



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

---

# DESARROLLO DE CORRELACIONES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE COMPRESORES SCROLL DENTRO DEL CAMPO DE LA REFRIGERACIÓN COMERCIAL

---

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



Alumno: Ródenas Cantó, Luis

Tutor: Navarro Peris, Emilio

Segundo tutor: Marchante Avellaneda, Javier

Departamento: Termodinámica Aplicada

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

## Agradecimientos

En primer lugar, dar las gracias a mis tutores Emilio y Javi por hacer posible la realización de este trabajo. Especialmente a Javi con el que he podido aprender muchas cosas que desconocía y hablar del trabajo en numerosas reuniones. También quiero agradecer a mi familia y amigos por su apoyo en todo momento, especialmente a mis padres. Por último, muchas gracias a Raquel, mi profesora de tecnología del instituto que logró que me interesara por la ingeniería.

## Resumen

La caracterización adecuada del compresor scroll en el campo de la refrigeración comercial es de vital importancia a la hora de diseñar instalaciones de frío y optimizar su consumo energético. Desafortunadamente actualmente el standard existente para realizar este tipo de tarea es bastante deficiente e implica la realización de gran cantidad de ensayos, lo que supone un alto coste. Pese a ello, las estimaciones del comportamiento que se deriva del compresor pueden diferir significativamente de su comportamiento real. En este proyecto el estudiante, partiendo de la información obtenida para la caracterización de un compresor scroll, va a desarrollar correlaciones que permita estimar el flujo másico de refrigerante y el consumo del compresor en función de las condiciones de trabajo con una precisión superior a los estándares actualmente existentes a partir del mínimo número de ensayos a definir durante el desarrollo del proyecto.

## Estructura

- DOCUMENTO 1º: MEMORIA
- DOCUMENTO 2º: PRESUPUESTO
- DOCUMENTO 3º: ANEXOS



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



DOCUMENTO 1º:

MEMORIA

## Índice de la memoria

|  |    |
|--|----|
| 1. Introducción .....  | 13 |
| 1.1. Objeto.....   | 13 |
| 1.2. Motivación .....  | 13 |
| 1.3. Preámbulo .....   | 13 |
| 1.4. Antecedentes .....  | 14 |
| 1.5. Software empleado .....   | 14 |
| 2. Obtención de los datos .....  | 15 |
| 2.1. Descripción y diseño del ensayo .....                             | 15 |
| 2.2. Refrigerantes utilizados.....                                     | 15 |
| 2.3. Compresor utilizado .....   | 16 |
| 3. Modelos utilizados para el ajuste.....                              | 16 |
| 3.1. Modelo basado en el polinomio AHRI.....                           | 16 |
| 3.2. Modelo basado en el polinomio AHRI reducido .....                 | 17 |
| 4. Métodos de diseño de experimentos para la obtención de puntos ..... | 18 |
| 4.1. Introducción .....  | 18 |
| 4.2. Diseños de superficie de respuesta.....                           | 18 |
| 4.2.1. Superficies de respuesta .....                                  | 18 |
| 4.2.2. Métodos escogidos .....   | 24 |
| 4.2.2.1. Diseño central compuesto (CCD) .....                          | 25 |
| 4.2.2.2. Diseño de tres niveles .....                                  | 27 |
| 4.2.2.3. Diseño de cuatro niveles .....                                | 30 |
| 4.2.2.4. Diseño envolvente.....  | 32 |
| 4.2.2.5. Diseño Central Reducido .....                                 | 33 |
| 4.2.2.6. Diseño Hexagonal.....   | 34 |
| 4.2.2.7. Modelo Federov .....  | 34 |
| 5. Ajuste de modelos.....  | 38 |
| 5.1. Introducción .....  | 38 |
| 5.2. Ajuste del modelo aplicando el polinomio AHRI convencional .....  | 42 |
| 5.2.1. Ajuste aplicando el Diseño Central Compuesto .....              | 42 |
| 5.2.2. Ajuste aplicando el diseño de tres niveles .....                | 44 |

