

3.5.3.2. Termopares

Los termopares de la instalación son del tipo T (Cu / Cu – Ni) Clase 1. Este tipo de termopares tiene un rango teórico entre -270 °C y 400 °C, aunque como el material aislante empleado es teflón y el diámetro de los cables es de 0,2 mm, hacen que el rango real sea bastante inferior.

Este tipo de termopar posee una baja tolerancia, del orden de $\pm 0,5$ °C para el rango de temperaturas entre -40 °C y 125 °C.

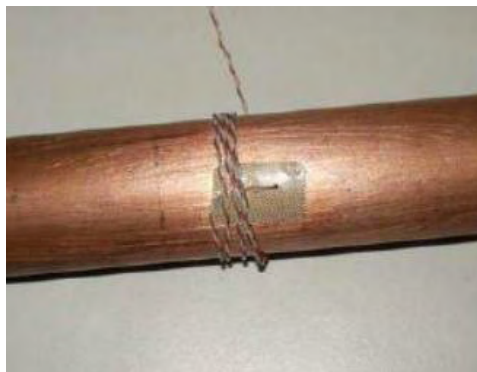


Ilustración 36. Termopar.

3.5.3.3. Caudalímetros

- Caudalímetro del caudal másico de refrigerante:



Ilustración 37. Siemens MASS 6000 Compacto.



Ilustración 38. Sensor SITRANS FC300 DN4.

- **Caudalímetros del fluido secundario del condensador y del evaporador:**



Ilustración 39. AXF Yokogawa.

3.5.4. Descripción del sistema de adquisición de datos de la instalación

Para conseguir un correcto aprovechamiento de todos los sensores de obtención de datos, hay instalados una serie de módulos encargados de convertir señales eléctricas, como corrientes y tensiones, en señales digitales.

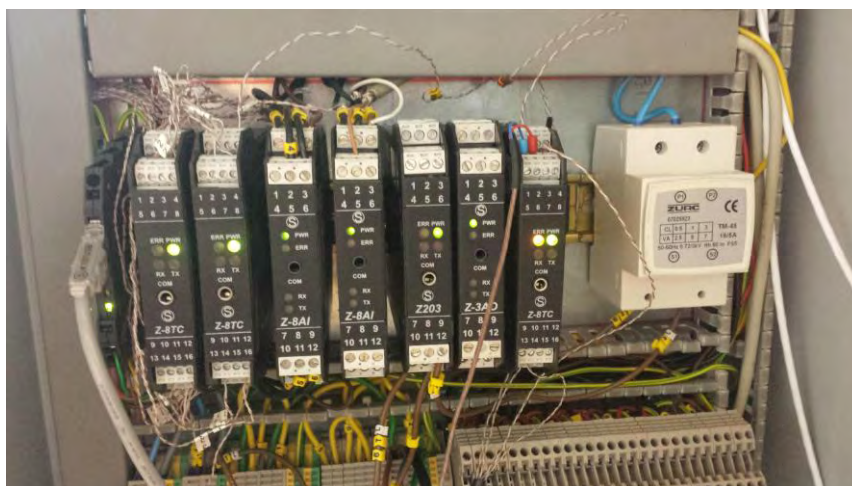


Ilustración 40. Sistema de adquisición de datos.

Estos módulos permiten recopilar todos los datos que los diversos sensores van midiendo. Estos datos son enviados mediante una interfaz Master-slave a un ordenador para su posterior análisis.

En la siguiente figura se puede observar la función de cada módulo de adquisición de datos:

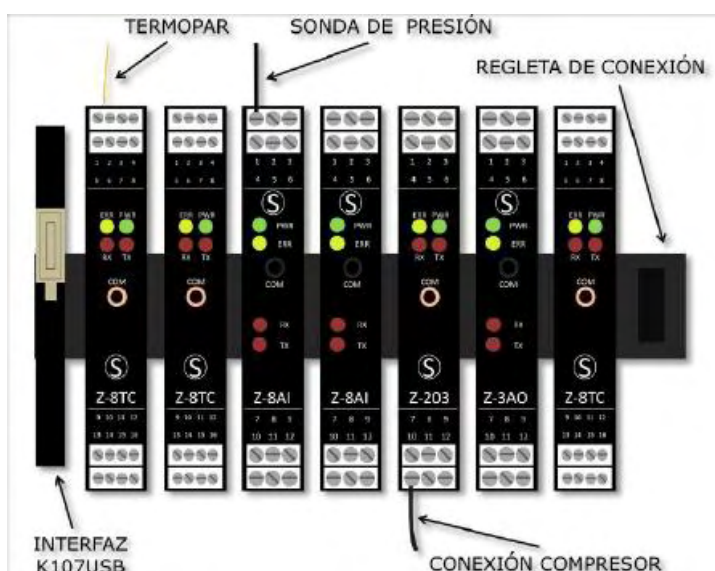


Ilustración 41. Descripción del sistema de adquisición de datos.

La unidad de adquisición de datos está formada por siete módulos y una interfaz K107USB, conectada a una regleta de conexión. La interfaz de conexión ordenador – módulos actúa mediante el protocolo Master – Slave o Cliente – Servidor. El master ordena a los diferentes slaves que le proporcione los valores de lectura que necesite, transmitiendo así la dirección de información desde el master al slave.

El K107USB es un dispositivo de conexión que funciona a través de un puerto USB. Además, cuenta con una velocidad de transmisión de datos de 1200 bps y un consumo máximo de 60 mA. La temperatura ambiente para una correcta adquisición de datos no debe ser inferior a -20 °C o superior a 65 °C.

Aunque en la figura haya siete módulos, sólo hay cuatro tipos de modelo diferentes.

- **Z – T8C:** es un dispositivo que mide el voltaje de los termopares y registra dichos valores. En la instalación se han instalado tres módulos Z – T8C debido a la necesidad de dar entrada a 19 termopares.
- **Z – 8AI:** es un dispositivo que mide el voltaje o la corriente y registra dichos valores para poder ser enviados para su posterior análisis. En la instalación se han instalado dos módulos Z – 8AI debido a la necesidad de dar entrada a 6 sondas de presión y 3 caudalímetros.
- **Z – 203:** es un analizador de red capaz de proporcionar magnitudes como voltaje, intensidad, frecuencia, potencia, etc. En la instalación será el encargado de analizar el comportamiento del compresor.
- **Z – 3AO:** es un convertidor de señal analógica en señal 4 – 20 mA.

Cada módulo cuenta con cuatro LEDs instalados para un mayor control de los diferentes dispositivos. Los LEDs van acompañados de unas siglas cuyo significado es el siguiente:

CODIFICACIÓN DE COLORES (LEDS)	
 PWR	PRESENCIA DE ALIMENTACIÓN
 ERR	ERROR
 RX	RECEPCIÓN CON LA GUÍA RS485
 TX	TRANSMISIÓN DE LA GUÍA RS485

Ilustración 42. Codificación de colores del sistema de adquisición de datos.

3.5.5. Descripción de la aplicación SCADA

Con el fin de poder hacer una buena gestión de los valores que se reciben del sistema de adquisición de datos, se debe tener un software capaz de conseguir transformar los datos recibidos en forma de bits, en datos prácticos que nos proporcionen la información que se desee (presiones, temperaturas, etc.).

Gracias a esta aplicación, los datos recogidos se disponen de forma ordenada mediante interfaces gráficas que se actualizan en el tiempo.

En la siguiente figura se puede observar de manera gráfica la cadena de transformación:

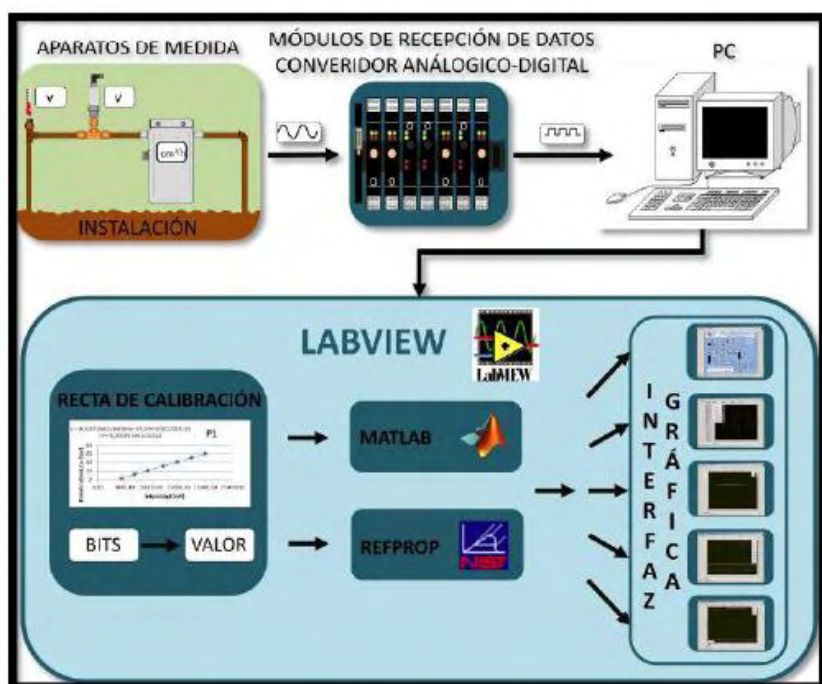


Ilustración 43. Descripción de la aplicación SCADA.

En el esquema anterior se muestra los cambios de señal que se producen y cómo es tratada la señal al llegar al ordenador. Cuando la señal es recibida por el ordenador, el software LABVIEW actúa. Este programa informático interactúa con otros programas como son REFPROP y MATLAB para conseguir adquirir las propiedades de los fluidos y realizar los cálculos necesarios, respectivamente.

El primer paso que realiza el software LABVIEW es buscar para cada señal digital, qué valor le corresponde. Para esta tarea el programa busca en las rectas de calibración de cada elemento de medida y almacena el dato. Una vez conocidos los valores prácticos de la instalación, LABVIEW procede a ordenarlos y disponerlos de forma que se facilite el análisis del comportamiento de la instalación.

LABVIEW interacciona con dos programas. El REFPROP actúa como base de datos y es el encargado de referenciar los valores experimentales obtenidos en la instalación, y por tanto, poder determinar todas las propiedades termodinámicas del fluido. Por otro lado, MATLAB es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio, y por tanto, es el encargado de realizar los cálculos necesarios.

Una vez los datos han sido tratados, LABVIEW puede mostrar dichos datos mediante interfaces gráficas que facilitarán el posterior estudio. En esta instalación se han dispuesto 6 pestañas diferentes: esquema de la instalación, presiones, temperaturas, potencias y caudales, propiedades y diagrama del ciclo.

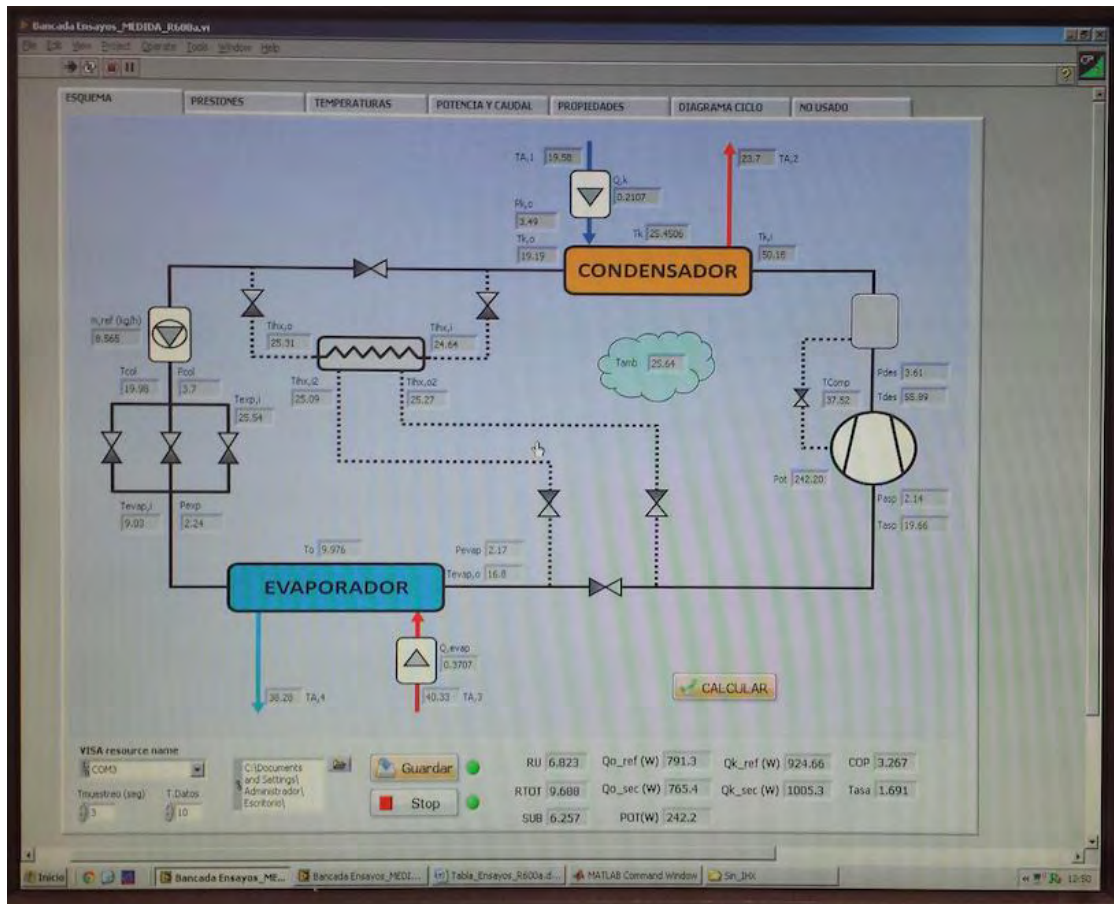


Ilustración 44. Primera pestaña (ESQUEMA).

