ANEXO

INTRODUCCIÓN AL COMPRESOR ROTATIVO SCROLL

pfernandezdiez.es

Carlos Renedo Estébanez ; Pablo Fernández García

A.1.- ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El compresor Scroll fue descrito por primera vez, y patentado en 1905, por el francés Leon Creux; se puede considerar constituido por un rotor en forma de espiral, excéntrico respecto al árbol motor, que rueda sobre la superficie del estator, que en lugar de ser circular tiene forma de espiral concéntrica con el árbol motor.

El contacto entre ambas superficies espirales se establece, en el estator, en todas sus generatrices, y en el rotor también en todas sus generatrices; su diseño basado en dos espirales, que se tienen que fabricar con tolerancias de mecanizado extremadamente estrechas, inferiores a 10 micras, hizo que, desafortunadamente, su concepto fuese olvidado, ya que en aquella época no existía la tecnología de precisión suficiente para su producción.

En 1972 el físico Niels Young retoma el concepto del Scroll, propone la idea a Arthur D. Little, en Cambridge, Machachuset, y su empresa se convierte en la primer compañía en aplicar la tecnología del Scroll a compresores de aire acondicionado, y así en 1973 se desarrolla un modelo viable del mismo que, sólo las técnicas de mecanizado por control numérico utilizadas, hicieron posible la fiabilidad de fabricación imprescindible para este tipo de compresores.

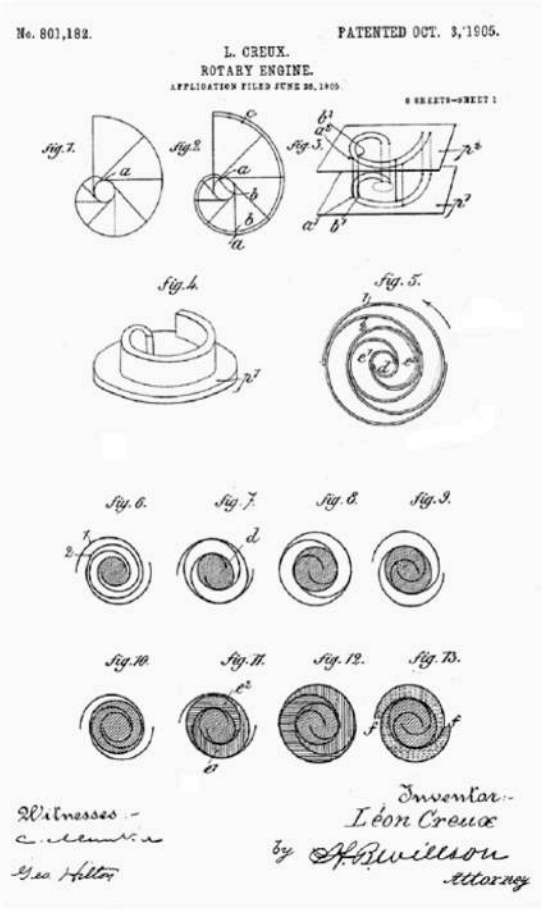


Fig A.1.- Primera patente del compresor Scroll en 1905

Las condiciones existentes en los años 70, tendentes a mejorar la eficiencia de los compresores, permitieron incentivar el desarrollo del compresor Scroll, ya que en comparación con los alternativos tenía:

- *Mejor eficiencia*
- *Mayor fiabilidad*
- *Funcionamiento suave*
- *Menos ruido*

por lo que a la vista de estas ventajas se comenzó a introducir en los equipos de climatización y refrigeración.

A finales de 1973 la empresa Artur D. Little, y la compañía Trane, comenzaron el desarrollo del compresor Scroll para refrigeración, llegando a usar finalmente esta tecnología en sus productos. Su desarrollo continuó, sobre todo en Japón y en Estados Unidos, comenzando a mediados de la década de los 80 su introducción en otros sectores como el de la automoción.

Hitachi y Mitsui Seiki en Japón introdujeron los compresores Scroll para aire acondicionado lubricados con aceite, aunque estas unidades eran simples adaptaciones de sus compresores de refrigeración.

Aunque los compresores Scroll se han desarrollado para la industria de la refrigeración convencional, se han encontrado otros campos de aplicación, como la medicina, donde debido a su reducido nivel de ruido y no tener problemas de mantenimiento, los compresores Scroll sin aceite se han instalado en máquinas de diálisis, ventiladores y nebulizadores.

Hoy en día los compresores Scroll se utilizan por la mayor parte de las grandes compañías de refrigeración y climatización como son Trane, Hitachi, o Copeland.

Los compresores Copeland Scroll® de 2÷15 CV se diseñan y construyen exclusivamente para aplicaciones de refrigeración. Los compresores Scroll de Refrigeracion tienen menor cantidad de partes móviles y son altamente fiables. Existen modelos para aplicaciones en un amplio rango, incluyendo bajas temperaturas de hasta -40°C.

De diseño simple con 70% menos de partes móviles, ya que sólo dos partes están involucradas en el trabajo de la compresión, frente a las, al menos, 9 por cilindro que requiere una tecnología a pistón convencional.

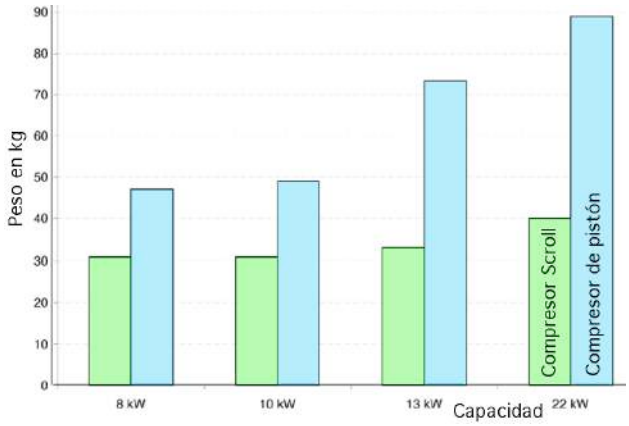


Fig A.2.- Comparación del peso entre el compresor Scroll y el compresor de pistón

Menor peso y tamaño que cualquier otra tecnología a pistón de capacidad equivalente, Fig A.2.

El Copeland Scroll es hasta tres veces más silencioso y exento de vibraciones que cualquier otra tecnología a pistón. Se necesitaría hacer funcionar tres compresores Scroll al mismo tiempo para alcanzar el nivel de ruido de un compresor a pistón de capacidad equivalente.

A.2.- DESCRIPCIÓN DEL COMPRESOR SCROLL

El compresor Scroll se puede considerar como la última generación de compresores rotativos de paletas, donde éstas últimas se han sustituido por un rotor en forma de espiral, excéntrico respecto al árbol motor y que rueda sobre la superficie del estator, que en lugar de ser circular también tiene forma de espiral, concéntrica respecto al árbol motor.

Existe una diferencia fundamental respecto a los compresores rotativos de paletas, y es la de que la espiral móvil del rotor no gira solidariamente con este último, sino que sólo se traslada con él, paralelamente a sí misma.

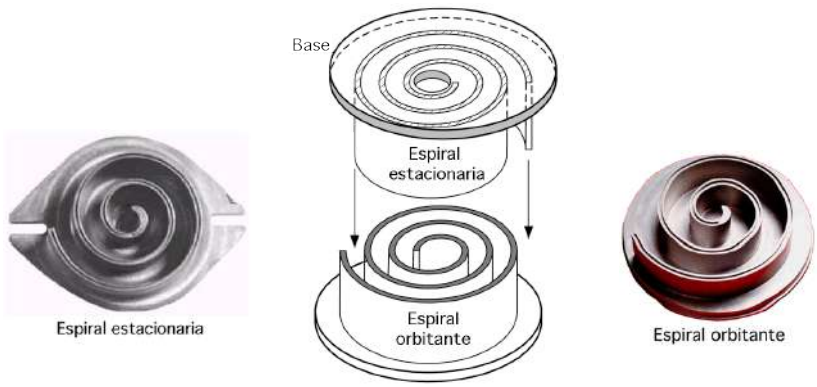


Fig A.3.- Espirales del Scroll, que se encuentran invertidas y giradas 180°

El compresor Scroll consta de dos elementos en forma de espiral:

- *Uno estacionario*
- *Otro móvil, que gira con un movimiento orbital alrededor del centro del eje motor*

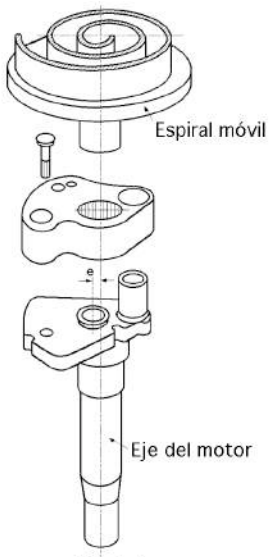


Fig A.4
Conjunto espiral móvil-eje del motor

Ambas espirales son idénticas y están ensambladas con una diferencia de fase de 180º

En la teoría de engranajes, los flancos de los dientes de un par de ruedas dentadas se diseñan de modo que sean perfiles de evolvente de círculos (la evoluta es, en este caso particular, un círculo denominado circulo base), con el objeto de conseguir así que los dientes rueden uno sobre el otro sin deslizamiento.

En el caso del compresor Scroll, el hecho de que el perfil de las dos espirales sea de evolvente, permite a la espiral móvil rodar sin deslizamiento sobre la espiral fija, cumpliéndose en todo momento la alineación de los centros de las dos espirales y el punto de contacto entre ambas.

El proceso de compresión del Scroll se describe como un proceso de desplazamiento positivo. Aumenta la presión del gas, reduciendo el volumen interno de la cámara de compresión mediante un esfuerzo mecánico. Las celdas selladas se definen exclusivamente por la geometría del Scroll y el movimiento orbital. Debido a su diseño, el dispositivo de involución en espiral del Scroll presenta por sí mismo la capacidad de reducir el volumen y generar así una relación de compresión determinada.

A.3.- FUNCIONAMIENTO

El principio básico de compresión Scroll se basa en la interacción de una espiral fija con otra móvil, ambas idénticas y desfasadas entre si 180°. La espiral móvil orbita, siguiendo la trayectoria fijada por la espiral fija y se mantiene unida a esta última gracias a la acción de la fuerza centrífuga. Así es como, desde la periferia, se van formando compartimientos de gas que son desplazados hacia el centro de las espirales, contrayéndose su volumen y aumentando la presión y temperatura, hasta producirse la descarga por el centro. Habrá seis compartimientos operando permanentemente, por lo que la compresión es siempre continúa y uniforme.

El movimiento orbital que describe la espiral móvil es circular, tiene la misma amplitud que el motor y se mantiene siempre con 180º de diferencia de fase valiéndose de un dispositivo antirotación, que se conoce como acoplamiento Oldham; la magnitud de este movimiento orbital depende del radio del círculo base y del espesor de la pared de las espirales.

Cuando está en funcionamiento, en cada posición del movimiento orbital las dos espirales entran en contacto en varios puntos, formando una serie de cámaras o celdas, (normalmente 6) en forma de media luna, independientes. El giro del motor hace que las celdas se vayan trasladando de la periferia hacia el interior de las espirales, progresivamente, lo que implica una disminución continua del volumen de estas cámaras a medida que se aproximan hacia el centro de las espirales. En

este tipo de compresores, las celdas o cámaras de compresión de geometría variable (en forma de hoz) están generadas por dos espirales idénticas:

- La espiral superior es fija (estator), en cuyo centro está situada la lumbrera de escape

- La otra espiral es orbitante (rotor)

Estando montadas ambas frente a frente, en contacto directo una con la otra.

Las espirales fija y móvil, cuyas geometrías, como sabemos, se mantienen en todo instante desfasadas un ángulo de 180º, merced a un dispositivo antirotación, están encajadas una dentro de la otra de modo que entre sus ejes hay una excentricidad *e*, para conseguir un movimiento orbital del eje de la espiral móvil alrededor del de la espiral fija de radio *e*.

Durante cada revolución del motor, la masa de gas inicial se mueve hacia el centro por el movimiento giratorio, y su volumen se reduce significativamente a medida que la celda que lo contiene se va desplazando hacia el interior de las espirales.

El proceso de compresión se inicia en dos celdas, de forma que cada una se corresponde con el extremo exterior de una de las dos espirales, existiendo pares de celdas simétricas. La compresión termina cuando el gas es comprimido a la máxima presión y escapa a través de un puerto de descarga localizado en la celda más profunda; en la descarga se juntan las porciones de gas que han sido aspiradas por uno y por otro lado de las espirales.

La duración de este proceso es de varias revoluciones, por lo que en todo momento existen dos celdas opuestas del mismo tamaño, obteniéndose así un ciclo de compresión casi continuo que genera muy pocas vibraciones.

Fijándose exclusivamente en el conjunto (árbol motor-rotor), con cada giro de 360º del árbol motor, se imprime a la espiral inscrita en el plato, rotor excéntrico, los dos movimientos siguientes:

a) Uno de rotación de 360° alrededor de su eje, (que tendría lugar igualmente si el valor de e fuera nulo)

b) Otro simultáneo de traslación paralela a si misma, alrededor del eje del árbol motor (que no se produciría si el valor de e fuese nulo)

Si se desea que la espiral describa únicamente éste último movimiento de traslación orbital sin la rotación producida por el hecho de estar solidariamente sujeta al plato, es necesario eliminar, mediante un dispositivo antirotación, ésta última unión rígida, lo que se consigue montando la espiral móvil sobre un simple cojinete vertical de apoyo, concéntrico con ella. De esta manera, el giro del árbol motor o cigüeñal arrastra al conjunto de la espiral móvil, haciéndola describir alrededor del árbol motor y, por lo tanto, alrededor del centro de la espiral fija, (punto donde está situada la lumbrera de escape), una órbita de radio *e* sin rotación simultánea.

Como consecuencia de este movimiento, las celdas y el vapor atrapado en ellas, son empujadas suavemente hacia el centro de la espiral fija, al mismo tiempo que su volumen se va reduciendo

progresivamente, comprimiendo el vapor; cuando éste llega al centro de la espiral fija, se pone en comunicación con la lumbrera de escape ubicada en él, produciéndose de esta manera la descarga del vapor.

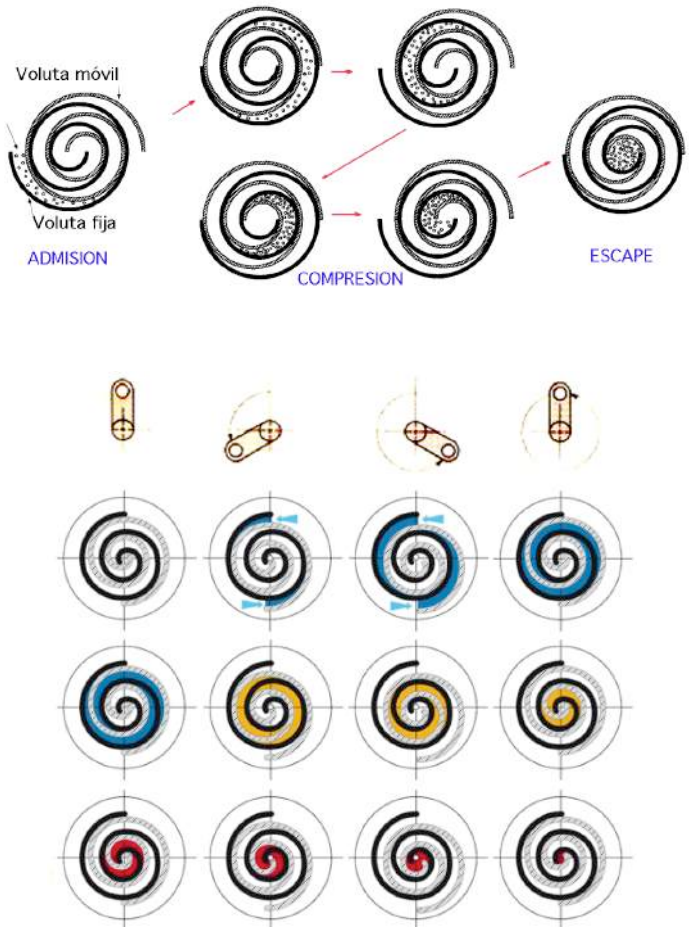


Fig A.5.- Vistas de las espirales del compresor Scroll en diversas etapas de la compresión

El funcionamiento se puede descomponer en las tres fases siguientes:

Aspiración: *En la primera órbita, 0 a 360°, en la parte exterior de las espirales se forman y llenan completamente de vapor, a la presión* p_1*, dos celdas de volumen* V_1

Compresión: *En la segunda órbita, 360 a 720°, tiene lugar la compresión a medida que dichas celdas disminuyen de volumen y se acercan hacia el centro de la espiral fija, alcanzándose al final de la segunda órbita la presión de escape* p_2*, cuando su volumen es* V_2

Descarga: *En la tercera y última órbita tiene lugar la descarga (escape) a través de ella, puestas ambas celdas en comunicación con la lumbrera de escape*

Cada uno de los tres pares de celdas, estarán en cada instante en alguna de las fases descritas, lo que origina un proceso en el que la aspiración, compresión y descarga tienen lugar simultáneamente y en secuencia continua, eliminándose por esta razón las pulsaciones casi por completo.