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

|  |    |
|--|----|
| 5.2.3. Ajuste aplicando diseño de cuatro niveles.....            | 48 |
| 5.2.4. Ajuste aplicando el diseño envolvente .....               | 52 |
| 5.2.5. Ajuste aplicando el modelo Federov.....                   | 55 |
| 5.3. Ajuste del modelo basado en el polinomio AHRI reducido..... | 61 |
| 5.3.1. Ajuste aplicando el Diseño Central Compuesto .....        | 61 |
| 5.3.2. Ajuste aplicando el modelo de tres niveles.....           | 63 |
| 5.3.3. Ajuste aplicando el diseño de cuatro niveles.....         | 67 |
| 5.3.4. Ajuste aplicando el diseño envolvente .....               | 70 |
| 5.3.5. Ajuste aplicando el Diseño Central Reducido (SCD).....    | 72 |
| 5.3.6. Ajuste aplicando el Diseño Hexagonal (HD).....            | 74 |
| 5.3.7. Ajuste aplicando el diseño Federov .....                  | 75 |
| 6. Planteamiento de soluciones alternativas .....                | 80 |
| 7. Solución adoptada.....  | 81 |
| 8. Análisis de los resultados .....                              | 81 |
| 9. Conclusiones.....   | 85 |
| 10. Bibliografía .....   | 85 |



## Figuras

Figura 2.1. Localización de sensores en el calorímetro

Figura 4.1. Vista cónica de la superficie de respuesta para  $W_c$

Figura 4.2. Vista lateral para la superficie de respuesta de  $W_c$

Figura 4.3. Vista superior para la superficie de respuesta de  $W_c$

Figura 4.4. Zona de trabajo del compresor según el fabricante usando R-22

Figura 4.5. Puntos obtenidos de forma experimental en el ensayo

Figura 4.6. Vista cónica de la superficie de estudio para  $m_{ref}$

Figura 4.7. Vista lateral de la superficie de estudio para  $m_{ref}$

Figura 4.8. Evolución de  $W_c$  en los puntos experimentales

Figura 4.9. Evolución de  $m_{ref}$  en los puntos experimentales

Figura 4.10. Disposición de los puntos en un Diseño Central Compuesto

Figura 4.11. Distribución del CCD

Figura 4.12. Distribución del CCD con dos puntos adicionales

Figura 4.13. Distribución de diseño de tres niveles centrado

Figura 4.14. Distribución del diseño de tres niveles centrado con dos puntos adicionales

Figura 4.15. Distribución del diseño de tres niveles

Figura 4.16. Distribución del diseño de tres niveles con traslaciones

Figura 4.17. Distribución del diseño de tres niveles con traslaciones y dos puntos adicionales

Figura 4.18. Distribución del diseño de cuatro niveles centrado

Figura 4.19. Distribución del diseño de cuatro niveles

Figura 4.20. Distribución del diseño envolvente para siete puntos

Figura 4.21. Distribución del diseño envolvente para once puntos

Figura 4.23. Distribución del Diseño Central Reducido

Figura 4.24. Distribución del Diseño Hexagonal

Figura 4.25. Distribución de once puntos del modelo Federov criterio "D"

Figura 4.26. Distribución de once puntos del modelo Federov criterio "A"

Figura 4.27. Distribución de once puntos del modelo Federov criterio "I"

Figura 4.28. Distribución de siete puntos del modelo Federov criterio "D"

Figura 4.29. Distribución de siete puntos del modelo Federov criterio "A"

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

Figura 4.30. Distribución de siete puntos del modelo Federov criterio "I"