La primera pestaña se titula **ESQUEMA**. En esta pestaña se muestra un esquema de la instalación principal y secundaria, con sus respectivos dispositivos de medida. Gracias a este esquema, la persona encargada de realizar los ensayos es capaz de ver todos los datos significativos que se obtienen instantáneamente. También es una buena herramienta para poder detectar un mal funcionamiento de la instalación, identificando temperaturas, presiones o caudales inadecuados.

Se han dispuesto dos recuadros: uno para poder introducir la frecuencia (en segundos) del tiempo de muestreo y otro para poder introducir la frecuencia (en segundos) del tiempo de adquisición.

Se ha dispuesto también de un botón, en el cual se puede seleccionar la carpeta donde se quieren guardar dichos datos.

Por último, se ha dispuesto de un botón llamado **GUARDAR** para guardar los datos en un archivo. Para detener el registro de datos debe pulsarse **STOP**.

La segunda pestaña muestra la representación gráfica de las lecturas de las 6 sondas de presión. Dichas presiones están representadas en función del tiempo.

La gráfica de presiones se muestra a continuación:

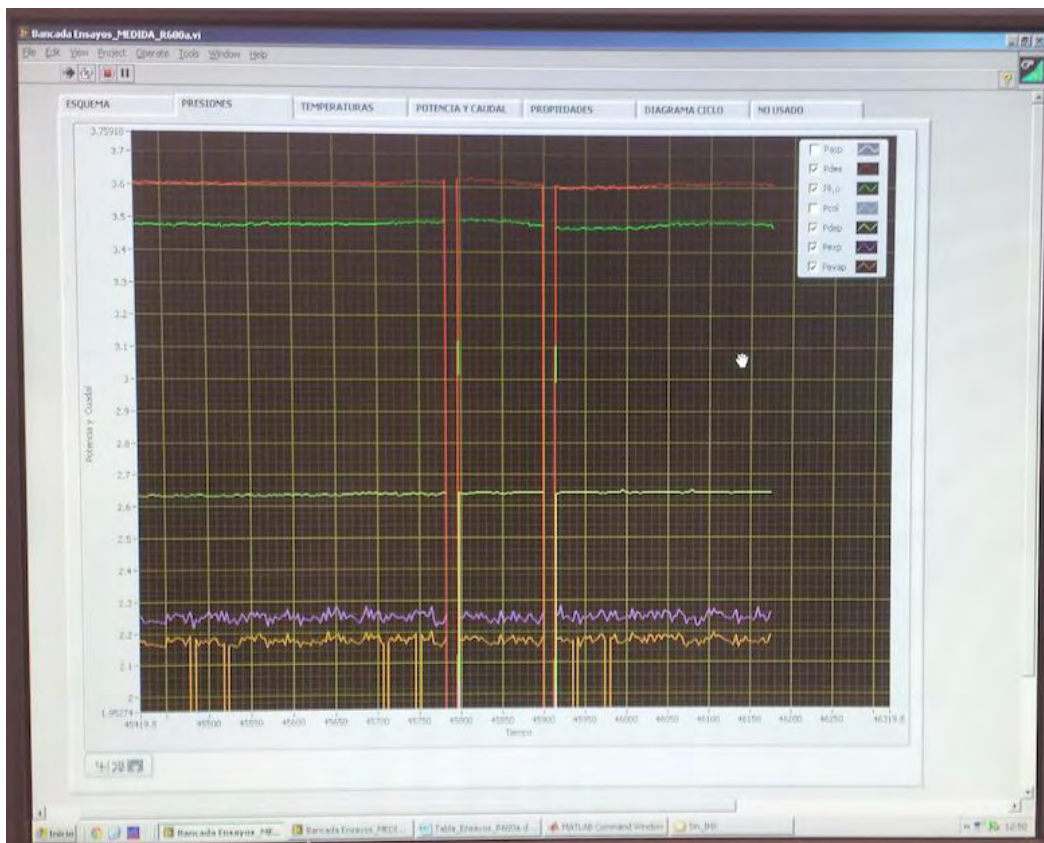


Ilustración 45. Segunda pestaña (PRESIONES).

Para poder sacarle el máximo partido a la aplicación, se ha dispuesto diferentes opciones de gráfico que se especifican en la siguiente tabla:

	PULSANDO Y ARRASTRANDO DEPLAZA LA GRÁFICA
	PULSANDO ESTE MARCADOR SE REESTABLECE EL GRÁFICO EN SU FORMA DE LECTURA PREDETERMINADA
	PULSANDO ESTE MARCADOR SE DESPLEGA EL MENU DE OPCIONES
	SE AMPLIA LA ZONA SELECCIONADA
	SE VE TODOS LOS GRÁFICOS SELECCIONADOS
	SE AMPLIA LA ZONA MARCADA POR DOS MARGENES VERTICALES
	PULSANDO REPETIDAS VECES SE AMPLIA LA ZONA DE ALREDEDOR
	SE AMPLIA LA ZONA MARCADA POR DOS MARGENES HORIZONTALES
	PULSANDO REPETIDAS VECES SE REDUCE LA ZONA DE ALREDEDOR

Ilustración 46. Opciones del gráfico.

Siguiendo con el análisis de la interfaz gráfica de presiones, en la parte superior derecha se ha dispuesto una leyenda de cada una de las sondas de presión para su identificación en la gráfica. Esta leyenda dispone de diversos marcadores con el fin de poder visualizar sólo las presiones que se deseen. Esta acción resulta de gran utilidad cuando se requiere realizar un seguimiento de una presión en concreto. Esta interfaz es imprescindible para controlar que las presiones de toda la instalación sean estables y poder realizar así un correcto ensayo. Esta gráfica permite detectar fugas, ya que si la tendencia de presiones es descendiente puede que exista una fuga en la instalación.

La tercera pestaña muestra la evolución de las temperaturas en función del tiempo.

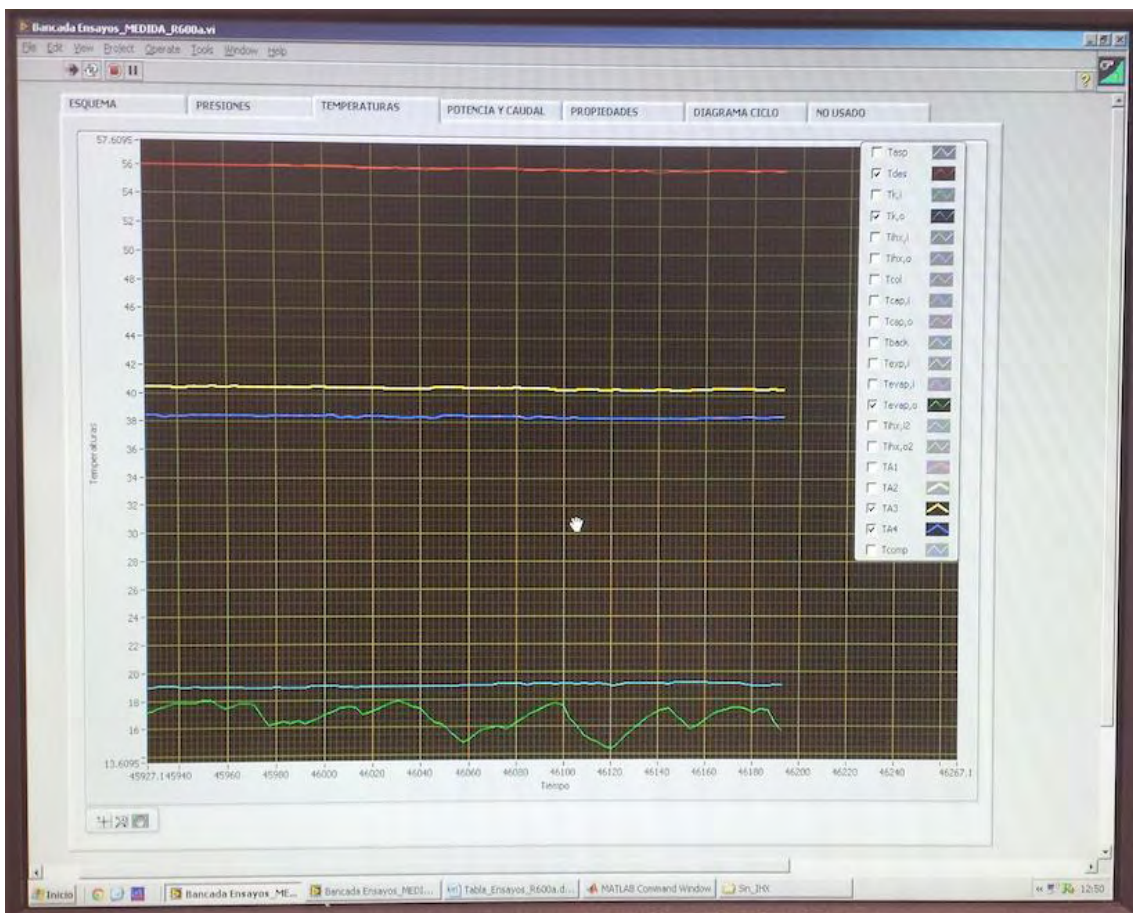


Ilustración 47. Tercera pestaña (TEMPERATURAS).

En esta gráfica se representan los datos leídos por todos los termopares de la instalación. Como en la gráfica de presiones, la gráfica de temperaturas también posee en la parte superior derecha de la imagen, una serie de leyendas con unos marcadores para poder visualizar sólo las temperaturas que se deseen. Esta gráfica nos permite ver que las en qué momento las temperaturas son estables, y por tanto, se puede proceder a la adquisición de datos.

A continuación se muestra la cuarta y última pestaña, ya que la quinta no se ha utilizado para estos ensayos. Esta pestaña muestra el caudal de refrigerante, los dos caudales de agua y la potencia consumida por el compresor.

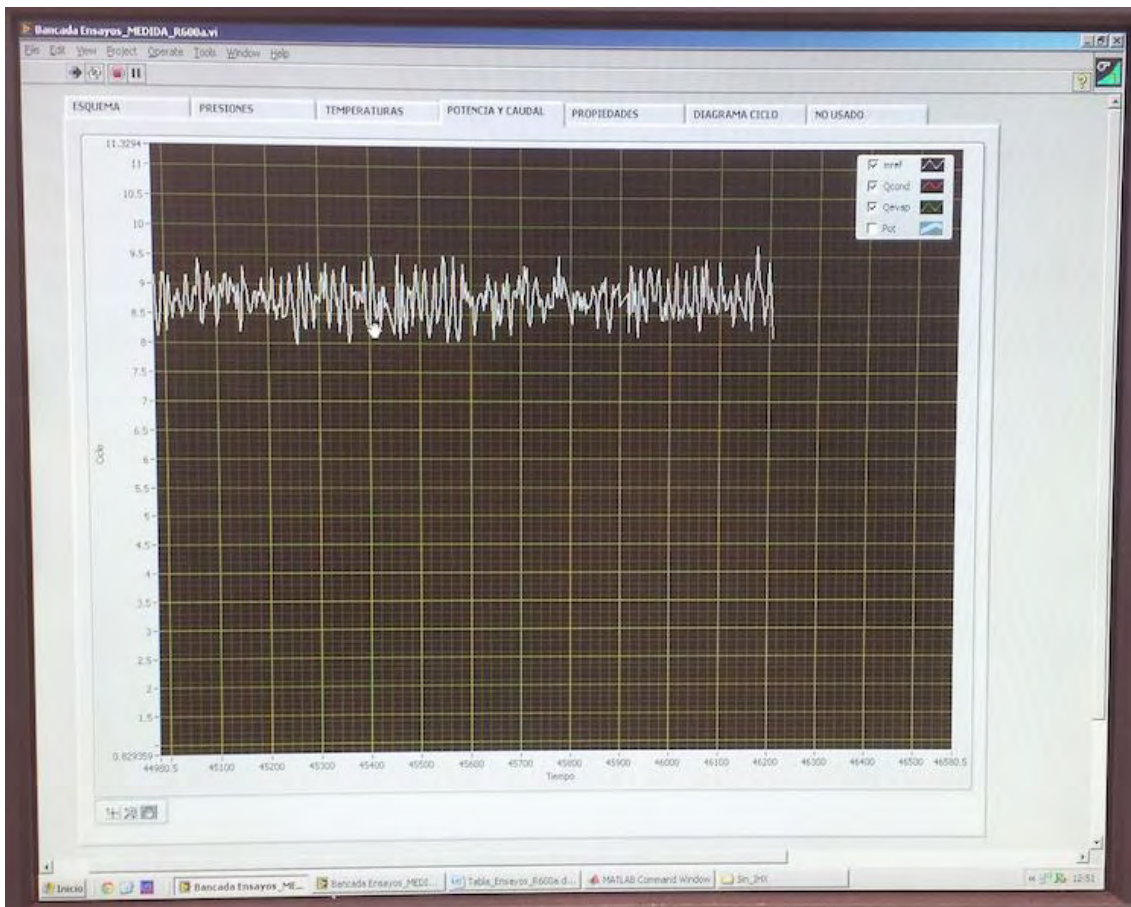


Ilustración 48. Cuarta pestaña (POTENCIA Y CAUDAL).

