

ESTUDIO DE CAMPO PARA COMPARAR 4 REFRIGERANTES EN LA MISMA INSTALACIÓN R-507, R407 A, R-407 F, R-442 A, PARA BAJA TEMPERATURA DE EVAPORACIÓN. (-30°C)

1.- Antecedentes y objeto del estudio.

En una importante industria agroalimentaria de Miajadas (Cáceres), preocupada por los efectos de los refrigerantes en relación al Calentamiento Global o Efecto Invernadero y, dado que en su actividad, la conservación de productos congelados, estos refrigerantes (R-507 en este caso) son elemento fundamental de la maquinaria frigorífica, ha encargado a la empresa mantenedora de sus instalaciones, **Refrigeración Carrasco, S.L.**, un trabajo de investigación con el objetivo de localizar el refrigerante más oportuno de los que ofrece el mercado y que cumpla dos requisitos fundamentales, a saber:

1º- Índice PCA (GWP) inferior al actual del R-507, que tiene un valor de 3850.

2º- El refrigerante elegido debe dar garantías de funcionar en los equipos de manera tan eficiente, al menos, como lo hacía el R-507, para que el proceso productivo del cliente pueda continuar con total garantía aún en las condiciones exteriores más adversas.

2.- Acciones llevadas a cabo por la empresa Refrigeración Carrasco.

Refrigeración Carrasco estudia y elige los productos que, siendo equivalentes en prestaciones al refrigerante existente en las instalaciones del cliente, R-507, azeotropo de R-125 y R143a, con un PCA (GWP) de 3850 (demasiado alto) y localiza los siguientes productos que ofrece en este momento el mercado para el rango de temperatura de evaporación deseado, es decir, entre -20°C y -35°C, a saber: R-407A, R-407F y R-442A.

Estos productos seleccionados tienen un índice de potencial de calentamiento atmosférico (PCA) en torno a la mitad que el producto existente, alrededor de 1900 y podrán por tanto servir para llevar a la obsolescencia los equipos existentes.

Mientras la industria desarrolla otras opciones para esta aplicación como son los HFO's puros (hidro-fluoro-olefinas) o mezclas con otras sustancias que posean un PCA de valor casi nulo o inferior a 150.

Elegidos los productos, Refrigeración Carrasco toma contacto con alguna empresa que disponga de los refrigerantes y que esté dispuesta a patrocinar los gastos de desarrollo e investigación para la aplicación de estos productos en las instalaciones frigoríficas de su cliente. Esta empresa es uno de los distribuidores más importantes de gases refrigerantes, **Gas Servei, S.A.** con sede en Barcelona.

En este punto, se necesita la tecnología que permita medir y analizar los equipos frigoríficos existentes en la planta de la industria agroalimentaria, de manera que podamos calcular con fiabilidad el COP y la capacidad frigorífica entregada por cada refrigerante, así como otros parámetros como la temperatura de descarga, etc.

En el mercado existe una herramienta ideal para estos estudios de rendimiento en plantas frigoríficas, llamada **Climacheck**.

Ahora falta encontrar la empresa oportuna que use habitualmente esta tecnología y tenga experiencia en desarrollos semejantes y encuentra que el distribuidor para España de estas herramientas, que es la empresa **RefriApp, S.L.**, de Almería.

Por último, Refrigeración Carrasco contrata también a un técnico especialista en este tipo de estudios y trabajos, con amplia experiencia reconocida, para que ayude a encontrar un protocolo de medición válido para esta ocasión, eligiendo a D. Fernando Gutiérrez.

3.- Resumen de herramientas, refrigerantes, equipos frigoríficos y personal involucrados en el estudio comparativo

3.1- Herramienta base del estudio.

Como se ha mencionado antes, el equipo ideal para realizar este estudio es el analizador de rendimiento de instalaciones frigoríficas y de climatización **Climacheck**.

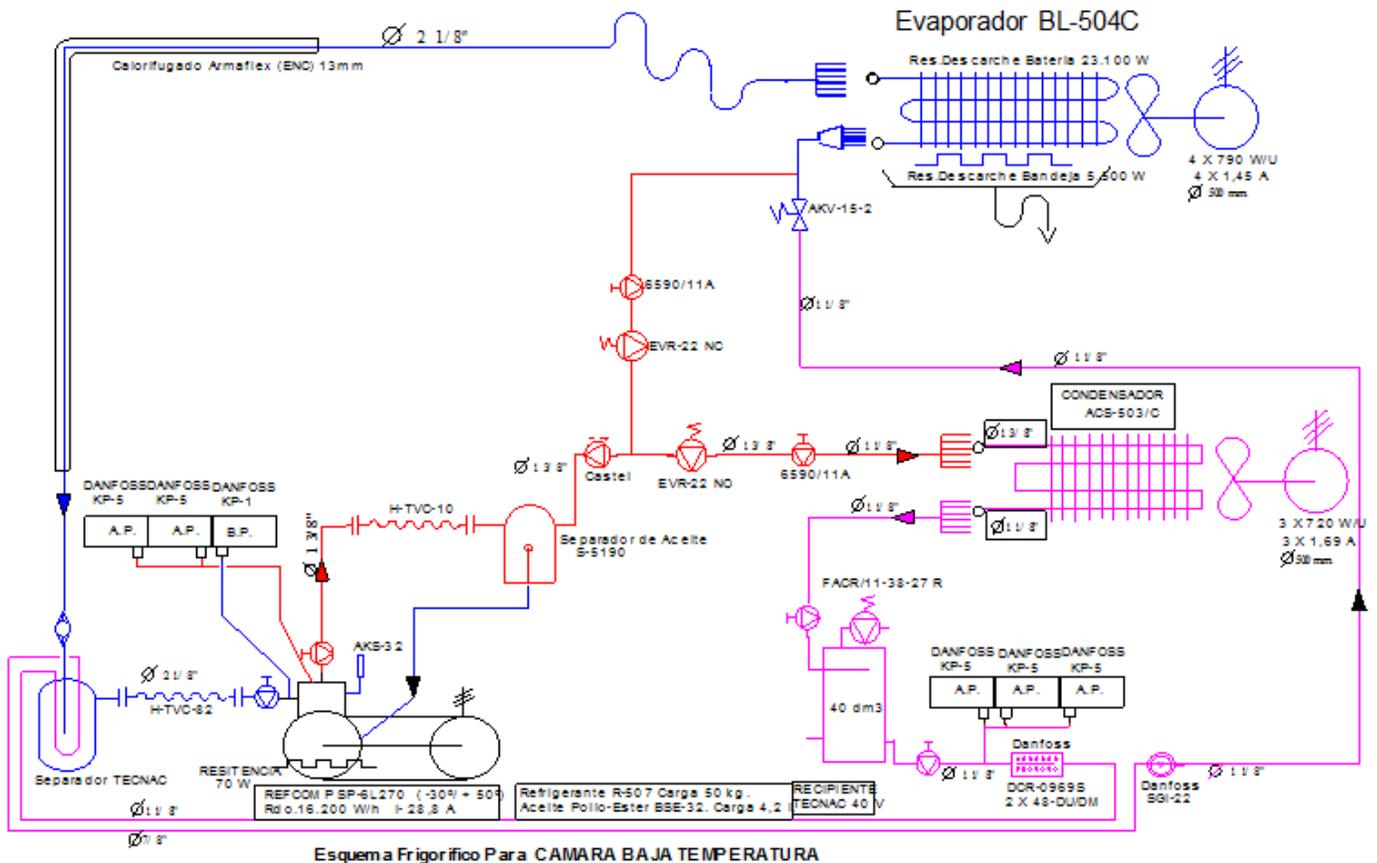
3.2- Gases Refrigerantes.