Figura 5.1. Marco de datos del CCD para polinomio AHRI

Figura 5.2. Ajuste ideal entre modelo teórico y puntos experimentales

Figura 5.3. Ajuste para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.4. Ajuste para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.5. Tabla resumen para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.6. Tabla resumen para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.7. Ajuste para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.8. Ajuste para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.9. Tabla resumen para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.10. Tabla resumen para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.11. Ajuste para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.12. Ajuste para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.13. Distribución del diseño de tres niveles con traslaciones y dos puntos adicionales

Figura 5.14. Tabla resumen para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.15. Tabla resumen para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.16. Ajuste para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.17. Ajuste para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.18. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.18. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.19. Ajuste para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.20. Ajuste para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

Figura 5.21. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.22. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.23. Distribución descartada para diseño envolvente

Figura 5.24. Distribución descartada para diseño envolvente

Figura 5.25. Ajuste para el diseño envolvente usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.26. Ajuste para el diseño envolvente usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.27. Tabla resumen para el diseño envolvente usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.28. Tabla resumen para el diseño envolvente usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.29. Ajuste para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.30. Ajuste para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.31. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.32. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.33. Ajuste para el diseño Federov criterio "A" usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.34. Ajuste para el diseño Federov criterio "A" usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.35. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "A" usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.36. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "A" usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.37. Ajuste para el diseño Federov criterio "I" usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.38. Ajuste para el diseño Federov criterio "I" usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.39. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "I" usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

Figura 5.40. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "I" usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Figura 5.41. Ajuste para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.42. Ajuste para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.43. Tabla resumen para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.44. Tabla resumen para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.45. Ajuste para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.46. Ajuste para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

Figura 5.47. Tabla resumen para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.48. Tabla resumen para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.49. Ajuste para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.50. Ajuste para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.51. Tabla resumen para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.52. Tabla resumen para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.53. Ajuste para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.54. Ajuste para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.55. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.56. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.57. Ajuste para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.58. Ajuste para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.59. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.60. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.61. Ajuste para el diseño envolvente usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.62. Ajuste para el diseño envolvente usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.63. Tabla resumen para el diseño envolvente usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.64. Tabla resumen para el diseño envolvente usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.65. Ajuste para el Diseño Central Reducido usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.66. Ajuste para el Diseño Central Reducido usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.67. Tabla resumen para el Diseño Central Reducido usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.68. Tabla resumen para el Diseño Central Reducido usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.69. Ajuste para el Diseño Hexagonal usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.70. Ajuste para el Diseño Hexagonal usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.71. Tabla resumen para el Diseño Hexagonal usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.72. Tabla resumen para el Diseño Hexagonal usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

Figura 5.73. Ajuste para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.74. Ajuste para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.75. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.76. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.77. Ajuste para el diseño Federov criterio "A" usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.78. Ajuste para el diseño Federov criterio "A" usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Figura 5.79. Ajuste para el diseño Federov criterio "I" usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

Figura 5.80. Ajuste para el diseño Federov criterio "I" usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

## 1. Introducción

### 1.1. Objeto

El objeto de este trabajo es, mediante correlaciones, obtener un modelo matemático de nuestro compresor scroll para el consumo del compresor y gasto másico de refrigerante lo más fiel posible a la realidad, pero tomando un menor número de puntos. Este modelo se basará en el polinomio AHRI de diez constantes para un sobrecalentamiento constante, así como en el polinomio AHRI reducido de seis constantes para un sobrecalentamiento constante.

### 1.2. Motivación

Esta selección de puntos se puede usar por parte de los fabricantes para obtener el consumo y el gasto másico de refrigerante con exactitud sin necesidad de tomar de forma experimental un elevado número de puntos, lo cual conlleva un gasto de tiempo y de dinero para ellos.