3.6. Metodología de ensayos empleada

Una vez realizada la monitorización de toda la instalación, se procede a la realización de los ensayos. El ensayo del refrigerante R134a fue realizado para la redacción de otro proyecto de investigación. Por lo tanto, para este proyecto únicamente se han realizado los ensayos para el refrigerante R600a.

Las siguientes tablas muestran las condiciones a las cuales debe mantenerse la instalación para los diferentes ensayos realizados.

R134a

Carga de R134a (contando el depósito intermedio e IHX): **1226 g**

Teva (°C)	Peva (bar)	Tcond (°C)	Pcond (bar)	SUB (K)	RU (K)
10 ± 0.5	[4.08÷4.22]	45 ± 0.5	[11.45÷11.75]	3 ± 1	10 ± 1
10 ± 0.5	[4.08÷4.22]	35 ± 0.5	[8.75÷8.99]	3 ± 1	10 ± 1
10 ± 0.5	[4.08÷4.22]	25 ± 0.5	[6.56÷6.75]	3 ± 1	10 ± 1
Teva (°C)	Peva (bar)	Tcond (°C)	Pcond (bar)	SUB (K)	RU (K)
0 ± 0.5	[2.88÷2.98]	45 ± 0.5	[11.45÷11.75]	3 ± 1	10 ± 1
0 ± 0.5	[2.88÷2.98]	35 ± 0.5	[8.75÷8.99]	3 ± 1	10 ± 1
0 ± 0.5	[2.88÷2.98]	25 ± 0.5	[6.56÷6.75]	3 ± 1	10 ± 1
Teva (°C)	Peva (bar)	Tcond (°C)	Pcond (bar)	SUB (K)	RU (K)
-10 ± 0.5	[1.97÷2.05]	45 ± 0.5	[11.45÷11.75]	1 ± 1	10 ± 1
-10 ± 0.5	[1.97÷2.05]	35 ± 0.5	[8.75÷8.99]	1 ± 1	10 ± 1
-10 ± 0.5	[1.97÷2.05]	25 ± 0.5	[6.56÷6.75]	1 ± 1	10 ± 1

Tabla 29. Metodología de ensayos empleada para el R134a.

R600a

Carga de R600a (contando el depósito intermedio e IHX): **234 g**

Teva (°C)	Peva (bar)	Tcond (°C)	Pcond (bar)	SUB (K)	RU (K)
10 ± 0.5	[2.24÷2.17]	45 ± 0.5	[6.12÷5.97]	3 ± 1	5 ± 1
10 ± 0.5	[2.24÷2.17]	35 ± 0.5	[4.71÷4.58]	3 ± 1	5 ± 1
10 ± 0.5	[2.24÷2.17]	25 ± 0.5	[3.56÷3.46]	3 ± 1	5 ± 1
Teva (°C)	Peva (bar)	Tcond (°C)	Pcond (bar)	SUB (K)	RU (K)
0 ± 0.5	[1.60÷1.54]	45 ± 0.5	[6.12÷5.97]	3 ± 1	5 ± 1
0 ± 0.5	[1.60÷1.54]	35 ± 0.5	[4.71÷4.58]	3 ± 1	5 ± 1
0 ± 0.5	[1.60÷1.54]	25 ± 0.5	[3.56÷3.46]	3 ± 1	5 ± 1
Teva (°C)	Peva (bar)	Tcond (°C)	Pcond (bar)	SUB (K)	RU (K)
-10 ± 0.5	[1.11÷1.06]	45 ± 0.5	[6.12÷5.97]	3 ± 1	5 ± 1
-10 ± 0.5	[1.11÷1.06]	35 ± 0.5	[4.71÷4.58]	3 ± 1	5 ± 1
-10 ± 0.5	[1.11÷1.06]	25 ± 0.5	[3.56÷3.46]	3 ± 1	5 ± 1

Tabla 30. Metodología de ensayos empleada para el R600a.

Hay tres factores importantes a tener en cuenta antes de realizar la adquisición de datos:

1. La potencia disipada por el condensador medida con el caudal de refrigerante debe ser igual o similar a la potencia disipada por el condensador medida con el caudal de agua del circuito secundario del condensador.
2. Las temperaturas y presiones del condensador y evaporador deben estar dentro del rango que se especifica en las tablas anteriores.
3. El recalentamiento útil y el subenfriamiento debe estar dentro del rango también.

A continuación se muestran diversas preguntas que uno se hace cuando intenta llevar la instalación a las condiciones de temperatura y presión deseadas.

1. ¿Cómo aumentar o disminuir la temperatura del evaporador?

- **Actuando sobre el caudal de agua del circuito evaporador:** se puede actuar sobre el caudal variando la frecuencia de alimentación del motor eléctrico de la bomba o abriendo y cerrando las válvulas de regulación.
 - Para disminuir la T_o hay que disminuir el Q_o .
 - Para aumentar la T_o hay que aumentar el Q_o .
- **Actuando sobre la temperatura del agua del circuito evaporador:** sólo existe la posibilidad de aumentar la temperatura del tanque mediante resistencias eléctricas.
 - Para disminuir la T_o hay que disminuir la $T_{A,3}$.
 - Para aumentar la T_o hay que aumentar la $T_{A,3}$.

2. ¿Cómo aumentar o disminuir la presión del evaporador?

La presión del evaporador será función directa de la T_o del evaporador.

3. ¿Cómo aumentar o disminuir la temperatura del condensador?

- **Actuando sobre el caudal de agua del circuito condensador:** sólo se puede actuar sobre el caudal abriendo o cerrando las válvulas de regulación.
 - Para disminuir la T_k hay que aumentar el Q_k .
 - Para aumentar la T_k hay que disminuir el Q_k .
- **Actuando sobre la temperatura del agua del circuito condensador:** se puede actuar sobre la temperatura $T_{A,1}$, variando la frecuencia de alimentación del motor eléctrico que mueve el ventilador que refrigera el intercambiador de tubos y placas. En caso de necesitar disminuir mucho la $T_{A,1}$ existe la posibilidad de enchufar la máquina frigorífica.
 - Para disminuir la T_k hay que disminuir $T_{A,1}$.
 - Para aumentar la T_k hay que aumentar $T_{A,1}$.

4. ¿Cómo aumentar o disminuir la presión del condensador?

La presión del condensador será función directa de la T_k del condensador.

5. ¿Cómo aumentar o disminuir la temperatura de subenfriamiento?

Añadiendo o quitando carga de fluido frigorígeno.

6. ¿Cómo aumentar o disminuir la temperatura de recalentamiento útil?

La temperatura de recalentamiento útil se puede regular mediante un autómata que actúa sobre la válvula de expansión, abriendo o cerrando en función de la temperatura deseada.

3.6.1. Datos adquiridos

- **Compresor**
 - **Tasp** = temperatura de aspiración (°C)
 - **Pasp** = presión de aspiración (bar)
 - **Tcomp** = temperatura superficial (°C)
 - **Pot** = potencia consumida (W)
 - **Tdes** = temperatura de descarga (°C)
 - **Pdes** = presión de descarga (bar)

- **Condensador**
 - **Tk,i** = temperatura de entrada del refrigerante (°C)
 - **Tk,o** = temperatura de salida del refrigerante (°C)
 - **Pk,o** = presión de salida del refrigerante (bar)
 - **Q,k** = caudal de agua del equipo secundario (m^3/h)
 - **TA,1** = temperatura de entrada del agua (°C)
 - **TA,2** = temperatura de salida del agua (°C)

- **Intercambiador intermedio (IHx)**
 - **Tihx,i** = temperatura de entrada en alta presión (°C)
 - **Tihx,o** = temperatura de salida en alta presión (°C)
 - **Tihx,i2** = temperatura de entrada en baja presión (°C)
 - **Tihx,o2** = temperatura de salida en baja presión (°C)

- **Colector**
 - **Tcol** = temperatura (°C)
 - **Pcol** = presión (°C)

- **Válvula de expansión**
 - **Texp,i** = temperatura de entrada (°C)
 - **Pexp** = presión de descarga (bar)

- **Evaporador**
 - **Tevap,i** = temperatura de entrada del refrigerante (°C)
 - **Tevap,o** = temperatura de salida del refrigerante (°C)
 - **Pevap** = presión de salida del refrigerante (bar)
 - **Q,evap** = caudal de agua glicolada del equipo secundario (m^3/h)
 - **TA,3** = temperatura de entrada del agua glicolada (°C)
 - **TA,4** = temperatura de salida del agua glicolada (°C)

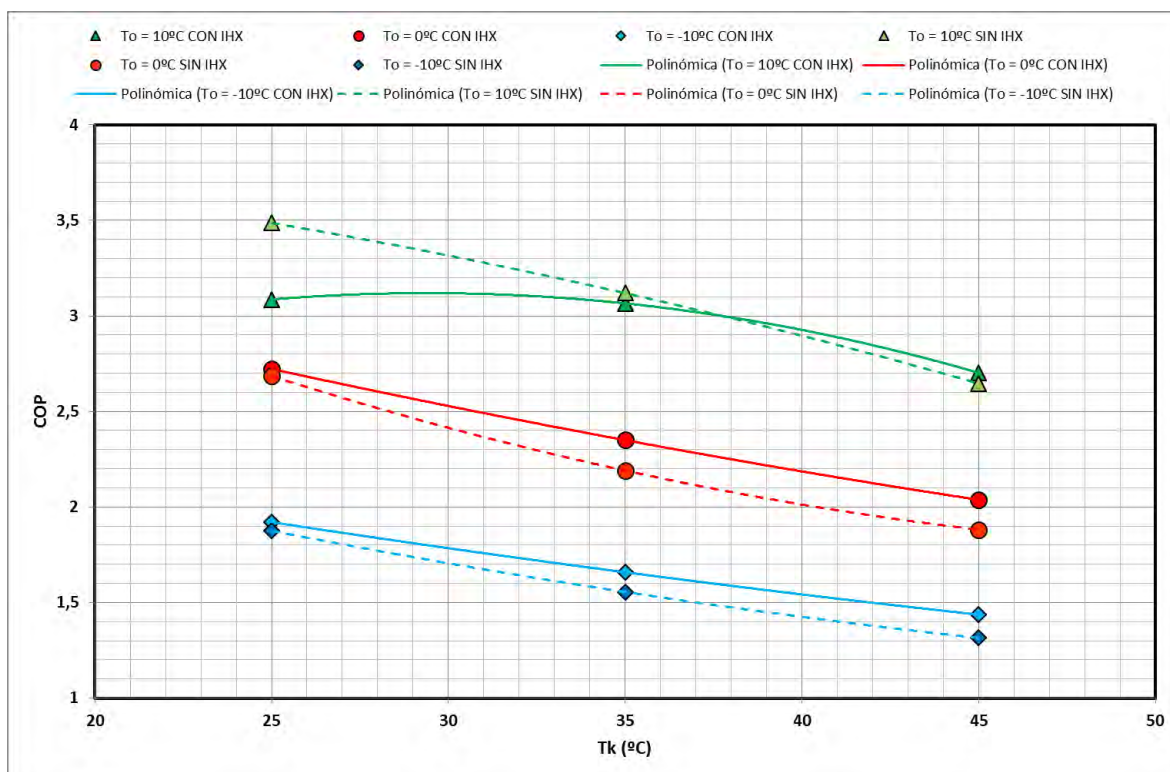
- **Otros datos**
 - **m,ref** = caudal másico de refrigerante que circula por la instalación principal (Kg/s)
 - **Tamb** = temperatura ambiente (°C)

3.7. Comparativa experimental del R600a con vs. sin IHX

3.7.1. COP

La siguiente ecuación muestra cómo se calcula el COP de la instalación:

$$COP = \frac{\dot{Q}_o}{P_c}$$



Gráfica 7. Comparativa del COP vs. Tk del R600a con vs. sin IHX.