- R-507, existente en la instalación que ha prestado la propiedad para este trabajo.
- R-407A, R-407F, y R-442A, al menos 120 Kg de cada producto, para las diferentes prácticas.
- Aditivo especial para minimizar los rozamientos de los compresores ya que los aceites POE que se usan en los equipos con HFC's lubrican peor que los aceites minerales. El aditivo mejora la

lubricidad y además ahorra en torno al 3% de energía eléctrica (la cantidad a añadir óptima será el 15% del volumen de aceite).

3.3- Equipo frigorífico para llevar a cabo las sucesivas mediciones.

El circuito frigorífico donde se llevan a cabo las mediciones tiene el siguiente esquema:



- Temperatura de evaporación= -30°C.
- Temperatura de condensación= 30-50°C.
- Válvula de expansión electrónica (Danfoss).
- Desercarcho por gas caliente.



Instalación frigorífica objeto del estudio.

Datos del compresor:

Se trata de un compresor semi-hermético Refcomp de 22 CV. A continuación se pueden observar sus características técnicas.

SP-6L270E

Leonardo v. 1.3.2



Project Condition

Refrigerant	R507
Evaporating Temperature	-30,00 °C
Evaporating Pressure	2,13 bar abs
Condensing Temperature	50,00 °C
Condensing Pressure	23,59 bar abs
Suction gas superheat	10 K
Liquid subcooling	3 K

Output data

Cooling capacity	16,5 kW
Input power	16,4 kW
COP	1,006
Absorbed Current	28,8 A
Condenser capacity	32,9 kW
Evaporator mass flow rate	717,0 kg/h
EER	3,433 [BTU/h]/kW
Oil cooling power	0 kW
Discharge temperature	99,9 °C
Initial injection pressure	- bar

Technical data

Displacement at 50/60 Hz [m³/h]	112,5 / 135,0
Nº of cylinders	6
Weight [Kg]	270
Oil Charge [dm³]	4,2
Discharge connection int.∅ [mm/inch]	35/ 1 3/8"
Suction connection int. ∅ [mm/inch]	54/ 2 1/8"
Motor	400/3/50
Lra[A]	123/201

3.4- Personal técnico involucrado en el estudio.

- Francisco Carrasco, responsable técnico de la empresa *Refrigeración Carrasco, S.L.*
- Joaquín Tena, Ingeniero Técnico Industrial de *RefriApp, S.L.*
- Fernando Gutiérrez, Ingeniero Técnico Industrial, profesional autónomo.

4.- Protocolo para el análisis.

Reunidos “in situ” los 3 técnicos que hemos mencionado, se opta por el siguiente protocolo para el estudio del comportamiento de la máquina a estudiar con los diferentes refrigerantes:

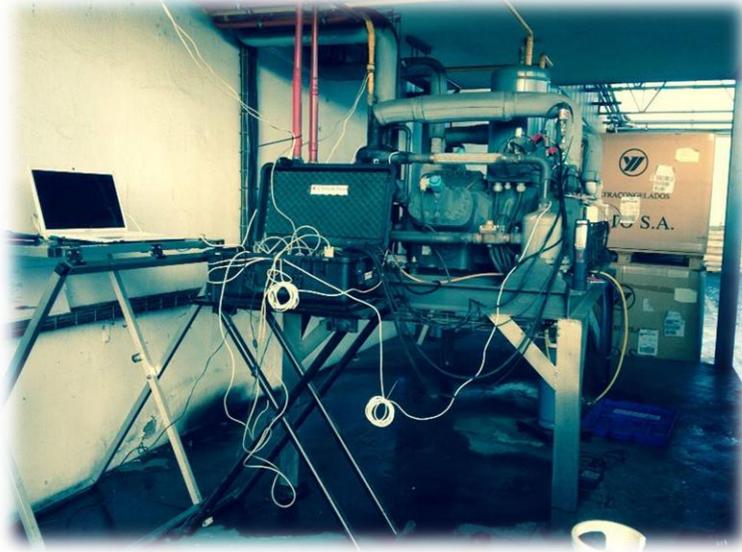
1º) Dado que la cámara frigorífica cedida por el cliente dispone de dos unidades gemelas (como las indicadas en el apartado 3.3) para el mantenimiento de temperatura a -20°C , se toma la decisión de dejar un equipo funcionando y realizamos las pruebas en el otro.

2º) Se añade el aditivo Zerol ICE LT, aproximadamente el 15% del volumen de aceite del equipo y los primeros datos se tomarán con el refrigerante existente R-507.

3º) Se sondea la instalación con 7 sondas de temperatura, 2 transductores de presión para la alta y baja presión, pinzas amperimétricas para medir intensidad por fase activa y sondas magnéticas para medir el voltaje, en las bornas accesibles del compresor.

Todas estas sondas de presión, temperatura y potencia son conectadas al “data-logger” de **Climacheck**.

4º) A continuación, se conecta el PC que contiene el programa de Climacheck al “data-logger”.



Equipo Climacheck conectado a la instalación.

5º) Se coloca además otro PC que contiene el Control de la válvula de expansión electrónica para que se puedan observar y/o cambiar los parámetros de la válvula cuando se precise en cualquiera de las pruebas que se realizarán a continuación y que además permita regular el grado de recalentamiento, y otros factores fundamentales para que cuando se comparen los refrigerantes, los datos de partida sean lo más parecidos posibles, antes de aportar los resultados de los **rendimientos termodinámicos**.

6º) Se hace rodar al sistema con el refrigerante existente, R-507, controlando de base la temperatura de condensación y el grado de recalentamiento, para hacer que estos dos datos sirvan de base para la práctica con el resto de refrigerantes. Para ello, se utiliza el software Danfoss de la válvula de expansión electrónica (VEE) y los presostatos de regulación de la temperatura de condensación.

7º) Los resultados de esta lectura se encuentran en la tabla nº1 (ver en página siguiente) y al final de este protocolo analizaremos y compararemos los parámetros más importantes.

8º) Posteriormente, se recuperará el refrigerante con una recicladora (**Fri₃Oil System**) para poder reutilizar el producto en otras aplicaciones o en la misma instalación si procediera.



Unidad recicladora Fri₃Oil System

9º) Se hace vacío del sistema frigorífico y se cambia al refrigerante R-407F. Se vuelven a hacer otra vez todas las lecturas como se ha hecho con el refrigerante anterior, pero ahora, dado que el objetivo es ver las prestaciones cuando tengamos otras condiciones peores de temperatura ambiente exterior, se hace rodar el sistema también a 50º C de temperatura de condensación para ver los resultados. (los resultados condensando a 50ºC se pueden ver en la tabla nº 2)

10º) Se repiten los procesos 8º y 9º para tomar mediciones y resultados de los refrigerantes R-407A y R-442A.

PARÁMETRO A MEDIR	R-507 A	R-407 F	R-407 A	R-442 A
Temperatura de entrada de aire al evaporador (°C)	-19	-19.5	-20.6	-18.8
Temperatura de salida de aire del evaporador (°C)	-19.5	-20.1	-21	-19.3
Temperatura de evaporación del refrigerante (°C)	-29.7	-29.1	-27	-27.5
ΔT en el evaporador (°C)	10.7	9.6	6.4	8.7
Presión de evaporación (bar)	1.14	0.86	0.9	1
Temperatura de aspiración (°C)	-15	-12.3	-10.7	-7.2
Recalentamiento total (°C)	15	14.4	14.1	17.8
Recalentamiento salida del evaporador(°C)	8.7	11	6.5	14.6
Deslizamiento (Glide) (°C)	0	6.2	6.1	6.4
Temperatura de descarga (°C)	69.1	93	87.7	94.3
Presión de condensación (°C)	13.76	13.76	12.95	13.69
Temperatura de condensación del refrigerante (°C)	30.1	31.9	31.4	31.4
Temperatura de entrada de aire al condensador (°C)	13.5	12.8	16.5	11.6
Temperatura de salida de aire del condensador(°C)	23.3	25	25.6	20.2
ΔT en el condensador (°C)	6.8	6.9	5.8	11.2
Consumo eléctrico del compresor (KW)	15.9	14.6	14.9	15.7
Intensidad media por fase (A)	28.4	26.6	26.5	28.1
Potencia frigorífica (KW)	30.3	31.3	31.3	36
Potencia calorífica (KW)	44.9	44.9	45.1	59.6
COP frigorífico	1.9	2.14	2.11	2.3
Subenfriamiento (°C)	5.5	7.7	8.1	10.4
Caudal Volumétrico (m ³ /h)	90.5	91.33	88.32	94.63
Caudal másico de refrigerante (gr/s)	261	186.5	204.4	205.4
*tabla 1-comparativa de parámetros y resultados				
condensando a +30°C, evaporando a -30°C				