La caracterización de los compresores por parte de los fabricantes es una problemática que, hoy en día, sigue sin estar resuelta. A la hora de caracterizarlos la norma AHRI propone un polinomio sobre el cual obtener un modelo para indicar así los coeficientes de regresión que permitan obtener de manera matemática su comportamiento experimental. Uno de los problemas que presenta este ajuste usando el polinomio AHRI es que se debe tomar un número elevado de puntos para la caracterización, con el consiguiente gasto de dinero. Otro de los problemas es que en muchos casos el polinomio AHRI sobre el cual se realiza el ajuste es demasiado extenso, obteniendo coeficientes de regresión no significativos lo cual nos indica que el modelo se podría simplificar eliminando términos cúbicos y cuadráticos del mismo.

En este trabajo nos enfocaremos en tratar estas dos problemáticas. Por un lado, llevando a cabo una simplificación en cuanto al número de puntos tomados para la caracterización, lo cual podría conllevar a un ahorro importante de dinero para los fabricantes. Por otro lado, se estudiarán posibles alternativas al polinomio AHRI propuesto por la norma, que permitan obtener modelos más simplificados, en los que se deban tomar un menor número de puntos y que permita obtener coeficientes de regresión significativos lo que conduciría a modelos en los que no sobran términos.

### 1.3. Preámbulo

Los equipos de refrigeración usan el ciclo de refrigeración por compresión para producir frío. Dentro de estos ciclos una parte fundamental es el compresor, los cuales fuerzan la circulación del fluido (refrigerante) creando zonas de alta y baja presión y consiguiendo que este fluido absorba calor en la zona del evaporador y lo ceda en la zona del condensador.

Unos de los tipos de compresor más usados son los compresores scroll que comprimen el fluido mediante un desplazamiento orbital. La compresión se realiza por reducción de volumen al girar un rotor en forma de espiral sobre otro fijo. Las principales ventajas de este tipo de compresores son el buen rendimiento volumétrico y el bajo impacto sonoro. Su uso está encaminado a la refrigeración comercial, como aires acondicionados, bomba de calor en viviendas o supermercados.

#### 1.4. Antecedentes

El marco de datos sobre el cual se va a llevar a cabo el estudio proviene de un estudio por parte de *AHRI Low-GWP AREP* el cual se basa en el impacto medioambiental de diferentes refrigerantes usados en un compresor scroll. Se usaron tres tipos de prueba para cada uno de los refrigerantes: temperatura de succión del compresor constante a 65°F, sobrecalentamiento constante a 20°F y sobrecalentamiento constante a 40°F. Para cada tipo de prueba se toma de forma experimental el valor de diversas variables como son la temperatura de evaporación, temperatura de condensación, temperatura de descarga, presión de condensación, presión de evaporación, consumo del compresor, gasto másico del refrigerante, capacidad refrigerante, entre otros.

Teniendo esto en cuenta se creó un marco de datos con número de puntos experimentales muy elevado para cada tipo de prueba dentro de cada refrigerante. En este caso nos centraremos en el estudio del compresor usando el refrigerante R404a para un sobrecalentamiento constante de 11.11 K.

#### 1.5. Software empleado

Tanto para el graficado de los valores obtenidos, para la muestra gráfica de la distribución de puntos dentro de la superficie de respuesta, los cálculos necesarios para realizar el ajuste de los diferentes modelos, cambio de unidades del sistema anglosajón al SI y el cálculo y representación de las correlaciones, se usará el programa R.

R es un ambiente de programación formado por un conjunto de herramientas muy flexibles que pueden ampliarse fácilmente mediante paquetes, librerías o definiendo nuestras propias funciones. Este software es de código abierto y gratuito. Para el desarrollo del trabajo se han usado librerías propias, paquetes descargados de una fuente externa y funciones creadas para la obtención de resultados. Todos estos elementos, así como el resto de código introducido se encuentran en el ANEXO I del trabajo.