A.4.- CARCASA

La carcasa del compresor Scroll consiste en una vasija cilíndrica vertical dividida en dos zonas, de baja y alta presión.

El volumen más grande de la carcasa funciona a la presión de succión del gas y contiene:

- *El motor*
- *La bomba de aceite (si dispone de ella)*
- *Los componentes móviles del conjunto de las espirales*

La zona de alta presión, relativamente pequeña, se encuentra encima de la espiral estacionaria y actúa como silenciador de la descarga, reduciendo el ruido y la vibración de la pulsación del gas.

En el funcionamiento en refrigeración, el gas refrigerante entra en el recinto de succión por la conexión inferior. La velocidad del gas disminuye sustancialmente en la carcasa, permitiendo de ese modo que el lubricante y cualquier pequeña cantidad de líquido refrigerante se separen del gas.

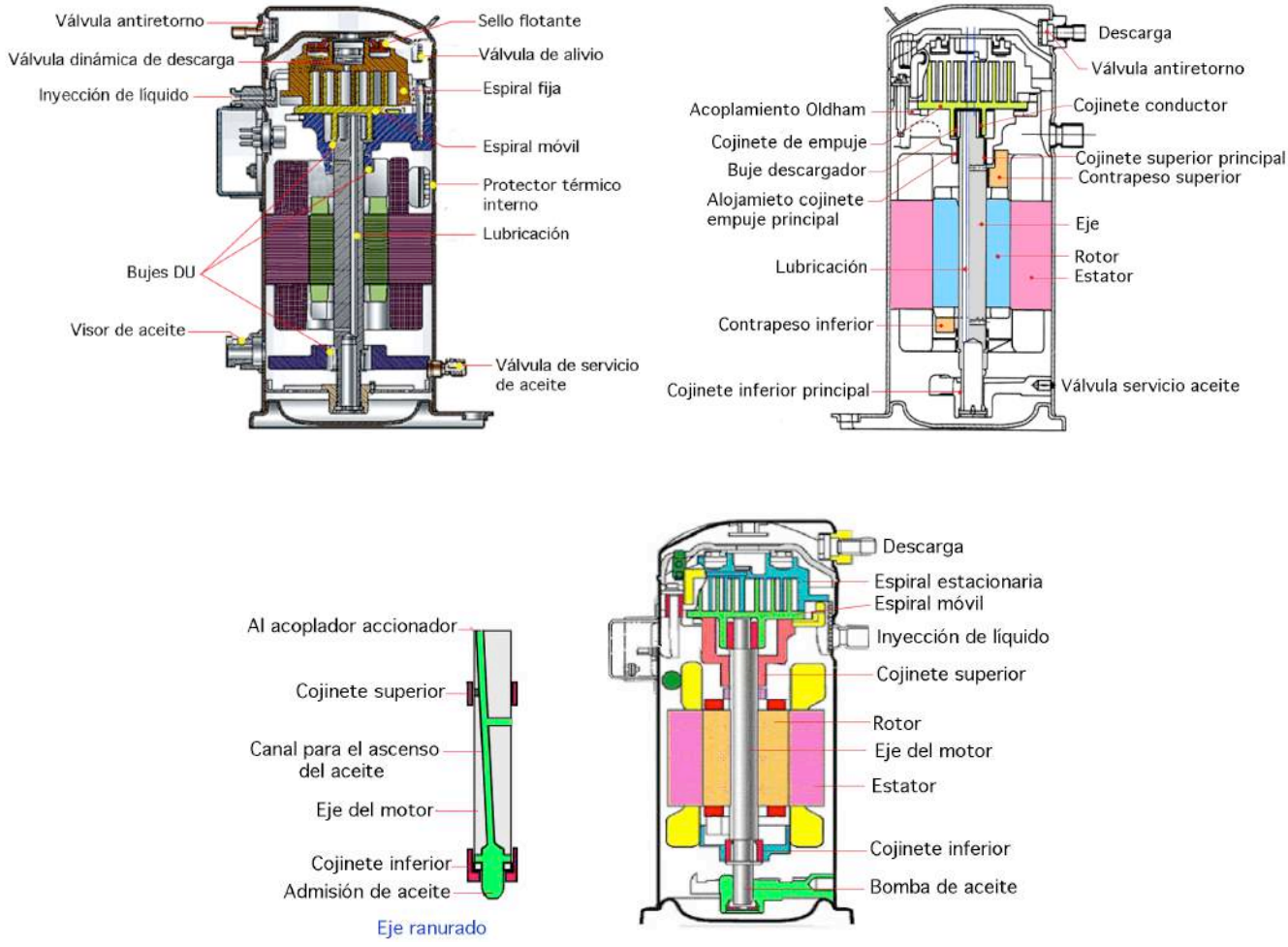


Fig A.6c.- Elementos de un compresor Scroll

La parte inferior de la carcasa sirve como deposito de aceite y del refrigerante en estado líquido, si existe. La gran capacidad del cárter permite su funcionamiento en sistemas con largos recorridos de tubería y grandes cargas de refrigerante.

Algunos modelos de Scroll utilizan una bomba de aceite accionada por la fuerza centrífuga, que se encarga de distribuir el lubricante a los cojinetes y al acoplamiento accionador, a través de un canal diagonal perforado en el eje del motor.

En este tipo de compresores todo el gas de succión, en su camino hacia las espirales, pasa hacia arriba a través del motor. Una pequeña cantidad de aceite en forma de neblina suspendida en el gas refrigerante proporciona la lubricación necesaria para el sellado de los laterales de las espirales.

El gas comprimido se descarga a través de una válvula de retención existente en la cámara de alta presión, saliendo de la carcasa del compresor a través de una conexión de descarga. El aceite sube por el eje por la fuerza centrífuga y lubrica los bujes, saliendo posteriormente por orificios de lubricación específicamente diseñados para tal fin.

Otros elementos con los que se puede dotar al compresor son:

- Un visor de nivel de aceite, que sirve como puerto de conexión para el dispositivo de control de nivel de aceite empleado en sistemas paralelos

- Un filtro de mallas de succión, capaz de retener impurezas provenientes del sistema

- En el caso de compresores mayores se puede incluir una trampa magnética, que permita atrapar partículas ferrosas que pudieran acabar en el cárter, y que de llegar a las espirales se pondría en peligro la fiabilidad del compresor

A.5.- ACCIONAMIENTO

El Scroll es un compresor hermético y está accionado por un motor eléctrico, cuya refrigeración se realiza por el gas de aspiración, no existiendo necesidad de refrigeración externa. Este sistema prolonga la vida del motor asegurando que éste permanezca con una temperatura baja y estable.

El motor sirve también como barrera a cualquier partícula de refrigerante que pudiera entrar en forma líquida, ya que permanecería en la carcasa y, posteriormente, pasaría a través del motor antes de alcanzar el área de compresión del conjunto de las espirales. La presencia de líquido aumenta la caída de la presión del gas refrigerante a través del motor ya que reduce el espacio disponible para el gas; ésto, junto con el calor desprendido por el motor, provoca que el líquido refrigerante se evapore antes de llegar a las espirales.

El eje del motor (cigüeñal) transmite la rotación del motor al movimiento orbital de la espiral inferior; el cigüeñal lleva unos contrapesos, necesarios para equilibrar el mecanismo del compresor.

Dos casquillos lubricados por aceite, (uno debajo del motor y el otro sobre él), alinean el cigüe-

ñal; el casquillo inferior se carga ligeramente, mientras que el superior lleva la mayor parte de la carga de compresión.

El aspecto más característico del compresor Scroll son sus espirales, que se fabrican en acero al carbono, o en aluminio, con una precisión entre $5 \div 12$ micras, aunque algunas aplicaciones permiten el uso de espirales de plástico modeladas mediante fundición por inyección.

Las tolerancias de mecanizado, tan ajustadas, son para minimizar las pérdidas por fugas, con lo que fomentan la eficacia de la compresión. En el caso de funcionamiento sin aceite, para que sea compatible con la propia lubricación de los sellos plásticos de las puntas de las espirales, se requiere un acabado superficial con una rugosidad de 0,4 micras en la base de la espiral.

Un cojinete de empuje hidrodinámico soporta la espiral orbitante, y es el encargado de soportar las fuerzas axiales impuestas por el gas comprimido entre las espirales. El diseño del cojinete y la selección del lubricante apropiado, son elementos importantes a la hora de obtener la mayor eficiencia posible del compresor.

El diseño de la espiral, incluyendo las dimensiones de la altura y el diámetro de la voluta, se optimizan para cada tipo de gas. Las dimensiones geométricas del conjunto de las espirales se incrementan uniformemente para compresores con más capacidad, siendo normal que, distintos tamaños de compresores de una misma compañía, tengan idéntico perfil de espirales, pero que presenten sin embargo, diferentes alturas y, por lo tanto, distintos volúmenes desplazados.

Las protecciones del compresor Scroll no difieren de las necesarias para cualquier otro tipo de compresor, estando protegido contra: sobrepresurización, sobrecalentamiento, rotación en sentido contrario y “slugging” (flujo intermitente).

La mayoría de los fabricantes de compresores combinan las características de protección del Scroll dentro de un módulo de protección, muchas veces alojado al lado de la carcasa del compresor.

A.6.- SISTEMAS DE PROTECCIÓN

En equipos grandes, los interruptores de alta presión forman parte del equipo básico. En un sistema con múltiples circuitos de refrigeración, como un enfriador de líquido refrigerado por aire, cada circuito debe tener un interruptor de alta presión separado para protegerlo contra la sobrepresurización; éstos tienen que estar conectados en serie para que, ante cualquier incidente de alta presión, se detenga todo el sistema.

Sensor de temperatura.- Debe proteger al compresor de las altas temperaturas que puedan resultar potencialmente dañinas. En muchos compresores Scroll, el sensor va montado internamente, por lo que estará influenciado tanto por la temperatura del motor, como por la del gas de descarga; una subida de la temperatura por encima de un valor prefijado causa el accionamiento del inte-

rruptor de límite superior, que implica la parada del compresor. Por ejemplo, algunos fabricantes, como Copeland, incorporan en sus nuevos diseños de compresores Scroll para refrigeración comercial (modelos de 7÷12 CV), un módulo de protección de temperatura interna, que funciona descargando el conjunto de las espirales cuando la temperatura interna alcanza los 135°C. A esta temperatura, una válvula de disco bimetálica se abre y hace que los elementos del Scroll se separen, interrumpiendo la compresión.

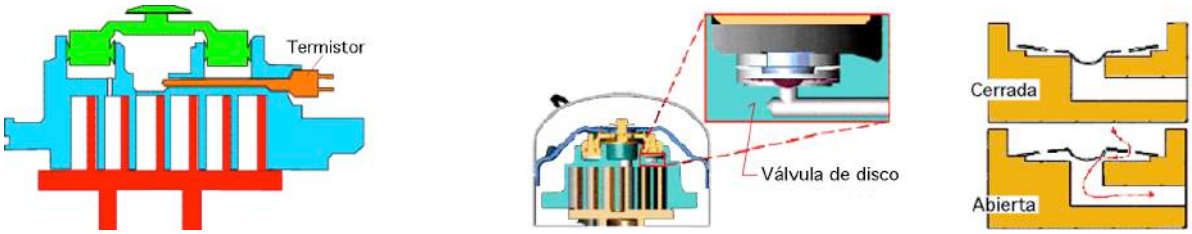


Fig A.7.- Dispositivo de protección de temperatura y válvula bimetálica de disco

Las presiones de succión y de descarga se equilibran, mientras que el motor continúa funcionando hasta su parada manual, o hasta que se dispare un protector unos minutos después. En ambos casos se debe permitir que se enfríe el compresor antes de volver a su funcionamiento normal.

Válvula antiretorno.- Una válvula de cierre o antiretorno aísla la conexión de descarga del compresor de la presión en la línea de descarga. Cuando el compresor se detiene, la válvula de cierre impide que el gas de la línea de succión provoque la rotación inversa del compresor en el apagado, permitiendo al mismo tiempo que el gas atrapado en las celdas de media y alta compresión se escape hacia el lado de succión. Esto permite al compresor arrancar descargado, lo que reduce el par de arranque y las tensiones mecánicas.

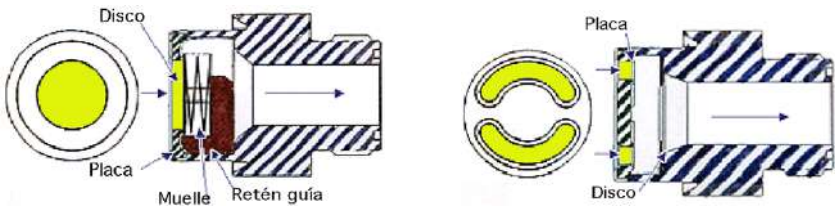


Fig A.8.- Válvulas antiretorno

Si se produjera el reflujo del gas, implicaría una entrada de gas caliente, procedente del condensador hacia el evaporador, lo que disminuiría considerablemente el rendimiento global de los enfriadores de compresión. Las válvulas de cierre pueden ser externas o internas, tienen una caída de presión ligeramente inferior, y proporcionan peor protección contra el reflujo.



Fig A.9
Válvula dinámica de descarga

Válvula dinámica de descarga.- En compresores Scroll para refrigeración, y para permitir que el gas alcance la presión deseada en el momento

de la descarga, se emplean válvulas dinámicas de descarga, lo que mejora considerablemente la eficiencia del compresor, especialmente cuando se requieren elevadas relaciones de compresión, Fig A.9. Más adelante se amplía información sobre su actuación.

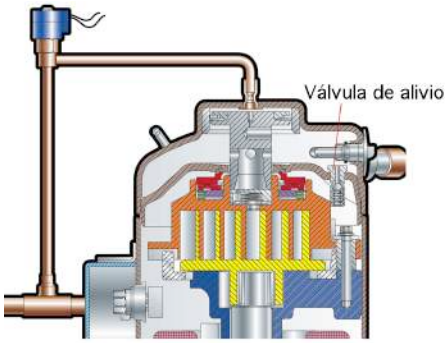
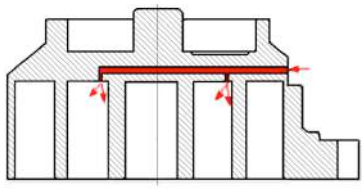


Fig A.10.- Válvula de alivio en compresores Scroll

Válvula de alivio.- Algunos compresores de refrigeración incorporan una válvula de alivio que abre a presiones diferenciales internas, Fig A.10, entre succión y descarga, del orden de 25 ÷31 bar (375 ÷460 psi). Esta acción provoca que el protector térmico interno se abra y de ese modo, el compresor se detenga.