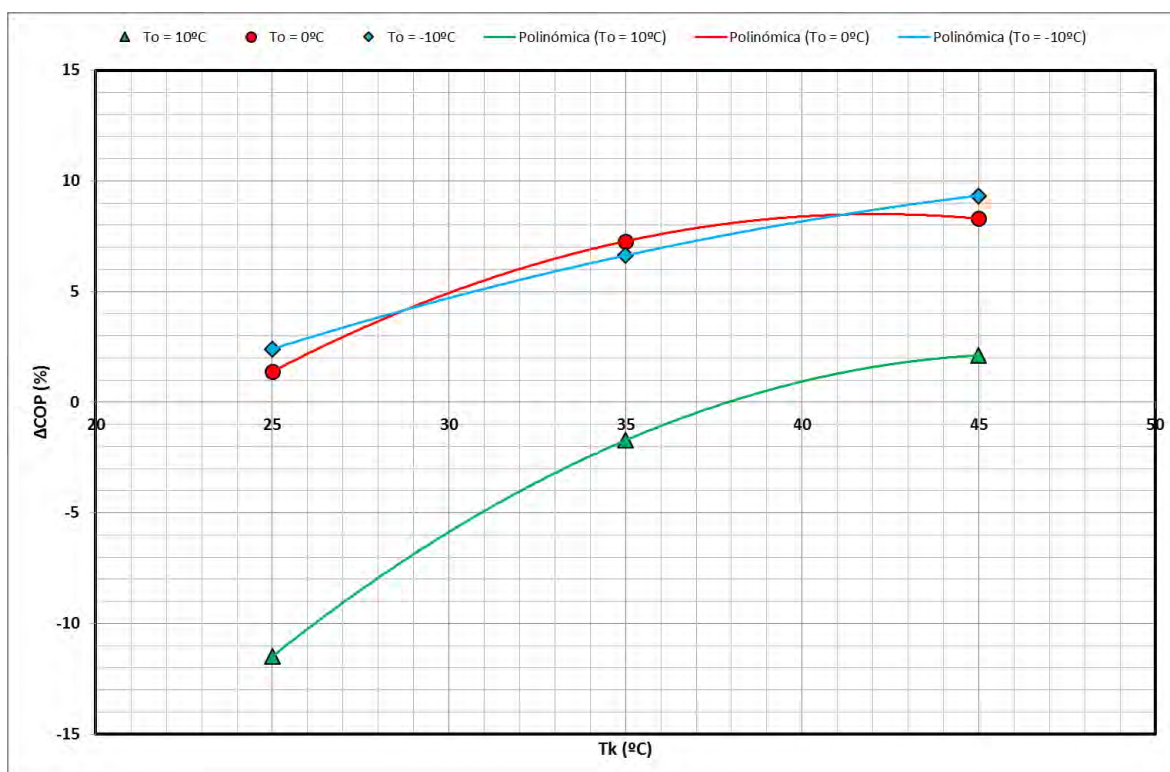
Los valores del COP han sido representados en valor promedio para una mejor presentación de la gráfica. La línea continua representa los valores de COP con IHX, mientras que la línea discontinua representa los valores de COP sin IHX. Para temperaturas de evaporación inferiores a 0 °C, el COP con IHX es superior al COP sin IHX, para todo el rango de temperaturas de condensación. Sin embargo, para una temperatura de condensación de 10 °C, el COP con IHX no es superior al COP sin IHX, para todo el rango de temperaturas de condensación.

Para una temperatura de evaporación de -10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el COP con IHX oscila entre 1,44 y 1,92, mientras que el COP sin IHX oscila entre 1,31 y 1,88 (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 0 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el COP con IHX oscila entre 2,04 y 2,72, mientras que el COP sin IHX oscila entre 1,88 y 2,69 (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el COP con IHX oscila entre 2,7 y 3,09, mientras que el COP sin IHX oscila entre 2,65 y 3,49 (valores promedio).

$$\Delta COP (\%) = \frac{COP_{R600a \text{ con IHX}} - COP_{R600a \text{ sin IHX}}}{COP_{R600a \text{ sin IHX}}} \cdot 100$$



Gráfica 8. Comparativa del incremento de COP vs. Tk en % del R600a con vs. sin IHX.

Para las temperaturas de evaporación inferiores a 0 °C, el COP con IHX es superior al COP sin IHX, para todo el rango de temperaturas de condensación.

Sin embargo, para una temperatura de evaporación de 10 °C, el COP con IHX no es superior al COP sin IHX hasta que se alcanza una temperatura de condensación de unos 38 °C.

Para una temperatura de evaporación de -10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el ΔCOP (%) oscila entre un 2,4 % y un 9,33 % (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 0 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el ΔCOP (%) oscila entre un 1,38 % y un 8,29 % (valores promedio).

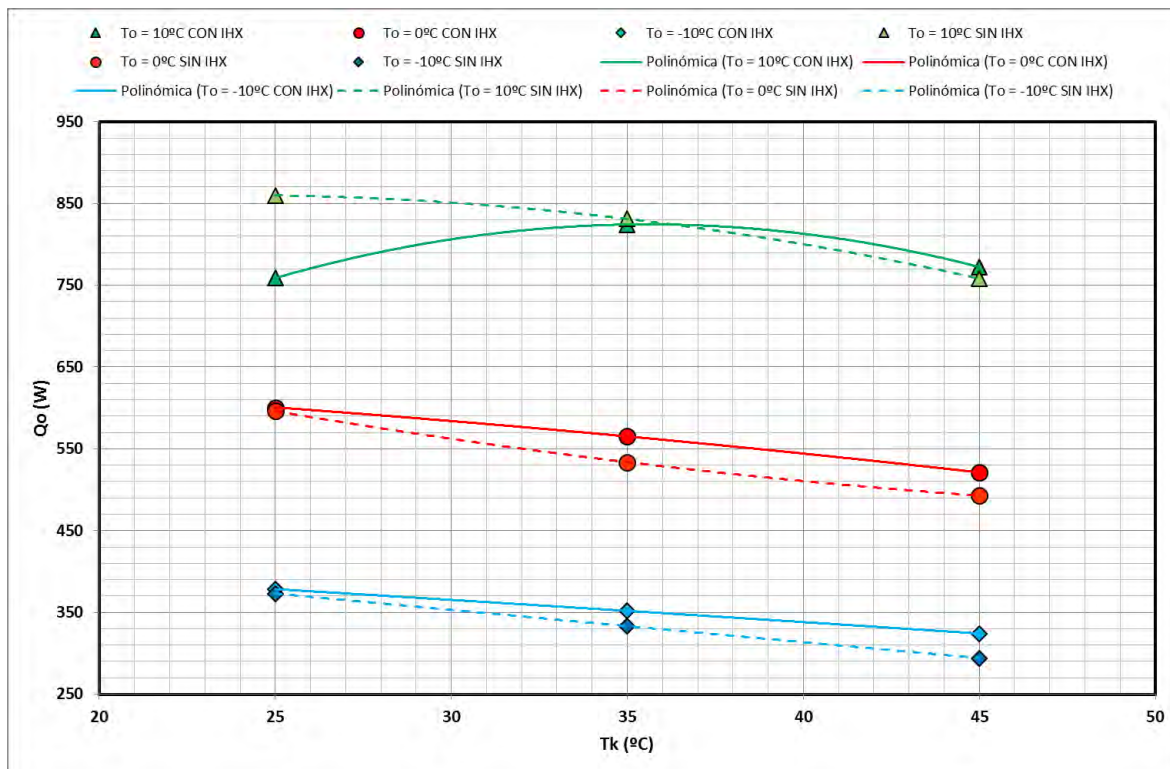
Para una temperatura de evaporación de 10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el ΔCOP (%) oscila entre un -11,48 % y un 2,11 % (valores promedio).

En general, se observa que cuanto más restrictivas son las condiciones de evaporación y condensación, mayor es el beneficio del intercambiador intermedio.

3.7.2. Potencia frigorífica (\dot{Q}_o)

La siguiente ecuación muestra cómo se calcula la potencia frigorífica producida por el evaporador:

$$\dot{Q}_o = \dot{m} \cdot q_o$$



Gráfica 9. Comparativa de la Qo vs. Tk del R600a con vs. sin IHX.

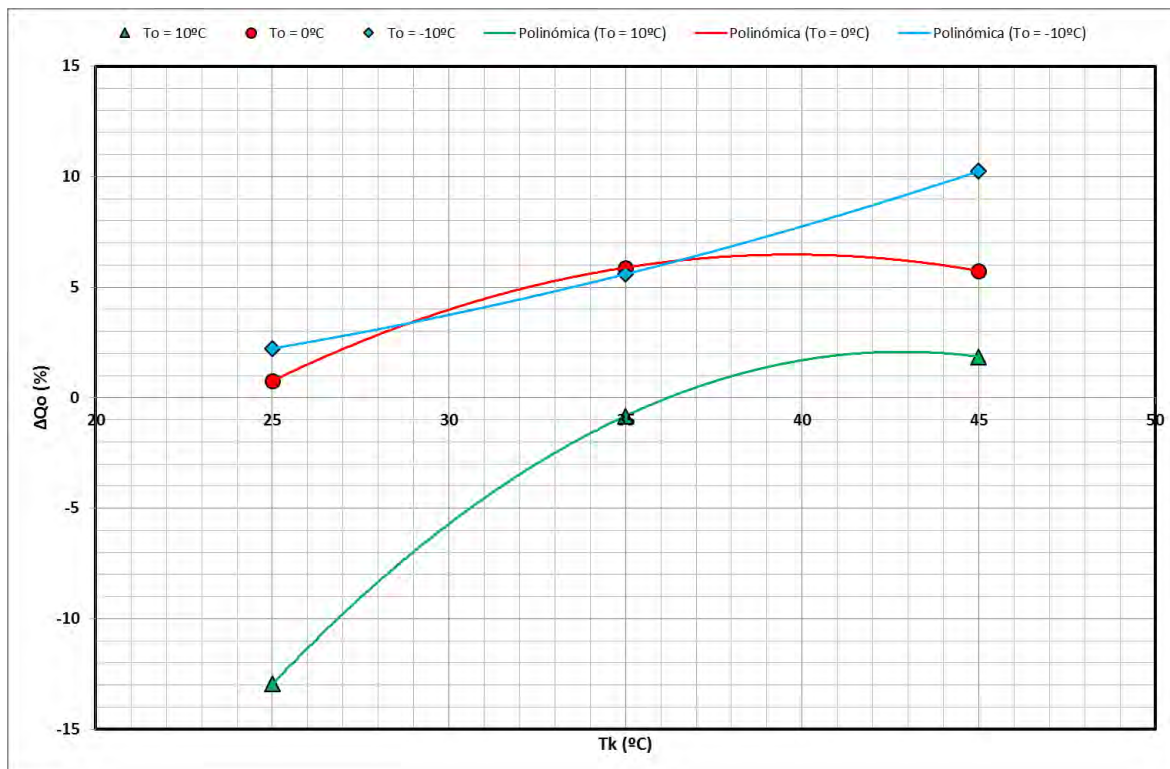
Los valores de la potencia frigorífica en el evaporador han sido representados en valor promedio para una mejor presentación de la gráfica. La línea continua representa los valores de potencia frigorífica con IHX, mientras que la línea discontinua representa los valores de potencia frigorífica sin IHX. Para temperaturas de evaporación inferiores a 0 °C, la potencia frigorífica con IHX es superior a la potencia frigorífica sin IHX, para todo el rango de temperaturas de condensación. Sin embargo, para una temperatura de condensación de 10 °C, la potencia frigorífica con IHX no es superior a la potencia frigorífica sin IHX, para todo el rango de temperaturas de condensación.

Para una temperatura de evaporación de -10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, la potencia frigorífica con IHX oscila entre 324 W y 378 W, mientras que la potencia frigorífica sin IHX oscila entre 294 W y 373 W (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 0 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, la potencia frigorífica con IHX oscila entre 521 W y 600 W, mientras que la potencia frigorífica sin IHX oscila entre 492 W y 596 W (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, la potencia frigorífica con IHX oscila entre 758 W y 772 W, mientras que la potencia frigorífica sin IHX oscila entre 758 W y 860 W (valores promedio).

$$\Delta \dot{Q}_o (\%) = \frac{\dot{Q}_o \text{ R600a con IHX} - \dot{Q}_o \text{ R600a sin IHX}}{\dot{Q}_o \text{ R600a sin IHX}} \cdot 100$$



Gráfica 10. Comparativa del incremento de la Qo vs. Tk en % del R600a con vs. sin IHX.

Para las temperaturas de evaporación inferiores a 0 °C, la potencia frigorífica con IHX es superior a la potencia frigorífica sin IHX, para todo el rango de temperaturas de condensación.

Sin embargo, para una temperatura de evaporación de 10 °C, la potencia frigorífica con IHX no es superior a la potencia frigorífica sin IHX hasta que se alcanza una temperatura de condensación de unos 36 °C.

