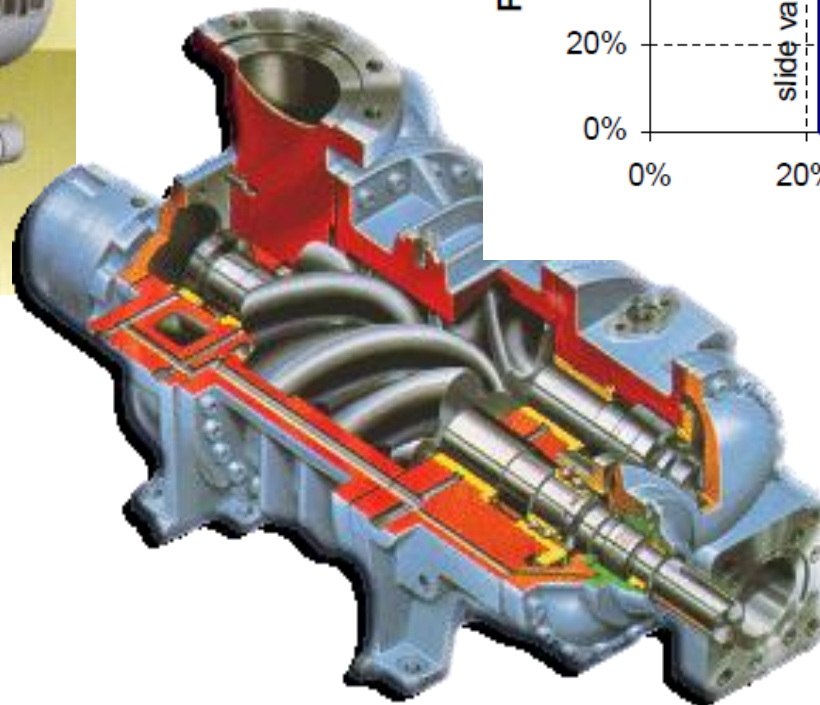
## USOS :

- Refrigeración mecánica
- Booster de compresores alternativos
- Recuperación de vapores de tanques de almacenamiento

## RANGOS DE APLICACIÓN:

- Presión de Succión: Atmosférica
- Presión de Descarga Máxima: 30 kg/cm<sup>2</sup>
- Máxima Relación de Compresión: 8
- Caudales: <300.000 m<sup>3</sup>/d

# Compresores a Tornillo



# Compresores de Paletas Deslizantes

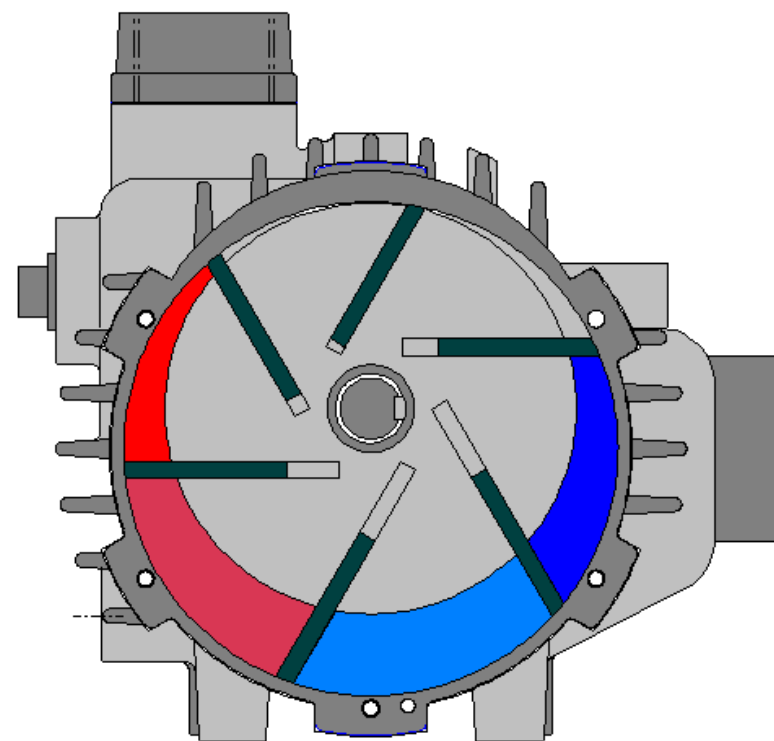
## USOS :