Inyección de líquido.- La válvula DTC (Válvula de Control de la Temperatura de Descarga) Fig A.11, detecta la temperatura en la cabeza del compresor mediante un bulbo, alojado en una cavidad especialmente dispuesta en la carcasa del compresor.


Fig A.11.- Inyección de líquido

Cuando la temperatura alcanza los 90°C+2ºC, el bulbo envía una señal de presión que abre la DTC para que la inyección comience.

Aquí se aprecia dónde se efectúa internamente la inyección de líquido, entre los compartimientos internos de las espirales. El gas inyectado se incorpora al ciclo termodinámico de compresión y hace que la temperatura de descarga descienda sin producir pérdidas de la capacidad.

Lubricación.- Los compresores Scroll no poseen bomba de aceite. El aceite es impulsado desde el depósito en la parte inferior a través de una ranura helicoidal a lo largo del eje. El aceite sube por el eje gracias a la fuerza centrífuga y lubrica los bujes saliendo por orificios de lubricación específicamente diseñados.

Los bujes son de bronce impregnados con *cubierta que no pega* que hace las veces de lubricante, si por alguna causa la película lubricante desaparece. Todos los compresores Copeland Scroll® cuentan con este tipo de bujes lo cual mejora considerablemente la fiabilidad del compresor en condiciones de lubricación exigida.

Protección contra el recalentamiento.- La proporciona un sensor de temperatura; es uno de los cinco termistores internos conectados en serie al Módulo de Protección Electrónica, que ofrece una protección superior contra elevadas temperaturas de descarga, sobrecargas, baja carga de gas refrigerante y baja tensión.


Fig A.12- Protección interna contra recalentamiento y módulo electrónico

La alimentación eléctrica del módulo es opcional (120, 240 ó 24 Volt). La bobina del contactor del compresor se conecta a través del contacto

normal cerrado M1-M2 del Módulo Electrónico (circuito de comando). Internamente, el compresor posee cinco Termistores PTC en serie, instalados 4 en el estator y 1 utilizado como termostato de descarga. Los dos extremos de la serie de termistores internos está conectada a los terminales S_1 y S_2 del módulo. Un aumento en la temperatura interna del compresor, genera un aumento de la resistencia en los termistores, que será detectada por el módulo. Por encima de un determinado valor, los contactos M_1 y M_2 se abren, sacando al compresor fuera de servicio.

El Módulo de Protección Electrónica aplicado en refrigeración posee, además, protección contra una inversión de la rotación.

Verificación del sentido de giro.- Los compresores Scroll son direccionalmente dependientes; es decir, realizan la compresión solamente en una dirección de giro.

Esto no es un problema en los compresores accionados con motor monofásico, ya que éstos siempre giran en la misma dirección. Pero los motores trifásicos pueden girar en cualquier dirección, dependiendo de la secuencia de fases, por lo que existe una posibilidad del 50% de que la fuerza motriz sea conectada al revés.

La verificación de la dirección de giro correcta se puede realizar observando que la presión de succión caiga y la presión de descarga aumente al energizar el compresor. Además, la operación en inversión del compresor es más ruidosa, y su consumo de corriente se reduce substancialmente en comparación con los valores tabulados.

Aunque la operación del Scroll en inversión por breves períodos de tiempo no resulta dañina, la operación por un período prolongado podría terminar produciendo daños permanentes al compresor.

En los periodos de parada del compresor, el líquido refrigerante se puede acumular en el cárter. Para impedir el apelmazamiento del líquido refrigerante en el compresor durante el arranque, los fabricantes han usado tradicionalmente un calefactor eléctrico, usualmente montado externamente en el fondo de la carcasa, que se activa cuando el compresor se detiene. Éste calienta el cárter de aceite lo suficiente para hervir el líquido refrigerante (no el aceite), así que sólo el refrigerante en estado gaseoso está presente durante el arranque.

Protección de una sola fase.- El panel de control del enfriador principal examina continuamente la energía trifásica a la entrada de la unidad. En caso de pérdida de cualquiera de las fases, el sistema de control del enfriador interrumpe el suministro de energía a la unidad. La pérdida de fase en sistemas trifásicos causa la rotación inversa en los compresores.

Protección durante el arranque.- El sistema de control del enfriador monitoriza las presiones de succión y de descarga del compresor en los primeros segundos del arranque. Si el compresor no consigue una presión diferencial determinada (por ejemplo, si la presión de descarga aumenta me-

nos de 69 kPa) o si la presión de descarga decrece, el compresor se detiene.

Arranques excesivos.- El enfriador, cuando tiene varios compresores, alterna el encendido y apagado de estos para conseguir una temperatura del agua del enfriador definida por un punto de ajuste; para evitar que los excesivos arranques puedan provocar recalentamiento en el motor, hay que asegurar que ningún compresor arranque más de 12 veces en una hora.

Parámetros de funcionamiento del compresor.- Cada compresor Scroll tiene definidos unos parámetros de funcionamiento, es decir, combinaciones aceptables de la presión y temperatura de succión y descarga, para las que fue diseñado para funcionar de manera continua y fiable. El funcionamiento fuera de los parámetros aceptables puede dañar al compresor.

El sistema de control del enfriador usa estos parámetros para programar el encendido y apagado de los compresores dentro de unos parámetros aceptables, y para controlar continuamente el rendimiento global de la instalación.

A.7.- REGULACIÓN DEL COMPRESOR SCROLL

La carga térmica de una instalación suele ser variable, especialmente en los sistemas de aire acondicionado, por lo que para asegurar y mejorar su correcto funcionamiento se debe ajustar la producción del compresor a la demanda térmica.

Hay diversas maneras de conseguir una regulación de la capacidad del compresor Scroll, como:

- Accionamiento por motores de velocidad variable
- Asociación de compresores en paralelo
- Inyección de vapor o de líquido
- La modulación mecánica
- La succión variable

La capacidad de un compresor Scroll es directamente proporcional a la velocidad de giro, por lo que ajustando este valor, se puede adaptar la producción frigorífica a la demanda de la instalación; este método de regulación requiere el uso de un motor de velocidad variable.

Si es un motor de combustión, el ajuste se realiza con la posición del acelerador.

Si el motor es eléctrico, se requiere de un convertidor electrónico que modifique la frecuencia o la tensión de alimentación del motor.

Resulta recomendable realizar algunas modificaciones en el compresor Scroll, como:

- Aumentar o reforzar la conformidad radial, lo que permite mantener el sellado requerido independientemente de la velocidad

- Instalar una bomba de aceite que mantenga la lubricación apropiada de los bujes (rodamientos) y de las superficies en contacto

- Incrementar el flujo interno de aceite, lo que mejora el sistema de lubricación

Otras maneras de conseguir un cierto grado de regulación es mediante la fabricación de unidades múltiples equipadas con dos o más compresores Scroll de tamaños iguales o diferentes montados en paralelo, lo que permite, además de cubrir una amplia gama de capacidades frigoríficas, fraccionar la potencia frigorífica de modo escalonado.

A título de ejemplo, una unidad tándem compuesta por dos compresores diferentes, uno del 40% y el otro del 60% de la potencia frigorífica total, posibilita el escalonamiento siguiente: 40% (funcionando sólo el primero), 60% (funcionando sólo el segundo) y 100% (funcionando los dos).

Para pequeños tamaños, y si la frecuencia de detenciones y puestas en marcha no es excesiva, se utiliza el control on-off, parando y arrancando el motor por medio de un termostato o presostato.

Las unidades condensadoras con una pareja de compresores trabajando en paralelo son una opción interesante, Fig A.13. A carga parcial ofrecen la ventaja de trabajar con una tasa de flujo másico de refrigerante reducida, que magnifica las diferentes eficiencias de los intercambiadores de calor sin introducir pérdidas extra.

Sin embargo, cuando se trabaja con dos o más compresores en paralelo, el retorno del aceite se convierte en un problema; se recomienda separar los circuitos de refrigerante, pero esta configuración no es siempre posible y no da las mismas ventajas operacionales a cargas parciales.

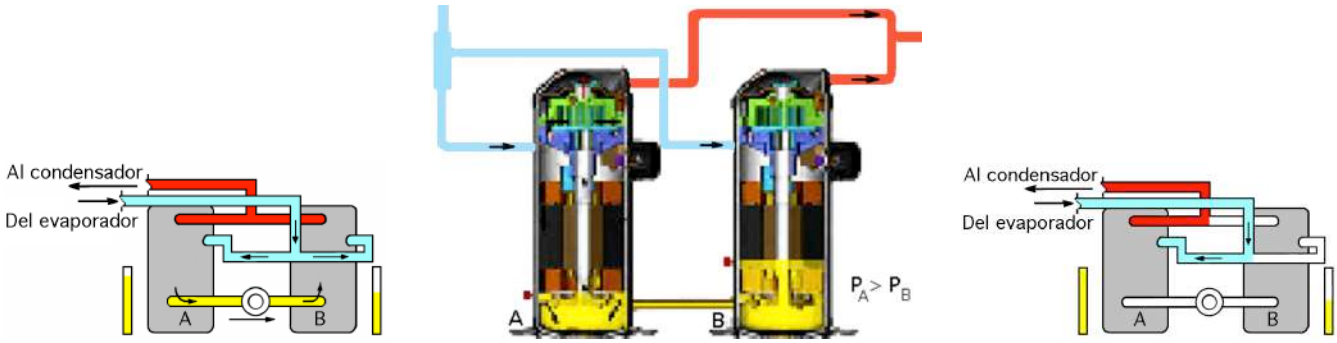


Fig A.13.- Línea de succión en paralelo

Campo de utilización.- Se emplean en el campo del aire acondicionado y bomba de calor en viviendas, para potencias frigoríficas comprendidas entre $5 \div 100$ kW, ocupando un espacio intermedio entre los compresores rotativos y los alternativos. Hasta la fecha se fabrican solamente herméticos.

El vapor se introduce en la carcasa del compresor, por su parte inferior, en donde está situado el motor, pasando por entre los devanados del estator y rotor, refrigerándolos; a la salida del motor el vapor reduce su velocidad facilitándose de este modo la separación de la mayor parte del aceite arrastrado por el vapor de aspiración.

Lubricación.- La lubricación de los dos cojinetes del cigüeñal y el de apoyo de la espiral móvil,

se realiza con aceite impulsado a través del interior del cigüeñal mediante una bomba centrífuga sumergida en el cárter y movida por el mismo cigüeñal. Este circuito de aceite está totalmente separado de las superficies de contacto de ambas espirales, cuya lubricación está asegurada por la pequeña cantidad de aceite arrastrado por el vapor de aspiración.

Pérdidas mecánicas por rozamiento.- La inexistencia de juntas y segmentos en los compresores Scroll, característica común también a los helicoidales, hace que las pérdidas mecánicas por rozamiento en este tipo de compresores, sean más bajas en comparación con las que se producen en los compresores alternativos.

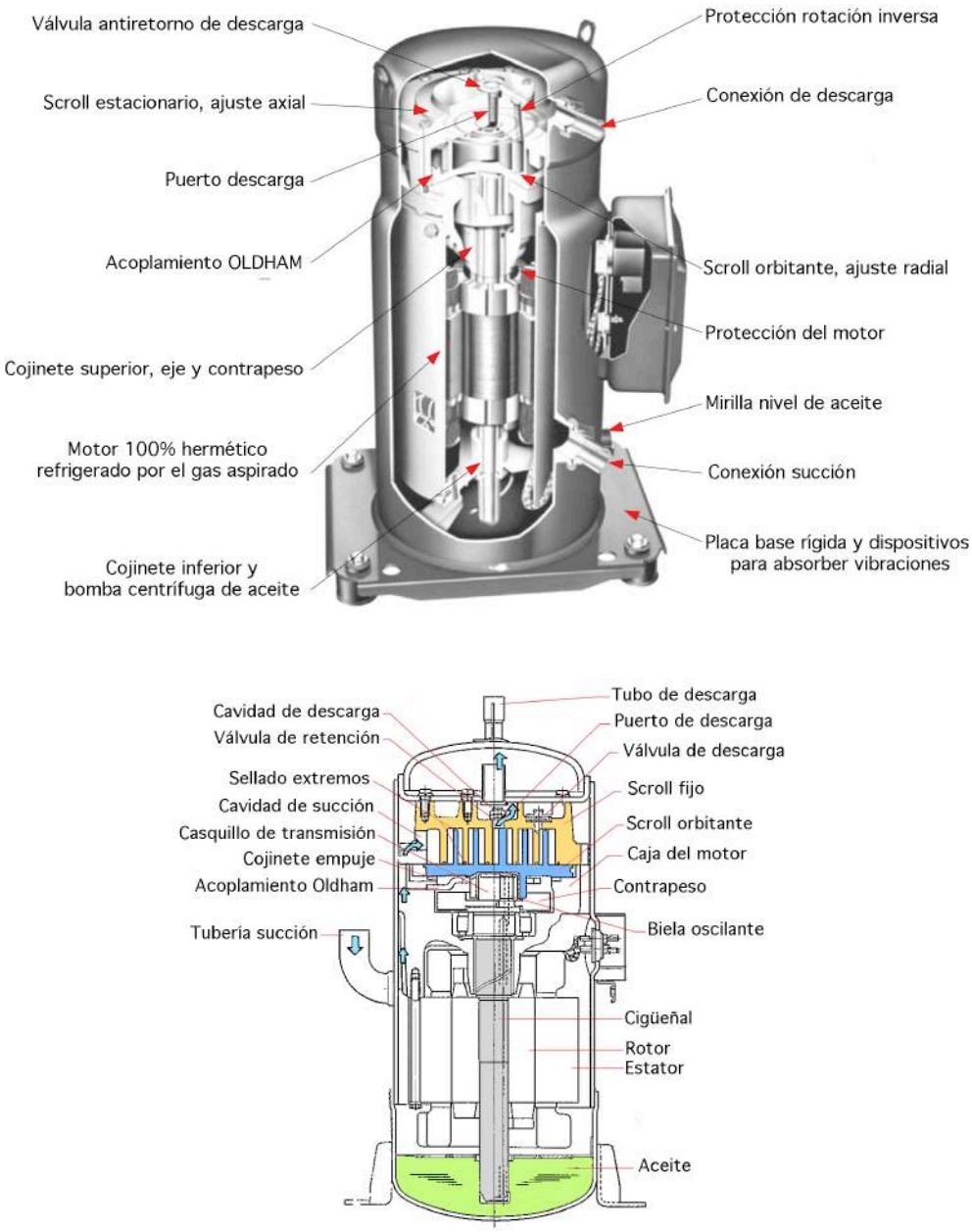


Fig A.14.- Compresor Scroll vertical hermético

Estanqueidad.- Los compresores Scroll se caracterizan por ser completamente herméticos. El conjunto de las espirales, el acoplador, los contrapesos, el motor y los cojinetes están montados en una carcasa cilíndrica de acero soldado. La mayoría de los compresores Scroll para refrigeración y tienen orientación vertical con las espirales montadas en el extremo superior del eje motor.

Para conseguir la estanqueidad suelen llevar mecanizada en el borde superior de ambas espirales una ranura que cumple el mismo cometido de sellado que los segmentos en los pistones de los compresores alternativos. Si entre ambos lados de la ranura (dos celdas en diferentes estadios de compresión) existe una diferencia de presiones Δp, el caudal de fluido (vapor o gas) que se filtrará de una celda a la otra, disminuyendo el rendimiento volumétrico del compresor, será tanto menor cuanto mayor sea la resistencia que se oponga a dicho flujo.

Esta resistencia, que es función de la holgura existente entre las superficies en contacto de ambas espirales, se aumenta practicando la ranura antes mencionada, que recibe el nombre de *cámara de alivio*. Su misión es originar un ensanchamiento brusco seguido de una contracción de la vena fluida, dos resistencias adicionales que no se presentarían de no existir dicha acanaladura.

A.8.- EL PROCESO DE COMPRESIÓN DEL SCROLL

Como sabemos, el compresor Scroll consta de dos espirales: una estacionaria y otra orbitante que gira alrededor del centro del eje motor.