Para una temperatura de evaporación de -10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el ΔQo (%) oscila entre un 2,23 % y un 10,24 % (valores promedio).

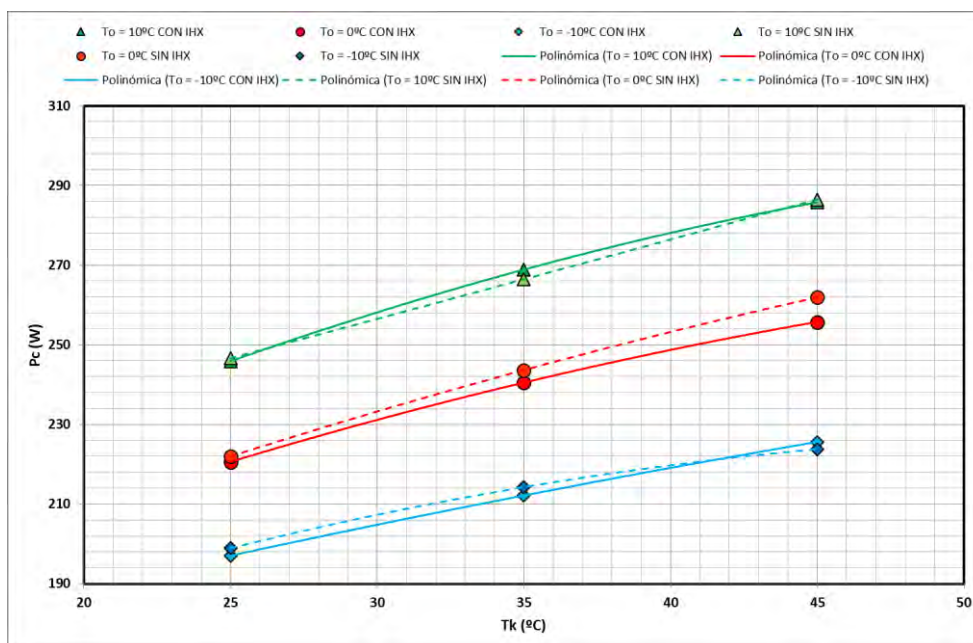
Para una temperatura de evaporación de 0 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el ΔQo (%) oscila entre un 0,76 % y un 5,74 % (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el ΔQo (%) oscila entre un -12,96 % y un 1,86 % (valores promedio).

3.7.3. Potencia consumida por el compresor (P_c)

La siguiente ecuación muestra cómo se calcula la potencia consumida por el compresor:

$$P_c = \dot{m} \cdot w_c$$



Gráfica 11. Comparativa de la P_c vs. T_k del R600a con vs. sin IHX.

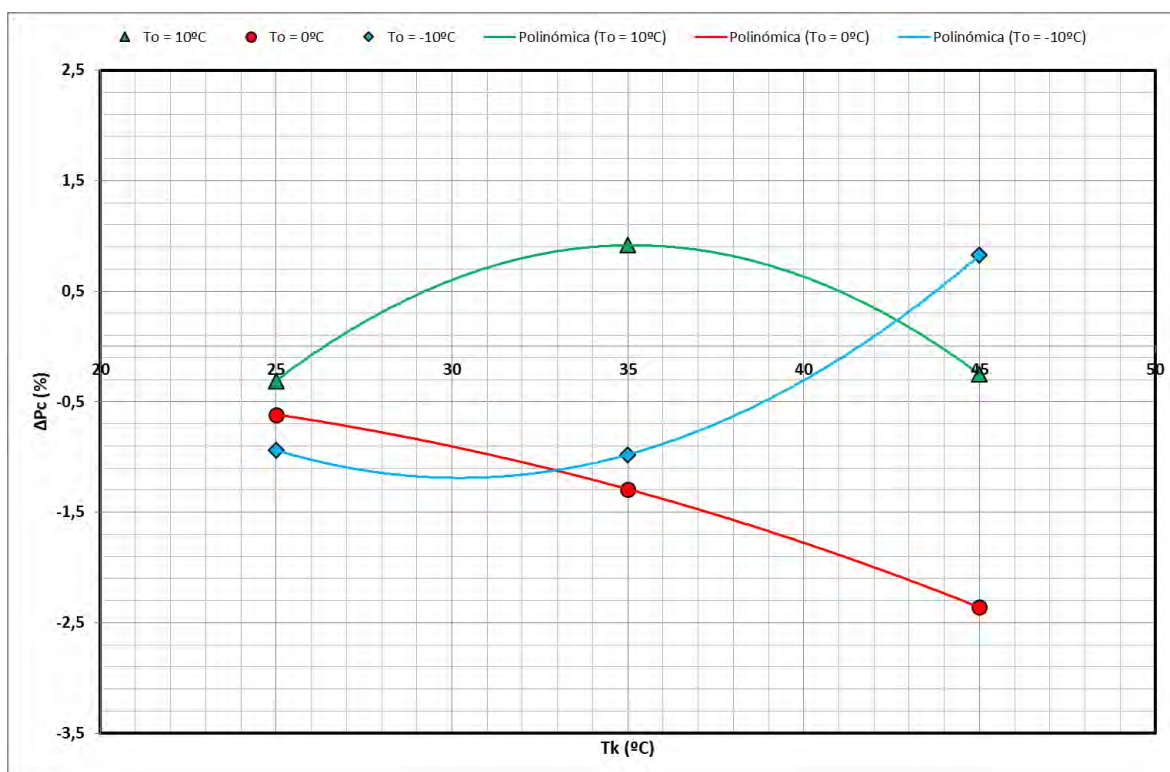
Los valores de la potencia consumida por el compresor han sido representados en valor promedio para una mejor presentación de la gráfica. La línea continua representa los valores de potencia consumida por el compresor con IHX, mientras que la línea discontinua representa los valores de potencia consumida por el compresor sin IHX. Para temperaturas de evaporación inferiores a 0 °C, la potencia consumida por el compresor con IHX es inferior a la potencia consumida por el compresor sin IHX, para casi todo el rango de temperaturas de condensación. Sin embargo, para una temperatura de condensación de 10 °C, la potencia consumida por el compresor con IHX es superior a la potencia consumida por el compresor sin IHX, para casi todo el rango de temperaturas de condensación.

Para una temperatura de evaporación de -10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, la potencia consumida por el compresor con IHX oscila entre 197 W y 225 W, mientras que la potencia consumida por el compresor sin IHX oscila entre 198 W y 224 W (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 0 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, la potencia consumida por el compresor con IHX oscila entre 220 W y 255 W, mientras que la potencia consumida por el compresor sin IHX oscila entre 222 W y 262 W (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, la potencia consumida por el compresor con IHX oscila entre 245 W y 285 W, mientras que la potencia consumida por el compresor sin IHX oscila entre 246 W y 286 W (valores promedio).

$$\Delta P_c (\%) = \frac{P_c R600a \text{ con IHX} - P_c R600a \text{ sin IHX}}{P_c R600a \text{ sin IHX}} \cdot 100$$



Gráfica 12. Comparativa del incremento de la Pc vs. Tk en % del R600a con vs. sin IHX.

Para las temperaturas de evaporación inferiores a 0 °C, la potencia consumida por el compresor con IHX es inferior a la potencia consumida por el compresor sin IHX, para casi todo el rango de temperaturas de condensación.

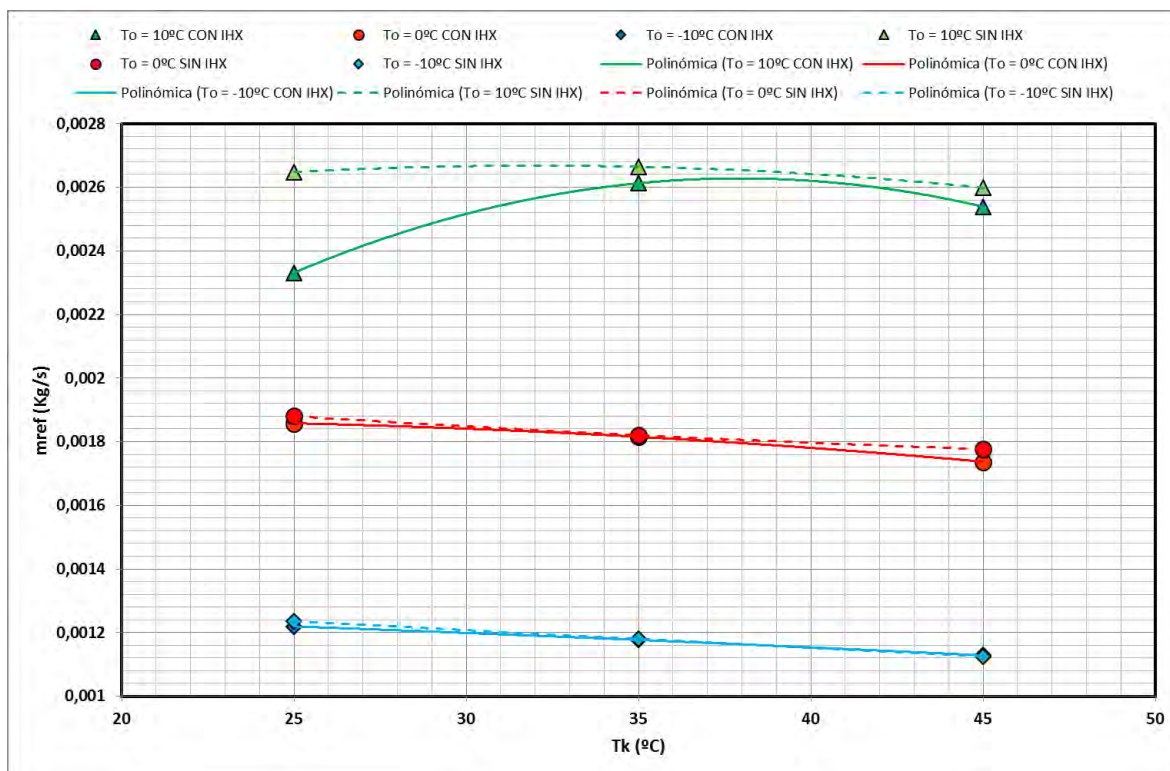
Sin embargo, para una temperatura de evaporación de 10 °C, la potencia consumida por el compresor con IHX es superior a la potencia consumida por el compresor sin IHX, para casi todo el rango de temperaturas de condensación.

Para una temperatura de evaporación de -10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el ΔP_c (%) oscila entre un -0,98 % y un 0,83 % (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 0 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el ΔP_c (%) oscila entre un -0,62 % y un -2,36 % (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el ΔP_c (%) oscila entre un -0,25 % y un 0,92 % (valores promedio).

3.7.4. Flujo másico de refrigerante (\dot{m}_{ref})



Gráfica 13. Comparativa del \dot{m}_{ref} vs. T_k del R600a con vs. sin IHX.

Los valores del flujo másico de refrigerante han sido representados en valor promedio para una mejor presentación de la gráfica. La línea continua representa los valores del flujo másico de refrigerante con IHX, mientras que la línea discontinua representa los valores del flujo másico de refrigerante sin IHX.

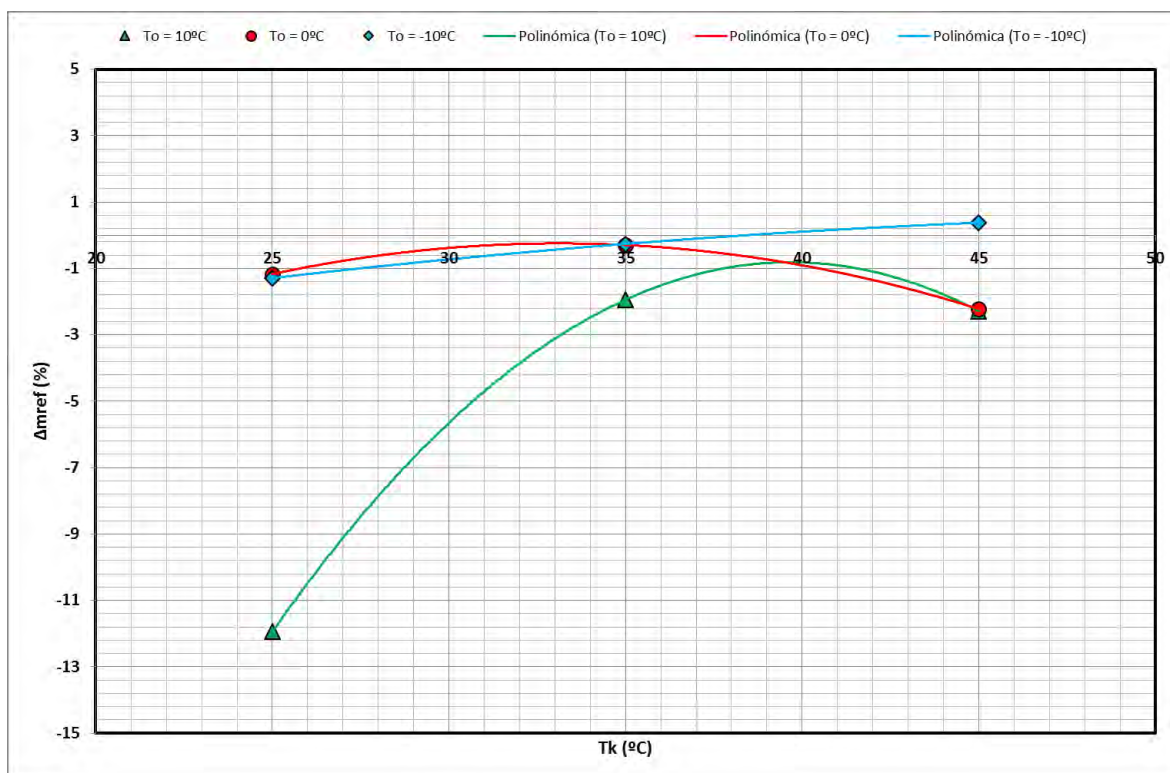
El flujo másico de refrigerante es mayor sin IHX que con IHX, para casi todas las temperaturas de condensación.