PARÁMETRO A MEDIR	R-407 F	R-407 A	R-442 A
<i>Temperatura de entrada de aire al evaporador (°C)</i>	-20	-21.5	-18.5
<i>Temperatura de salida de aire del evaporador (°C)</i>	-20.5	-21.7	-19
<i>Temperatura de evaporación del refrigerante (°C)</i>	-25.3	-25.8	-25.9
<i>ΔT en el evaporador (°C)</i>	5.3	4.3	7.4
<i>Presión de evaporación (bar)</i>	1.16	1	1.13
<i>Temperatura de aspiración (°C)</i>	-13.7	-9.6	-7.9
<i>Recalentamiento total(°C)</i>	9.3	14	15.7
<i>Recalentamiento salida de evaporador (°C)</i>	1.2	8.2	11.7
<i>Deslizamiento (Glide) (°C)</i>	6.1	6.2	6.3
<i>Temperatura de descarga (°C)</i>	99.4	90.2	105.6
<i>Presión de condensación (°C)</i>	22.21	21.34	22.74
<i>Temperatura de condensación del refrigerante (°C)</i>	50	50.3	50.7
<i>Temperatura de entrada de aire al condensador (°C)</i>	13.9	12.8	12.7
<i>Temperatura de salida de aire del condensador(°C)</i>	29.9	38.5	38
<i>ΔT en el condensador (°C) (Tcond-Tsaire)</i>	20.1	11.8	12.7
<i>Consumo eléctrico del compresor (KW)</i>	17.3	11.9	15.9
<i>Intensidad media por fase (A)</i>	31.1	21.8	28.7
<i>Potencia frigorífica (KW)</i>	36.3	27.1	32.5
<i>Potencia calorífica (KW)</i>	52.4	38.2	47.3
<i>COP frigorífico</i>	2.09	2.28	2.05
<i>Subenfriamiento (°C)</i>	23.9	22.6	21.8
<i>Caudal Volumétrico (m3/h)</i>	91.45	75.93	85.92
<i>Caudal másico de refrigerante (gr/s)</i>	223.2	184	199.7
*			
<i>tabla 2-comparativa de parámetros y resultados, condensando a +50°C, evaporando a -26°C.</i>			

5.- Análisis de lo que se desprende de las tablas aportadas en el punto anterior.

La realidad es que, conforme se han ido leyendo las prestaciones de cada uno de los refrigerantes, se ha analizado lo que a continuación se resume. He aquí, algunos detalles comentados de valor.

5.1- No se puede decir que ninguno de los candidatos (R-407A, R-407F y R-442A) sean productos de alta seguridad y fiabilidad absoluta de por sí.

5.2- Existe la costumbre de elegir un producto por sus prestaciones de COP y CAP, normalmente, sin tener en cuenta la temperatura de descarga, punto fundamental para la seguridad de los compresores.

5.3- Los 3 productos serán de mayor o menor fiabilidad, dependiendo de los propios equipos, es decir, que es posible que alguno de los productos, funcionen mejor o peor en un equipo que en otro, o en una determinada zona geográfica/climática.

5.4- En otras aplicaciones donde se han usado alguno de estos productos que aquí estamos estudiando, sorprendentemente las prestaciones eran un poco mejores que las encontradas en este estudio, y nos referimos en particular al producto R-407A (del que los técnicos que firman este estudio ya realizaron un *case history* en diciembre de 2013, comparándolo contra el R-404A en una instalación similar, sita en Almería). En el caso de Almería, aquella instalación no precisaba de grandes cambios de diseño, y sin embargo en este estudio, basado en una instalación de Miajadas (Cáceres), sí que se han tomado medidas correctoras para asegurar el funcionamiento correcto de los compresores por los condicionantes propios de esta unidad.

5.5- En general, se puede decir que al aplicar estos 3 nuevos refrigerantes a una instalación anterior que use R-404A ó R-507 se deberán adaptar ciertos elementos y aplicar medidas correctoras para evitar averías.

5.6- Como resumen general de ésta experiencia, se puede decir que:

- Durante 8 meses al año, todos los productos son válidos para esta aplicación de baja temperatura de evaporación (-30/-35°C), y en la media temperatura de evaporación (-10/-15°C) seguramente para todo el año.
- Dentro de los 4 meses restantes,(verano), será imprescindible realizar medidas correctoras en función de la instalación y de la climatología de cada zona para mitigar los efectos de la alta temperatura de descarga propia de estos 3 refrigerantes, muy superior a la que presentan el R-404A/R-507.
- En cualquiera de los casos, se han obtenido prestaciones mejores de COP y CAP con el producto R-442A.
- La recomendación consensuada por los 3 técnicos que han participado en el estudio de campo que nos ocupa, sería adaptar las instalaciones de R-507/404A al refrigerante R-442A por su mejor respuesta en prestaciones de COP y CAP, según se puede observar en el análisis contenido en el siguiente punto.

5.7- Desglose del estudio, comparación de los productos y sus prestaciones:

Se parte de la base de que **Climacheck** lee cada período de tiempo (1 seg/5 seg. etc.) todos los parámetros al mismo tiempo y al mismo tiempo calcula COP, CAP, rendimiento isentrópico del compresor, caudal másico, desplazamiento volumétrico y por supuesto todos los demás parámetros incluyendo el más importante, que es la temperatura de descarga del compresor, fundamental para la vida útil del mismo.

a.- los parámetros y resultados de la lectura que aporta **Climacheck**, (que están bien documentados en archivos exportados Excel para cualquiera que lo desee) se resumen en las tablas 1 y 2 vistas anteriormente, habiendo seleccionado para dichas tablas líneas de programa cuando el funcionamiento era estable, en cuanto a temperaturas de condensación, evaporación y recalentamiento más o menos iguales (para que la comparación sea fiable y justa). Se han ido leyendo los resultados a medida que se iba trabajando con los equipos y para que sean comparables, se ha ajustado el régimen del equipo estudiando:

1º) La Tª de condensación para todos los refrigerantes a estudiar (excepto para el R-507), primero a 30º C y posteriormente a 50 ºC.

2º) El grado de recalentamiento, fundamental para la seguridad del compresor en el futuro.

3º) Tª de evaporación, cerca de -30ºC, cuando la cámara esté próxima a su consigna de -20 ºC.

4º) El desplazamiento volumétrico del compresor para cerciorarnos de que actúa con las 3 culatas del compresor, por tanto su funcionamiento al 100%, sin reducción de capacidad.

5º) Con todo ello, y a tenor de los resultados, se puede asegurar que las prestaciones son válidas en los tres casos, pero obliga a utilizar medidas correctoras para la seguridad de las instalaciones en la mayoría de los casos.

6º) En general, los 3 productos alternativos estudiados presentan mejor COP que el R-507, y en particular el R-442A presenta mejor COP que sus competidores. Este hecho es fundamental para los intereses del cliente, ya que es el parámetro que afecta a la factura eléctrica y a su vez disminuye el impacto sobre el Calentamiento Global por efecto indirecto del consumo energético (menor emisión de CO₂).

6- Conclusión.

Después de la comparación de prestaciones, y observando que el R-442A entrega mejor COP como se ha dicho anteriormente, el cliente nos ha permitido usar otra instalación de nueva puesta en marcha para aplicar este refrigerante y medir sus prestaciones.