## 2. Obtención de los datos

### 2.1. Descripción y diseño del ensayo

Tal como se muestra en el **Test Report #21** proporcionado por el **Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute (AHRI) Low-GWP Alternative Refrigerants Evaluation Program (Low-GWP AREP)** [1] para esta prueba se miden variables para un rango amplio de temperaturas. La temperatura del evaporador se encuentra entre  $-23.33^{\circ}\text{C}$  ( $-10^{\circ}\text{F}$ ) y  $1.67^{\circ}\text{C}$  ( $35^{\circ}\text{F}$ ) y la temperatura del condensador se encuentra en un rango de entre  $21.11^{\circ}\text{C}$  ( $70^{\circ}\text{F}$ ) y  $60^{\circ}\text{C}$  ( $140^{\circ}\text{F}$ ). Las pruebas se llevan a cabo con un subenfriamiento constante de  $8.33\text{K}$  ( $15^{\circ}\text{F}$ ).

Los elementos usados para el ciclo son el compresor, condensador, subenfriador (para bajar temperatura y presión), tres válvulas electrónicas de expansión y un evaporador. La presiones y temperaturas del evaporador y del condensador se controlan de forma indirecta mediante las válvulas de expansión, un calentador que calienta el aire dentro de la cámara del compresor y un calentador situado junto al condensador. El dispositivo experimental en el que se realizan este tipo de ensayos se conoce como **calorímetro**.

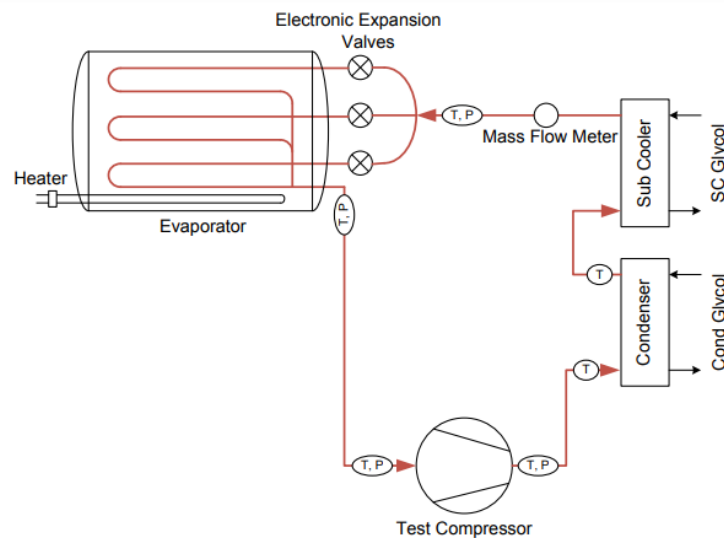


Figura 2.1. Localización de sensores en el calorímetro

### 2.2. Refrigerantes utilizados

Para este trabajo el refrigerante que se ha tenido en cuenta es el R404a el cual es mezcla de R125, R143a y R134a en una proporción de masa de 0.44/0.52/0.04. Además de este refrigerante el resto de los refrigerantes usados para los 4 ensayos restantes han sido:

- ARM-31a
- D2Y-65
- L-40
- R32 + R134a en una proporción másica de 0.5053/0.4947



### 2.3. Compresor utilizado

El compresor utilizado es el Copeland ZS21KAEPFV, usado para refrigeración en cámaras de supermercado. Las especificaciones aportadas por el fabricante [2] son la siguientes.

|                            |                                      |
|----------------------------|--------------------------------------|
| Refrigerantes              | R-134a, R-22, R-404a, R-407a, R-410a |
| Voltaje                    | 208/230                              |
| Frecuencia                 | 60 Hz                                |
| Aplicación                 | Media temperatura                    |
| Capacidad frigorífica (kJ) | 11000-38000                          |

Tabla 1.1. Especificaciones del compresor

El lubricante utilizado es el original, cargado en el compresor, tal como indica el fabricante aceite de poliéster.

