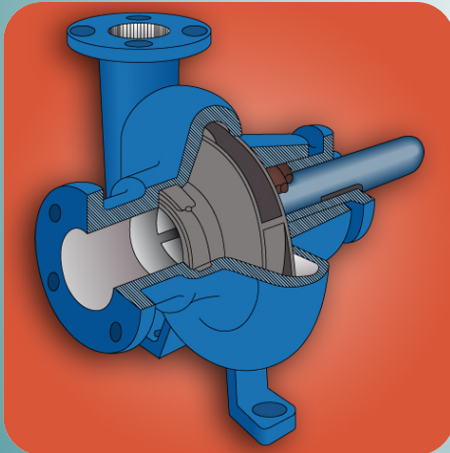


Sistemas y Máquinas Fluido Mecánicas

Bloque II. Tema 5.2. Compresores: Clasificación II y Teoría de la Compresión



Carlos J. Renedo

Inmaculada Fernández Diego

Juan Carcedo Haya

Félix Ortiz Fernández

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

BLOQUE 2: Máquinas de Fluidos Compresibles



Las transparencias son el material de apoyo del profesor para impartir la clase. No son apuntes de la asignatura. Al alumno le pueden servir como guía para recopilar información (libros, ...) y elaborar sus propios apuntes

En esta presentación se incluye un listado de problemas en el orden en el que se pueden resolver siguiendo el desarrollo de la teoría. Es trabajo del alumno resolverlos y comprobar la solución

2.1.- Ventiladores

2.2.- Compresores

2.2.1.- Generalidades

2.2.2.- Clasificación (II)

2.2.3.- Teoría de la Compresión



Clasificación (VIII)

Por el Modo de Compresión (IX)

➤ Rotativos (IV)

❑ De Tornillo (I):

✓ De Doble Tornillo

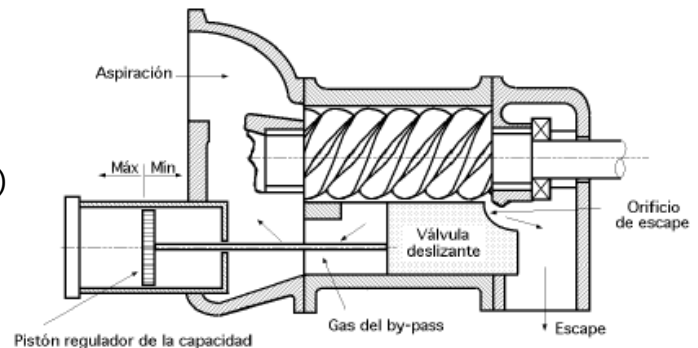
- Macho-hembra
- Sellado con aceite
- Sin válvulas
- Relación de compresión fija
- Regulación de capacidad (no mantiene el rendimiento)
- Inyección de vapor frío

5 lóbulos

6 huecos



<http://www.indutorres.com/productos/kaeser.html>



<http://files.pfernandezdiez.es/Compresores/PDFs/2Compresores.pdf>

Clasificación (VIII)

Por el Modo de Compresión (IX)

➤ Rotativos (IV)

❑ De Tornillo

✓ De Doble

- Macho y hembra
- Sellado
- Sin vapor
- Relación de compresión
- Regulación de la capacidad
- (no m...)
- Inyección de vapor



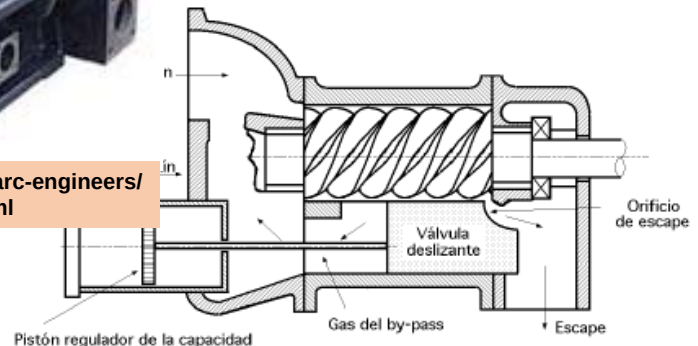
<http://www.indiamart.com/arc-engineers/industrial-compressors.html>

5 lóbulos

6 huecos



dutorres.com/productos/kaeser.html



<http://files.pfernandezdiez.es/Compresores/PDFs/2Compresores.pdf>

Clasificación (VIII)

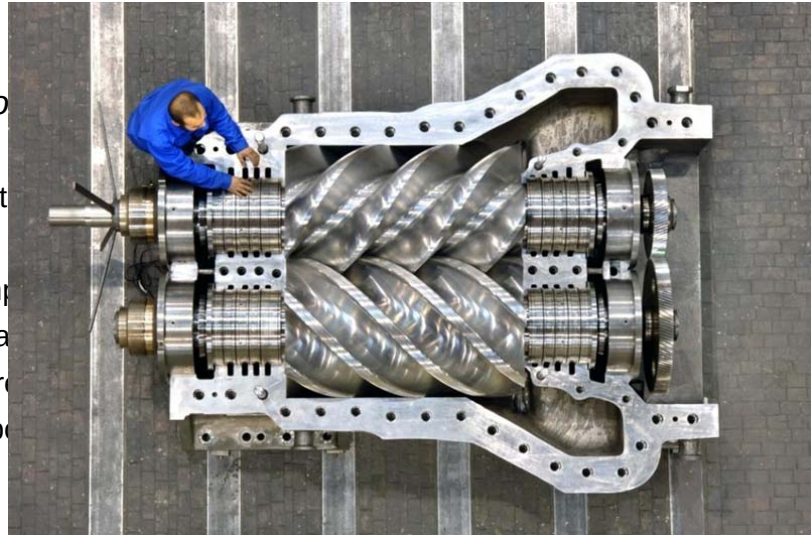
Por el Modo de Compresión (IX)

➤ Rotativos (IV)

☐ De Tornillo (I):

✓ De Doble Tornillo

- Macho-hembra
- Sellado con aceite
- Sin válvulas
- Relación de comp
- Regulación de ca
- (no mantiene el r
- Inyección de vapo



<http://www.queenslandgasconference.com.au/en/Exhibitors/105787/MAN-Diesel-Turbo-SE/Products/546555/Oil-Free-Process-Gas-Screw-Compressors>