Para una temperatura de evaporación de -10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el flujo másico de refrigerante con IHX oscila entre 0,00113 Kg/s y 0,00122 Kg/s, mientras que el flujo másico de refrigerante sin IHX oscila entre 0,00112 Kg/s y 0,00124 Kg/s (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 0 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el flujo másico de refrigerante con IHX oscila entre 0,00174 Kg/s y 0,00186 Kg/s, mientras que el flujo másico de refrigerante sin IHX oscila entre 0,00178 Kg/s y 0,00188 Kg/s (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el flujo másico de refrigerante con IHX oscila entre 0,00233 Kg/s y 0,00261 Kg/s, mientras que el flujo másico de refrigerante sin IHX oscila entre 0,0026 Kg/s y 0,00266 Kg/s (valores promedio).

$$\Delta \dot{m}_{ref} (\%) = \frac{\dot{m}_{ref} R600a \text{ con IHX} - \dot{m}_{ref} R600a \text{ sin IHX}}{\dot{m}_{ref} R600a \text{ sin IHX}} \cdot 100$$



Gráfica 14. Comparativa del incremento de mref vs. Tk en % del R600a con vs. sin IHX.

El flujo másico de refrigerante es mayor sin IHX que con IHX, para todas las condiciones menos para una temperatura de condensación de 45 °C y una temperatura de evaporación de -10 °C.

Para una temperatura de evaporación de -10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el Δmref (%) oscila entre un -1,29 % y un 0,38 % (valores promedio).

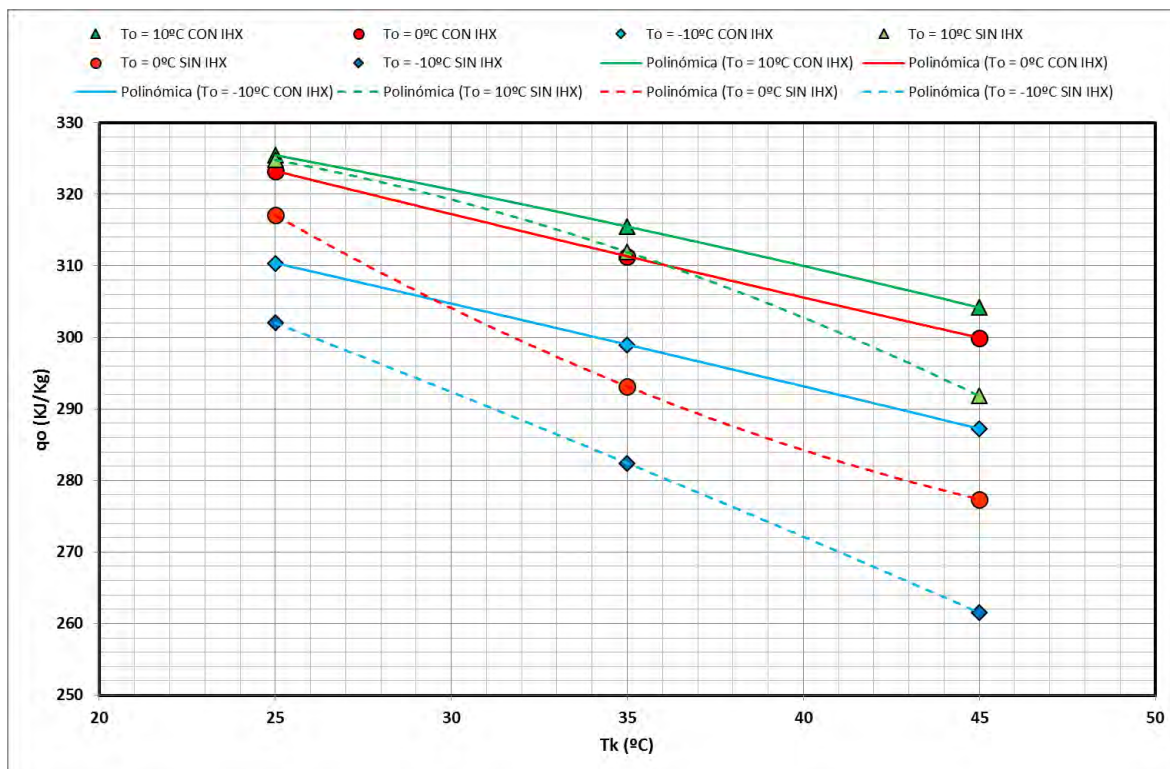
Para una temperatura de evaporación de 0 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el Δmref (%) oscila entre un -2,22 % y un -0,3 % (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el Δmref (%) oscila entre un -11,94 % y un -1,94 % (valores promedio).

3.7.5. Salto entálpico en el evaporador (q_o)

La siguiente ecuación muestra cómo se calcula el salto entálpico que se produce en el evaporador:

$$q_o = h_{evap,out} - h_{evap,in}$$



Gráfica 15. Comparativa del q_o vs. T_k del R600a con vs. sin IHX.

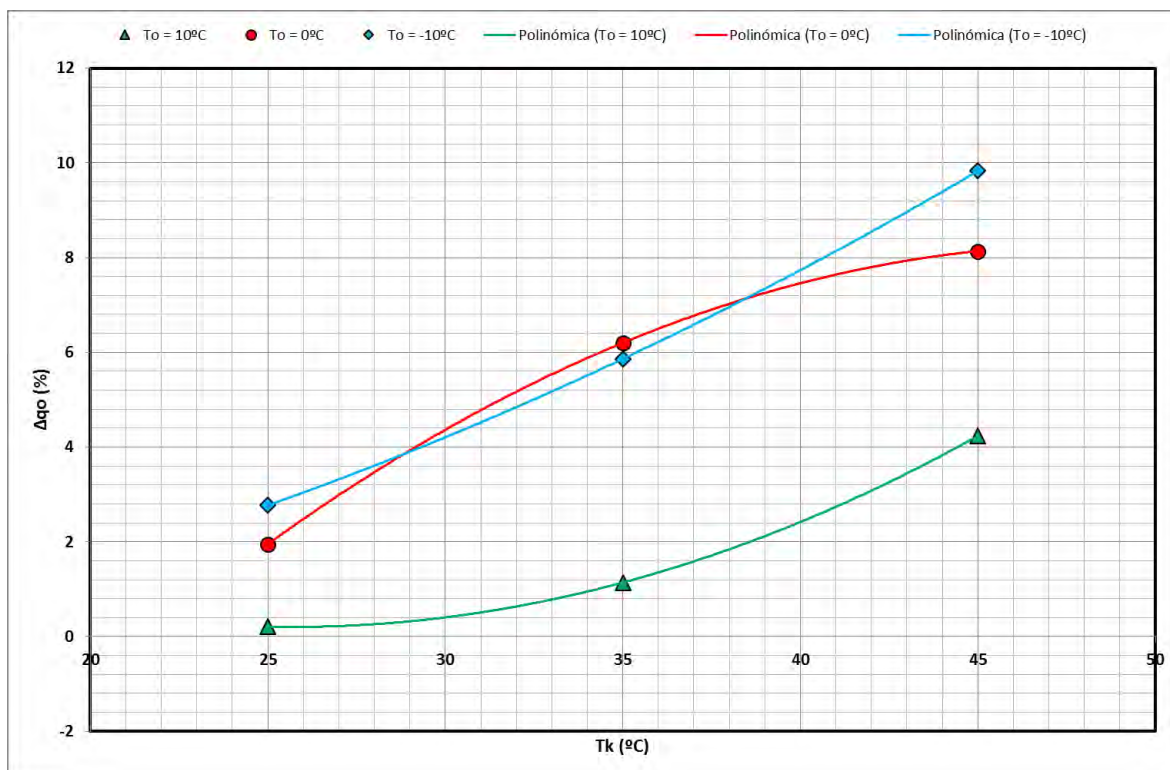
Los valores del salto entálpico en el evaporador han sido representados en valor promedio para una mejor presentación de la gráfica. La línea continua representa los valores del salto entálpico con IHX, mientras que la línea discontinua representa los valores del salto entálpico sin IHX. El salto entálpico en el evaporador es siempre mayor con IHX que sin IHX, para todas las temperaturas de condensación.

Para una temperatura de evaporación de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un rango de temperaturas de condensación entre $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, el salto entálpico en el evaporador con IHX oscila entre 287 KJ/Kg y 310 KJ/Kg , mientras que el salto entálpico en el evaporador sin IHX oscila entre 261 KJ/Kg y 302 KJ/Kg (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un rango de temperaturas de condensación entre $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, el salto entálpico en el evaporador con IHX oscila entre 300 KJ/Kg y 323 KJ/Kg , mientras que el salto entálpico en el evaporador sin IHX oscila entre 277 KJ/Kg y 317 KJ/Kg (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un rango de temperaturas de condensación entre $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, el salto entálpico en el evaporador con IHX oscila entre 304 KJ/Kg y 325 KJ/Kg , mientras que el salto entálpico en el evaporador sin IHX oscila entre 292 KJ/Kg y 325 KJ/Kg (valores promedio).

$$\Delta q_o (\%) = \frac{q_o \text{ R600a con IHX} - q_o \text{ R600a sin IHX}}{q_o \text{ R600a sin IHX}} \cdot 100$$



Gráfica 16. Comparativa del incremento de q_o vs. T_k en % del R600a con vs. sin IHX.

El salto entálpico en el evaporador es siempre mayor con IHX que sin IHX, para todas las temperaturas de condensación.

Para una temperatura de evaporación de -10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C , el Δq_o (%) oscila entre un $2,77\%$ y un $9,83\%$ (valores promedio).

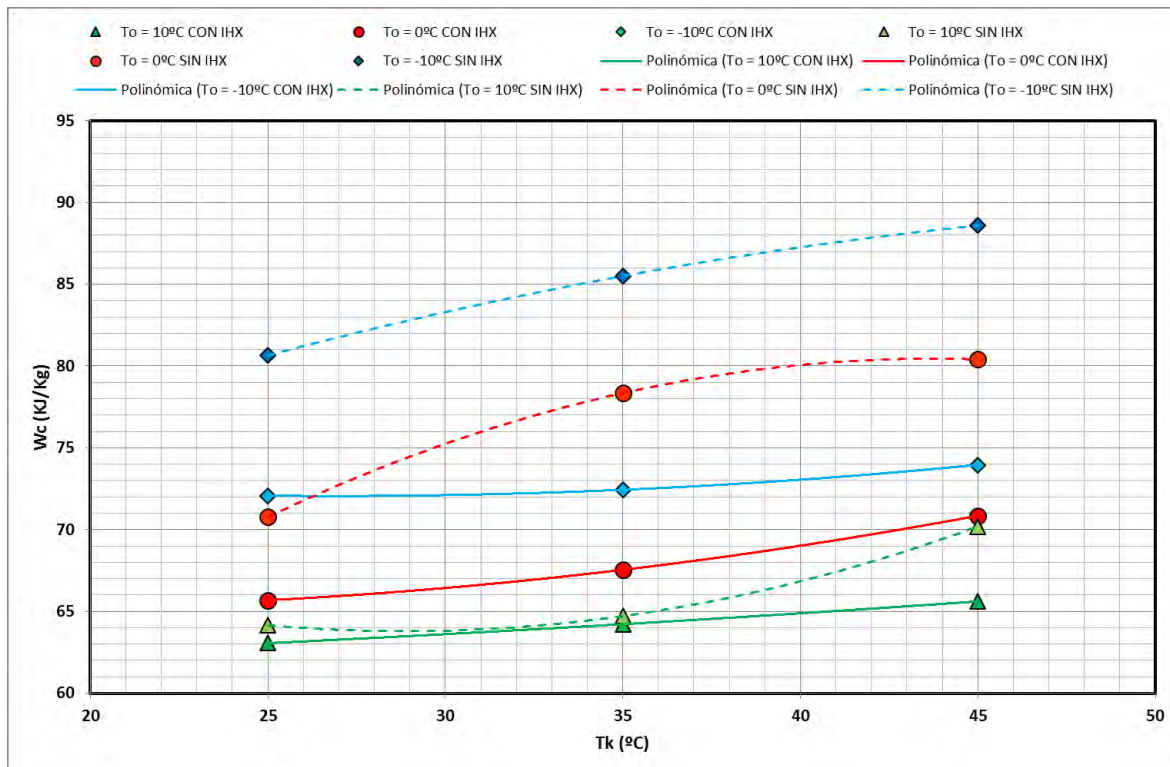
Para una temperatura de evaporación de 0 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C , el Δq_o (%) oscila entre un $1,95\%$ y un $8,14\%$ (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C , el Δq_o (%) oscila entre un $0,21\%$ y un $4,24\%$ (valores promedio).