El movimiento orbital que describe la espiral móvil es circular, tiene la misma amplitud que el motor, y se mantiene con una diferencia de fase de 180º mediante un mecanismo antirotación, en los compresores $\begin{cases} \textit{grandes con un acoplamiento Oldman, Fig A.14} \\ \textit{pequeños con un acoplamiento de bola, (como los de aire acondicionado de automóviles)} \end{cases}$

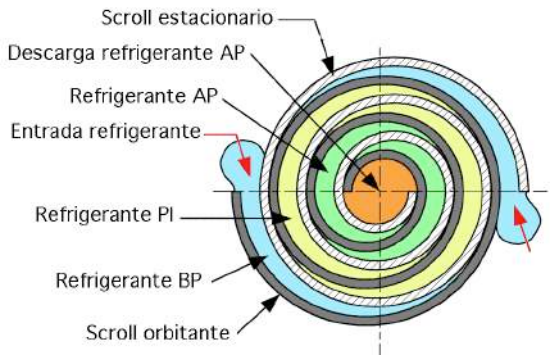


Fig A.15.- El proceso de compresión es continuo,
los flancos de las espirales contienen celdas de gas refrigerante de baja, media y alta presión

Durante el funcionamiento, los laterales de las dos espirales forman compartimentos o celdas en forma de media luna. Como la espiral inferior orbita, los puntos de cierre o sellado (puntos tangentes) sobre los laterales de las espirales evolucionan desde el exterior hacia el interior, empujando las celdas hacia el centro de la espiral.

Mientras las celdas se mueven, disminuyen progresivamente de volumen y, por tanto, comprimen el gas atrapado. Este proceso de compresión es de desplazamiento positivo, ya que al aumentar la presión del gas refrigerante, se reduce el volumen interno de las cámaras de compresión mediante un esfuerzo mecánico.

Existe un espacio remanente entre la compresión y la descarga, pero no es un inhibidor de la capacidad, como sucede en el huelgo existente en un compresor alternativo; ésto se debe a que este volumen nunca está expuesto a la succión.

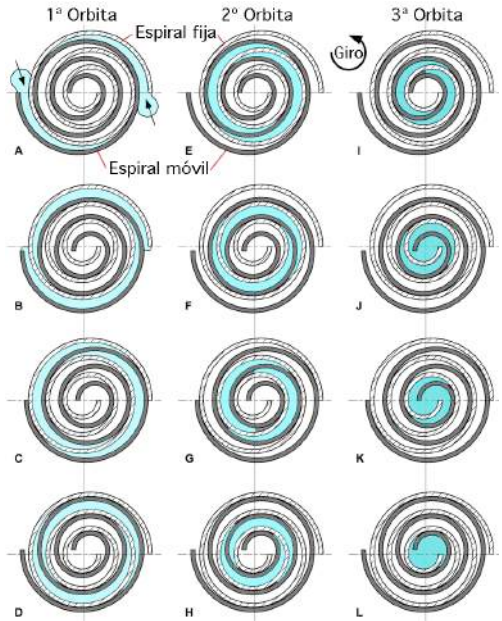


Fig A.16.- El ciclo de compresión requiere de varias órbitas para mover el refrigerante desde la succión (A), a la descarga (L)

Las fases que se producen durante el funcionamiento del compresor son: admisión, compresión y descarga, distinguiéndose tres órbitas en este ciclo:

- Por la rotación del eje del motor, las paredes de la zona exterior de las dos espirales se separan, permitiendo que ese espacio se llene del gas refrigerante de baja presión (posición A). La órbita de la espiral inferior fuerza el cierre de las primeras celdas de gas refrigerante (posición C). Mientras que la primera órbita termina, el primer par de celdas se ha trasladado hacia el interior, a una posición media y, al mismo tiempo, los extremos externos de la espiral comienzan a abrirse otra vez para admitir más gas refrigerante a baja presión (posición D)

- La segunda órbita empuja las primeras celdas de gas hacia el centro del conjunto de las espirales, disminuyendo progresivamente el volumen del gas y aumentando continuamente su presión y temperatura

- La tercera órbita comienza cuando las celdas se encuentran justo antes de alcanzar el centro del conjunto de las espirales. A medida que ésta continúa, los extremos internos de las espirales interrumpen el contacto (posición J) admitiendo el paso del gas comprimido al centro del puerto de descarga. El ciclo de compresión se completa descargando el gas refrigerante de alta presión al final de esta órbita (posición L)

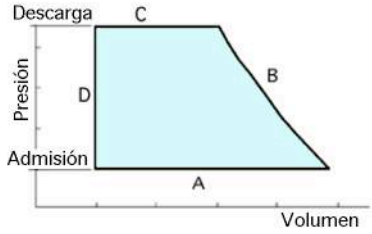


Fig A.17.- Diagrama (p,v) funcionando en condiciones normales

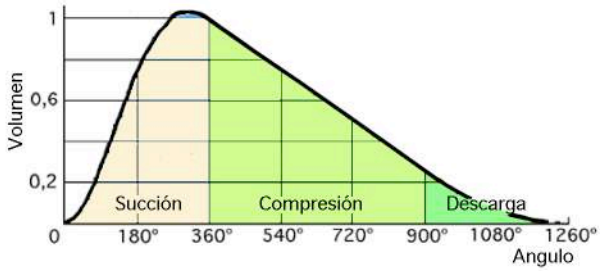


Fig A.18.- Volumen normalizado de la cámara en función del ángulo girado

Es importante observar la simetría de la espiral y las celdas. La forma y la posición de ambas celdas son simétricas y diametralmente opuestas, durante el ciclo completo de compresión. La simetría natural de las espirales equilibra las fuerzas radiales del gas contra los laterales de la espiral, proporcionando un ciclo de compresión suave.

Por otra parte, en cada órbita comienza un nuevo ciclo de compresión, de modo que en todo momento hay tres pares de celdas simétricas en forma de media luna, cada par con baja, media y alta presión. Entre las posiciones *A* y *L*, el proceso de la compresión es suave y continuo sin vibraciones o pulsaciones fuertes.Se representa el diagrama (p-v) del funcionamiento de un Scroll en condiciones normales; un determinado volumen de gas llena las cámaras (A); el movimiento de la espiral comprime el gas (B), y éste, comprimido, se evacúa en la fase de descarga (C, D).

VOLUMEN.- Las áreas y volúmenes encerrados entre las paredes de las espirales son factores determinantes en el proceso de compresión. El volumen se puede calcular en función del ángulo orbital en la que el eje de abscisas representa el ángulo de rotación, que comienza en 0º, cuando se inicia el proceso de succión. El eje de ordenadas representa el volumen de la celda normalizado respecto del volumen de succión.

Durante el proceso de succión (entre 0º y 360º), Fig A.18, el volumen es el limitado por el perfil de la espiral móvil, y una línea perpendicular a la espiral fija. Hay que tener en cuenta que tiene un máximo poco antes de finalizar el proceso de succión. El grado de llenado depende de las condiciones del flujo durante el proceso de succión, y bajo un determinado número de revoluciones, puede que incluso se produzca un efecto de sobrecarga.

Durante el proceso de compresión (a partir de 360º hasta 900º), y considerando un perfil de la espiral de la involuta circular, la disminución del volumen es lineal.

A 900º, las cámaras más internas se exponen al puerto de descarga formando una celda única. El volumen durante el proceso de descarga no está claramente definido y, por lo tanto está marcado con una línea discontinua. Puesto que el gas se descarga durante una revolución del compresor Scroll, las pulsaciones de presión son pequeñas comparadas con los compresores alternativos.

Los términos de relación de presión y relación de volumen se emplean casi indistintamente;

sin embargo, la geometría del compresor sólo determina la relación de volumen interna.

La relación de volumen de un compresor Scroll se define como el cociente entre el *volumen de succión* (volumen de las dos primeras cámaras en el momento en el que se cierran) y el *volumen sellado de descarga* (volumen de las dos últimas cámaras justo antes de ser expuestas al puerto de descarga).

La relación de presión se puede obtener modelando el proceso, teniendo en cuenta las pérdidas y la transferencia de calor, o bien, se puede medir. El proceso ideal de la compresión es adiabático, y en el caso real más sencillo, se puede considerar politrópico.

SOBRECOMPRESIÓN.- Sucede cuando la presión en el interior de las cámaras del compresor es más alta que la presión del sistema (presión de condensación); en esta situación, cuando el puerto de descarga se abre, la presión en la cámara de descarga es más alta que la presión del sistema. El gas se expande en la cámara interna (cámara de descarga), después de que las dos cámaras hayan emergido a un solo compartimiento; el trabajo adicional requerido en el proceso de sobrecompresión se pierde, con el correspondiente efecto negativo sobre la eficiencia global del sistema.

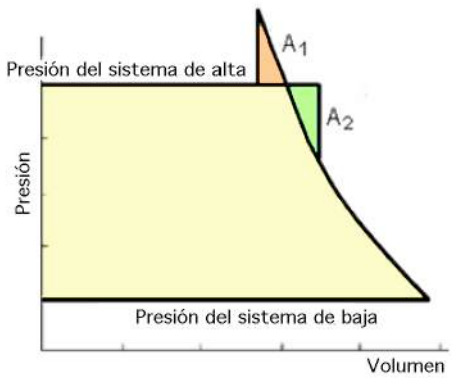


Fig A.19.- Diagrama (p,v) para el compresor Scroll
A_1 es la pérdida por sobrecompresión, y A_2 la de subcompresión

En el diagrama *(p,v)* para el compresor Scroll, la pérdida de sobrecompresión se indica como el área A_1, Fig A.19.

La pérdida por estrangulamiento (si es significativa) amplifica ligeramente las pérdidas por sobrecompresión. Al principio del proceso de descarga, estas pérdidas retrasan la compensación de la presión entre el compartimiento interno y la cámara de alta presión.

Debido a lo anterior, es preciso realizar un trabajo adicional de compresión después de que se comience a abrir el puerto de descarga.

En el caso de compresores Scroll con puerto de descarga grande, se estima que las pérdidas por estrangulamiento son insignificantes. No obstante, si se reduce el diseño del puerto de descarga, que es una manera de conseguir una relación de presión mayor, las pérdidas de estrangulamiento se han de considerar conjuntamente con las pérdidas de sobrecompresión.

SUBCOMPRESIÓN.- Sucede cuando la presión en el interior del compresor es más pequeña que la presión del sistema, es decir, inferior a la presión real de condensación. En el momento que el puerto de descarga se abre, y si no hay válvula de escape, habrá un reflujo desde la cámara de alta presión hacia la cámara interna. De esta manera, el compresor tiene que trabajar contra una pre-

sión mayor que en el caso ideal. Después del equilibrado de presiones, el gas en la cámara interna se elimina a través del puerto de descarga, de la misma manera que cuando no hay subcompresión o sobrecompresión.

Si se utiliza una válvula de descarga (antiretorno), no se producen pérdidas por subcompresión ya que se impide que el gas de la cámara de alta presión entre en la de descarga. En el caso de que la presión del sistema sea mayor que la presión de la cámara de descarga, la válvula cierra simplemente el puerto de descarga y el proceso de compresión continúa hasta que la presión en la cámara de descarga alcance el valor de la presión alta del sistema. La válvula de descarga provoca unas pérdidas adicionales por estrangulamiento, a la vez que disminuye el área efectiva. Todavía cierta cantidad de gas en el volumen muerto (volumen debajo de la válvula de descarga) se expansionará causando una pérdida, pero ésta será más pequeña que la de subcompresión puesto que el gas disponible en el volumen muerto es pequeño.

De esta manera, será una tarea de optimización del funcionamiento del compresor decidir si se utiliza una válvula de descarga o no. Por una parte, la válvula de descarga disminuye las pérdidas por subcompresión limitando la reexpansión al volumen de separación, pero por otra parte, las pérdidas por estrangulamiento se incrementan; se sugiere que la válvula de descarga se debe emplear en aplicaciones donde la relación de presión sea mayor que 4.

A.9.- UTILIZACIÓN DE VÁLVULAS EN LOS COMPRESORES SCROLL

En los compresores Scroll se utilizan válvulas por dos razones:

- Para prevenir que la espiral gire en sentido contrario; la válvula de retención (o de parada) permanece abierta durante condiciones normales de funcionamiento; cuando el compresor está parado, evitan que gire en sentido contrario cuando la presión del condensado sea mayor que la de la cámara de descarga.

- Para disminuir las pérdidas de subcompresión; lo evitan cuando la presión interna es menor que la presión del sistema.

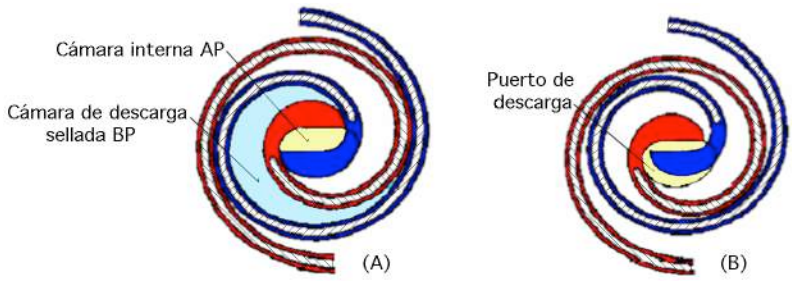


Fig A.20.- Proceso de descarga

Normalmente, se utiliza una válvula de láminas diseñada para abrir y cerrar una vez por revolución, para asegurar que no haya ningún reflujo desde la cámara de alta presión a la cámara interior. Se debe tener especial cuidado en que la válvula disponga del tiempo suficiente para cerrarse

totalmente, antes de que el siguiente par de cámaras se exponga al puerto de descarga. Este es el problema en que la AP del sistema es mayor que la de la cámara de descarga. El gas en la cámara interna se descarga a través del puerto de descarga, estando la válvula de láminas abierta; la presión en la cámara de descarga es inferior a la AP del sistema.

Las dos celdas entrantes acaban de salir de la cámara presurizada. La presión cae por debajo de la presión alta del sistema, y la diferencia de presión sobre la válvula de láminas cambia rápidamente de positiva a negativa. La válvula golpea su asiento y, debido a las altas velocidades de impacto, probablemente se rompa.

Para evitar este problema, la diferencia de presión debe cambiar lentamente de positiva a negativa, para así dar a la válvula de láminas el tiempo suficiente para cerrar suavemente. Una solución es que la espiral móvil abarque por completo el puerto de descarga al final de la fase de descarga, dejando la válvula cerrada en ese momento.

Cuando las cámaras de descarga selladas se exponen a la cámara presurizada, y varíe la presión, la válvula de láminas está ya cerrada. Esta solución requiere realizar un cambio en el diseño al final de la espiral y del puerto de descarga.

A.10.- CONFORMIDAD DEL COMPRESOR SCROLL

La conformidad se define como la capacidad que permite que las dos espirales del compresor Scroll se separen ligeramente, en la dirección axial o radial. Esto se puede producir por varios motivos, siendo los más comunes:

- *La existencia de elevadas presiones*
- *La presencia de impurezas*
- *La existencia de refrigerante líquido en las celdas del compresor*

Un compresor radialmente conforme es aquel que permite que la espiral orbitante siga una trayectoria flexible en torno a la definida por su contacto con la espiral estacionaria. Un buje *descargador* instalado entre la espiral orbitante y el eje del motor absorbe las variaciones en el radio de la órbita creada por el mecanizado y por las diferencias del montaje.

Un compresor axialmente conforme es aquel que tiene capacidad para que las espirales orbitante y estacionaria se separen axialmente.

En un compresor no-conforme, la espiral orbitante sigue una trayectoria fija donde las espirales móvil y estacionaria nunca entran en contacto. Algunos fabricantes, Carrier y Danfoss, lo conocen como *diseño de órbita controlada*. La relación geométrica entre las espirales de este tipo de compresores es constante, a todas las condiciones de funcionamiento.

La principal diferencia entre un compresor con contacto entre las espirales, o un compresor de

órbita controlada con contacto libre, selecciona el método utilizado para sellar las espirales.