Clasificación

Por el Modo

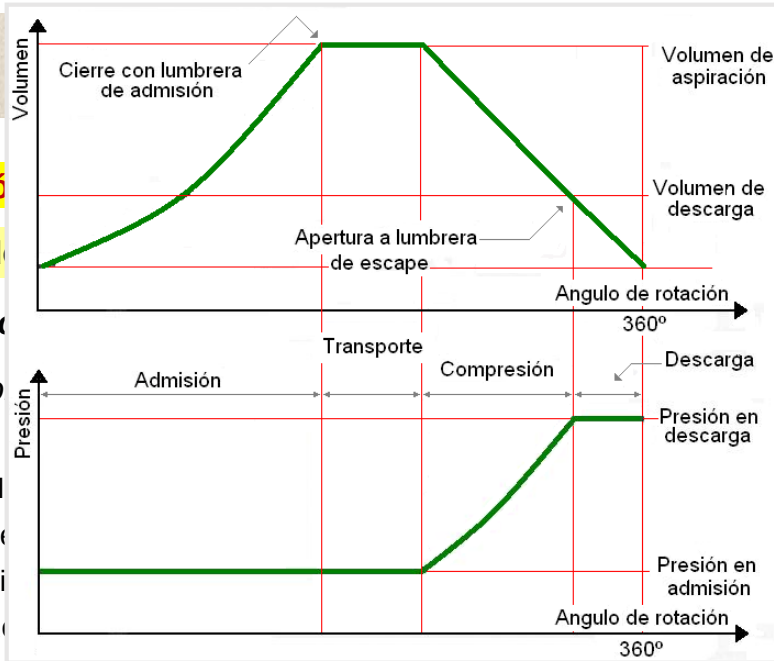
➤ Rotativo

❑ De To

✓ De

- M
- S
- Si
- R

- Regulación de capacidad

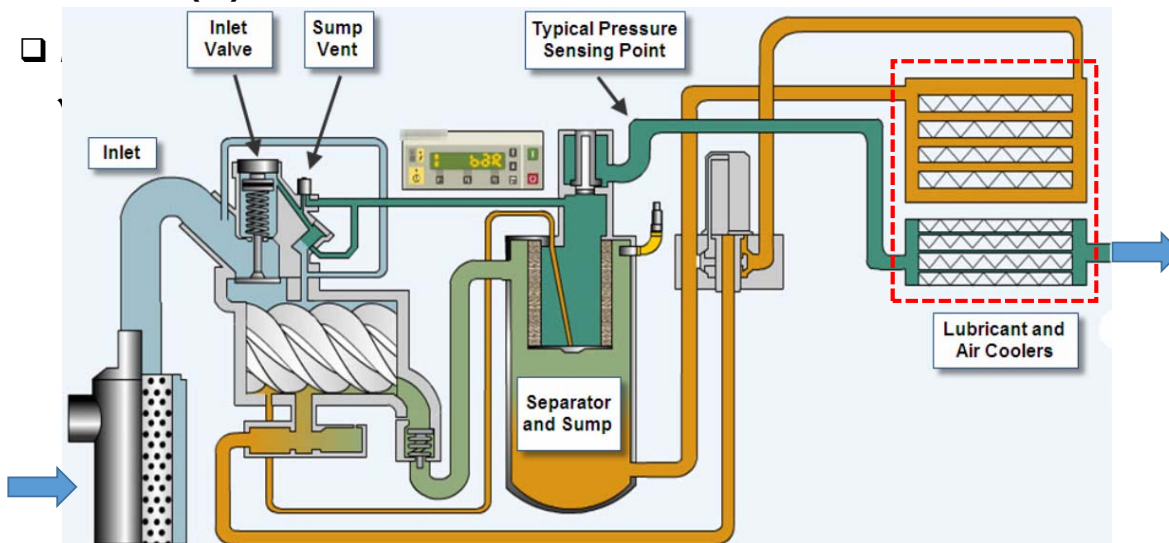


<http://www.enviropro.co.uk/entry/33926/Atlas-Copco/ZTZR-110900-rotary-screw-compressor/>

Clasificación (VIII)

Por el Modo de Compresión (IX)

➤ **Rotativos (IV)**



Clasificación (VIII)

Por el Modo de Compresión (IX)

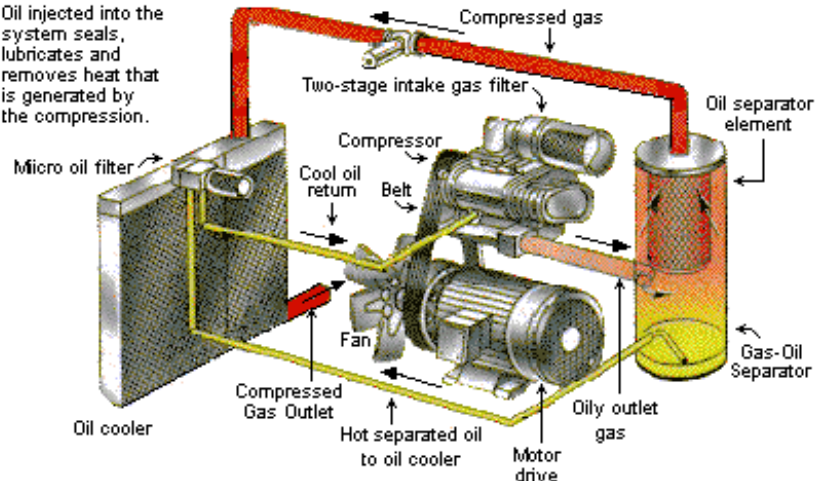
➤ Rotativos (IV)

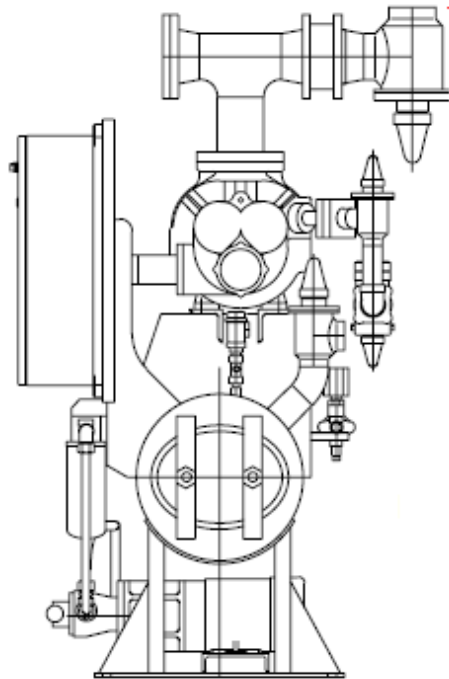
❑ De Tornillo (I):

✓ De Doble Tornillo

- Macho-hembra
- Sellado con a
- Sin válvulas
- Relación de c
- Regulación d
- (no mantiene
- Inyección de

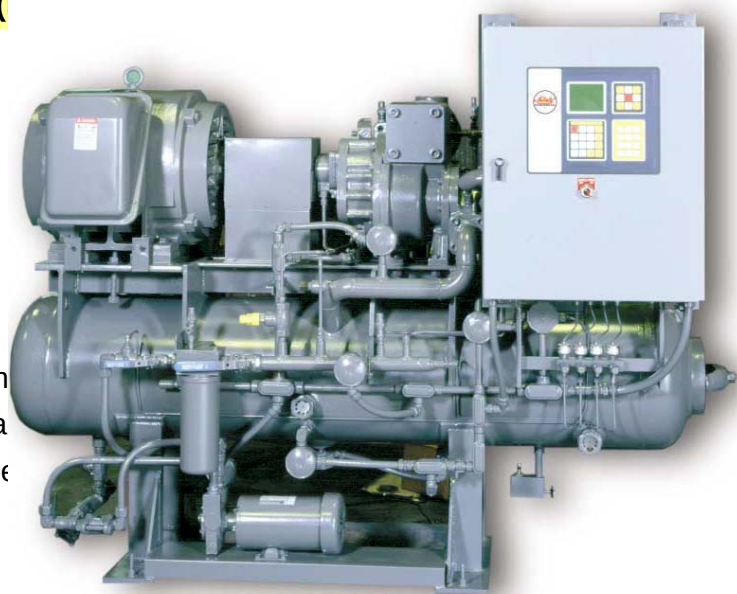
Oil injected into the system seals, lubricates and removes heat that is generated by the compression.





n (°)

sión
ida
mie
fo



Clasificación (IX)

[http://www.norskulde.com/
?page=11&?page=11&article=1](http://www.norskulde.com/?page=11&?page=11&article=1)

Por el Modo de Compresión (X)

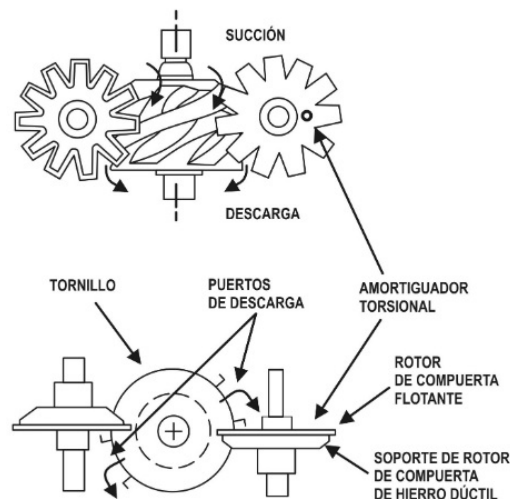
➤ **Rotativos (V)**

□ **De Tornillo (II):**

✓ **De Tornillo Simple (o triple)**

- Tornillo y dos satélites
- Con control de capacidad
(no mantiene el rendimiento)