3.7.6. Salto entálpico en el compresor (w_c)

La siguiente ecuación muestra cómo se calcula el salto entálpico que se produce en el compresor:

$$w_c = h_{comp,out} - h_{comp,in}$$



Gráfica 17. Comparativa del w_c vs. T_k del R600a con vs. sin IHX.

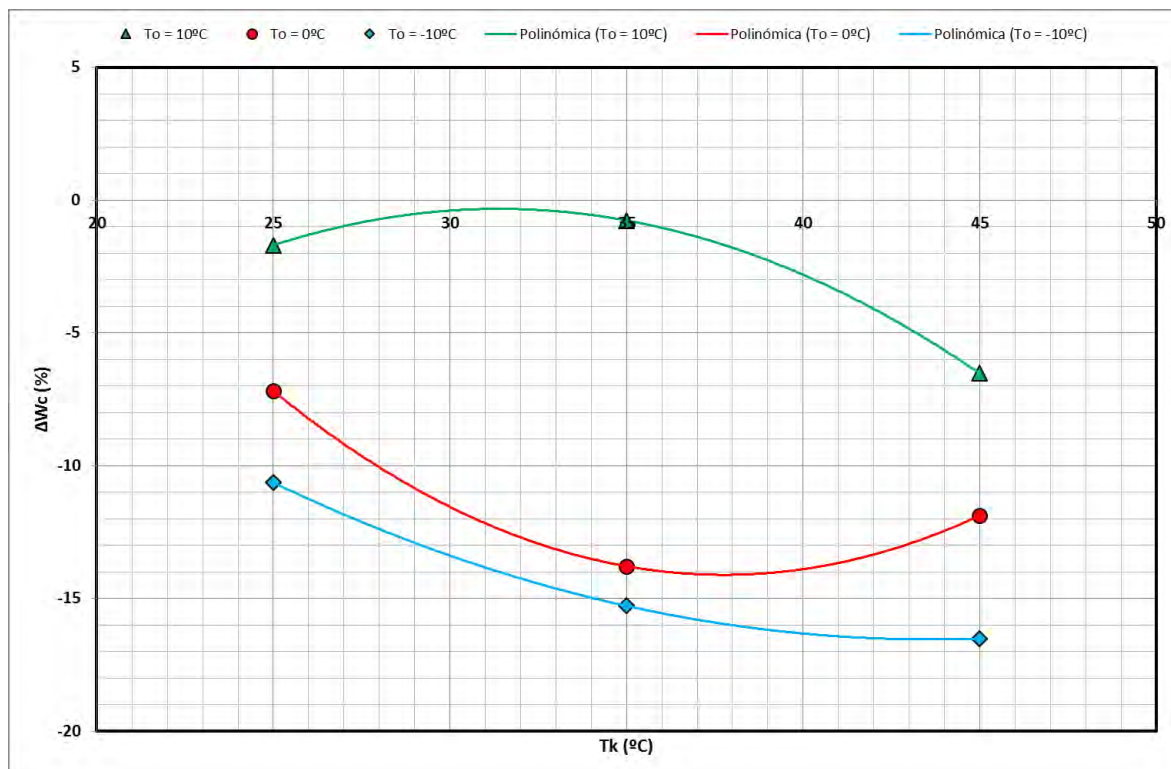
Los valores del salto entálpico en el compresor han sido representados en valor promedio para una mejor presentación de la gráfica. La línea continua representa los valores del salto entálpico con IHX, mientras que la línea discontinua representa los valores del salto entálpico sin IHX. El salto entálpico en el compresor es siempre mayor sin IHX que con IHX, para todas las temperaturas de condensación.

Para una temperatura de evaporación de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un rango de temperaturas de condensación entre $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, el salto entálpico en el compresor con IHX oscila entre 72 KJ/Kg y 74 KJ/Kg , mientras que el salto entálpico en el compresor sin IHX oscila entre 80 KJ/Kg y 88 KJ/Kg (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un rango de temperaturas de condensación entre $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, el salto entálpico en el compresor con IHX oscila entre 65 KJ/Kg y 70 KJ/Kg , mientras que el salto entálpico en el compresor sin IHX oscila entre 70 KJ/Kg y 80 KJ/Kg (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un rango de temperaturas de condensación entre $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, el salto entálpico en el compresor con IHX oscila entre 63 KJ/Kg y 65 KJ/Kg , mientras que el salto entálpico en el compresor sin IHX oscila entre 64 KJ/Kg y 70 KJ/Kg (valores promedio).

$$\Delta w_c (\%) = \frac{W_c R600a \text{ con IHX} - W_c R600a \text{ sin IHX}}{W_c R600a \text{ sin IHX}} \cdot 100$$



Gráfica 18. Comparativa del incremento de Wc vs. Tk en % del R600a con vs. sin IHX.

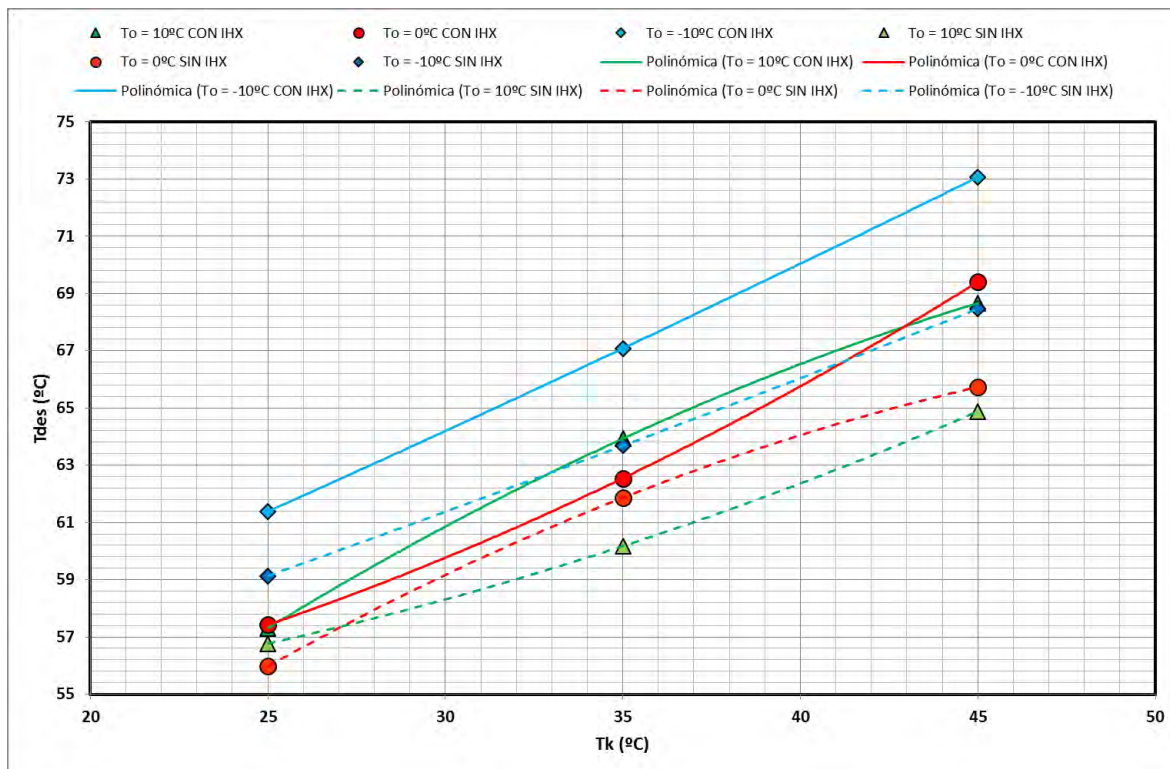
El salto entálpico en el compresor es siempre mayor sin IHX que con IHX, para todas las temperaturas de condensación.

Para una temperatura de evaporación de -10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el Δwc (%) oscila entre un -16,51 % y un -10,64 % (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 0 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el Δwc (%) oscila entre un -11,88 % y un -7,19 % (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el Δwc (%) oscila entre un -6,53 % y un -0,77 % (valores promedio).

3.7.7. Temperatura de descarga del compresor (T_{des})



Gráfica 19. Comparativa de la T_{des} vs. T_k del R600a con vs. sin IHX.

Los valores de la temperatura de descarga del compresor han sido representados en valor promedio para una mejor presentación de la gráfica. La línea continua representa los valores de la temperatura de descarga con IHX, mientras que la línea discontinua representa los valores de la temperatura de descarga sin IHX.

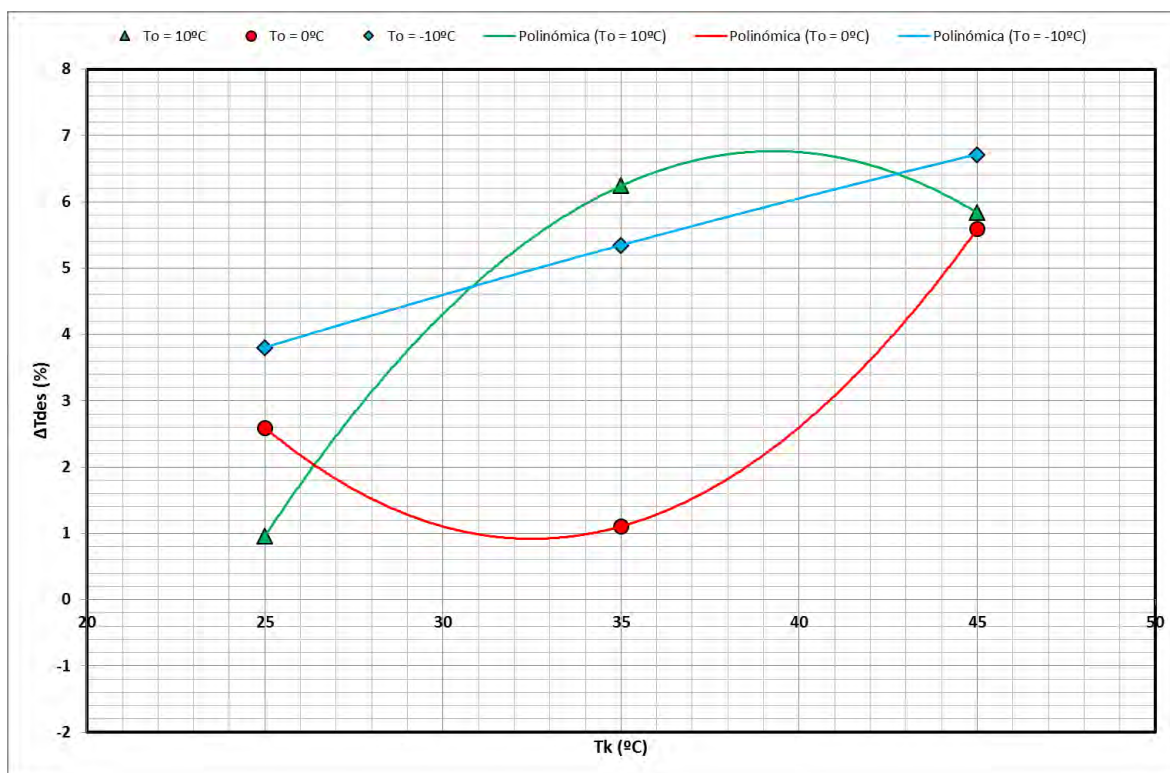
La temperatura de descarga del compresor es siempre mayor con IHX que sin IHX, para todas las temperaturas de condensación.

Para una temperatura de evaporación de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un rango de temperaturas de condensación entre $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura de descarga del compresor con IHX oscila entre $61\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $73\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura de descarga del compresor sin IHX oscila entre $59\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $68\text{ }^{\circ}\text{C}$ (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un rango de temperaturas de condensación entre $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura de descarga del compresor con IHX oscila entre $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $79\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura de descarga del compresor sin IHX oscila entre $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $66\text{ }^{\circ}\text{C}$ (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un rango de temperaturas de condensación entre $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura de descarga del compresor con IHX oscila entre $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $78\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura de descarga del compresor sin IHX oscila entre $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ (valores promedio).

$$\Delta T_{des} (\%) = \frac{T_{des R600a con IHX} - T_{des R600a sin IHX}}{T_{des R600a sin IHX}} \cdot 100$$



Gráfica 20. Comparativa del incremento de Tdes vs. Tk en % del R600a con vs. sin IHX.