- Recuperación de vapores de tanques
- Booster de compresores alternativos
- Reducción de Presión de entrecolumna

## RANGOS DE APLICACIÓN:

- Presión de Succión: vacío
- Presión de Descarga Máxima: 10 kg/cm<sup>2</sup>
- Máxima Relación de Compresión: 4,5
- Caudales: <80.000 m<sup>3</sup>/d

# Compresores de Paletas Deslizantes



# Compresores de Paletas Deslizantes

Ejemplo:  
Recuperación de  
Vapores de Tanque



- Caudal: 18.000 m<sup>3</sup>/d de gas de PM 45
- Se obtienen 13.500 m<sup>3</sup>/d de gas a 3 kg/cm<sup>2</sup>
- y 1 m<sup>3</sup>/d de gasolina a presión atmosférica

## COMPRESORES DE BOCA DE POZO

**OBJETIVO:** Bajar presión en boca de pozo y aumentar producción

**TIPOS:** Paletas Deslizantes / Tornillo / Alternativos / o Tándem

**RANGOS:** Presión succión: muy bajas presiones (hasta vacío)

**Caudal:** hasta 50.000 SCMD aprox

**Potencia:** hasta 150 HP aprox.

**PRECAUCIONES:** Composición del Gas combustible

Compatibilidad del Gas con el aceite de lubricación

Compatibilidad de aceites de lubricación

Cantidad de Condensados





# ANEXO

- **Ejemplo de Compresor Alternativo**
- **Compresores Alternativos: Control**
- **Compresores Centrífugos: Control**
- **Selección de Compresores y Accionamientos**
- **Configuración de equipos**

## Compresión: EJEMPLO DE COMPRESOR ALTERNATIVO

### DATOS:

• CAUDAL: 150 000 Sm<sup>3</sup>/d

• COMPOSICIÓN:

CO<sub>2</sub> 2,0 %

CH<sub>4</sub> 85,0 %

C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 6,0 %

C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 3,5 %

C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 2,1 %

C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> 1,4 %

H<sub>2</sub>S no

• PRESIÓN DE SUCCIÓN: Ps = 2 bar(g)

• TEMPERATURA DE SUCCIÓN: ts = 30°C

• PRESIÓN DE DESCARGA: Pd = 75 bar(g)

• TEMPERATURA AMBIENTE: 42 °C (máx) , - 15 °C (mín)

• ALTURA S/NIVEL DEL MAR: 700 m

• AGUA DE ENFRIAMIENTO: no disponible

# Compresión: EJEMPLO DE COMPRESOR ALTERNATIVO

## SELECCIÓN

Verificaremos si un Compresor Alternativo es apropiado para este caso, utilizando el gráfico de la GPSA

Caudal STD:

$$Q = 150.000 \text{ Sm}^3/\text{d} / (24 \times 60) \text{ min}/\text{h}$$

$$Q = 104,2 \text{ Sm}^3/\text{min}$$

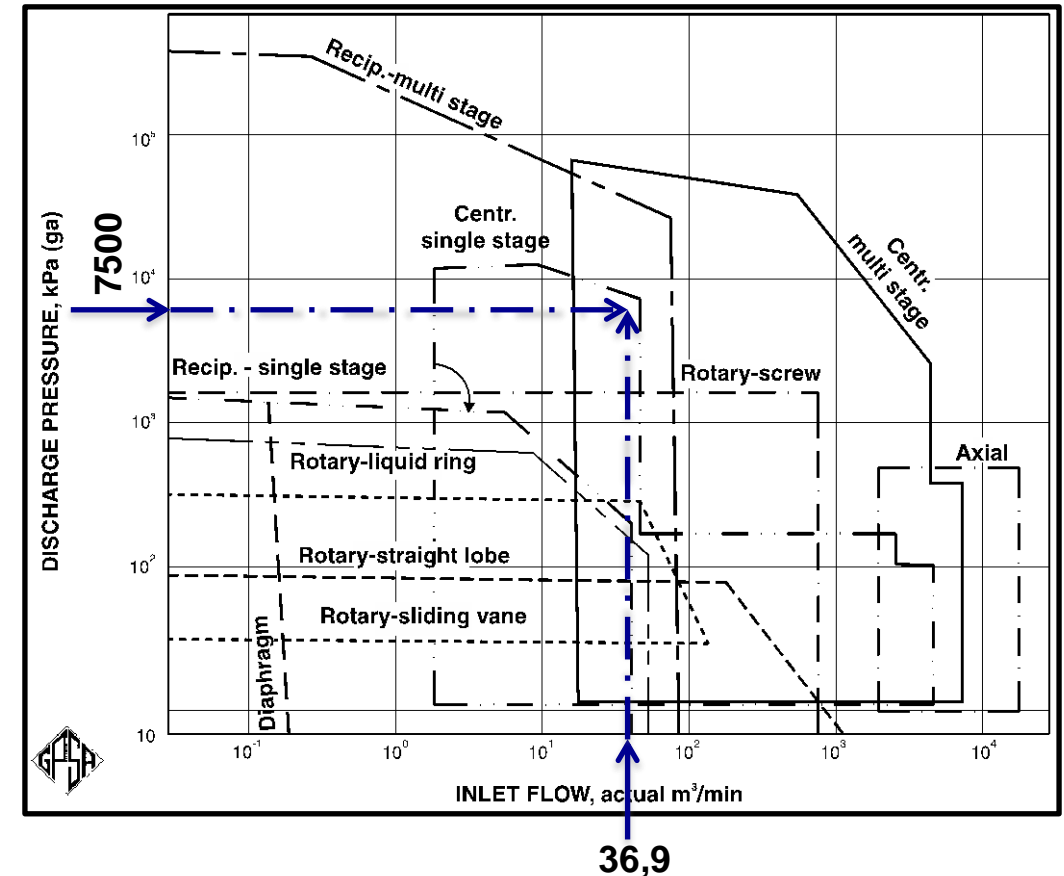
En condiciones de succión  
(2 bar(g) y 30°C) (cálc aproximado):

$$V = 104,2 \times (273+30)/(273+15) \times (1,013 / 3,013)$$

$$V = 36,9 \text{ m}^3/\text{min}$$

La Presión de descarga:

$$P_d = 75 \text{ bar(g)}; P_d = 7.500 \text{ kPa(g)}$$



El gráfico indica que un Compresor Alternativo Multietapa es una selección apropiada. También indica que otra opción a estudiar es un Compresor Centrífugo Multietapa.