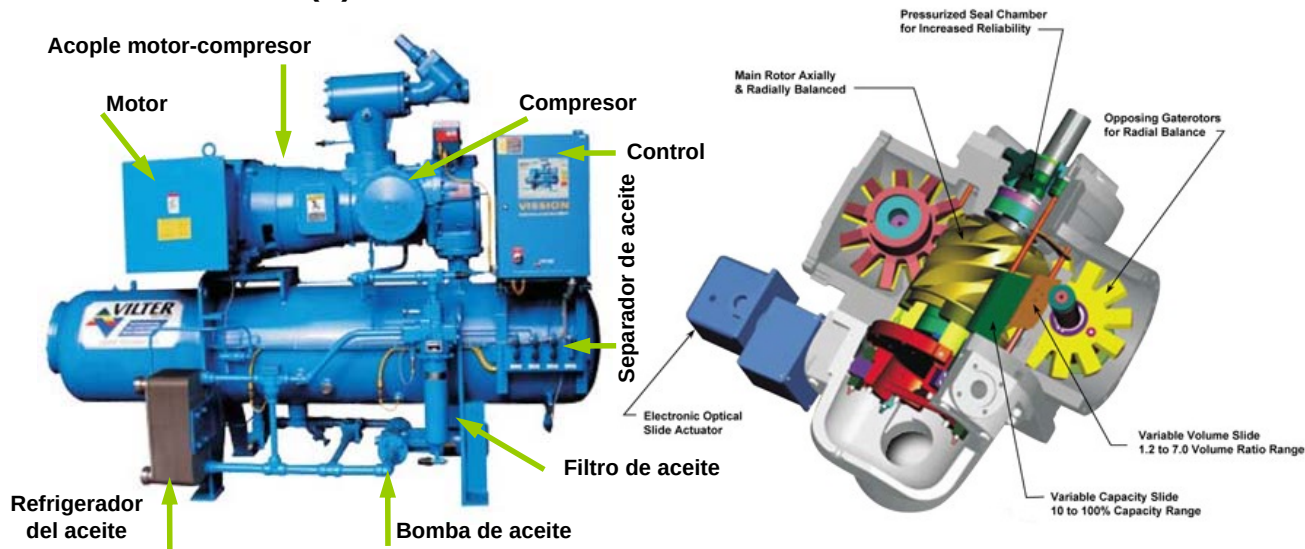
<http://www.acrlatinoamerica.com/201206284836/articulos/refrigeracion-comercial-e-industrial/compresor-de-un-solo-tornillo.html>



Clasificación (IX)

Por el Modo de Compresión (X)

➤ Rotativos (V)



Clasificación (IX)

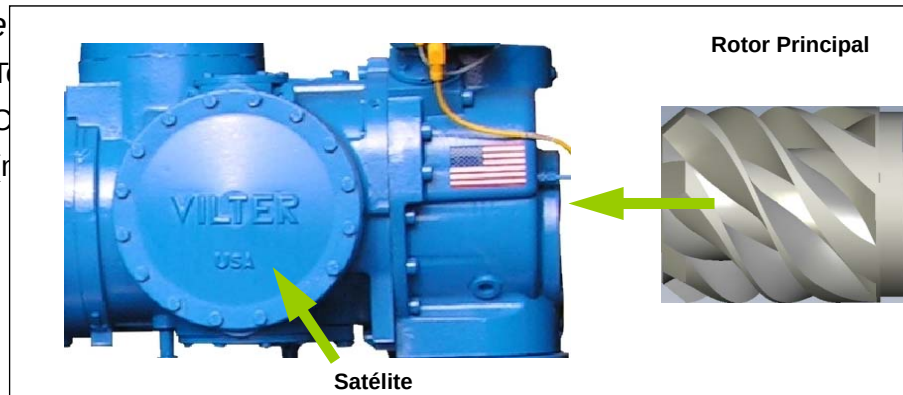
Por el Modo de Compresión (X)

➤ Rotativos (V)

☐ De Tornillo (II):

✓ De

- T
- C
- (r



Clasificación (IX)

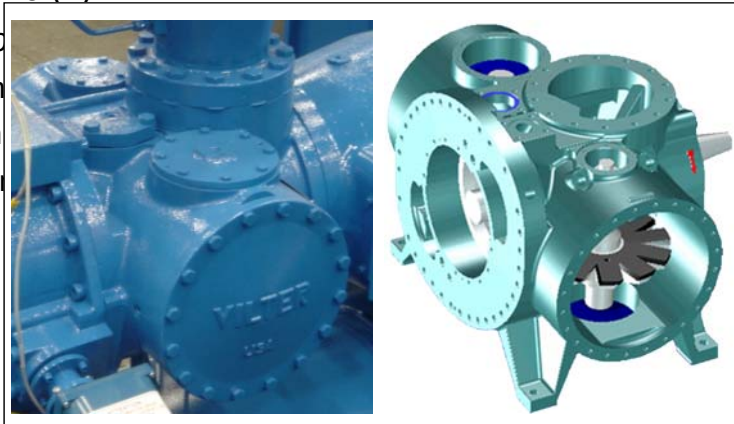
Por el Modo de Compresión (X)

➤ Rotativos (V)

□ De Tornillo (II):

✓ De Torno

- Tornillo
- Con
- (no



Clasificación (IX)

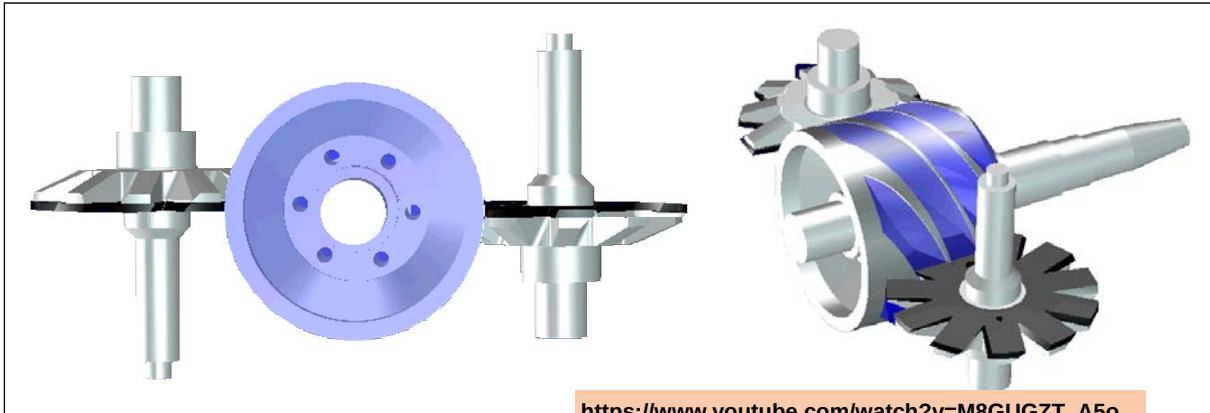
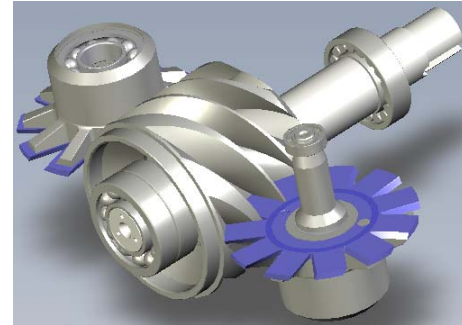
Por el Modo de Compresión (X)

➤ Rotativos (V)

❑ De Tornillo (II):

✓ De Tornillo Simple (o triple)

- Tornillo y dos satélites



Clasificación (IX)

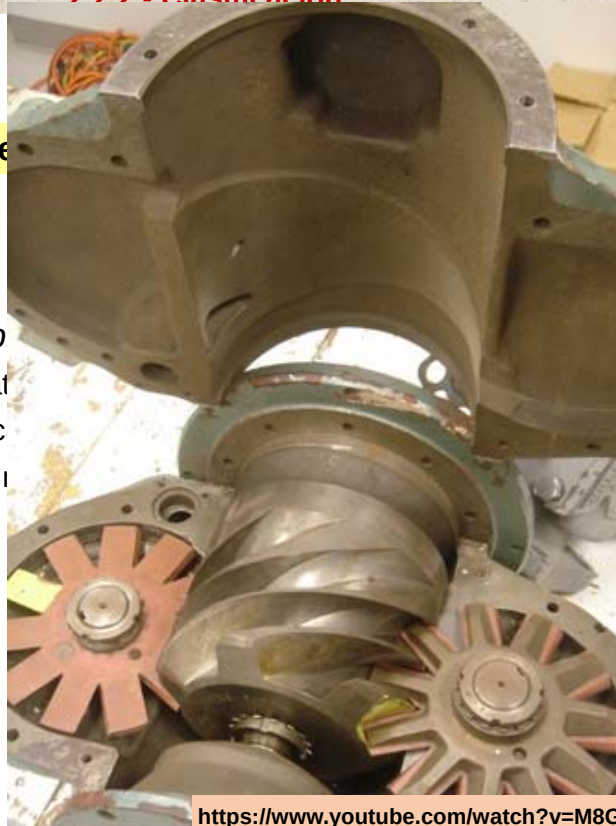
Por el Modo de Compresión

➤ Rotativos (V)

□ De Tornillo (II):

✓ De Tornillo Simple

- Tornillo y dos satélites
- Con control de caudal
(no mantiene el nivel)



Clasificación (IX)

Por el Modo de Compresión (X)

➤ Rotativos (V)

❑ De Tornillo (II):

✓ De Tornillo Simple (Simple)