La temperatura de descarga del compresor es siempre mayor con IHX que sin IHX, para todas las temperaturas de condensación.

Para una temperatura de evaporación de -10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el ΔT_{des} (%) oscila entre un 3,8 % y un 6,71 % (valores promedio).

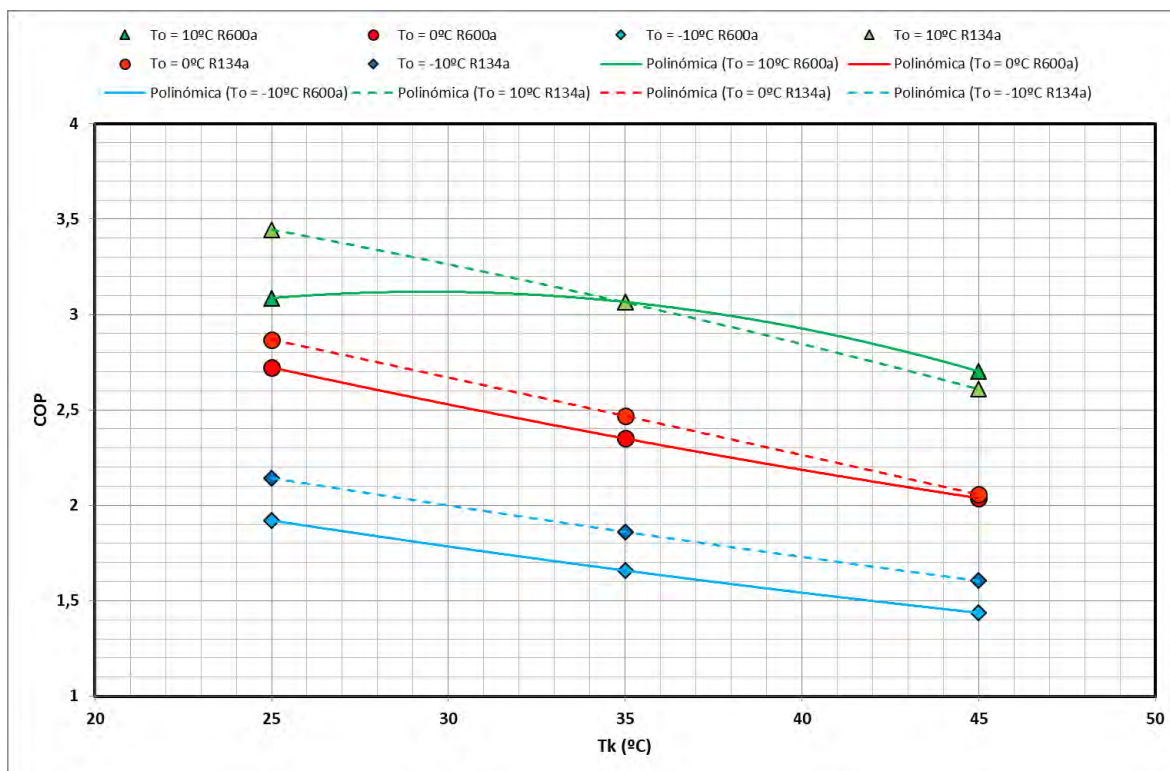
Para una temperatura de evaporación de 0 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el ΔT_{des} (%) oscila entre un 1,1 % y un 5,59 % (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el ΔT_{des} (%) oscila entre un 0,96 % y un 6,24 % (valores promedio).

3.8. Comparativa experimental del R600a vs. R134a con IHX

3.8.1. COP

$$COP = \frac{\dot{Q}_o}{P_c}$$



Gráfica 21. Comparativa del COP vs. Tk del R600a vs. R134a con IHX.

Los valores del COP han sido representados en valor promedio para una mejor presentación de la gráfica. La línea continua representa los valores de COP del R600a con IHX, mientras que la línea discontinua representa los valores de COP del R134a con IHX.

Para temperaturas de evaporación inferiores a 0 °C, el COP del R134a con IHX es superior al COP del R600a con IHX, para todo el rango de temperaturas de condensación.

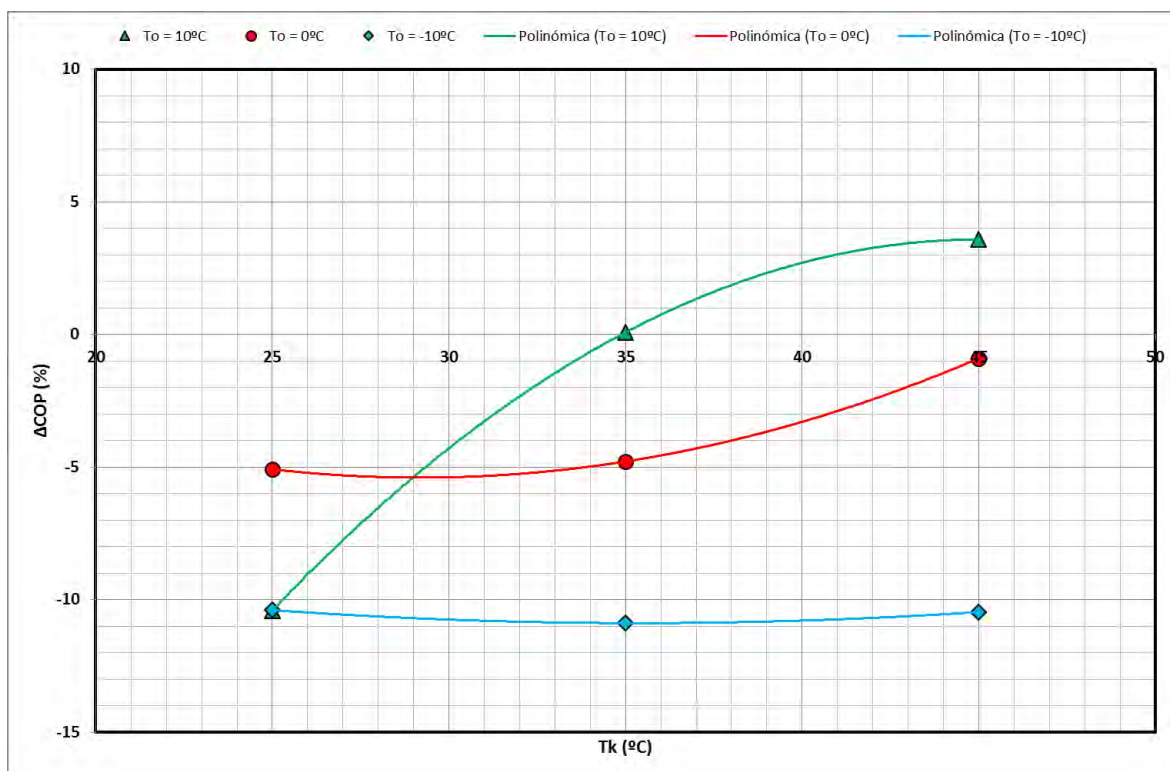
Sin embargo, para una temperatura de condensación de 10 °C, el COP del R134a con IHX no es superior al COP del R600a con IHX, para todo el rango de temperaturas de condensación.

Para una temperatura de evaporación de -10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el COP del R600a con IHX oscila entre 1,44 y 1,92, mientras que el COP del R134a con IHX oscila entre 1,6 y 2,14 (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 0 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el COP del R600a con IHX oscila entre 2,04 y 2,72, mientras que el COP del R134a con IHX oscila entre 2,06 y 2,87 (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el COP del R600a con IHX oscila entre 2,7 y 3,09, mientras que el COP del R134a con IHX oscila entre 2,61 y 3,44 (valores promedio).

$$\Delta COP (\%) = \frac{COP_{R600a \text{ con IHX}} - COP_{R134a \text{ con IHX}}}{COP_{R134a \text{ con IHX}}} \cdot 100$$



Gráfica 22. Comparativa del incremento de COP vs. Tk del R600a vs. R134a con IHX.

Para las temperaturas de evaporación inferiores a 0 °C, el COP del R134a con IHX es superior al COP del R600a con IHX, para todo el rango de temperaturas de condensación.

Sin embargo, para una temperatura de evaporación de 10 °C, el COP del R134a con IHX no es superior al COP del R600a con IHX, hasta que la temperatura de condensación baja por debajo de unos 35 °C.

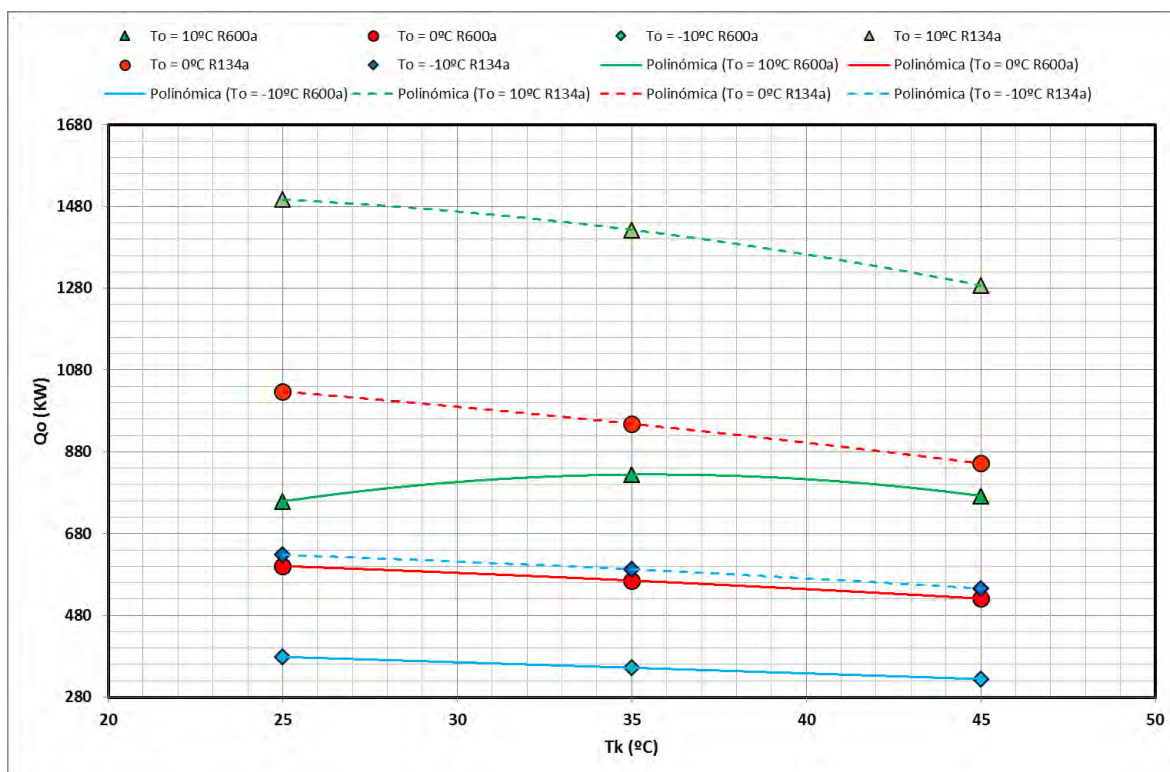
Para una temperatura de evaporación de -10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el ΔCOP (%) oscila entre un -10,88 % y un -10,39 % (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 0 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el ΔCOP (%) oscila entre un -5,09 % y un -0,9 % (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C, el ΔCOP (%) oscila entre un -10,41 % y un 3,58 % (valores promedio).

3.8.2. Potencia frigorífica (\dot{Q}_o)

$$\dot{Q}_o = \dot{m} \cdot q_o$$



Gráfica 23. Comparativa de la Q_o vs. T_k del R600a vs. R134a con IHX.

Los valores de la potencia frigorífica en el evaporador han sido representados en valor promedio para una mejor presentación de la gráfica. La línea continua representa los valores de potencia frigorífica del R600a con IHX, mientras que la línea discontinua representa los valores de potencia frigorífica del R134a con IHX. La potencia frigorífica en el evaporador del R134a con IHX es siempre mayor que la del R600a con IHX, para todas las temperaturas de condensación.

Para una temperatura de evaporación de -10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C , la potencia frigorífica del R600a con IHX oscila entre 324 W y 378 W , mientras que la potencia frigorífica del R134a con IHX oscila entre 545 W y 628 W (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 0 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C , la potencia frigorífica del R600a con IHX oscila entre 521 W y 600 W , mientras que la potencia frigorífica del R134a con IHX oscila entre 852 W y 1027 W (valores promedio).

Para una temperatura de evaporación de 10 °C y un rango de temperaturas de condensación entre 25 °C y 45 °C , la potencia frigorífica del R600a con IHX oscila entre 758 W y 824 W , mientras que la potencia frigorífica del R134a con IHX oscila entre 1286 W y 1496 W (valores promedio).