La medición de este segundo equipo será objeto de un segundo informe por parte de los mismos técnicos que suscriben este primero e incluirá las medidas correctoras que consideremos oportunas para esta nueva instalación en la misma industria de Miajadas (Cáceres).

Todos los datos en los que se basa nuestra decisión están plasmados como resumen en las tablas de resultados 1 y 2 anteriormente expuestas en este estudio de campo comparativo de 4 refrigerantes.

Por último, será el mercado quien decida cuál es la mejor solución para éstas aplicaciones, pero creemos que lo interesante sería elegir un solo refrigerante para la media y baja temperatura de evaporación y así podríamos simplificar las ofertas de refrigerantes para evitar el colapso logístico que se viene dando desde que hemos ido sustituyendo los CFC's, y posteriormente, los HCFC's, que en muchos casos ha confundido a los profesionales y a los clientes debido intereses comerciales, y así, poder simplificar los refrigerantes (disponibles en los servicios técnicos de los profesionales) a los mínimos imprescindibles: R-134 a, R-442A, R-410A y R-407C.

Realizado en enero de 2014.

Fco. Javier Carrasco // Director técnico de Refrigeración Carrasco, S.L.

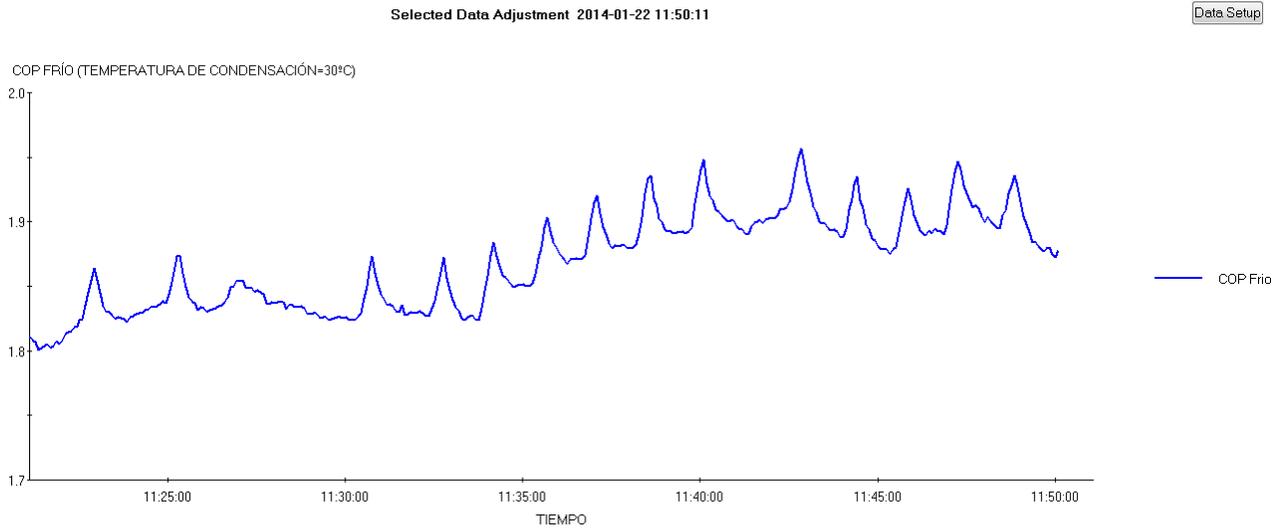
Fernando Gutiérrez // Ing. Téc. Autónomo.

Joaquín Tena // Ingeniero Téc. Industrial de RefriApp, S.L.

Anexo 1-Gráficos comparativos.

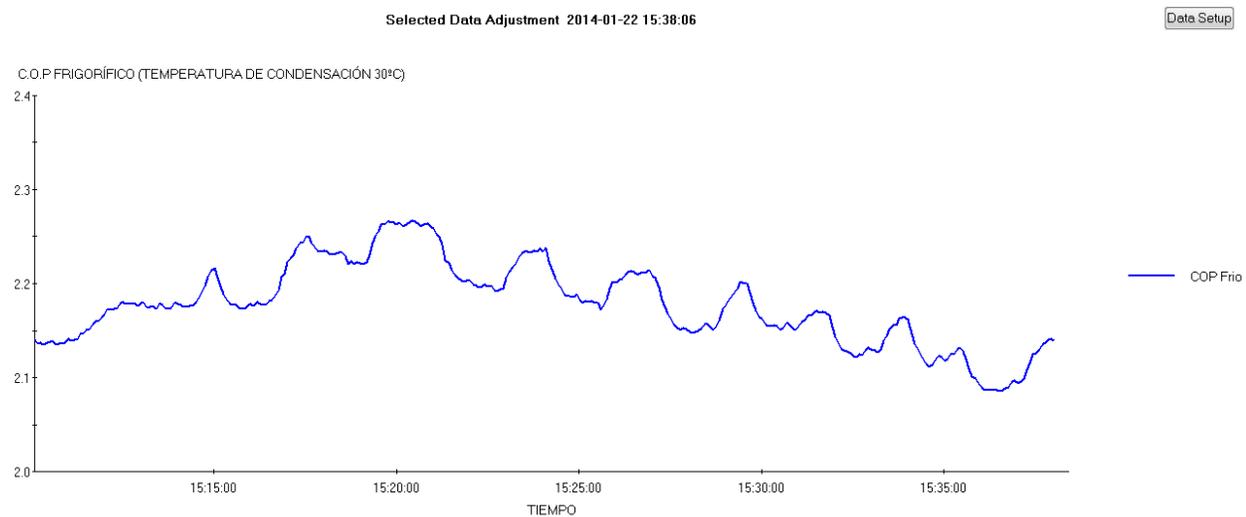
1.1.-Comparación del C.O.P. Frigorífico obtenido.

1.1.1-C.O.P. con R-507.



Vemos que el C.O.P. obtenido se mantiene estable entre 1.8 y 1.95 durante toda la medición, siendo **la media de 1.9**, cuando la temperatura de condensación era de 30°C.

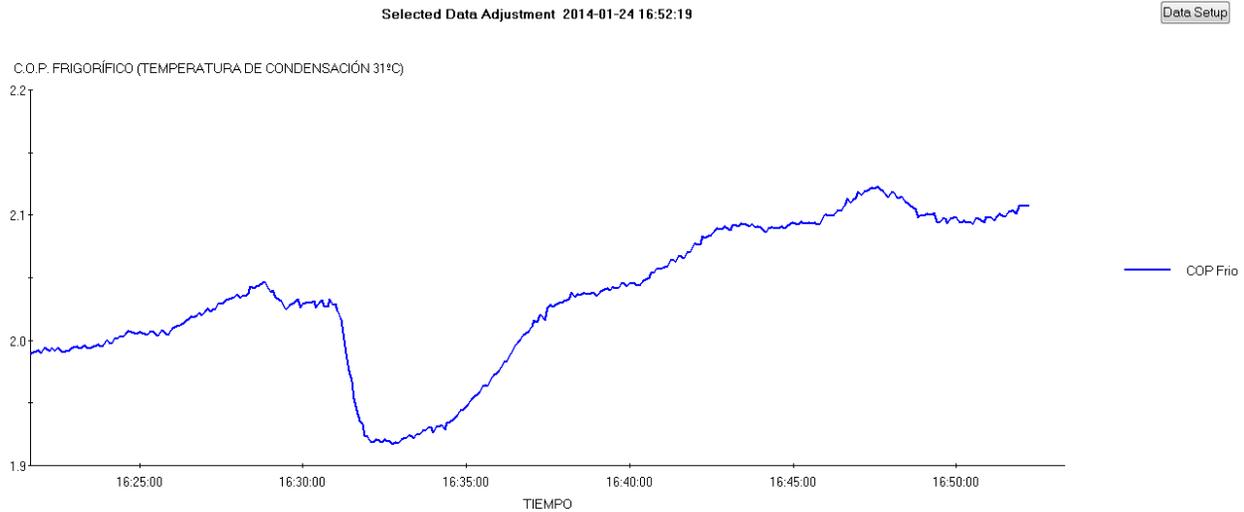
1.1.2.- C.O.P. con R-407F.