## Compresión: EJEMPLO DE COMPRESOR ALTERNATIVO

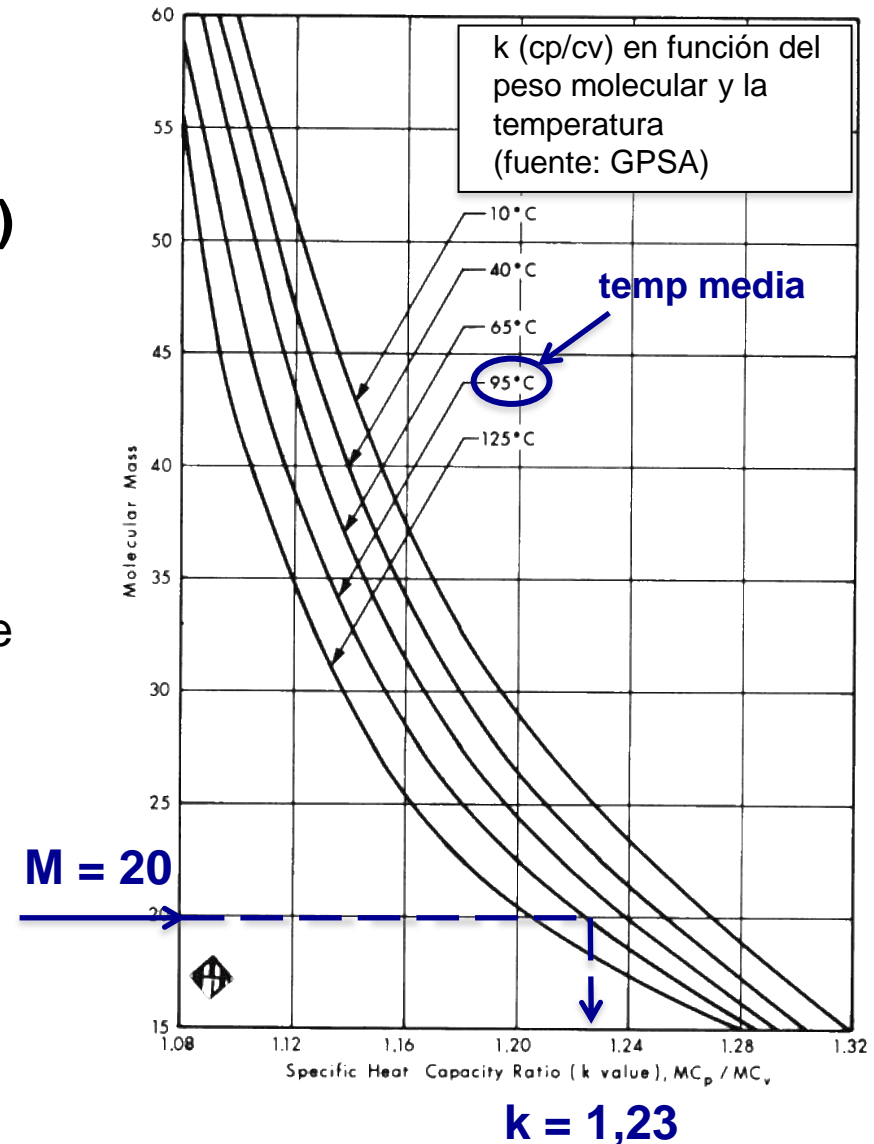
### CÁLCULOS

#### a.- Coeficiente $k$ (relación de calores específicos)

Es una propiedad del gas a comprimir, que depende de su composición y de la temperatura, y que se requiere para los cálculos de temperatura de descarga y potencia.

Un valor aproximado se puede obtener de la Gráfica adjunta (fuente: GPSA), conociendo el Peso Molecular  $M$  (para nuestro caso  $M=20$ ) y la temperatura media del gas, en el proceso de compresión (hemos adoptado  $t = 95^{\circ}\text{C}$ ).

Resultando  $k = 1,23$



## Compresión: EJEMPLO DE COMPRESOR ALTERNATIVO

### CÁLCULOS

#### b.- Cantidad de Etapas / Temperatura de Descarga por Etapa

Siendo la Relación de Compresión Total:  $r = P_d \text{ (abs)} / P_s \text{ (abs)} = 25,2$

Y distribuyéndola en n etapas, la Relación de Compresión por etapa, se calcula mediante:

$$r_i = \sqrt[n]{r}$$

La Temperatura de Descarga de cada etapa se calcula en función de esa relación de compresión por etapa,

$$T_d = T_s r^{(k-1)/k}$$

Tomando una Temperatura de Enfriamiento interetapa (con aire) de  $T_s = 50^\circ\text{C}$ , y el valor de  $k = 1,23$  del Gráfico de la GPSA, resulta:

		2 etapas	3 etapas	4 etapas
Relación de Compresión por etapa	$r_i$	5,02	2,93	2,24
Temperatura de Descarga	$T_d$ (°C)	164	122	103

Adoptamos 3 etapas, dado que la temperatura de descarga para 2 etapas supera el valor límite habitual dado por los fabricantes, de  $150^\circ\text{C}$  (por deterioro del aceite lubricante). Además para 2 etapas la relación de compresión por etapa es de 5,0 , un valor alto y que debería ser verificado por los fabricantes.