El rendimiento de un compresor está relacionado directamente con las fugas internas y las pérdidas mecánicas. El gas refrigerante de cada celda atrapado entre los flancos de la espiral, trata de encontrar un lugar de equilibrio. Si el gas a un lado del flanco está a mayor presión que el gas al otro lado, el gas de alta presión buscará un camino hacia el lado de baja presión.

En un compresor Scroll sólo hay dos trayectorias de salida: radial y axial, a diferencia de los compresores rotativos de doble-tornillo que tienen por lo menos tres trayectorias de salida:

- *Axialmente, entre el acoplamiento de los lóbulos macho y hembra*
- *Radialmente, entre los bordes del lóbulo y la carcasa*
- *Entre los extremos del rotor y la carcasa*

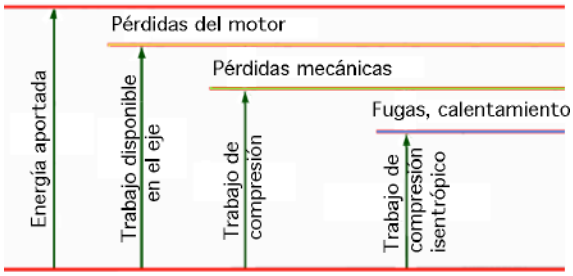


Fig A.21.- Esquema energético en un compresor Scroll

La *fuga radial* se produce entre los flancos de las espirales, donde una celda de AP avanza intentando escapar hacia la celda contigua exterior, que contiene gas a una presión más baja.

La *fuga axial* sucede entre los extremos de una espiral y la placa base de la espiral opuesta.

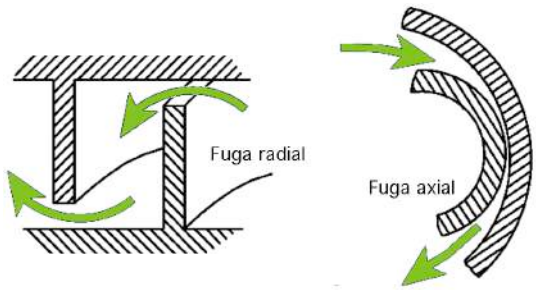


Fig A.22.- Esquema de las fugas radial y axial

Es importante minimizar estas fugas, ya que incrementan el consumo de energía, reducen la capacidad del compresor y disminuyen su eficiencia; las fugas axiales son más críticas que las radiales.

SELLADO RADIAL.- Los compresores *Compliant* usan el contacto entre las espirales orbitante y fija como mecanismo de sellado. Sin embargo, los compresores radialmente conformes pueden tener un cerramiento poco efectivo en todos los puntos de contacto, especialmente cuando son nuevos.

Debido a ésto, requieren de un periodo de rodaje para igualar el contacto en todas las superficies. La conformidad radial es simplemente la habilidad que tienen los flancos de las espirales de separarse ligeramente en la dirección radial; ésto se logra permitiendo que la espiral móvil se desplace una pequeña distancia en la dirección radial, mediante el uso de un buje descargador en el extremo del eje del compresor. La fuerza centrífuga generada por la masa rotatoria de la espiral orbitante crea el sellado de los extremos de ambas espirales.

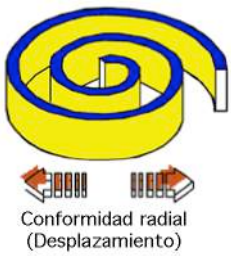


Fig A.23.- Conformidad radial

Las fuerzas de gas generadas por el proceso de compresión se oponen a esta carga y son proporcionales al diferencial de presión de operación. Durante el funcionamiento normal, la fuerza centrífuga es mayor que la fuerza de gas que mantiene el sellado. Al permitir que la espiral se mueva hacia adentro, el conjunto del Scroll tiene la capacidad de manipular pequeñas cantidades de impurezas o de líquido adicional. La conformidad radial asegura el sellado correcto y proporciona protección contra pequeñas impurezas y refrigerante líquido, es decir, asegura el contacto entre espirales y permite que éstas se separen haciendo que impurezas o líquido puedan pasar sin provocar daños.

Los compresores de órbita controlada, al contrario, dependen de un perfil de espiral ultra preciso para asegurar que las paredes de las espirales nunca se toquen. Gracias al control numérico en el mecanizado, se crean geometrías de superficie precisa, manteniendo tolerancias del orden de micras. Estas tolerancias son tan precisas que una delgada capa de aceite sella el espacio entre los flancos y proporciona una superficie lubricada para que la espiral orbitante pase sin fricción o desgaste. Como el concepto de órbita controlada no permite el contacto mecánico entre los flancos, la conformidad no es necesaria y el compresor mantiene una geometría fija durante toda la vida del conjunto de las espirales.

SELLADO AXIAL.- La conformidad axial se define en términos generales como la separación de la punta de una espiral de la base de la espiral opuesta. Los diseños Compliant dependen del contacto entre los extremos de una espiral y la placa base opuesta. La flexibilidad axial es necesaria para permitir dilataciones y desgastes, mantiene la presión constante y uniforme sobre los bordes de las espirales, optimiza la carga sobre los bordes y elimina las fugas; para lograr este tipo de conformidad existen dos métodos:

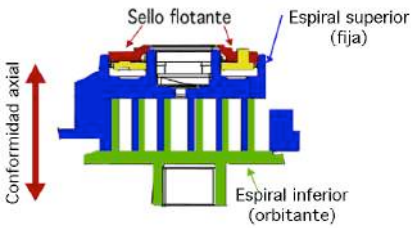


Fig A.24.- Conformidad axial

a) ***Sello en la ranura.-*** Consiste en hacer una ranura pequeña a lo largo de la punta de cada elemento espiral y luego se inserta un sello flexible en ella. Este sello generalmente está hecho del mismo material que los segmentos de los compresores de pistón y, esencialmente, realiza la misma función, es decir, cuando las espirales se separan, este sello mantiene el contacto con la base contra-

ria. Con este segmento, la fabricación se hace más compleja en los casos en que los perfiles de las espirales sean muy estrechos.

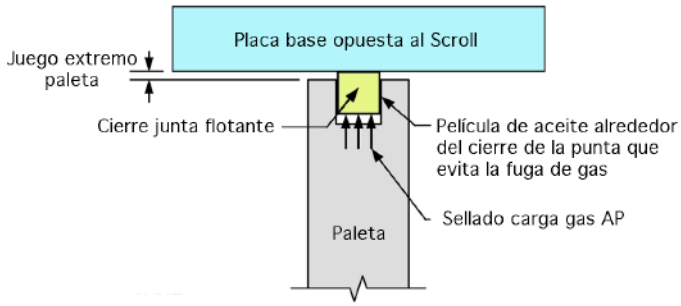
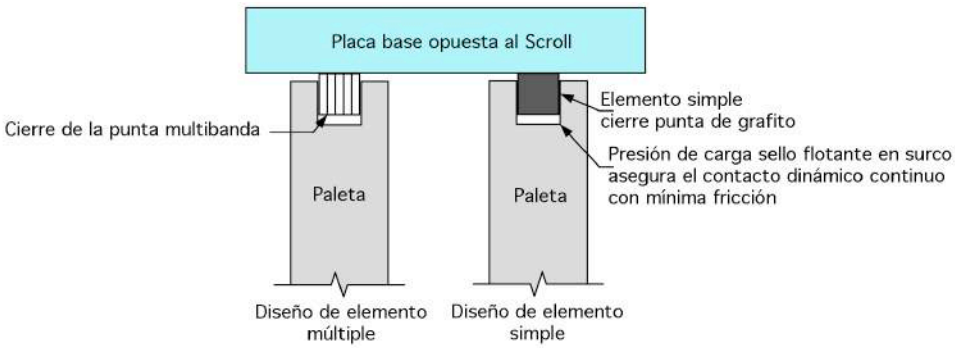


Fig A.25a.- Juntas flotantes instaladas en ranuras mecanizadas en las puntas de las paletas del Scroll orbitante



A 25b.- Cierres de la punta de las paletas utilizadas en el Scroll orbitante, que tienen menor área de contacto y menos fricción que los compresores en los que el extremo de la paleta y la base de la espiral opuesta están en contacto

b) ***Sello flotante.-*** Otra opción para mantener sellada la punta y la base de contacto es aplicar una carga, ya sea a la espiral fija o a la orbitante, para lo que utiliza la presión del gas.

Este sello tiene dos propósitos principales:

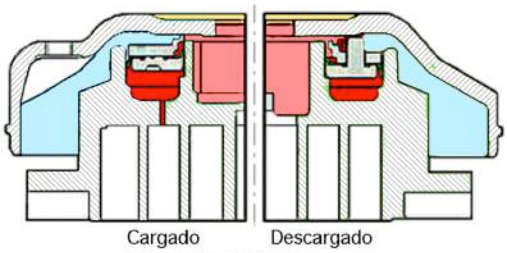


Fig A.26.- Sello flotante

- Mantener sellados y separados el lado de AP (descarga) del lado de baja presión (succión)

- Proporcionar la carga de gas requerida para mantener el contacto necesario entre la punta de la espiral y la base, lo que se logra mediante el uso de una cavidad intermedia, (a través de un orificio que atraviesa el cuerpo de la espiral fija a la PI), se forma bajo el sello después de que éste se inserte en la espiral fija

El sello flotante se levanta cuando se carga por la acción de la resultante de presiones que actúan sobre él, $\begin{cases} \textit{presión de succión: color azul} \\ \textit{presión de descarga: color rojo} \end{cases}$, Fig A.26

Mantiene ambas espirales unidas con la suficiente presión para que no existan fugas entre compartimientos a diferente presiones, sin necesidad de aplicar sellos en los bordes de la espiral. El sello flotante se descarga (derecha) cuando la relación de compresión es mayor de 11/1 en aplicacio-

nes de aire acondicionado o de 26/1 en refrigeración. Esta acción impide que las espirales sigan comprimiendo en condiciones que pondrían en riesgo la confiabilidad del compresor.

Durante el funcionamiento del compresor Scroll, la cavidad intermedia se presuriza mediante la alimentación de gas a través de un pequeño orificio que conecta la cavidad con una de las celdas de compresión formados en el Scroll. Durante el arranque, el sello está en una posición sin carga, lo que significa que incluso a presiones elevadas de succión el par demandado por el motor es bajo debido a la fuga a través de los bordes.

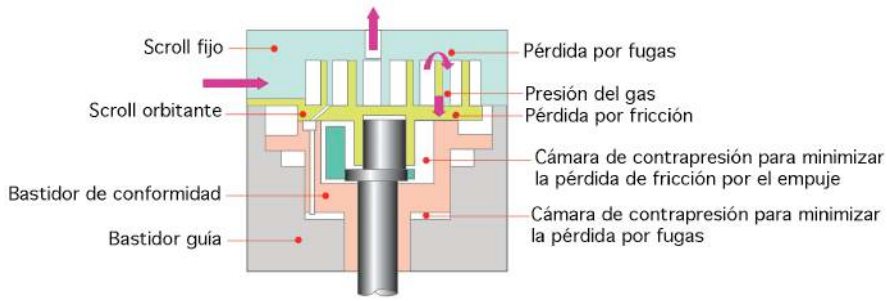


Fig A. 27.- Mecanismos del bastidor de conformidad y mejoras

A.11.- INYECCIÓN DE REFRIGERANTE EN EL SCROLL

En los compresores Scroll utilizados en refrigeración, la inyección de refrigerante se encuentra entre las nuevas tecnologías enfocadas a la mejora del funcionamiento, que se puede hacer de dos formas, $\begin{cases} \textit{inyección de vapor} \\ \textit{inyección de líquido refrigerante} \end{cases}$

a) INYECCIÓN DE VAPOR.- Es un método usado para mejorar el rendimiento de los compresores Scroll en refrigeración, ya que puede extender el rango de operación de un compresor a niveles más bajos de temperatura de evaporación.

La técnica consiste en tomar, de la salida del condensador, una pequeña fracción de refrigerante, a la que se hace circular primero por una etapa de expansión, usualmente por un tubo capilar y, posteriormente, a través de un intercambiador de calor o economizador, donde se calienta con la otra fracción de refrigerante que sale del condensador.

El refrigerante se inyecta en el compresor Scroll como vapor saturado, y su cantidad viene determinada por $\begin{cases} \textit{la diferencia entre la presión del condensador y la presión de la celda del Scroll} \\ \textit{el diámetro del tubo capilar} \end{cases}$

El refrigerante restante del condensador, después de enfriarse en el economizador, se expande antes de entrar al evaporador; al circular a través del intercambiador se subenfría, por lo que se logra un incremento del efecto frigorífico. Este sistema tiene alguna similitud con el sistema *booster*, ya que al igual que éste, aprovecha los beneficios que se derivan del empleo de un economizador.

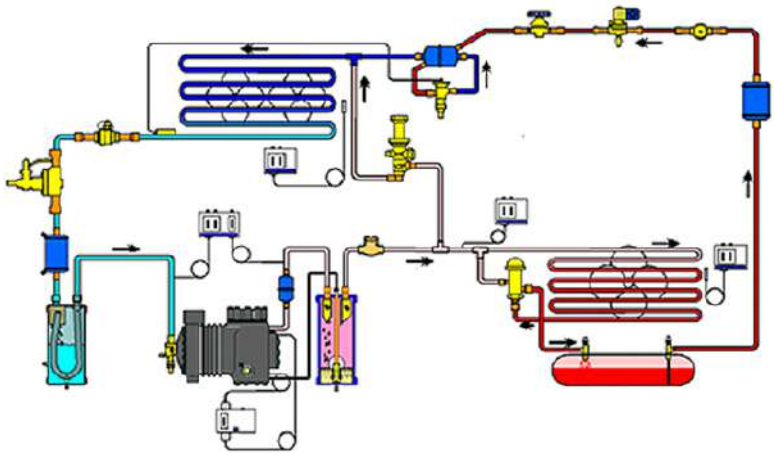


Fig A.28.- Esquema frigorífico

Esta técnica, que ha sido utilizada con éxito desde hace mucho tiempo en los compresores de tornillo de instalaciones industriales, nunca antes había sido aplicada en compresores herméticos de tan reducido tamaño.

Para realizar la inyección de vapor en un Scroll en refrigeración, Fig A.28, se necesitan los siguientes componentes básicos:

- *Un condensador*
- *Un evaporador*
- *Un compresor*
- *Un intercambiador de calor o economizador*
- *Un tubo capilar*
- *Una válvula solenoide de cierre*

El economizador es el componente del sistema donde transcurre el proceso de subenfriamiento del líquido que, posteriormente, se envía al evaporador.

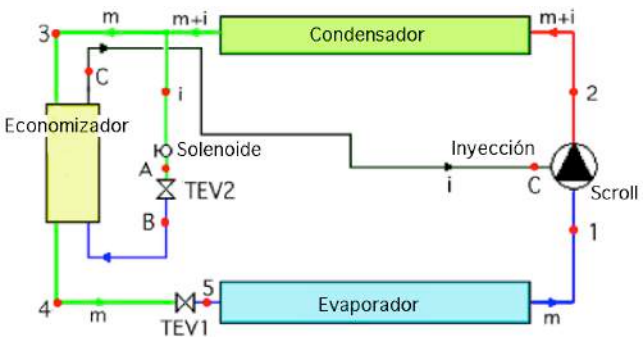


Fig A.29.- Esquema Frigorífco

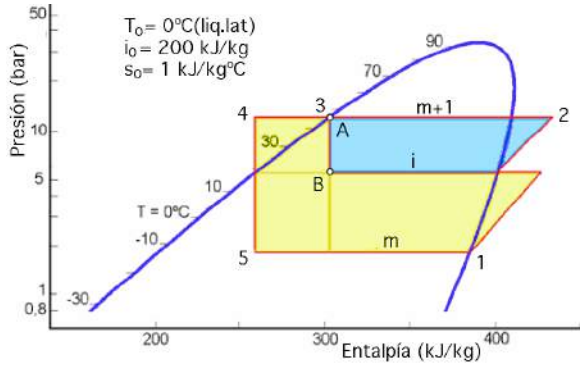


Fig A.30.- Diagrama entálpico del Scroll de inyección de vapor

Para conseguir reducir la temperatura del líquido en dicho economizador, es necesario alimentar a éste con una pequeña proporción del mismo refrigerante, pero previamente expansionado. Durante el proceso de subenfriamiento, el vapor que se genera como consecuencia del intercambio tér-

mico en el interior de dicho economizador es aspirado de forma continua por el propio compresor.