Vemos que el C.O.P. obtenido se mantiene estable entre 2.1 y 2.3 durante toda la medición, siendo **la media de 2.14**, cuando la temperatura de condensación era de 30°C.

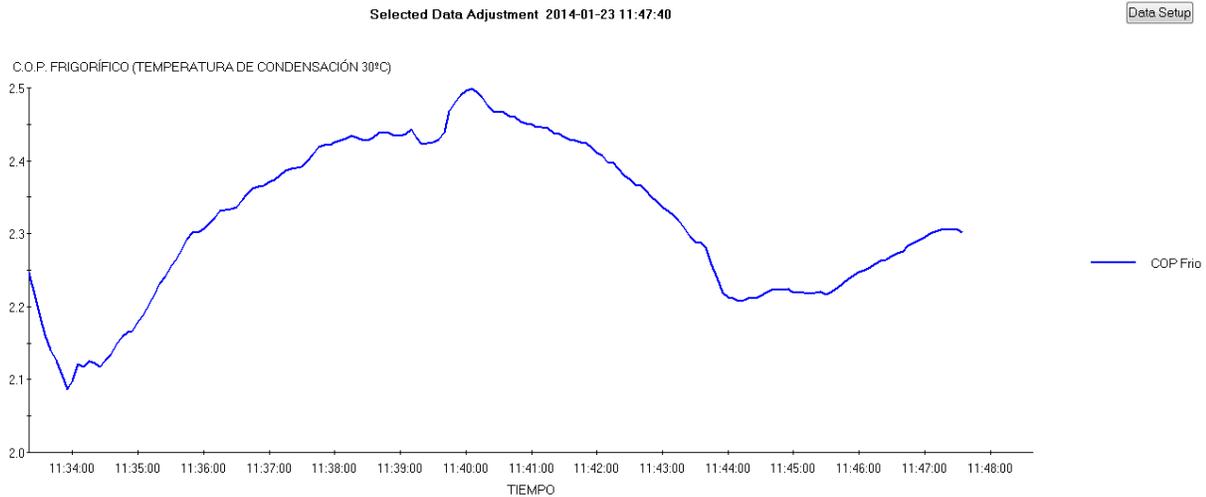
1.1.3.- C.O.P. con R-407A.

Vemos que el C.O.P. obtenido se mantiene estable entre 1.9 y 2.15 durante toda la medición, estabilizándose alrededor de 2.11, cuando la temperatura de condensación era de 31°C.



1.1.4.- C.O.P. con R-442A.

Vemos que el C.O.P. obtenido se mantiene estable entre 2.1 y 2.5 durante toda la medición, siendo **la media de 2.3**, cuando la temperatura de condensación era de 30°C.



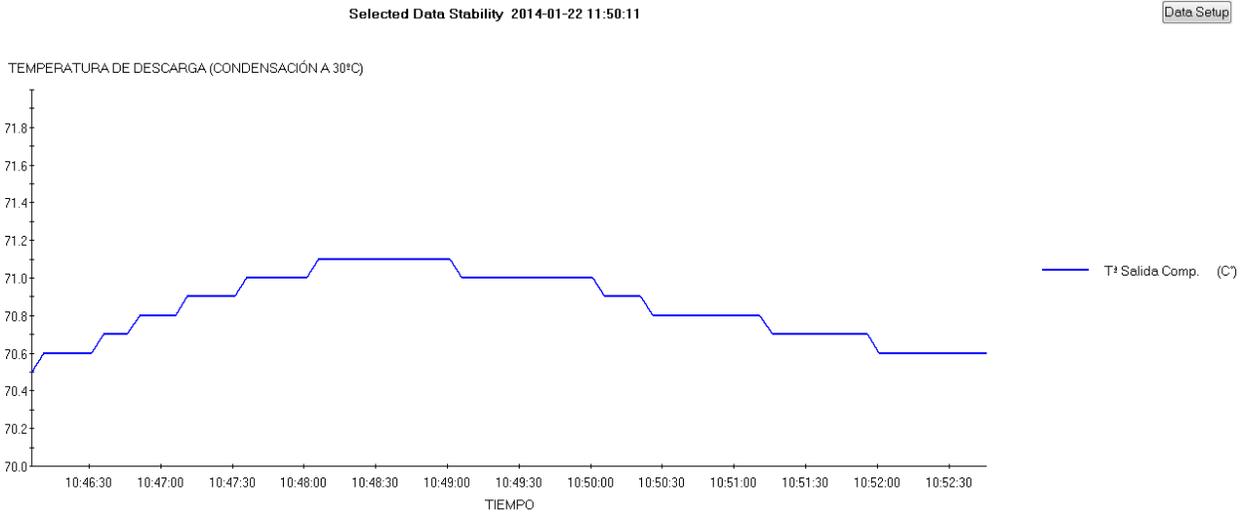
Conclusiones:

REFRIGERANTE	R-507	R-407F	R-407A	R-442A
C.O.P. MEDIO	1.87	2.18	2.04	2.30

1.2-Comparación de la temperatura de descarga.

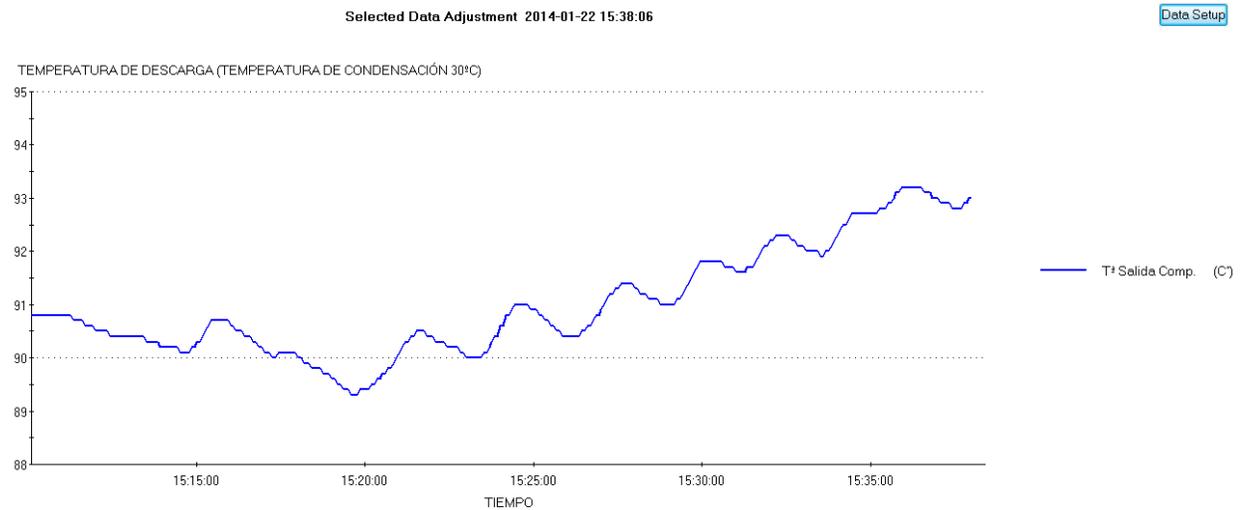
1.2.1.-Temperatura de descarga con R-507.

La temperatura de descarga oscila entre 69º y 71º durante toda la medición, cuando la temperatura de condensación era de 30ºC.