## Compresión: EJEMPLO DE COMPRESOR ALTERNATIVO

### CÁLCULOS

#### c.- Cálculo de Potencia

La Potencia ideal de Compresión isoentrópica se calcula mediante:

$$W_{is} = \frac{G}{M} Z R \frac{k}{k-1} T_s (r^{(k-1)/k} - 1)$$

Para nuestro ejemplo:

$G = 1,47 \text{ kg/s}$  (tomando  $Q=150.000 \text{ Sm}^3/\text{d}$  y  $M=20$ )

$Z = 1$  (adoptado);  $M=20$ ;  $k=1,23$ ;  $r= 2,93$  (por etapa);  $R=8315 \text{ Nm}/(\text{K kmol})$

Para la primera etapa:  $T_s = 303 \text{ K}$ , entonces  $W_{is1} = 220 \text{ kW}$

Para la segunda etapa:  $T_s = 323 \text{ K}$ , entonces  $W_{is2} = 234 \text{ kW}$

Para la tercera etapa:  $T_s = 323 \text{ K}$ , entonces  $W_{is3} = 234 \text{ kW}$

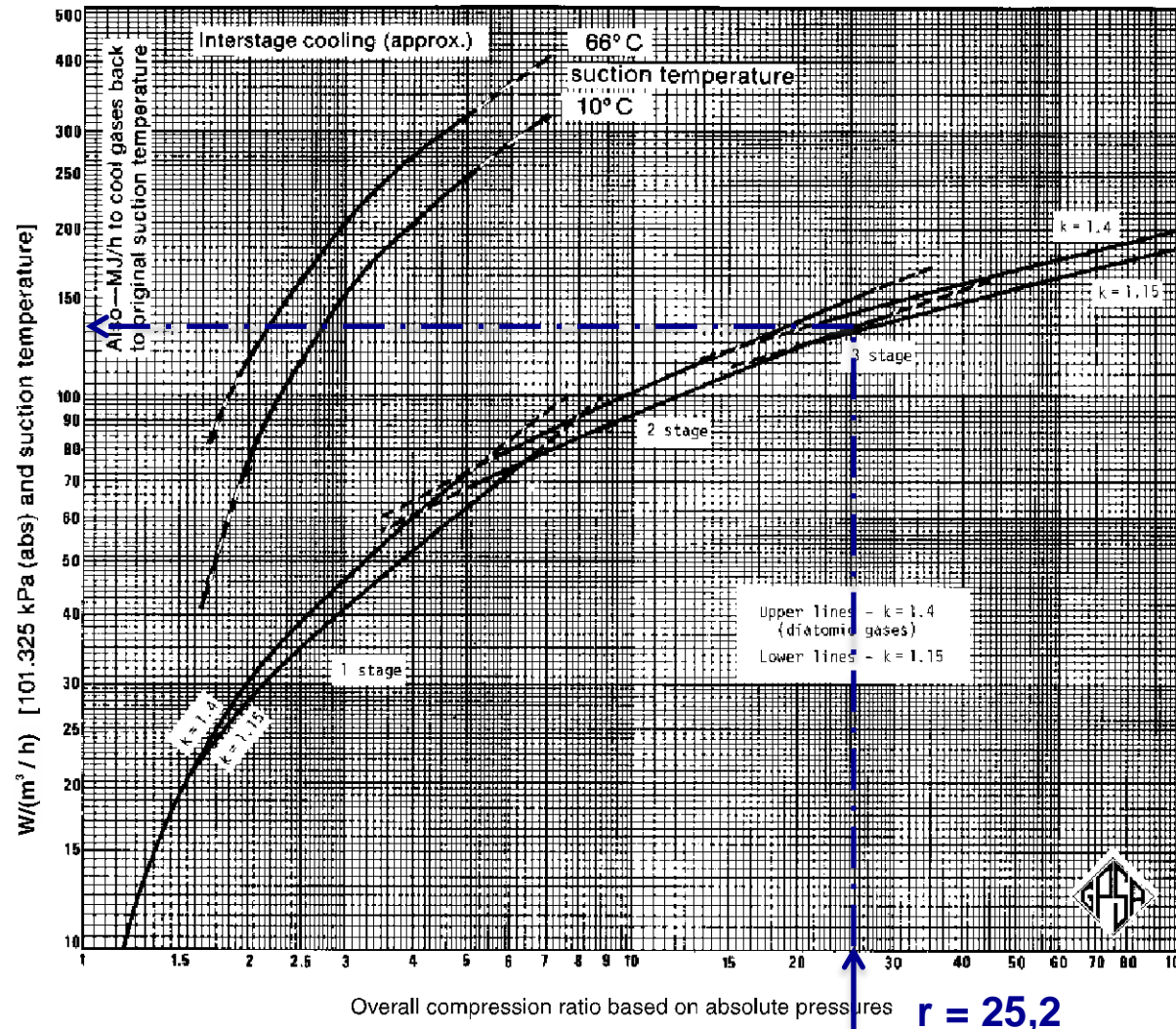
**Potencia total isoentrópica:  $W_{is} = 689 \text{ kW}$**