- Tornillo y dos satélites

Entrada de vapor
al compresor

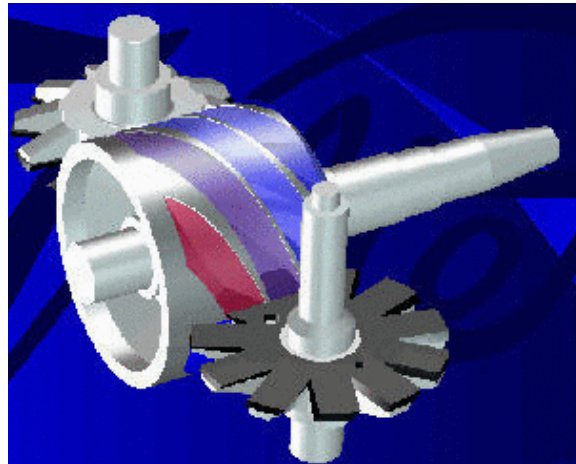
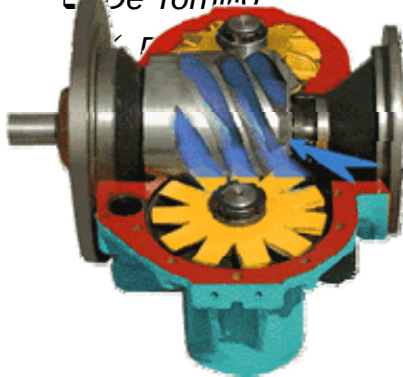


Clasificación (IX)

Por el Modo de

➤ Rotativos (V)

☐ De Tornillo



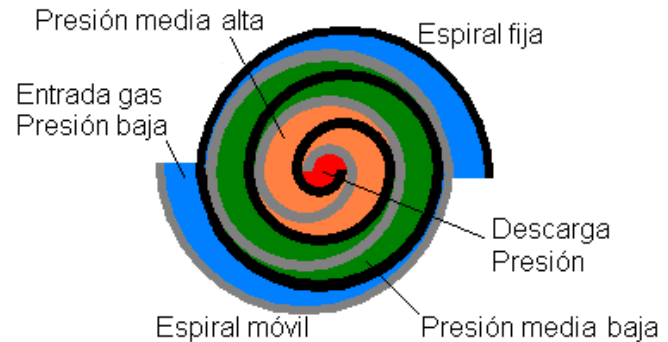
Clasificación (X)

Por el Modo de Compresión (XI)

➤ Rotativos (VI)

❑ Scroll (I):

- Dos volutas en forma de espiral
- Varias cámaras enfrentadas
- Flujo continuo
- Sin válvulas
- Relación de compresión fija
- Regulación de capacidad con varias lumbreras de descarga (no mantiene rendimiento)
- Necesita válvula antirretorno
- El sellado no soporta toda la diferencia de presión
- Resistente a la entrada de líquido

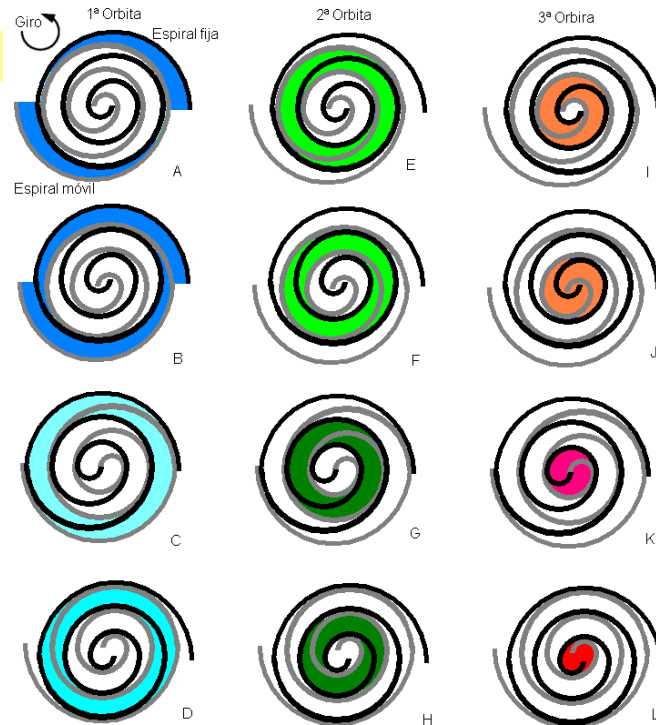


Clasificación (X)

Por el Modo de Compresión (XI)

➤ Rotativos (VI)

□ Scroll (II):



Clasificación (X)

Por el Modo de Compresión (XI)

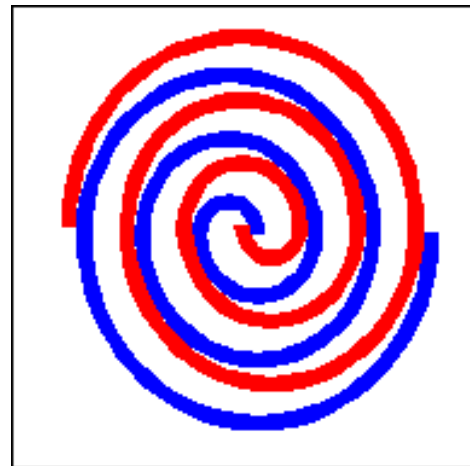
➤ Rotativos (VI)

❑ Scroll (III):



http://www.copeland.su/tehnicheskaya_informaciya_copeland_scroll

<http://chamber.testequity.com/scroll.html>

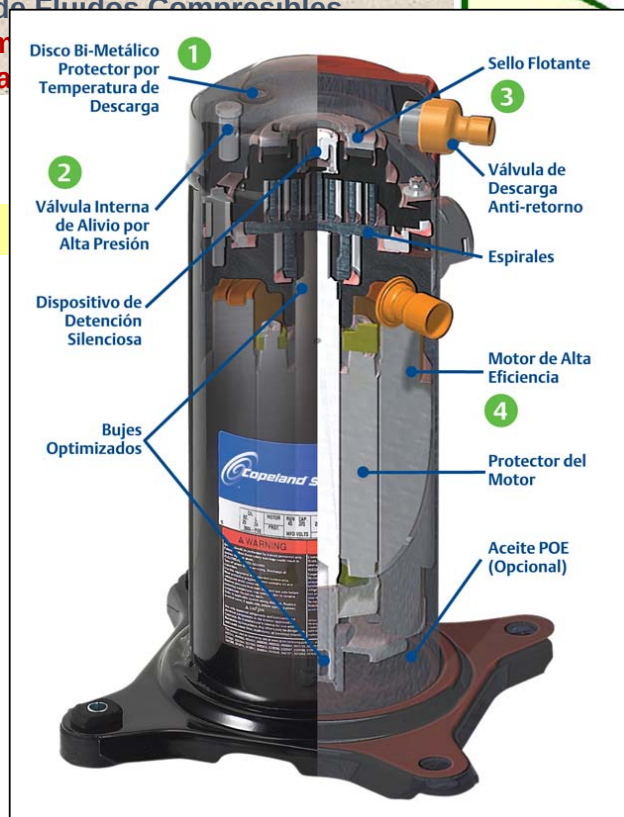


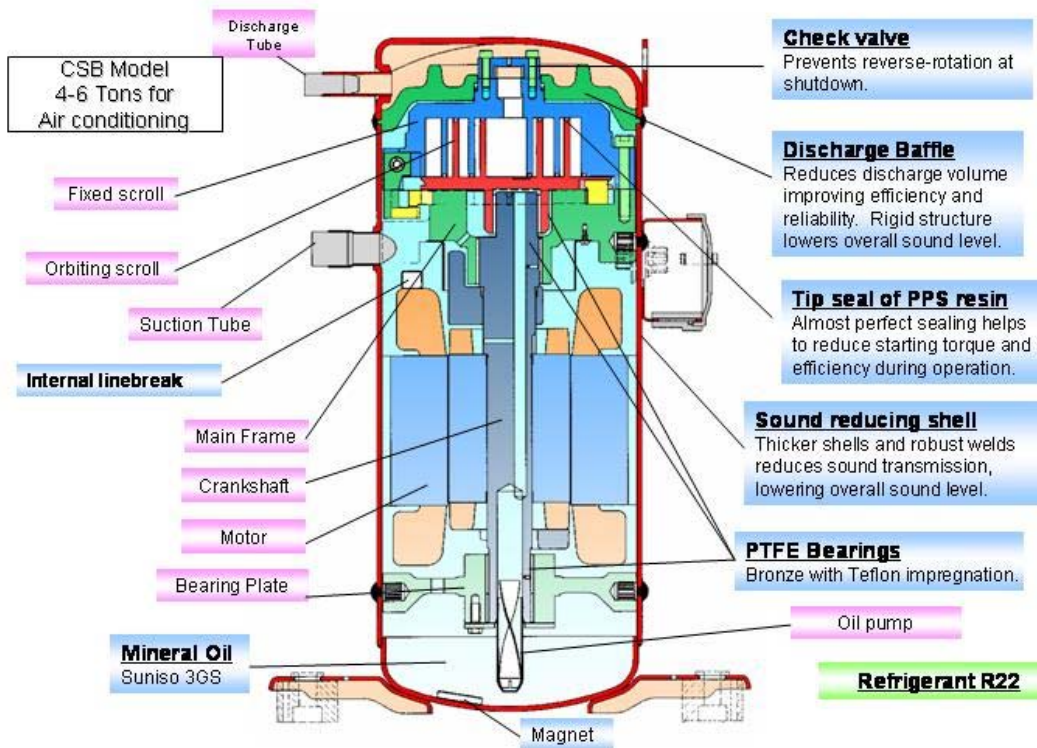
Clasificación (X)