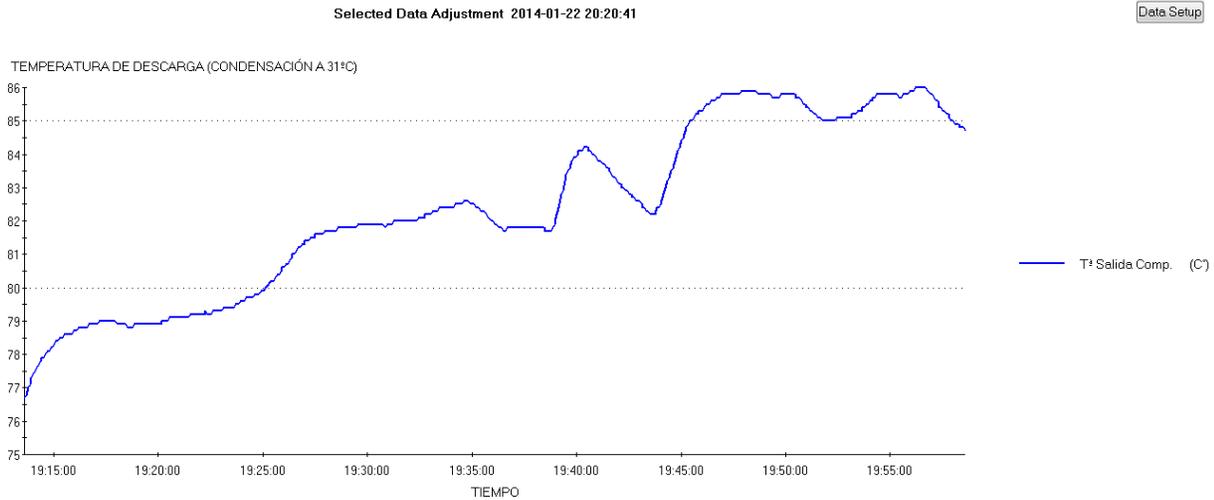
1.2.2.-Temperatura de descarga con R-407F.

La temperatura de descarga oscila entre 89º Y 94º durante toda la medición, **siendo la media de 93º**, cuando la temperatura de condensación era de 30ºC.



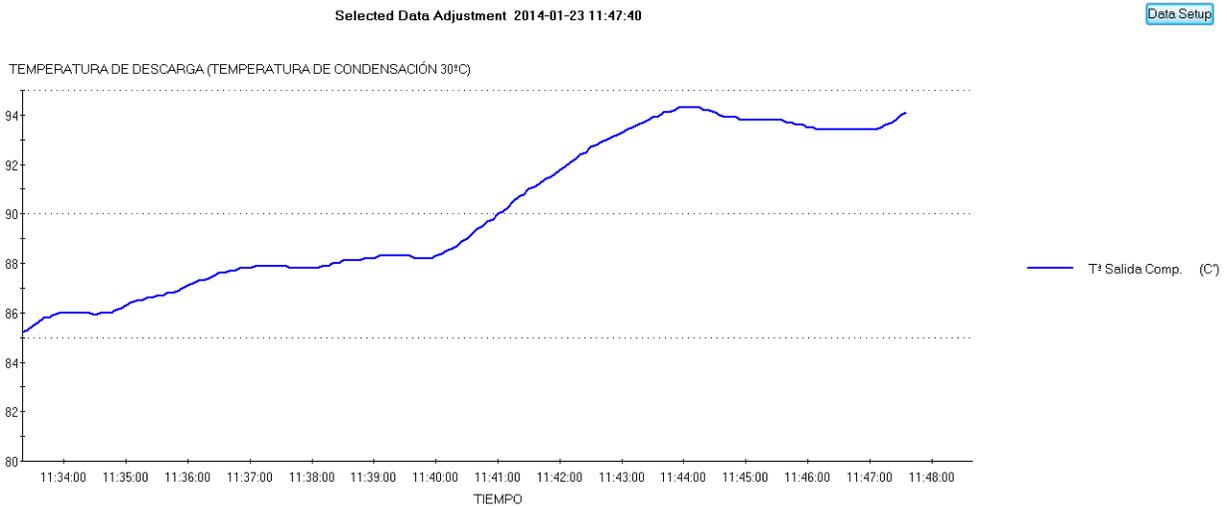
1.2.3.-Temperatura de descarga con R-407A.

La temperatura de descarga oscila entre 72º Y 88º durante toda la medición, **estabilizándose alrededor de 87ºC**, cuando la temperatura de condensación era de 31ºC.



1.2.4.-Temperatura de descarga con R-442A.

La temperatura de descarga oscila entre 85º Y 95º durante toda la medición, **siendo la media de 90ºC**, cuando la temperatura de condensación era de 30ºC.



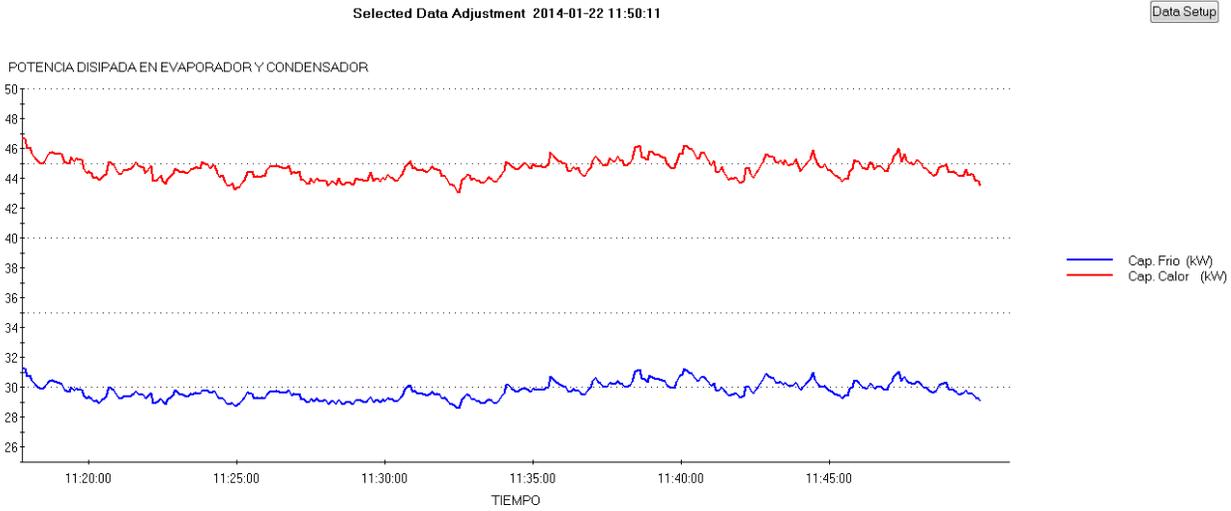
Conclusiones:

REFRIGERANTE	R-507	R-407F	R-407A	R-442A
TEMPERATURA DE DESCARGA MEDIA (ºC)	70.5	91.5	85	90

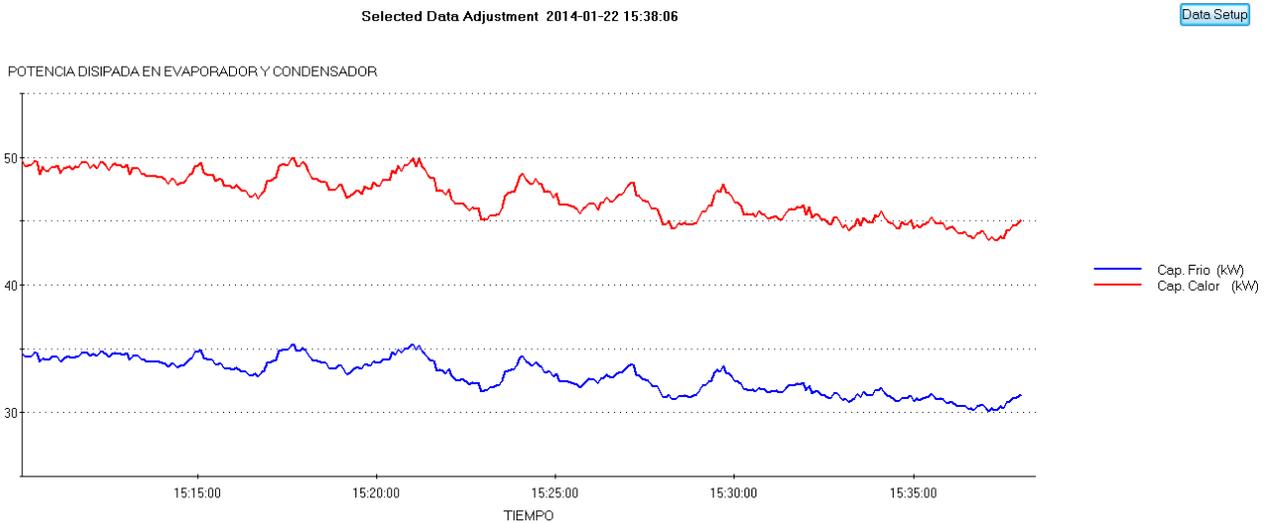
1.3-Comparación de potencias frigoríficas y caloríficas.