Tomando un rendimiento isoentrópico de:  $\eta_{is} = 0,82$

Resulta: **Potencia de Compresión:  $W = 783 \text{ kW} = 1134 \text{ HP}$**

# Compresión: EJEMPLO DE COMPRESOR ALTERNATIVO

**W/(m<sup>3</sup>/h) = 135**



## d.- Estimación de Potencia según GPSA :

Para  $r = 25,2$  y  $k = 1,23$  resulta:  $W/(m^3/h) = 135$

Como:  $Q = 150.000 \text{ Sm}^3/d$  y  $t_s = 30^\circ\text{C}$ , para calcular el volumen en  $m^3/h$ , a 1 ata y temperatura de succión, hay que ajustar el caudal Std, por temperatura

$$T_s/(15+273) = 303/288 = 1,05$$

$$m^3/h = 150.000 / 24 \times 1,05 = 6563 \text{ m}^3/h$$

$$W = 135 \times 6563 = 886 \text{ KW}$$

$$W = 1196 \text{ HP}$$

Watts por  $m^3/h$  (medidos a 1 ata y temperatura de succión) en función de la relación de compresión. Fuente: GPSA

## COMPRESORES ALTERNATIVOS: Control

Las variables claves a tener en cuenta en el funcionamiento de un Compresor Alternativo son:

- **Presión de Succión**
  - **Presión de Descarga**
  - **Temperatura de Descarga**
  - **Volumen aspirado en condiciones de succión**
  - **Velocidad del Accionamiento**
- **Presión de Descarga**
  - **Temperatura de Succión**
  - **Caudal másico que circula**

La variable que más influye en el Control de Caudal (másico) es la **Presión de Succión**, y por eso es la variable típica que se controla.

Debe tenerse en cuenta que la Presión de Succión tiene una ventana de valores para que el Compresor opere en forma segura, y por eso debe ser controlada.

En el caso en que el valor requerido de Presión de Succión, para que circule el Caudal de proceso, sea inferior al valor operativo mínimo, se hace actuar la **Válvula de Recirculación**, o la **Velocidad del Accionamiento**.

Otras maneras de variar el volumen efectivo comprimido es a través de la **Regulación de Espacios Nocivos** y el **Levantamiento de Válvulas**.



## COMPRESORES CENTRÍFUGOS: Control

En el Control de un Compresor Centrífugo es clave mantener la parámetros de **Caudal y Altura de Compresión**, dentro de los valores de operación estable.

El valor de **Caudal Mínimo** está dado por el fenómeno de **Surge**. En ese punto, la altura de descarga no alcanza a vencer la contrapresión del sistema. El gas retrocede generando oscilaciones de presión, afectando la integridad del equipo.

El valor de **Caudal Máximo** está dado por el fenómeno de **Choke Flow o Stonewall**. Es el caudal que ocasiona flujo sónico en alguna parte del compresor, no pudiendo por lo tanto aumentarse el caudal.