Fig A.31.- Puntos internos de inyección

De esta forma, dicho vapor se incorpora a la corriente de gas que está siendo comprimida y en combinación con ella discurre a través de las espirales del compresor hasta su salida del mismo. El proceso de inyección de vapor en la corriente de gas procedente del sistema tiene lugar en dos puntos específicos de las espirales donde dicho gas ya se encuentra a la mitad de su proceso de compresión (presión intermedia), lo que garantiza que el flujo másico a la entrada del compresor, y con ello la capacidad del evaporador, no varíe.

Las principales ventajas, para un sistema, derivadas de la aplicación de los compresores Scroll de inyección de vapor se pueden resumir en los siguientes puntos:

Incremento de la capacidad frigorífica con inyección de vapor.- El subenfriamiento adicional al que se somete al líquido refrigerante y, por tanto, el incremento resultante en la diferencia de entalpías entre la entrada y salida del evaporador, es el responsable del aumento de la capacidad frigorífica que siempre se puede constatar en un sistema que utilice un compresor Scroll de inyección de vapor.

La entalpía del líquido refrigerante subenfriado i_{sc}, en kJ/kg, se calcula por la ecuación:

$$i_{sc} = i_{con} - C_{p(ref)} \ (T_{con} - T_{sc})$$

en la que, $\begin{cases} i_{con} \text{ es la entalpía del refrigerante líquido saturado a la temperatura de condensación } (kJ/kg) \\ C_{p(ref)} \text{ es el calor específico del refrigerante líquido a presión constante } (kJ/kg^{\circ}C) \\ T_{con} \text{ es la temperatura de saturación del refrigerante líquido a la presión de condensación} \\ T_{sc} \text{ es la temperatura del refrigerante líquido subenfriado } (^{\circ}C) \end{cases}$

La capacidad de los compresores Scroll de inyección de vapor con respecto a sus homólogos en desplazamiento (m^3/h) sin inyección resulta en todos los casos superior, siendo el incremento medio del orden del 72%.

Esta mejora en la capacidad frigorífica del compresor, como resultado del incremento de entalpías, es la clave que determina que, siempre que se utilicen compresores Scroll de inyección de vapor en un determinado sistema, se seleccionen compresores con un menor desplazamiento. Un ejemplo sería un compresor Scroll de inyección de vapor y 11,75 m^3/h de desplazamiento que proporciona prácticamente el mismo rendimiento que un compresor Scroll sin inyección de 20,9 m^3/h

Incremento de la eficiencia (COP) con inyección de vapor.- Por lo general, el COP de un compresor Scroll de inyección de vapor siempre es superior al que proporciona cualquier otro compresor de una sola etapa de la misma capacidad; la ganancia media en el COP en una amplia gama

es del orden del 48%. Obtener en un compresor Scroll de inyección de vapor la misma capacidad frigorífica que un compresor tradicional, siempre requiere de un menor consumo eléctrico que el que este último utiliza, ya que parte del vapor generado para obtener dicha capacidad se comprime desde un valor de presión intermedia en lugar de hacerlo desde el estado de más baja presión de aspiración del sistema.

Reducción del coste inicial de la inversión de una instalación con inyección de vapor.- Dado que la mejora que se obtiene en la capacidad unitaria de los compresores Scroll de inyección de vapor procede exclusivamente del incremento entálpico en el evaporador, el flujo másico de refrigerante que circula a través de un sistema con este tipo de compresores siempre es significativamente inferior con respecto al de una instalación convencional de la misma capacidad. Esta disminución en el flujo, que puede llegar a alcanzar valores del orden del 45%, favorece el empleo de tuberías de menor diámetro, tanto en la línea de aspiración, como de líquido del sistema y, por tanto, va a contribuir a reducir de una forma sustancial su carga de refrigerante.

Otro de los beneficios que se deriva del empleo de este tipo de compresores es reducir el tamaño del condensador que está asociado al compresor. Diferentes test llevados a cabo para calcular el calor a disipar de una instalación equipada con compresores Scroll de inyección de vapor, ponen de manifiesto que las necesidades en el condensador y, por lo tanto, su tamaño, se pueden reducir entre un 10÷20% con respecto a los sistemas tradicionales.

La consideración de estos aspectos, con el ahorro que ello supone en cuanto al coste de tuberías, central y condensador, pueden contribuir a reducir de una forma significativa la inversión inicial prevista en el total de la instalación.

Costes de operación con inyección de vapor.- Aunque existen muchas maneras de reducir el consumo eléctrico de una instalación frigorífica y, por tanto el coste de operación de la misma, es evidente que al margen del método empleado para ello, seleccionar siempre el compresor con la más alta eficiencia o COP es una decisión que a buen seguro mejorará los resultados.

El COP del compresor Scroll es superior al de su equivalente en capacidad en versión semihermético.

Un análisis dinámico considerando la variación de alguno de los parámetros del sistema, como la temperatura de condensación, permite observar que, incluso a bajas temperaturas de condensación, la inyección de vapor representa, desde el punto de vista energético, la opción más favorable para cualquier sistema de refrigeración a baja temperatura.

Igualmente se pone de manifiesto que las diferencias entre ambos compresores en lo que a su eficiencia y, por lo tanto, a su consumo eléctrico se refiere, son más acentuadas a medida que la relación de presiones de trabajo en el sistema aumenta.

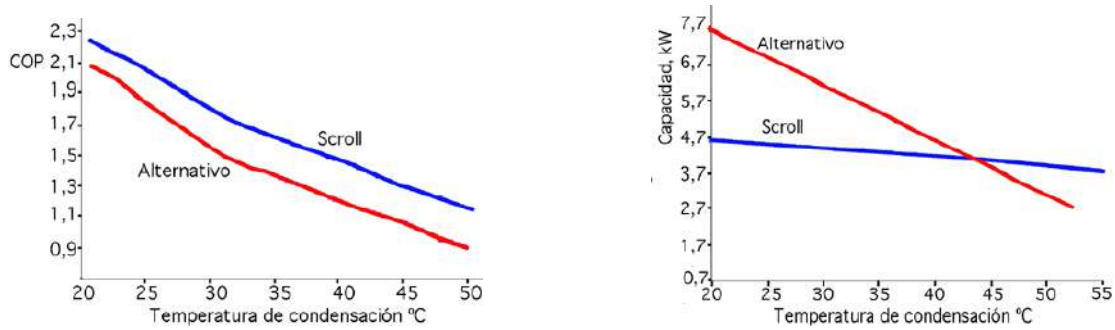


Fig A.32.- Variación de las prestaciones de un compresor Scroll en función de la Temperatura de condensación (9 kW a -35°C/45°C, R404A)

Estabilidad del sistema con inyección de vapor.- Al igual que el COP, la capacidad frigorífica de un compresor de refrigeración tiende a variar a medida que del mismo modo se modifica la relación de presiones bajo la cual opera. Uno de los rasgos distintivos que caracterizan a estos compresores frente a otros tipos de diferente tecnología se basa precisamente en la forma en que dicha variación tiene lugar. En la figura se muestran las curvas de capacidad características de un compresor Scroll de inyección de vapor y de un compresor semihermético en función de la temperatura de condensación del sistema.

Tal y como se observa en el gráfico, el hecho de que la evolución de la curva de capacidad transcurra de una forma menos acusada en el caso del compresor Scroll, supone para éste, en lo que respecta a un sistema de refrigeración, una serie de ventajas.

La existencia de un menor exceso de capacidad frigorífica en el compresor Scroll durante el invierno, supone que el número de ciclos de arranque y parada consecutivos que dicho compresor experimente durante esta estación, caracterizada por una baja carga térmica, se reduzca de forma considerable. Esto, que representa importantes beneficios en términos de control y consumo de energía para el sistema, contribuye también a incrementar la fiabilidad, especialmente en los sistemas centralizados.

A medida que el número de compresores que se encuentran operativos en una central se mantiene más uniforme, más constante resulta el flujo de refrigerante en la línea de aspiración del sistema y con ello, el retorno de aceite.

Por otro lado, disponer de cierta reserva de capacidad a altas temperaturas durante el verano, minimiza el riesgo de que se produzca una falta de potencia en la instalación cuando la temperatura de condensación alcance valores puntualmente elevados durante dicho periodo.

Aquí se comprueba que un compresor Scroll de inyección de vapor es capaz de hacer frente a la carga térmica de un hipotético sistema de 3,3 kW, incluso aunque su temperatura de condensación alcanzase valores del orden de 55°C, es decir, 10°C por encima de la temperatura de diseño considerada. Sin embargo, un compresor semihermético, diseñado inicialmente para la misma capacidad,

sólo sería capaz de responder a esa carga térmica siempre y cuando su temperatura de condensación se mantuviese por debajo de los 46°C.

b) INYECCIÓN DE LÍQUIDO.- Es una buena opción cuando se pretenden alcanzar relaciones altas de presión. En realidad, el funcionamiento del compresor con relaciones altas de presión puede causar temperaturas de descarga excesivamente altas que pueden dañar químicamente el aceite y el refrigerante y causar un fallo mecánico.

Mediante un compresor Scroll de inyección de líquido es posible proporcionar un adecuado enfriamiento por inyección de líquido refrigerante desde el condensador directamente a la cámara de succión o en el espacio cerrado de compresión. El esquema de la inyección de refrigerante líquido en compresores Scroll, consiste en cuatro elementos: el compresor, el condensador, el evaporador y un tubo capilar con un solenoide, para cortar la inyección cuando el compresor se detenga.

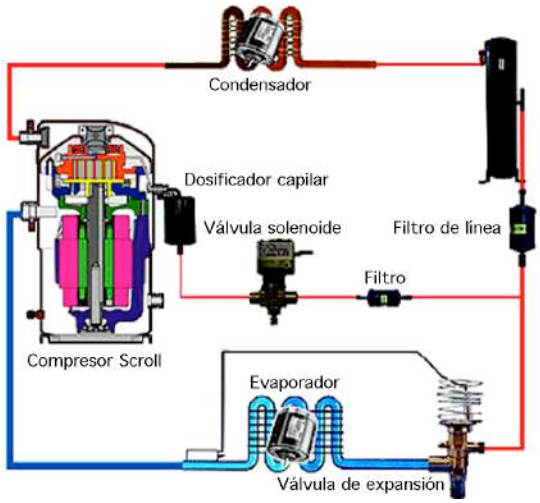


Fig A.33.- Disposición de los componentes del sistema de inyección de líquido para Scroll de 7,5 a 15 CV

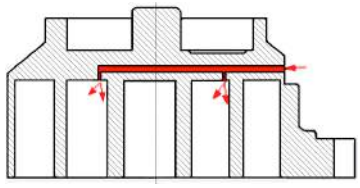


Fig A.34 (A-11).- La inyección se efectúa entre los compartimentos internos de las espirales

El concepto es extremadamente simple: La válvula solenoide permanecerá activada y abierta, siempre que el compresor esté en marcha y debe ser alimentada eléctricamente a través de los contactos M_1/M_2 del módulo de protección del compresor. El modelo de dosificador capilar tiene que ser acorde al tipo de refrigerante y al modelo de compresor empleado.

Un método alternativo en lugar de un tubo capilar para controlar la inyección, es una válvula controlada por la temperatura de la descarga. Ésta detecta la temperatura en la cabeza del compre-

sor mediante un bulbo, alojado en una cavidad especialmente dispuesta en la carcasa del compresor. Cuando la temperatura alcanza la determinada por el fabricante, el bulbo envía una señal de presión que abre esta válvula para que comience la inyección.

En ambos casos, una pequeña conexión va de la línea líquida del condensador a un tubo capilar o a una válvula controlada por la temperatura. La válvula o el tubo capilar están unidos directamente al puerto de inyección del compresor. Se toma una pequeña cantidad de refrigerante desde la línea de líquido que hace las veces de masa de inyección; como en el proceso de inyección de vapor, esta masa de inyección está directamente relacionada con:

- La diferencia de presión entre el condensador y la celda intermedia del Scroll

- Con el diámetro del capilar de inyección y de la tubería de los canales internos del Scroll por donde se inyecta esta masa

Al igual que en la inyección de vapor, aquí se observa también un ligero aumento en la potencia consumida por el compresor, debido al aumento del trabajo al comprimir el refrigerante inyectado adicionalmente. Sin embargo, el resultado es el enfriamiento suficiente del gas de descarga, de modo que permite relaciones de compresión más elevadas que las halladas normalmente en condiciones de temperatura de evaporación baja y de condensación elevada.

La temperatura de descarga experimental disminuye más o menos linealmente con el incremento de la relación de inyección.

Los cambios que experimenta la entrada de energía del compresor y la energía de compresión indicada teórica al incrementar la relación de inyección se muestran en las figuras. Las condiciones de funcionamiento óptimas de la técnica de inyección de líquido en un compresor *Scroll Inverter*, se presenta con la:

- Variación de la frecuencia del compresor
- Presión de inyección
- Relación de inyección
- Localización de la inyección

La inyección de líquido a altas frecuencias muestra una mejora considerable en el funcionamiento y fiabilidad del compresor. Sin embargo, la inyección a bajas frecuencias muestra algunas desventajas respecto a la energía, la capacidad, y a la eficiencia adiabática del compresor, debido a que la presión de la inyección causa un:

- Descenso en la temperatura de descarga
- Aumento en la entrada de energía

por lo que la presión optima de inyección se debería seleccionar para proporcionar un funcionamiento apropiado del sistema.