Veamos ahora que potencia frigorífica consiguen los cuatro refrigerantes, y la potencia calorífica que disipan los condensadores.

1.3.1.-Potencia frigorífica/calorífica con R-507.La potencia frigorífica se sitúa alrededor de los 30 KW y la calorífica alrededor de 45 KW.

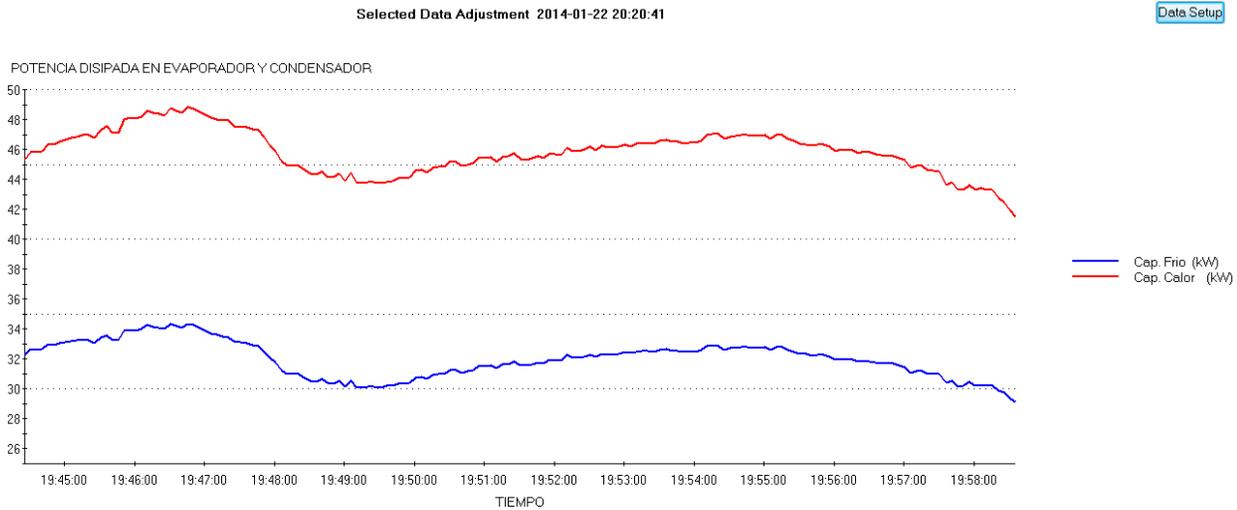


1.3.2.-Potencia frigorífica/calorífica con R-407F.En este caso, la potencia frigorífica media se sitúa alrededor de los 32 KW y la calorífica alrededor de 47KW.



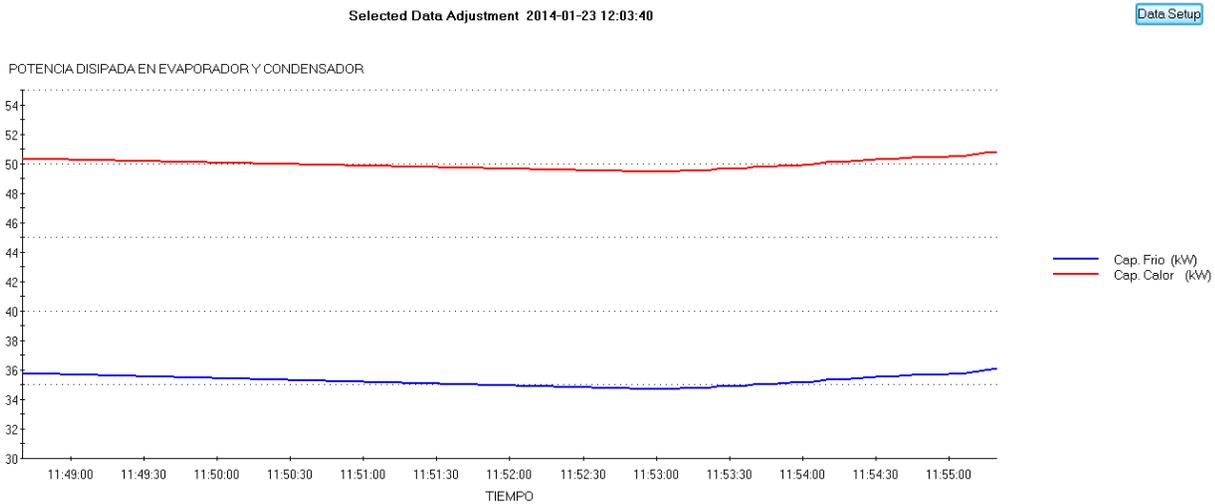
1.3.2.-Potencia frigorífica/calorífica con R-407A.

En este caso, la potencia frigorífica media se sitúa alrededor de los 32KW y la calorífica alrededor de 46KW.



1.3.2.-Potencia frigorífica/calorífica con R-442A.

En este caso, la potencia frigorífica media se sitúa alrededor de los 35-40KW y la calorífica alrededor de 50-60KW.



Conclusiones:

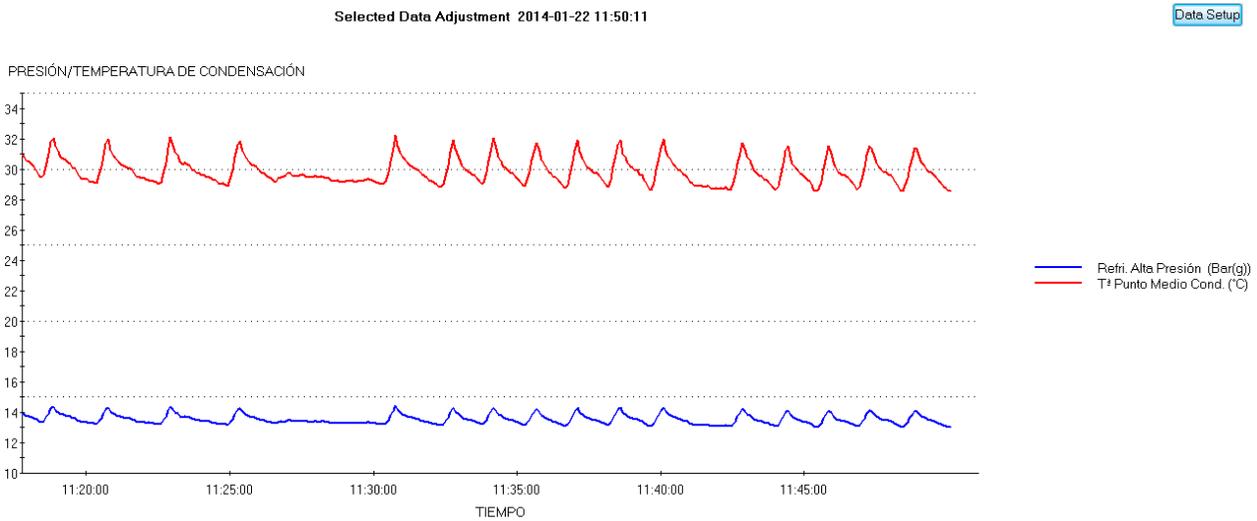
REFRIGERANTE	R-507	R-407F	R-407A	R-442A
POTENCIA FRIGORÍFICA (KW)	30	32	32	35-40
POTENCIA CALORÍFICA (KW)	45	47	46	50-60

1.4- Comparación de presiones/temperaturas de condensación de los refrigerantes.