Por el Modo de Compresión (XI)

➤ Rotativos (VI)

❑ Scroll (IV):



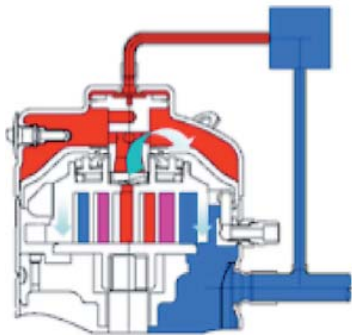


Clasificación (X)

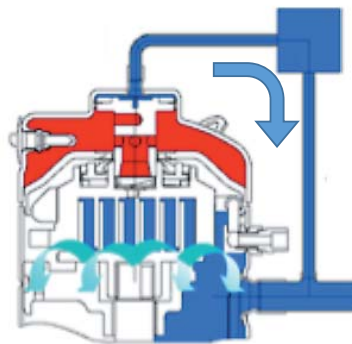
Por el Modo de Compresión (XI)

➤ Rotativos (VI)

□ Scroll (IV):



Válvula de alivio de presión
cerrada (descarga a la succión)



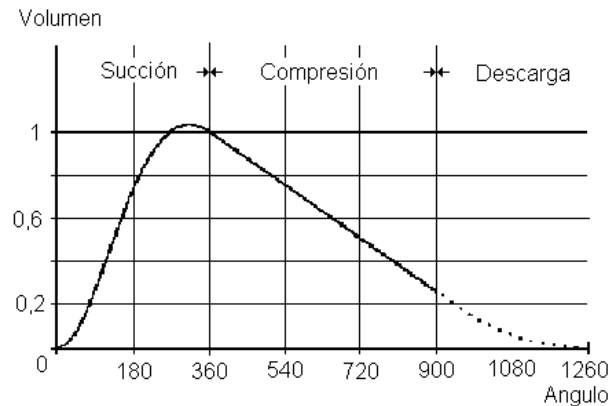
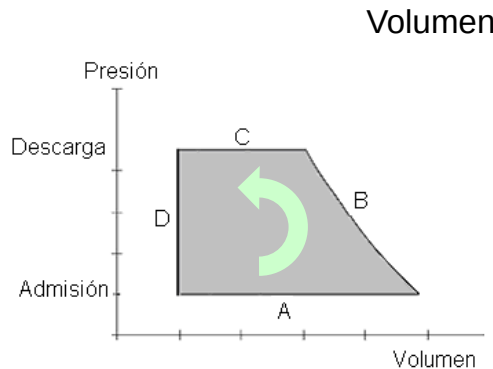
Válvula de alivio de presión
abierta (descarga a la succión)

Clasificación (X)

Por el Modo de Compresión (XI)

➤ Rotativos (VI)

□ Scroll (V):

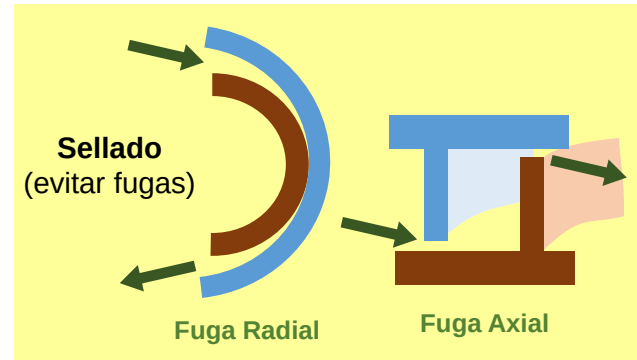


Clasificación (X)

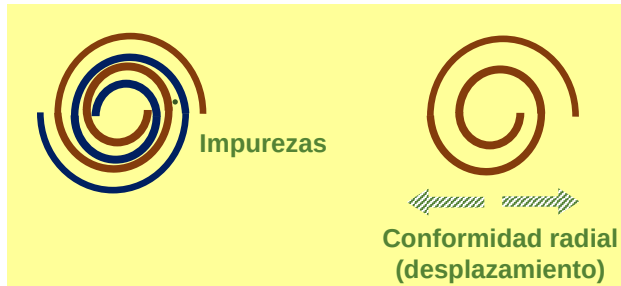
Por el Modo de Compresión (XI)

➤ Rotativos (VI)

□ Scroll (IV):



Las posibilidades de fugas son tanto radiales como axiales (más críticas)



Clasificación (X)

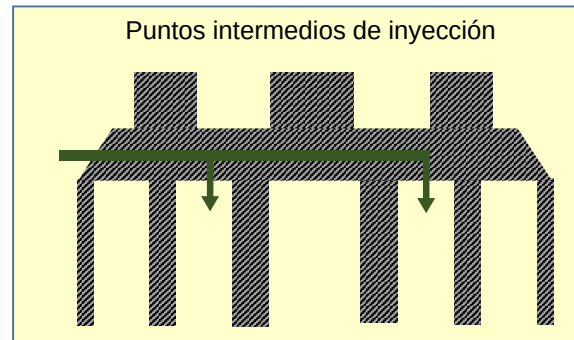
Por el Modo de Compresión (XI)

➤ Rotativos (VI)

□ Scroll (V):

Si está preparado para ello, puede realizarse inyección de vapor en varios puntos intermedios de la compresión

Interesante con altas T de descarga



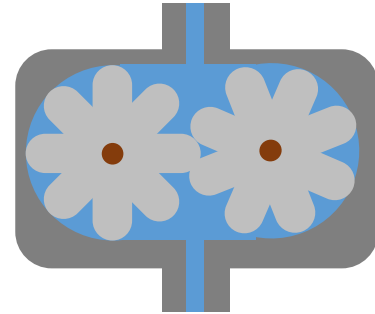
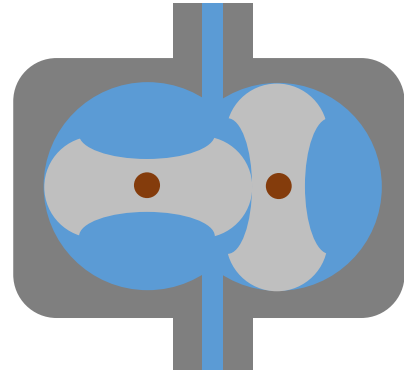
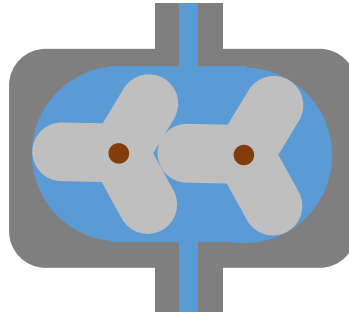
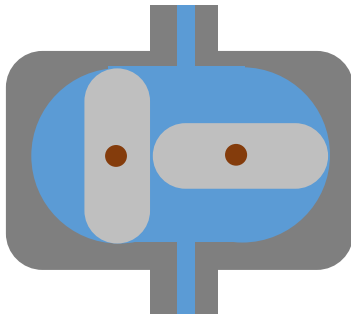
Clasificación (XI)

Por el Modo de Compresión (XII)

➤ Rotativos (VII)

☐ Engranajes (I):

- Dos engranajes, uno accionado, el otro conducido
- El fluido va por el exterior