Las variables con que se cuentan para establecer un punto óptimo y seguro, cumpliendo con los parámetros de funcionamiento requeridos, son:

- **Presión de succión**
- **Presión de descarga**
- **Velocidad del Compresor**
- **Posición de las paletas de ingreso (IGV)**

## Compresión: Selección de Compresores

### • COMPARATIVA SELECCIÓN COMPRESORES

Comparative Guidelines to Selection of Compressors<sup>(15.1)</sup>

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

#### Rating Symbols

E - Excellent  
G - Good

F - Fair  
P - Poor

(fuente: Gas Conditioning & Processing by Campbell)

## Compresión: Selección de Compresores

- COMPARATIVA SELECCIÓN DE ACCIONAMIENTO**

Comparative Guidelines to Selection of Gas Compressor Drivers<sup>(15.1)</sup>

Driver Type	Reliability	Initial Cost	Installation Cost	Efficiency	Maintenance Cost	Weight/Space	Run Length	Ease Movement	Remove Adaptability	Adaptability to Reciprocating	Adaptability to Centrifugal Compressor
High Speed Gas Engine	G	E	E	G	G	E	G	E	G	E	F
Low Speed Integral Gas Engine	E	G-P	G-P	E	E	F	E	P	G	E	P
Gas Turbine	E	G-P	E-F	G*	E	E	E	E	E	F	E
Steam Turbine	G	G	G	G-P	E	E	E	P	F	F	E
Electric Motor	E	E-G	E	E	E	E	E	E-P	E	G	E

### Rating Symbols

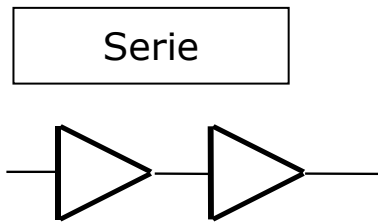
E - Excellent  
G - Good  
F - Fair  
P - Poor

\*Thermal Efficiency can be increased by use of Recuperator and/or Waste Exhaust Heat Recovery

Exhaust Heat Recovery can also be utilized sometimes on Reciprocating Engines.

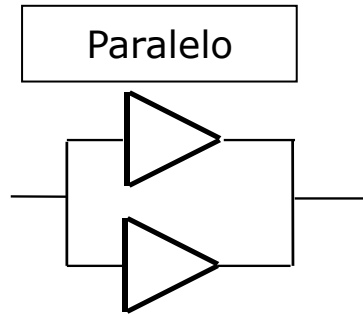
(fuente: Gas Conditioning & Processing by Campbell)

# Configuraciones de Equipos



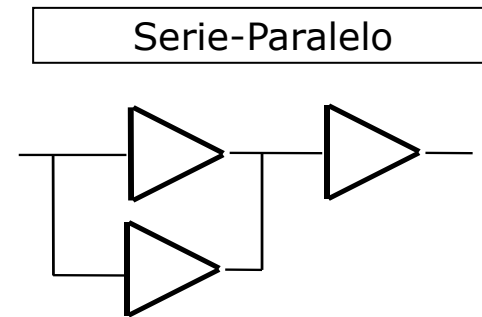
$$Q_T = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$$

$$R_c = R_{c1} \times R_{c2} \times R_{cn}$$



$$Q_T = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

$$R_c = R_{c1} = R_{c2} = R_{cn}$$

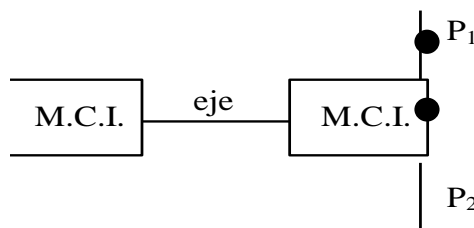


$$Q_T = (Q_1 + Q_2) = Q_3$$

$$R_c = (R_{c1} = R_{c2}) \times R_{c3}$$

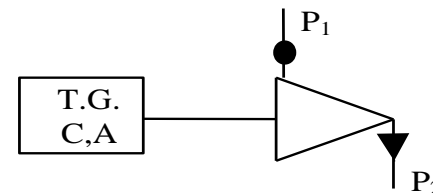
## **Tecnología disponible.**

a) Motocompresor:



Motor de combustión interna  
Compresor alternativo (unidos por el cigueñal)

b) Turbo compresor.



Turbina de gas de ciclo abierto (Dobleje)  
Compresor centrífugo (unido por 2º eje)