## 3. Modelos utilizados para el ajuste

### 3.1. Modelo basado en el polinomio AHRI

Según la norma AHRI 540 [3] para la caracterización de compresores, los fabricantes deben aportar un modelo para poder caracterizar los compresores que van a ser vendidos. Este modelo se basa en un polinomio de tercer grado y diez constantes con la siguiente forma:

$$X = C_1 + C_2 * S + C_3 * D + C_4 * S^2 + C_5 * S * D + C_6 * D^2 + C_7 * S^3 + C_8 * D * S^2 + C_9 * S * D^2 + C_{10} * D^3$$

Donde:

- $C_1$  a  $C_{10}$  son los coeficientes de regresión que deben ser aportados por el fabricante para la caracterización de su compresor

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

- S es la temperatura del evaporador medida en °C
- D es la temperatura del condensador medida en °C
- X es la variable que se obtendrá para el modelo (en nuestro caso el trabajo del compresor y el gasto másico del refrigerante)

Teniendo esto en cuenta debemos obtener un mínimo de once puntos escogidos para poder realizar el ajuste al modelo basado en el polinomio AHRI.

### 3.2. Modelo basado en el polinomio AHRI reducido

En el documento *“Performance representation of variable-speed compressor for invertir air conditioners based on experimental data”* de Shuangquan Shao, Wenxing Shi, Xianting Li y Huajun Chen [4] se expone la posibilidad del uso de un polinomio reducido para la caracterización de compresores. Este polinomio sería un polinomio de segundo grado y seis constantes de la forma:

$$X = C_1 + C_2 * S + C_3 * D + C_4 * S^2 + C_5 * S * D + C_6 * D^2$$

Donde:

- $C_1$  a  $C_6$  son los coeficientes de regresión
- S es la temperatura del evaporador medida en °C
- D es la temperatura del condensador medida en °C
- X es la variable que se obtendrá para el modelo (en nuestro caso el trabajo del compresor y el gasto másico del refrigerante)

En nuestro caso, teniendo en cuenta que contamos con un número de puntos reducido en la mayoría de los diseños, esta simplificación nos ayudará a evitar la adición de puntos a un diseño ya dado, cosa que debemos hacer para poder realizar el ajuste para el modelo basado en el polinomio AHRI original (como se comentará en el apartado 4.2.2.)

## 4. Métodos de diseño de experimentos para la obtención de puntos

### 4.1. Introducción

El diseño experimental es una técnica estadística la cual sirve para diseñar las condiciones ideales de un producto, proceso o servicio para que cumpla con nuestras expectativas usando el mínimo número de experimentos o pruebas. En nuestro caso usaremos técnicas particulares pertenecientes al diseño experimental, los métodos de superficie de respuesta. Esto es debido a que en nuestro caso partimos de un marco de datos amplio a partir del cual obtenemos una superficie de respuesta con curvatura.

### 4.2. Diseños de superficie de respuesta

#### 4.2.1. Superficies de respuesta

Para nuestro caso particular debemos obtener un modelo matemático que se ajuste al trabajo del compresor y al gasto másico del refrigerante, estas ecuaciones dependerán de dos factores o variables independientes, las cuales debemos de tener en cuenta a la hora de elegir los modelos de superficie de respuesta, estas son la temperatura del evaporador y del condensador. Una forma adecuada de saber los modelos a usar es mapear la región de la superficie de respuesta que nos interesa para el estudio. A continuación, se muestran las regiones mapeadas de la superficie de respuesta para el **trabajo del compresor**, usando como factores la temperatura del evaporador y el condensador y manteniendo un sobrecalentamiento constante a 11.11K. La temperatura del evaporador y el condensador se muestran en °C y el trabajo del compresor en kW.