Veamos ahora la relación entre las presiones y temperaturas de condensación de los cuatro refrigerantes.

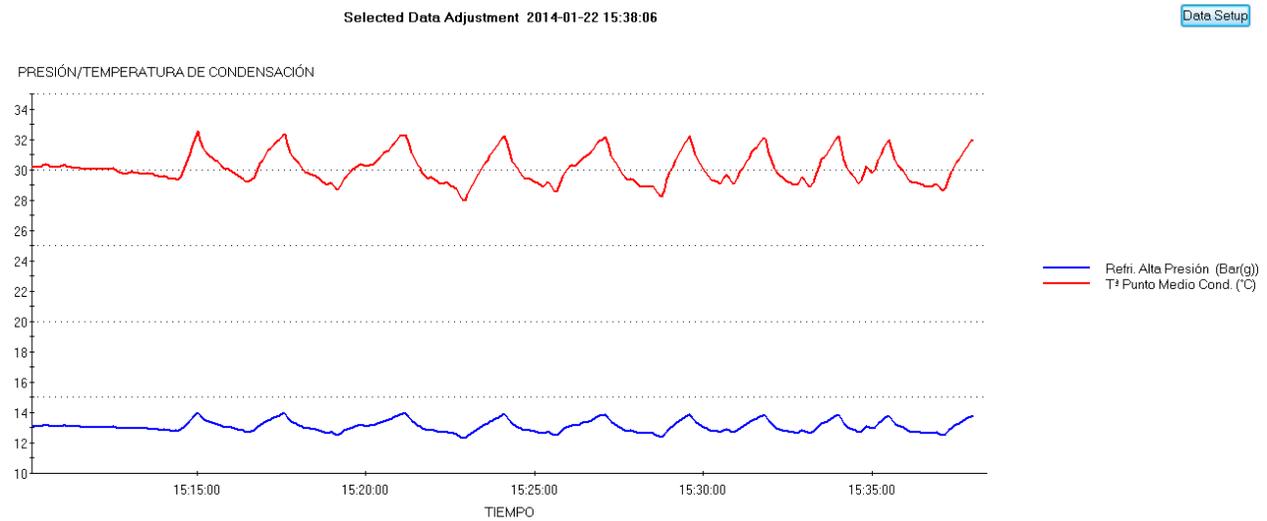
1.4.1.- Presión/temperatura de condensación con R-507.

La temperatura de condensación es estable alrededor de 30°C, que corresponde a una HP aproximada de 13.76 bar.



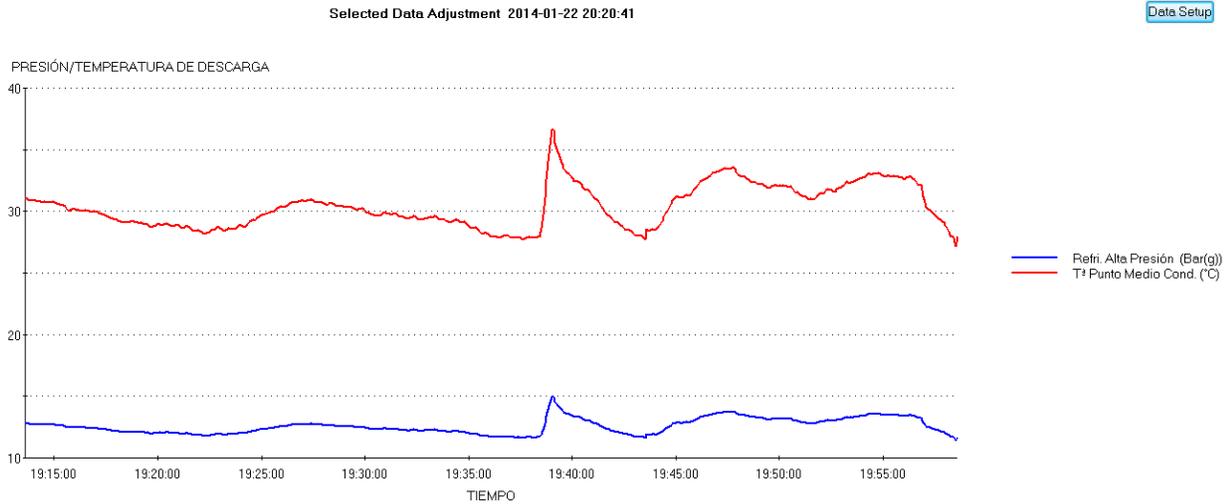
1.4.2.-Presión/temperatura de condensación con R-407F.

La temperatura de condensación es estable alrededor de 30°C, que corresponde a una HP aproximada de 13 bar.



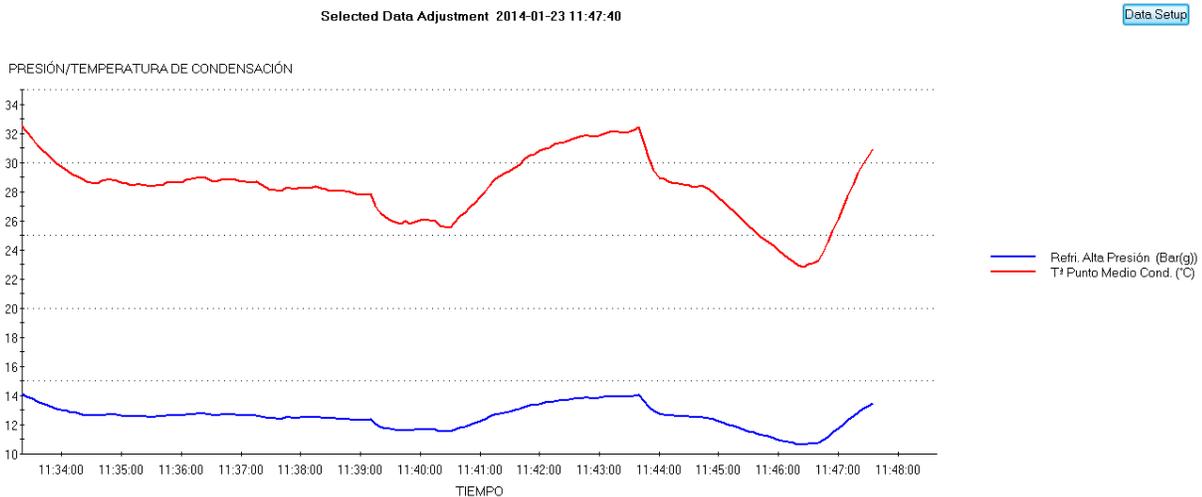
1.4.3.-Presión/temperatura de condensación con R-407A.

La temperatura de condensación es estable alrededor de 30°C, que corresponde a una HP aproximada de 13 bar.



1.4.3.-Presión/temperatura de condensación con R-442A.

La temperatura de condensación es estable alrededor de 28.5 °C, que corresponde a una HP aproximada de 13 bar.



Conclusiones:

REFRIGERANTE	R-507	R-407F	R-407A	R-442A
PRESIÓN DE CONDENSACIÓN (Bar)	14	13	13	13
TEMPERATURA DE CONDENSACIÓN (°C)*	30	30	30	28.5

NOTA: nos referimos a la temperatura media de condensación, omitiendo el deslizamiento propio de R-407A, R-407F y R-442A.*