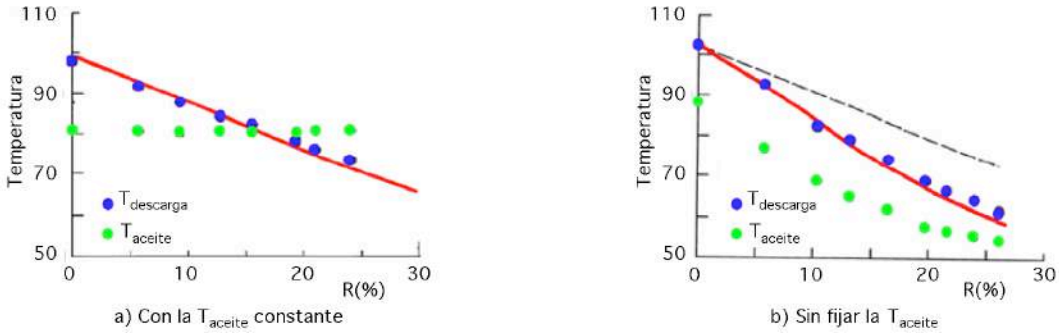


Fig A.35.- Temperatura experimental de descarga (en discontinuo, la temperatura de descarga ideal)

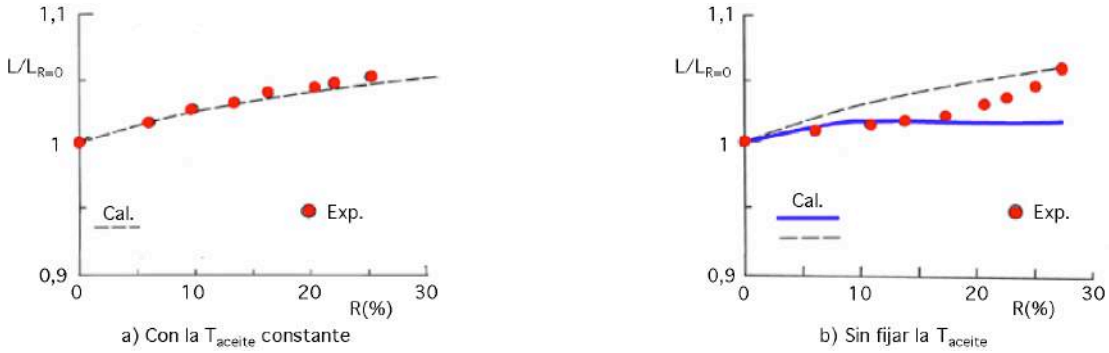


Fig A.36.- Variación de energía experimental

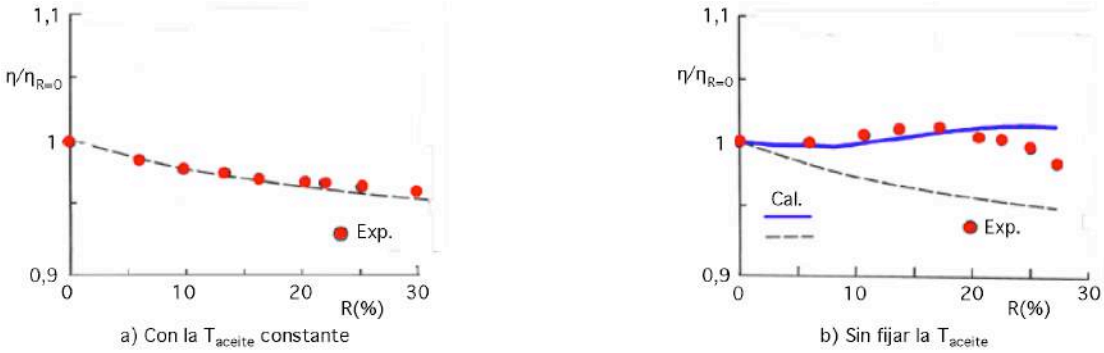


Fig A.37.- Variación experimentada por el rendimiento

A.12.- REGULACIÓN

Existen otros métodos para lograr la regulación en un compresor, aparte de la asociación de compresores en paralelo o de inyección de vapor o de líquido, tales como:

- *Accionamiento por motores de velocidad variable*
- *La modulación mecánica*
- *La succión variable*

- ***Regulación por accionamiento con motores de velocidad variable.-*** La capacidad de un compresor Scroll es directamente proporcional a la velocidad de giro, por lo que ajustando este

valor, se puede adaptar la producción frigorífica a la demanda de la instalación. La modulación de velocidad variable requiere del uso de un motor trifásico de inducción de velocidad variable y de un regulador que se una al sistema de tal forma, que pueda ajustar la velocidad del motor con precisión para alcanzar los requerimientos de velocidad del motor.

También son necesarias otras modificaciones en el compresor Scroll, como:

- Aumentar o reforzar la conformidad radial para permitir que la estructura del scroll se ajuste a las diferentes velocidades del motor manteniendo el sellado requerido

- Una bomba de aceite para mantener la lubricación apropiada de los bujes o rodamientos y las superficies en contacto

- Un sistema de lubricación mejorado para acrecentar el flujo y el retorno interno de aceite

- Regulación mecánica.- Se lograr separando el scroll fijo y el orbitante en dirección axial. Esto genera un patrón de fuga que disminuye la capacidad del compresor, siendo esta disminución de la capacidad proporcional a la duración de la separación.

Esta separación se logra físicamente con el uso de un pistón de elevación dentro de una tapa sobre el puerto de descarga (alta presión). La tapa tiene un volumen adicional que actúa como la cámara de un pistón, por lo que queda una pequeña distancia entre el pistón y el tope de su cámara. En condiciones normales, la presión por encima y por debajo del pistón se iguala, mediante la utilización de un pequeño pasadizo en el propio pistón.

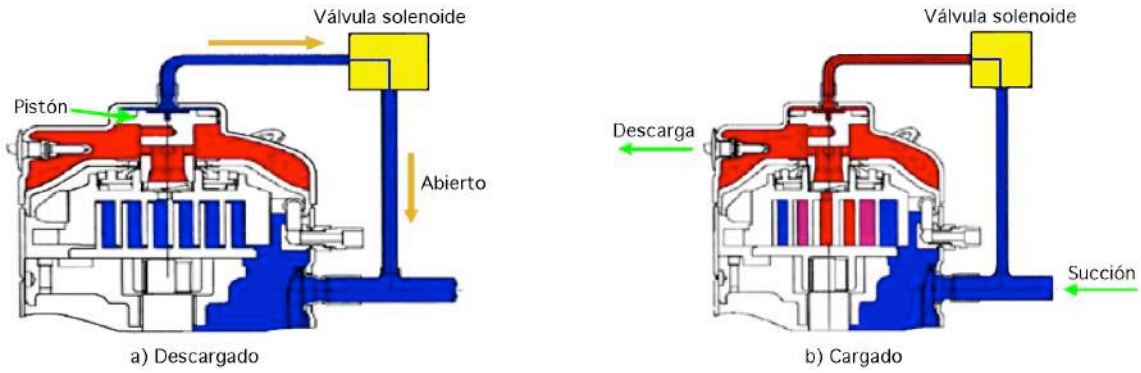


Fig A.38.- Modulación mecánica

Sin embargo, cuando se requiere modulación de capacidad, hay una gran liberación de presión fuera del tubo que se localiza sobre el área del pistón y se fuga a la línea de succión que se abre a través de una válvula solenoide.

A medida que la presión sobre el pistón disminuye, el pistón es empujado hacia arriba a la cámara extendida; esta acción levanta el scroll fijo causando la separación y la consecuente fuga y, además, reduciendo el flujo de masa y la capacidad.

Regulación por succión variable.- Es similar en concepto al esquema de modulación me-

cánica. En este caso, sin embargo, en lugar de crear una separación forzada entre las espirales para disminuir el flujo de masa y la capacidad, la masa de succión inicial se disminuye liberando o dando salida a un porcentaje del gas de la celda inicial de succión. Esta liberación es controlada por una válvula de solenoide y un pasadizo que va hacia la celda de succión. El efecto global de la eliminación de un porcentaje del gas de la celda inicial de succión es una reducción en la capacidad.

A.13.- RENDIMIENTO Y NIVEL DE RUIDO

Existen dos métodos para entender las comparaciones de rendimiento entre compresores: eficiencia volumétrica y eficiencia isentrópica, siendo sus definiciones:

$$Eficiencia\ volumétrica = \frac{Volumen\ del\ flujo\ de\ succión\ que\ entra}{Desplazamiento\ del\ compresor}$$

$$Eficiencia\ isentrópica = \frac{Potencia\ ideal\ aplicada\ para\ comprimir\ el\ gas}{Potencia\ eléctrica\ aplicada}$$

Los compresores Scroll tienen una ventaja de un $5 \div 10\%$ de rendimiento por encima de los compresores rotativos a pistón. Esto es debido a una reducción de las fugas de gas y de las pérdidas de flujo; un compresor Scroll, en general, tiene casi cero fugas de gas, comparado con una máquina rotativa con holguras fijas de operación. Además, para un compresor rotativo estas holguras aumentarán con el tiempo, a medida que sus componentes se desgastan. Sin embargo los compresores Scroll mantienen su capacidad de sellado durante el funcionamiento normal, ya que las partes aparejadas se desgastan juntas en su encastre, es decir, se acoplan entre ellas con el uso.

Para los compresores Scroll de aire acondicionado, las pérdidas de fluido también se reducen, debido a la ausencia de válvulas en la succión y en la descarga.

En los compresores Scroll de refrigeración, el uso de una válvula para relaciones de compresión por encima de 5 también manifiesta una mejora significativa en la eficiencia volumétrica, la cual compensa las pérdidas inherentes de fluido asociadas ala válvula.

Otro efecto de la válvula de descarga y el puerto menor es la disminución de la recompresión de gas, lo que produce un menor intercambio de calor entre el gas de la descarga y de la succión, ayudando a crear una curva plana de eficiencia volumétrica.

Los compresores Scroll también experimentan mayores cargas en los rodamientos que los compresores rotativos, generalmente del orden de $15 \div 30\%$. Existe incluso un incremento de las cargas de fricción relativas con respecto a un compresor rotativo, debido al contacto entre las espirales del Scroll y el empuje axial. En conjunto, esto conduce a una pérdida superior por fricción del orden del $1 \div 2\%$.

Los compresores Scroll funcionan generalmente mejor en aplicaciones de refrigeración que algunos compresores semiherméticos. Sin embargo, el rendimiento del compresor Scroll puede tener

desventajas en relación al compresor semihermético de alta eficiencia. A elevadas relaciones de presión el compresor semihermético a pistón es mejor.

La inyección de vapor se puede usar para mejorar el compresor Scroll y el rendimiento del sistema, al proporcionar al líquido mayor subenfriamiento. Esta mejora del rendimiento puede igualar generalmente la elevada eficiencia de los compresores semiherméticos en las mismas condiciones de operación. A más bajas temperatura de condensación, las ventajas inherentes a las bajas fugas de gas y pérdidas de fluido permiten al Scroll funcionar mejor que el compresor semihermético de alta eficiencia.

Para las aplicaciones de *aire acondicionado*, los compresores Scroll ofrecen algunas ventajas intrínsecas al reducir los niveles de ruido y vibración. Con la ausencia de válvulas dinámicas y un proceso de flujo casi continuo, hay una contribución mínima de las pulsaciones del gas al ruido del compresor.

En los compresores rotativos, grandes pulsaciones de gas dan contra la carcasa, lo cual genera ruido adicional. En los compresores Scroll, la mayor contribución de sonido es el contacto mecánico entre los elementos.

El nivel de sonido de un compresor rotativo y uno Scroll del mismo tamaño es comparable. Sin embargo, un compresor Scroll a menudo puede ser de 3 ÷8 dB más silencioso que un compresor semihermético.

Para los compresores Scroll de *refrigeración* la situación es algo diferente, ya que existen ambos efectos, el del ruido mecánico y el del ruido de gas generado por la válvula y el puerto; a menudo el ruido de gas se reduce internamente con el uso de un silenciador especialmente diseñado, bajando significativamente la vibración de torsión experimentada por el compresor.

Combinando esta vibración de baja torsión con el uso de contrapesos dinámicamente balanceados que compensan la rotación interna de los elementos, se pueden alcanzar niveles de vibración estables de menos de 50 micrones.

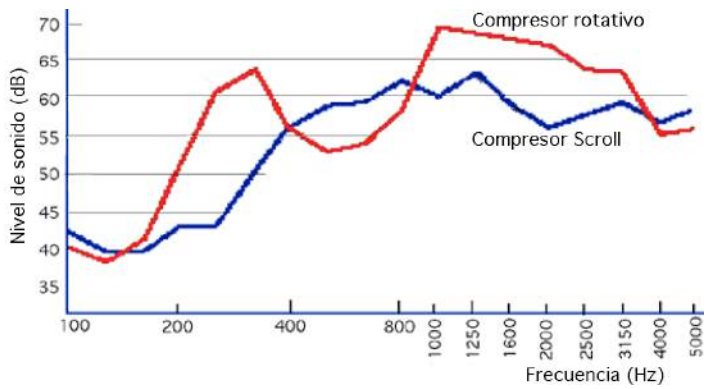


Fig A.39.- Comparación entre los niveles de ruido de un compresor Scroll y otro rotativo de la misma capacidad

Ventajas.- Los circuitos frigoríficos y de bomba de calor que utilizan compresor Scroll alcanzan valores del COP inusualmente altos, posibles únicamente debido al elevado rendimiento volumétrico que tiene este compresor para todas las condiciones de funcionamiento que pueden presentarse (relaciones de compresión diversas).

Las causas de este buen rendimiento volumétrico son:

a) Inexistencia de espacio muerto perjudicial.

b) Ausencia de válvulas de admisión y escape así como de segmentos que elimina tanto posibles retrasos en su apertura como inestanqueidades.

c) El contacto, tanto en los flancos de las espirales como en sus bases y bordes superiores, es perfecto y constante (adaptabilidad axial y radial muy buena).

d) Mínimo efecto de pared merced a la separación física de las zonas de aspiración (exterior espirales) y descarga (interior espirales)

Otra consecuencia beneficiosa del elevado rendimiento volumétrico que poseen este tipo de compresores es su menor desplazamiento o tamaño, comparado con el necesario para un alternativo de la misma potencia frigorífica.

- La *simultaneidad* conque se producen la aspiración, compresión y escape del vapor en un compresor Scroll, en comparación con las fases correlativas en las que ocurren en uno alternativo, hace que las variaciones del par motor en un compresor Scroll sean mucho más reducidas que en uno alternativo, disminuyendo por esta razón los esfuerzos a que está sometido el motor así como las vibraciones; a señalar igualmente la ausencia casi total de pulsaciones.

- Una *elevada fiabilidad de funcionamiento*, lo que se traduce en un indice muy bajo de fallos, debido principalmente a los tres aspectos de diseño siguientes:

a) Pequeño número de partes móviles, un 60% menos que en un compresor alternativo

b) Ausencia de válvulas

c) Buena resistencia frente a los esfuerzos causados por la llegada al compresor de líquido y/o partículas sólidas (suciedad)

- *Excelente nivel sonoro*, (6 db), menor que el de los compresores alternativos de su rango y ésto debido a que la espiral móvil rueda sin deslizamiento sobre la espiral estacionaria

- Como la espiral móvil rueda sin deslizamiento sobre la espiral estacionaria, el *desgaste* experimentado por las superficies espirales en contacto es mínimo.

- *Tamaño* un 40% y *peso pequeño* un 15% menor que el de uno alternativo, respectivamente.

Inconvenientes.- El hecho de no estar inherentemente equilibrado, al contrario de lo que sucede con los compresores de tornillo, impone un límite e impide de modo decisivo la fabricación de compresores Scroll de grandes tamaños. A presiones de escape altas, las dos espirales, la estaciona-

ria y la orbital, tienden a separarse debido al empuje generado por la presión interna del vapor; esto se traduce en un aumento de las holguras, lo que a su vez reduce el rendimiento del compresor. Para evitar este aspecto negativo, algunos fabricantes utilizan espirales compensadas en presión, haciendo gravitar la presión de alta o una intermedia en el reverso de al menos una de las espirales.

A.14.- OTRAS CONSIDERACIONES

Como hemos visto, los compresores Scroll se utilizan ampliamente en aire acondicionado y refrigeración, existiendo algunas tendencias importantes a considerar cuando se diseña un sistema.

Como protección de temperatura, generalmente se recomienda usar un termostato de línea de descarga que detenga el compresor si la temperatura de descarga sobrepasa ciertos límites. Algunos modelos de compresor traen un dispositivo interno de temperatura de descarga de manera estándar.

Generalmente los compresores Scroll se fabrican con protección interna del motor o con un módulo de protección de control externo que actúa en base a la variación de la resistencia de una cadena de termistores localizada en el motor, la cual puede estar en serie o en paralelo.

Los estándares de regulación de seguridad locales, generalmente exigen control y corte por alta presión.

Los compresores Scroll también pueden tener aplicación en una variedad de unidades de compresores múltiples, como los tándem y los sistemas paralelos. Una consideración importante a tener en cuenta, cuando se usan compresores Scroll en estos tipos de aplicaciones, es el sistema de lubricación.

Los diseños típicos en tándem incluyen tubos de ecualización de aceite para mantener los niveles de aceite apropiados. Para las aplicaciones de sistemas paralelos, se usan generalmente dispositivos electrónicos de control del nivel de aceite. En ambos casos, ciertas consideraciones de diseño del sistema, como el tamaño del separador de aceite, recipientes de aceite, válvulas de corte del flujo de aceite de retorno cuando el compresor no está operando, entre otras, pueden proporcionar protección extra y vida adicional a los compresores instalados, aumentando así la vida del sistema.

Otra consideración adicional en el diseño de sistemas es la manipulación de impurezas y humedad que puede mejorar significativamente la vida del sistema y del compresor.

Futuro del Scroll.- Basados en el éxito del compresor Scroll durante los últimos años, el futuro de este tipo de compresor en todos sus tamaños es en extremo brillante. El rendimiento del Scroll y su bajo nivel de ruido han demostrado que es claramente superior a otras tecnologías en aire acondicionado y, con algunas mejoras de eficiencia adicionales, también en refrigeración.