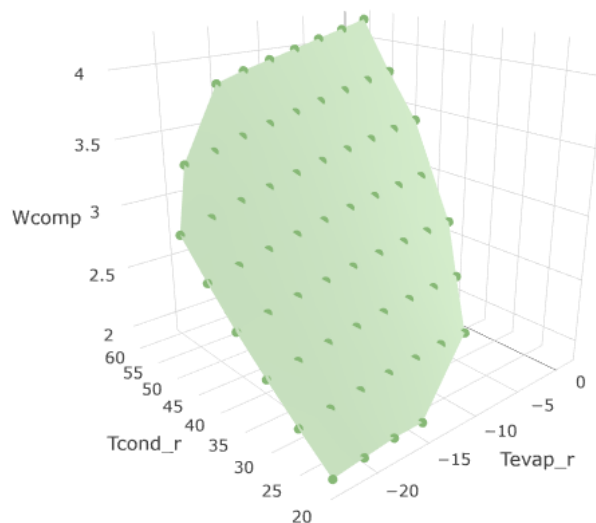


Figura 4.1. Vista cónica de la superficie de respuesta para  $W_c$

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

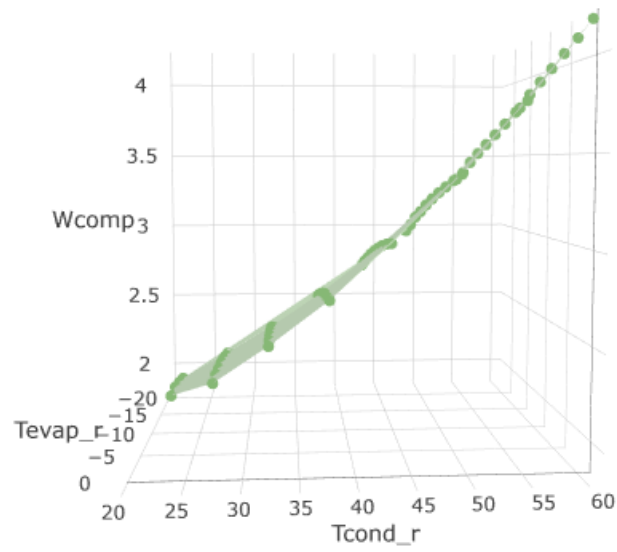


Figura 4.2. Vista lateral para la superficie de respuesta de  $W_c$

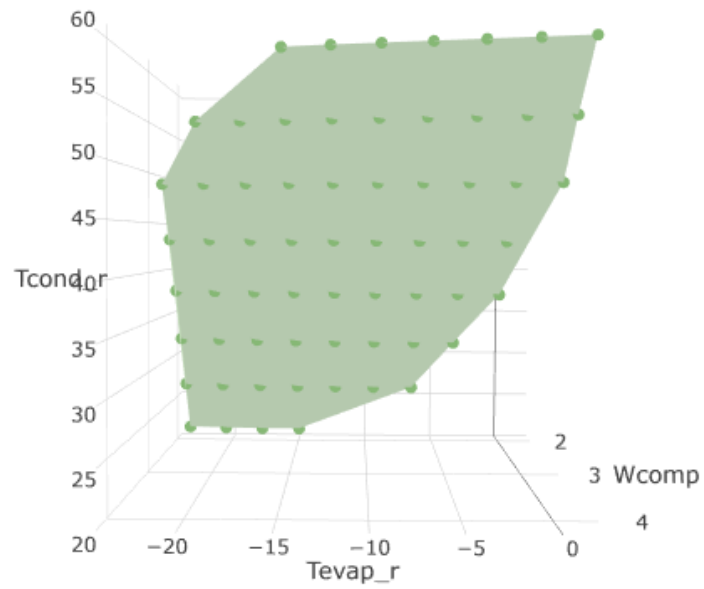


Figura 4.3. Vista superior para la superficie de respuesta de  $W_c$

En la Figura 4.1. tenemos una perspectiva cónica para saber la forma de la región del mapa de manera tridimensional. En la Figura 4.2. podemos observar la **curvatura** de esta superficie con respecto a la temperatura del condensador, esta curvatura nos obliga por tanto a tomar un mínimo de tres niveles a la hora de seleccionar los puntos, puesto que escoger 2 niveles nos llevaría a un error para el modelo ya que lo ajustaríamos para una recta.