Los engranajes pueden tener diferente nº de lóbulos

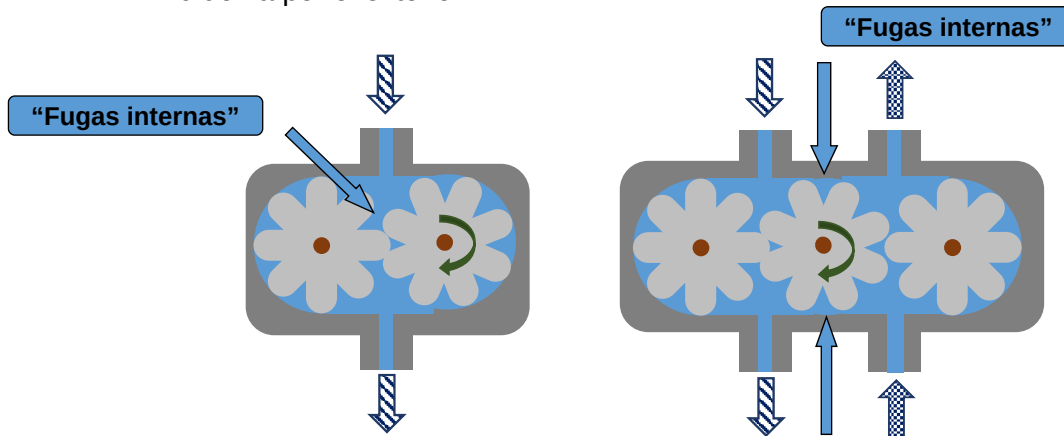
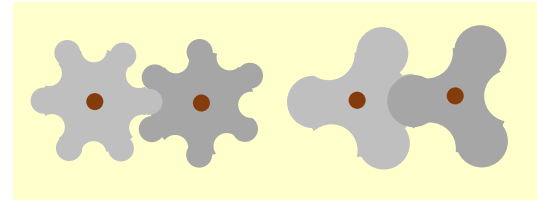
Clasificación (XI)

Por el Modo de Compresión (XII)

➤ Rotativos (VII)

☐ Engranajes (I):

- Dos engranajes, uno accionado, el otro conducido
- El fluido va por el exterior



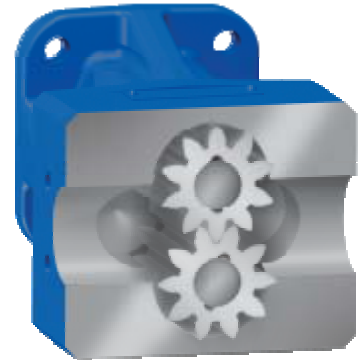
Clasificación (XI)

Por el Modo de Compresión (XII)

➤ Rotativos (VII)

□ Engranajes (I):

- Dos engranajes, uno accionado, el otro conducido
- El fluido va por el exterior



<http://www.teisa.com.mx/productos-viking-pump.shtml>



<http://www.gd-transport.com/es/productos/bombas-para-liquidos/bombas-de-lobulos-rotativos/ssp-serie-s/>

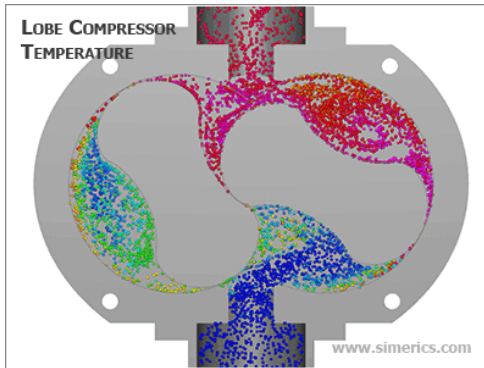
Clasificación (XI)

Por el Modo de Compresión (XII)

➤ Rotativos (VII)

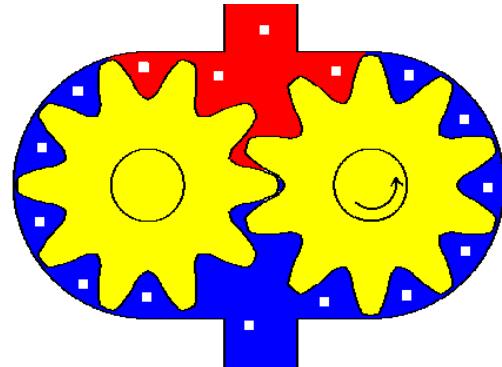
❑ Engranajes (I):

- Dos engranajes, uno accionado, el otro conducido
- El fluido va por el exterior



http://www.simerics.com/animation/lobe_compressor_ani.gif

<http://tecnoblog-tecno.blogspot.com.es/>



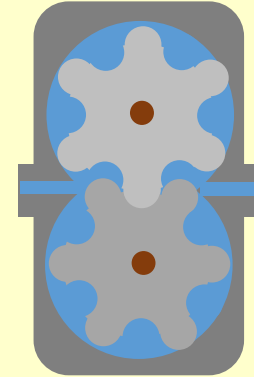
Clasificación (XI)

Por el Modo de Compresión (XII)

➤ Rotativos (VII)

□ Engranajes (II):

- Dos engranajes, uno accionado, el otro conducido
- El fluido va por el exterior



b = ancho del diente (mm)

m = módulo de la rueda dentada (altura del diente, mm)

n = r.p.m.

z = nº de dientes de la rueda

P_1 = presión relativa actuante (kg/cm^2)

Pot = Potencia (CV)

r = radio (mm)

V_1 = volumen de la cámara máxima

w = velocidad angular

$$\text{Par} = P_1 \cdot S_1 \cdot r = P_1 \cdot S_1 \cdot \frac{m \cdot z}{2} = \frac{P_1 \cdot 2,25 \cdot \text{m}^2 \cdot b \cdot z}{2}$$

$$Q_N = 2 \cdot V_1 \cdot z \cdot n \cdot (P_1 + 1)$$

$$\text{Pot} = \frac{\text{Trabajo}}{t} = \text{Par} \cdot w = \text{Par} \cdot [2 \cdot \pi \cdot n] =$$

$$= \frac{P_1 \cdot 2,25 \cdot \text{m}^2 \cdot b \cdot z \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot 1000 \cdot 75}$$

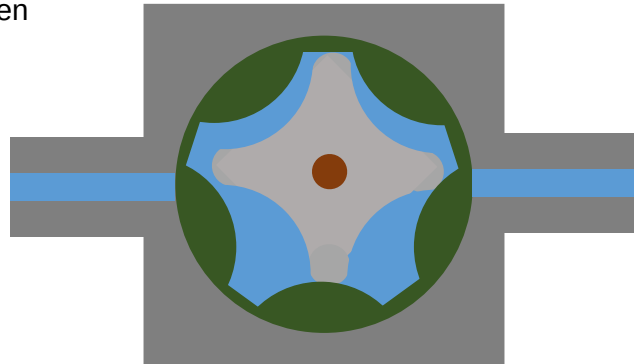
Clasificación (XI)

Por el Modo de Compresión (XII)

➤ Rotativos (VII)

❑ *Engranajes Interiores (III):*

- El engranaje y la cámara tienen diferente número de lóbulos



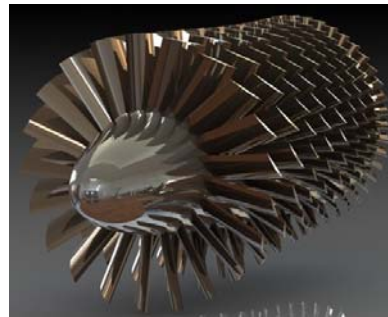
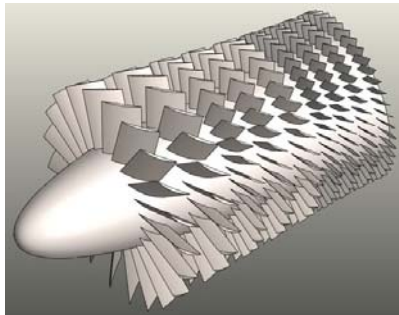
Clasificación (XII)

Por el Modo de Compresión (XIII)

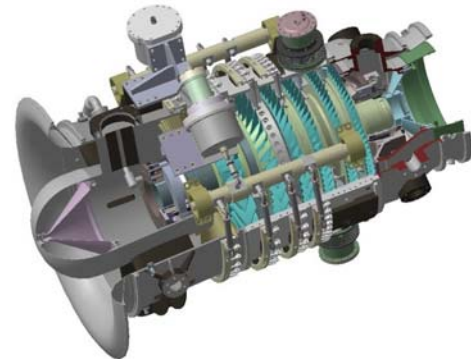
➤ Rotativos (VIII)

□ Axiales:

- Bajas relaciones de compresión (varias etapas)
- Aptos para grandes volúmenes
- Necesitan válvula antiretorno a la salida