El Scroll es comparable a los compresores semiherméticos actuales de alta eficiencia; ofrecen una amplia variedad de opciones en la modulación de la capacidad y en esquemas mejorados de in-

yección de vapor, que pueden proporcionar un incremento en la eficiencia del compresor y del sistema. Esto es cada vez más importante para cumplir con los requerimientos futuros de conservación de energía y las obligaciones globales para reducir las emisiones de anhídrido carbónico.

La tecnología Scroll ofrece también la mejor opción para diseñar y fabricar en el futuro compresores más silenciosos y confiables.

Una ventaja para los compresores Scroll en el futuro es el uso creciente del R-410A, ya que el Scroll se ajusta a este tipo de refrigerante, poseen una mayor eficiencia isentrópica y son más silenciosos. Incluso comparados con los compresores alternativos a pistón con R-22, resultan ser más silenciosos; los compresores otativos equivalentes son entre 6÷8 dB más ruidosos. Los compresores Scroll específicamente diseñados para el refrigerante R-410A están demostrando hoy en día ser muy fiables.

A.15.- DIFERENCIAS DE DISEÑO EN EL SCROLL PARA REFRIGERACIÓN Y PARA AIRE ACONDICIONADO

Debido a que los Scroll de refrigeración operan sobre un más amplio rango de temperaturas y relaciones de compresión, existen algunas diferencias de diseño entre un Scroll de refrigeración y uno de aire acondicionado.

La temperatura de descarga no es el único problema que se puede encontrar a bajas temperaturas de evaporación y a elevadas temperaturas de condensación. También hay relaciones de presión significativamente más altas, las cuales pueden causar un aumento de la fatiga sobre los elementos del Scroll. Estos aumentos de la proporción de compresión también pueden afectar el puerto de descarga, generando un flujo de retorno hacia el Scroll que puede afectar el consumo de energía significativamente, ya que produce la recompresión de una porción del gas de descarga.

- Una modificación incorporada al Scroll de refrigeración es el mecanizado especial para elevadas relaciones de compresión (HCR), que genera un fuerte incremento de la fuerza e incluso una reducción en el volumen final de descarga, lo que provoca un aumento en la relación de volumen e inherentemente en la relación de compresión.

- Otra modificación es el uso de una válvula dinámica de descarga para controlar el reflujo, la cual se diseña para reducir el reflujo sin crear restricciones u obstrucciones adicionales en la vía y se combina con un puerto de dimensiones reducidas para las condiciones de bajas temperaturas de evaporación y el flujo de baja masa resultante.

A.17.- GEOMETRÍAS DIVERSAS DE LOS VOLÚMENES DE LAS CELDAS

Hoy en día el compresor Scroll se usa principalmente en aplicaciones de aire acondicionado, donde la relación de presiones es moderada. Para incrementar el rango de aplicación a la refrigera-

ción comercial, existe interés en desarrollar compresores Scroll que trabajen con un buen rendimiento cuando tengan que funcionar con relaciones de presión más altas, lo que se puede conseguir:

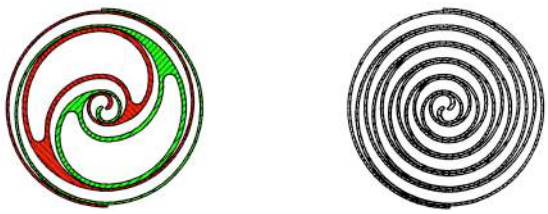
- *Optimizando el perfil de las espirales*
- *Mediante la inyección de refrigerante*

Geometría de la involuta con espesor de pared constante.- Todos los compresores que se fabrican en serie están basados en la involuta de un círculo como perfil de la espiral. El espesor de la pared del perfil es constante (al igual que el de los otros dos perfiles que se presentan), y se diseña normalmente con 2 vueltas y media. De igual manera se forman los otros perfiles de la espiral, cuando la geometría base se modifica, como por ejemplo la involuta de una línea , y la involuta de un cuadrado.

La involuta del círculo se puede comparar con la de un segmento recto y con la involuta de un cuadrado, y se pone de manifiesto que si tanto el espesor, como la altura del perfil, el volumen de succión y la relación de compresión, se asumen iguales, el número de cámaras de compresión de la involuta del círculo será el menor y, por lo tanto, el tiempo y la longitud de descarga serán los más cortos.

Operando en las mismas condiciones, las fluctuaciones de las fuerzas del gas serán las más altas en la involuta del círculo y las más bajas en la involuta del cuadrado.

El perfil de la involuta del círculo es el más compacto de los tres, pero también es el que tiene más variaciones de esfuerzo de torsión.



a) Con 3 vueltas *b) Con 6 vueltas*

Fig A.40.- Geometría alternativa del Scroll con la misma relación de volumen

Perfil de envolvente con espesor de pared variable.- En 1992 United Technologies presentó un perfil de Scroll con paredes delgadas en el lado exterior y en el centro, y con paredes gruesas en medio, Fig A.41a. Esta geometría tiene una gran cámara de succión, una compresión rápida y una longitud y tiempo de descarga cortos. Sus desventajas son que presenta unas altas variaciones del esfuerzo de torsión, y un difícil mecanizado.

En 1995 Hitachi desarrolla investigaciones sobre compresores de espesor de pared variable, cuyos perfiles son involutas de círculos con radio del círculo base variable. El volumen de descarga para los casos mostrados en esta figura se puede aceptar como constante, puesto que sólo depende

de la geometría cercana al puerto de descarga.

La relación de volúmenes depende sólo del volumen de succión. En estos tres perfiles, el volumen succionado es constante, pero el diámetro de las espirales cambia. El perfil con paredes gruesas en el exterior tiene el diámetro más grande, mientras que el que tiene las paredes delgadas en el exterior tiene el diámetro más pequeño. Si el diámetro externo es el mismo en los tres perfiles, el que tiene las paredes externas delgadas, tiene la mayor relación de volumen y, por tanto, la relación de compresión más alta.

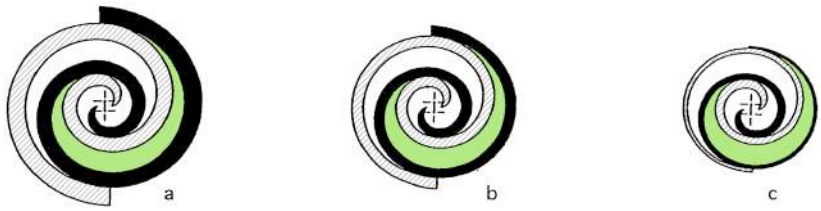
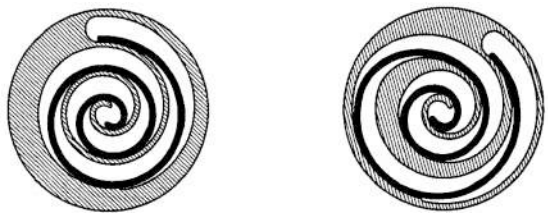


Fig A.41.- Espesor de pared a) Creciente desde el centro; b) Constante; c) Decreciente
Los esquemas Scroll con la misma proporción de volumen

United Technologies ha desarrollado un perfil de la espiral en la que el espacio desaprovechado se utiliza según se indica en la Fig A.42b. Debido a que, en general, el diámetro del Scroll es menor que el diámetro del motor, no tiene sentido práctico optimizar de este modo el perfil de la envolvente.



(a) Scroll común *(b) Scroll utilizando el espacio desaprovechado*

Fig A.42.- Posible optimización del espacio en el compresor

OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE DESCARGA

Una forma de conseguir una relación de volumen más alta es optimizar la geometría de descarga. Teóricamente, se puede conseguir cualquier relación de volumen disminuyendo el volumen de descarga. Una condición para que esto ocurra es un acoplamiento perfecto, lo que conlleva que los dos extremos de las espirales tengan en todo momento un punto de contacto.

Perfil envolvente con altura variable.- En la figura se muestra una espiral con altura variable. La cámara de descarga en este caso se reduce al 50% respecto al tamaño original, lo que da lugar a un incremento de la relación de presiones.

La cámara de succión para la geometría alternativa es igual que para la geometría original. Durante el proceso de compresión, la altura de la cámara se reduce en un escalón. En éste, existe un

paso por debajo de la voluta que conecta las dos cámaras adyacentes, dando lugar a un alto flujo de gas recirculando. Sin embargo, la capacidad volumétrica del compresor no se ve afectada significativamente ya que el volumen de succión es el mismo que en la geometría original.

Debido a las pérdidas del flujo en la recirculación, la eficacia isentrópica es baja, por lo que la aplicación de este método no es competitiva.

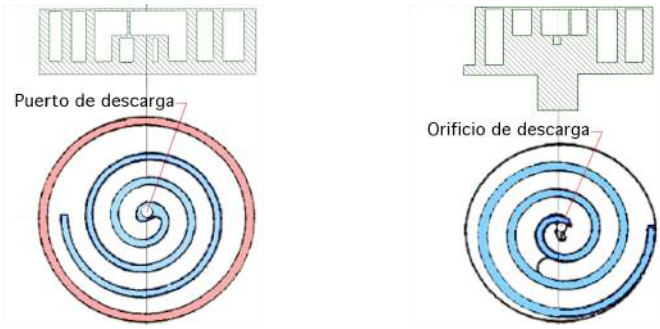


Fig A.43.- Diseño de la espiral con un salto en la altura de la espiral para incrementar la relación de volumen; los extremos de la espiral central no son simétricos

Número de vueltas.- Una solución para incrementar la relación de volumen es agregar más vueltas a la espiral; esta modificación implica un aumento en la longitud y tiempo de la salida, y la fricción. Todos los compresores Scroll producidos comercialmente tienen 2 vueltas y media, pero este parámetro se podría deber a que es el resultado de un modelo de optimización.

Precompresión.- El compresor Scroll tiene una relación de volumen fija. Una manera de conseguir una relación de presión más alta es comprimir el gas antes de entrar al compresor Scroll, lo que se podría hacer bien con otro compresor Scroll, o con cualquier otro tipo de compresor; ésto depende de la optimización del sistema de compresión, y no del propio compresor.

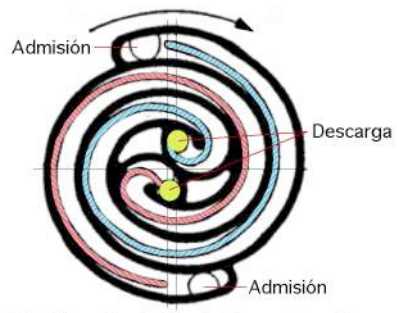


Fig A.44.- Diseño de Bock de un Scroll con 2 puertos de descarga y dos espirales móviles

Compresor Scroll con dos puertos de descarga.- Un diseño con dos espirales móviles y dos puertos de descarga en un compresor, se presentan en la Fig A.44. Este Scroll tiene una espiral fija y dos espirales móviles. Debido a la complicada geometría, se prevén unos costes de fabricación bastante altos y, por lo tanto, que dicho modelo no sea competitivo.

Tecnología triangular para el compresor Scroll.- Un compresor con espiral triangular fue patentado en USA en 1985. En este caso se demuestra que el perfil del arrollamiento no tiene por qué ser circular, sino que podría tener la forma de cualquier polígono. No se ha encontrado bibliografía que compare este perfil con el de la involuta de un círculo.

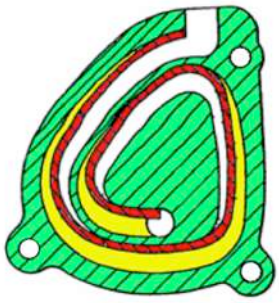


Fig A.45.- Scroll triangular

De lo anterior se deduce que las principales características que el nuevo Scroll debería tener son:

- Relación de volumen alta

- Acoplamiento perfecto, lo que asegura que una cámara esté vacía antes de que la siguiente esté conectada al puerto de descarga

- Longitud de salida pequeña

- Compresión rápida (para minimizar el tiempo de salida)

- Variaciones del esfuerzo de torsión bajas

- Coste de fabricación bajo

- Calentamiento del gas de succión bajo

No todos estos requerimientos se pueden conseguir al mismo tiempo.

Otro campo de interés es la optimización del final del perfil del arrollamiento en el puerto de descarga. Los métodos matemáticos para diseñar un acoplamiento perfecto (es decir, que los extremos finales de las espirales se toquen todo el tiempo) son considerados como un paso esencial para desarrollar perfiles de envolvente con mayores relaciones de compresión.

REFERENCIAS COMPRESOR SCROLL

Renedo, Carlos J..- INTRODUCCIÓN AL AIRE ACONDICIONADO. Capitulo 2.“Compresores frigoríficos”. Universidad de Cantabria.

Elson, J.P., Hundy, G.F. y Monier, K.J.- SCROLL COMPRESSOR DESIGN AND APPLICATION CHARACTERISTICS FOR AIR CONDITIONING, HEAT PUMP AND REFRIGERATION APPLICATIONS. Proceedings of the Institute of Refrigeration, 1990

Hundy, G.F. y Kulkarni, S.- THE REFRIGERATION SCROLL AND ITS APPLICATION. Proceedings of the Institute of Refrigeration, 1996-97.

Wang, S.K. THE HANDBOOK OF AIR CONDITIONING AND REFRIGERATION. McGraw Hill, Inc.

Incropera, Frank P. y DeWitt, David P.- FUNDAMENTALS OF HEAT TRANSFER.- John Wiley and Sons.

Zucker Robert D., FUNDAMENTALS OF GAS DYNAMICS.- Matrix Publishers, Inc.

"Patent number: 801182 .- ROTARY ENGINE. US Patent Office (1905). Retrieved on 9 February 2008.

David T. Gerken; John L. Calhoun (03 2000). DESIGN REVIEW OF CAST ALUMINUM SCROLL COMPRESSOR COMPONENTs. SAE 2000 World Congress. SAE International. Retrieved on 21 February 2007.

Tojo, Kenj.- SCROLL COMPRESSOR WITH MEANS FOR END PLATE BIAS AND COOLED GAS RETURN TO SEALED COMPRESSOR SPACES, U.S. Patent 4216661, 1980.

Tischer, J., Utter, R., SCROLL MACHINE USING DISCHARGE PRESSURE FOR AXIAL SEALING, U.S. Patent 4522575, 1985.

Caillat, J., Weatherston, R., Bush, J.- SCROLL-TYPE MACHINE WITH AXIALLY COMPLIANT MOUNTING, U.S. Patent 4767293, 1988.

Richardson, Jr., Hubert.- SCROLL COMPRESSOR WITH ORBITING SCROLL MEMBER BIASED BY OIL PRESSURE, U.S. Patent 4875838, 1989.

Etemad, S., Yannascoli, D., Hatzikazakis, M.- SCROLL MACHINE WITH WRAPS OF DIFFERENT THICKNESSES, U.S. Patent 4834633, 1989.

SCROLL COMPRESSORS COOL THE COST OF COOLING MILK, Wisconsin Public Service Corporation - A WPS Resources Company (07 2003). Retrieved on 21 February 2007.

Jim Wheeler (1988).- SCROLL COMPRESSORS: THE INSIDE STORY, Contracting Business (Penton Media Inc): 36.

James W. Bush; John P. Elson (1988).- SCROLL COMPRESSOR DESIGN CRITERIA FOR RESIDENTIAL AIR CONDITIONING AND HEAT PUMP APPLICATIONS, Proceedings of the 1988 International Compressor Engineering Conference 1: 83-92.

Jill Russell (2006).- COMMERCIAL FOODSERVICE EQUIPMENT, A CONTINUOUS COOL, Appliance Magazine. Retrieved on 10 January 2007.

Whitman W. C. y Jonson W. M.- TECNOLOGÍA DE LA REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO. REFRIGERACIÓN COMERCIAL, Ed Paraninfo.

COMPRESSOR HANDBOOK .- *Paul C. Hanlon, editor. p. cm. Includes index. ISBN 0-07-026005-2, Mc GRAW-HILL*