<https://grabcad.com/library/axial-compressor-section>



http://ascon.net/showcase/gallery/items/?bm_id=12002

Clasificación (XII)

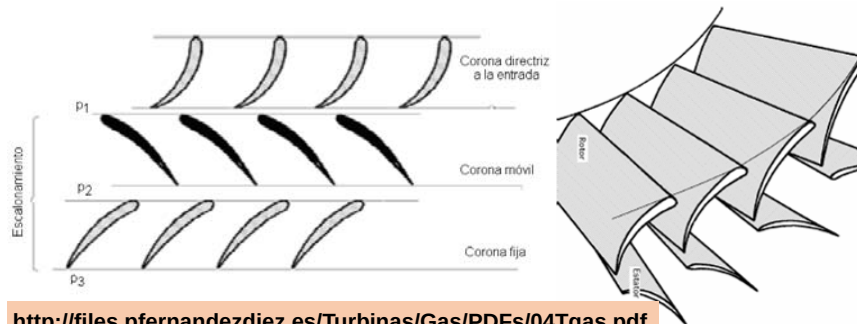
<http://www.conceptsnrec.com/Resources/Photo-Gallery/Compressors.aspx>

Por el Modo de Compresión (XIII)

➤ Rotativos (VIII)

❑ Axiales:

- Bajas relaciones de compresión (varias etapas)
- Aptos para grandes volúmenes
- Necesitan válvula antiretorno a la salida



<http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Gas/PDFs/04Tgas.pdf>

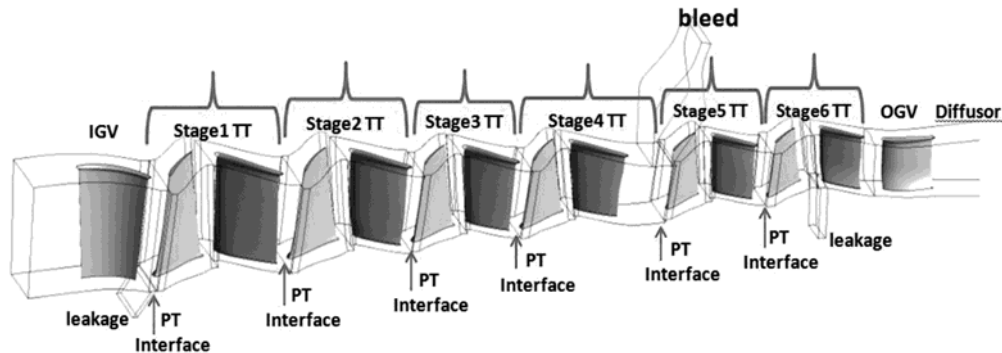
Clasificación (XII)

Por el Modo de Compresión (XIII)

➤ Rotativos (VIII)

□ Axiales:

- Bajas relaciones de compresión (varias etapas)
- Aptos para grandes volúmenes
- Necesitan válvula antiretorno a la salida



Clasificación (XIII)

Por el Modo de Compresión (XIV)

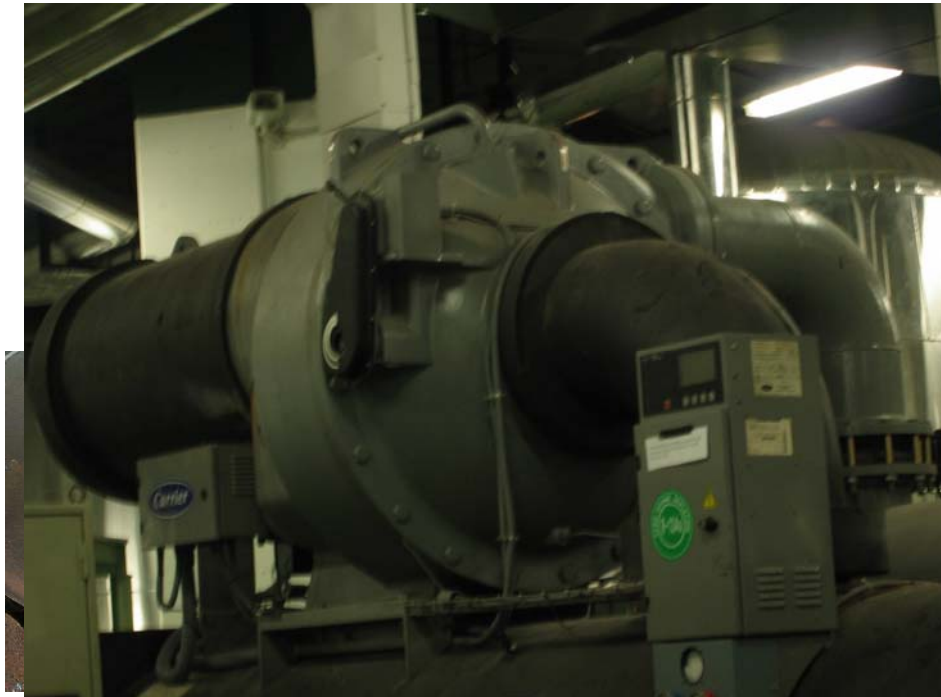
➤ Rotativos (IX)

❑ Centrífugos:

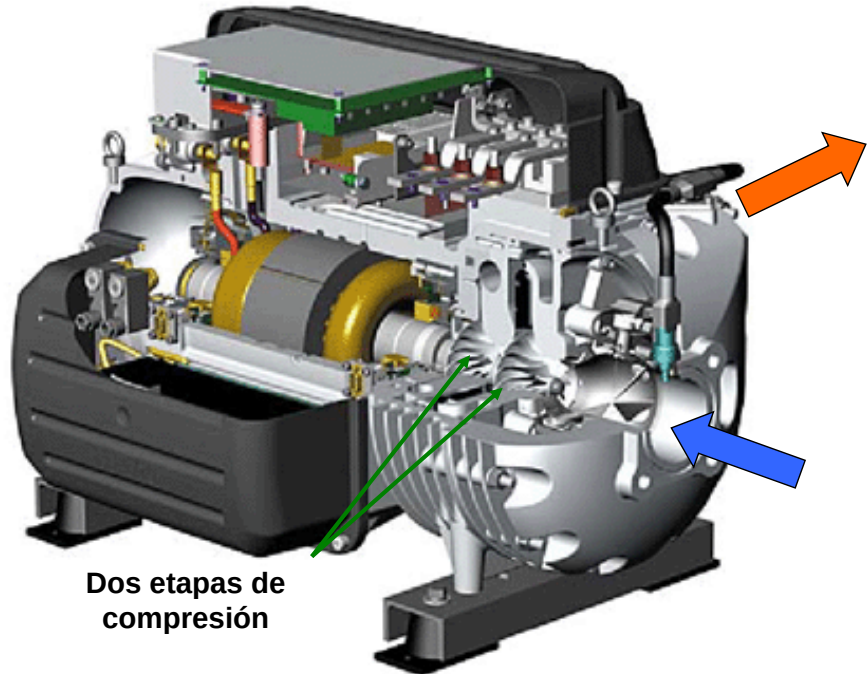
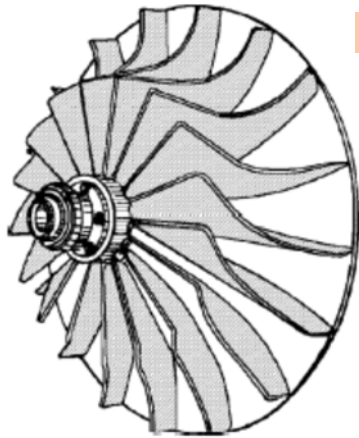
- Bajas relaciones de compresión (varias etapas)
- Aptos para grandes volúmenes
- Necesitan válvula antiretorno a la salida



Clasificación (XIII)



<http://files.pfernandezdiez.es/Compresores/PDFs/4Compresores.pdf>



Dos etapas de
compresión

http://grupos.emagister.com/debate/compresor_rodamientos_del_futuro_levitacion_magantica/1787-694396

Teoría de la Compresión (I)

Comprimen, mediante el empleo de un trabajo exterior, un vapor o un gas

La compresión elevan la temperatura

Teóricamente es isoentrópica, y el trabajo aplicado es: $w_{\text{compS}} = h_{\text{Salida}} - h_{\text{Entrada}}$

Los **compresores volumétricos**:

- Para bajos caudales
- Las válvulas hacen que el ciclo real sea mayor

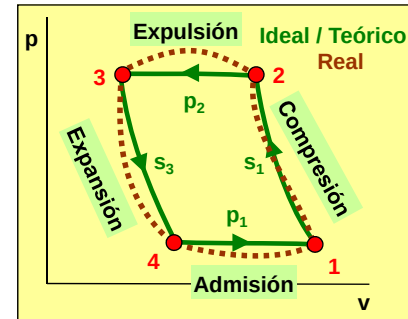
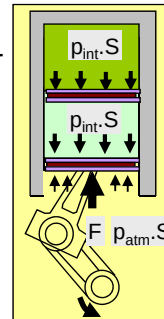
Las etapas del ciclo de compresión son:

- 1-2 compresión (s cte)
- 2-3 expulsión (p cte)(abre val. de escape)
- 3-4 expansión (s cte)
- 4-1 admisión (p cte) (abre val. de adm.)

$$\eta_{\text{Vol}} = \frac{V_1 - V_4}{V_1 - V_3}$$

$\eta \uparrow$ al $\downarrow$ el espacio muerto (V_3)
(al modificar V_3 también lo hace V_4)
técnicamente es necesario por las válvulas y las tolerancias mecánicas

Por unidad de masa



Teoría de la Compresión (II)

W_{comp} se puede $\downarrow$ si se extrae Q , (refrigerando)

Suponiendo la compresión adiabática es:

$$\left. \begin{aligned} W_{\text{comp}} &= h_2 - h_1 \\ c_p &= \frac{\Delta h}{\Delta T} \end{aligned} \right\} W_{\text{comp}} = c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

Si la capacidad térmica es cte, en una compresión con $s = \text{cte}$:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

De esta manera se puede expresar el trabajo como:

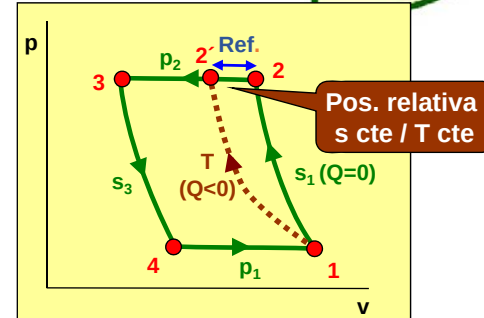
$$\left. \begin{aligned} c_p &= \frac{R \cdot \gamma}{\gamma - 1} \\ W_{\text{comp}} &= c_p \cdot (T_2 - T_1) \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} W_{\text{comp}} &= \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \cdot [T_2 - T_1] \\ T_2 &= T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \end{aligned} \right\} W_{\text{comp}} = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \cdot \left[T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - T_1 \right]$$

$\left\{ \begin{array}{l} \gamma \text{ exponente adiabático aire } (\approx 1,4) \\ T \text{ (Kelvin)} ; p \text{ (Pa)} \end{array} \right.$

$$W_{\text{comp}} = \frac{\gamma \cdot R}{\gamma - 1} \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

Por unidad
de masa

Interesa T_1 baja

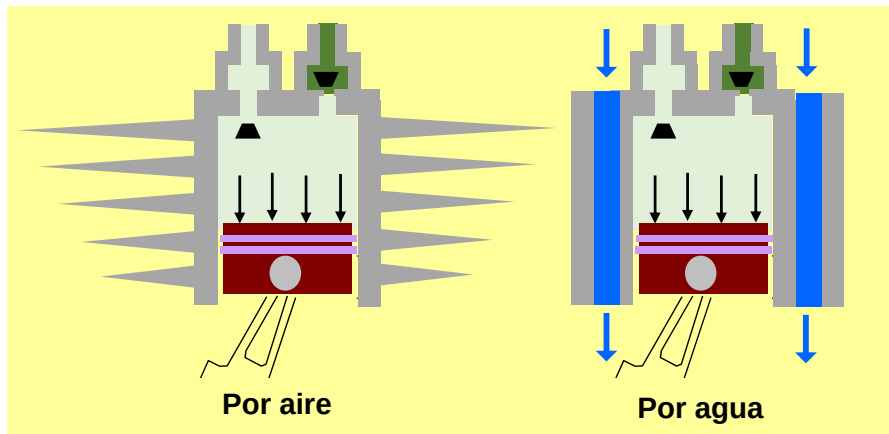


Teoría de la Compresión (III)

La compresión $\Rightarrow \uparrow T^a$ en el aire comprimido $\Rightarrow \uparrow T^a$ la cámara de compresión $\Rightarrow$

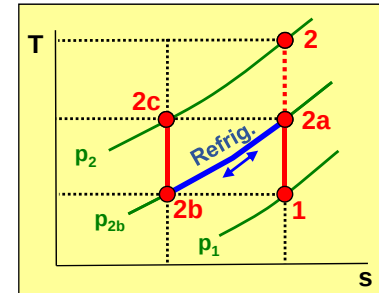
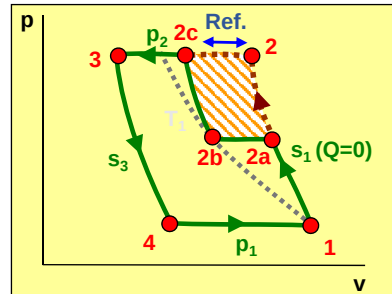
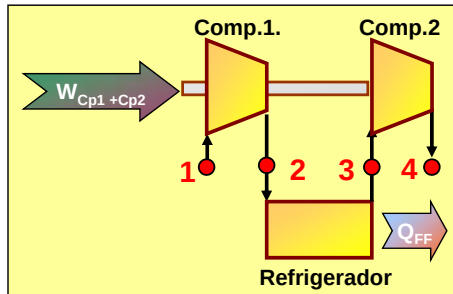
$\Rightarrow \uparrow T^a$ en el aire admitido comprimido $\Rightarrow \downarrow$ masa de aire admitido

El efecto se mejora **refrigerando** la cámara de compresión



Teoría de la Compresión (IV)

Constructivamente es difícil refrigerar en el interior del compresor; en la práctica se instalan dos compresores, y una etapa intermedia de refrigeración



w_{comp} es suma de dos etapas

$$w_{\text{comp}} = \frac{\gamma \cdot R}{\gamma - 1} \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_{2a}}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] + \frac{\gamma \cdot R}{\gamma - 1} \cdot T_{2b} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_{2b}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

La refrigeración ideal es la que iguala la T de entrada a la segunda etapa a la de entrada a la primera; además será ideal si no se pierde presión

$$T_1 = T_{2b} ; p_{2a} = p_{2b}$$

Teoría de la Compresión (V)

$$w_{\text{comp}} = \frac{\gamma \cdot R}{\gamma - 1} \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_{2a}}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] + \frac{\gamma \cdot R}{\gamma - 1} \cdot T_{2b} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_{2b}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

Para optimizar la presión intermedia, p_c : $\frac{dw}{dp_c} = 0$

Se obtiene: $p_c = \sqrt{p_1 \cdot p_2}$ $\frac{p_c}{p_1} = \frac{p_2}{p_d}$

Es decir, la relación de presiones es la misma en cada etapa

Si la compresión se realizara en más etapas esta regla se mantendría

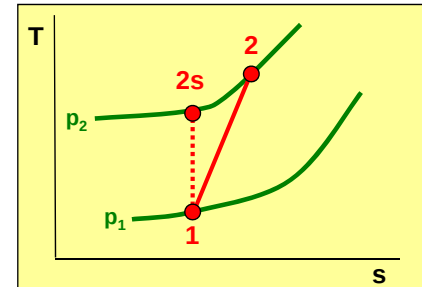
$$\frac{p_c}{p_1} = \frac{p_e}{p_d} = \frac{p_2}{p_f} \quad p_c = \sqrt[3]{p_1^2 \cdot p_2} \quad p_e = \sqrt[3]{p_1 \cdot p_2^2}$$

Teoría de la Compresión (VI)

El Compresor tiene un rendimiento isoentrópico

$$\eta_{s \text{ comp}} = \frac{W_{s \text{ comp}}}{W_{\text{comp}}} \quad \begin{cases} W_{s \text{ comp}} = h_{2s} - h_1 \\ W_{\text{comp}} = h_2 - h_1 \end{cases} \quad \eta_{s \text{ comp}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{s \text{ comp}}}$$



$$c_p = \frac{\Delta h}{\Delta T} \Rightarrow \Delta h = c_p \cdot \Delta T \quad \begin{cases} W_{s \text{ comp}} = c_p \cdot (T_{2s} - T_1) \\ W_{\text{comp}} = c_p \cdot (T_2 - T_1) \end{cases} \quad \eta_{s \text{ comp}} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$$

• con $s = \text{cte}$:

$$T_{2s} = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_{s \text{ comp}}}$$