Por último, en la Figura 4.3. observamos uno de los factores que más nos condicionarán a la hora de elegir los modelos para diseños de superficie de respuesta, **no tenemos una superficie rectangular**. Este problema nos lleva a tomar dos estrategias diferenciadas a la hora de escoger los puntos:

- Tomar los puntos como si esta superficie fuera rectangular para luego hacer traslaciones de los puntos que queden fuera de la superficie. El inconveniente de seguir esta estrategia es que estamos a la hora de ajustar en modelo y posteriormente calcular las correlaciones podemos obtener errores elevados puesto que nuestra superficie no va a tener esa forma que debería tener.
- Usar como superficie de respuesta un área dentro de la superficie total con forma rectangular para evitar traslaciones de puntos y poder utilizar modelos de superficie de respuesta sin variaciones. El inconveniente de seguir este método es que eliminamos la superficie que no tenemos en cuenta, lo que lleva a la extrapolación de los puntos que han quedado fuera del rectángulo y la curvatura que estos puedan tener, aumentando el error en esas zonas que no hemos tenido en cuenta y por consiguiente, el error de toda la correlación.

El motivo de la ausencia de puntos en la esquina superior izquierda es por la limitación que supone la temperatura de descarga del compresor, una temperatura de descarga elevada es uno de los causantes más comunes de fallos en el compresor por tanto se recomienda no llegar a valores de temperatura elevados.

La ausencia de puntos en la esquina inferior derecha es debida a las bajas relaciones de compresión que se desarrollarían en esa región.

En la Figura 4.4. podemos observar la zona de trabajo (*envelope*) de nuestro compresor aportada por el fabricante usando como refrigerante R22, pero la forma sigue siendo muy similar a la de la Figura 4.5. la cual representa los puntos medidos para el compresor usando como refrigerante R404a y un recalentamiento de 11.11K (20°F).

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

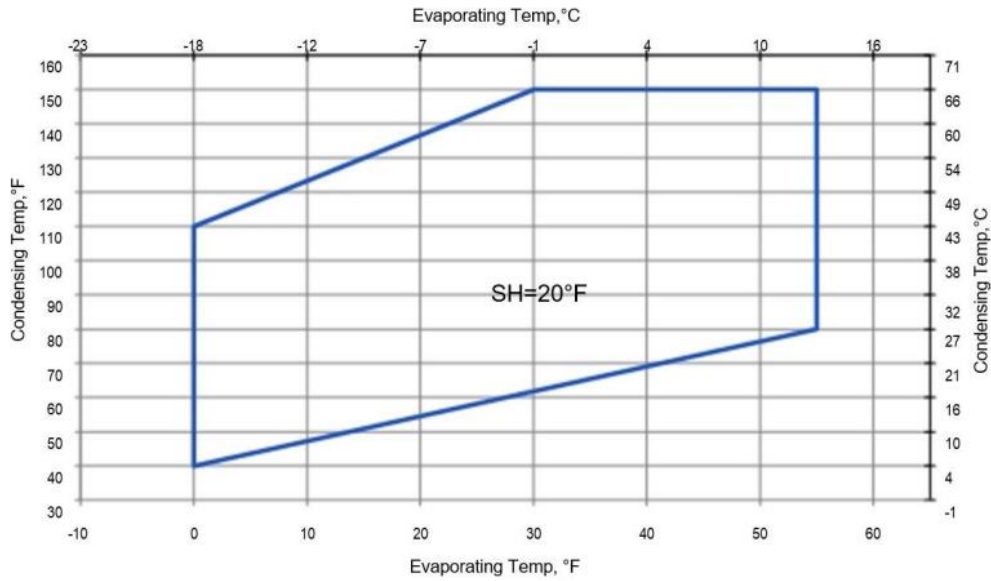


Figura 4.4. Zona de trabajo del compresor según el fabricante usando R-22

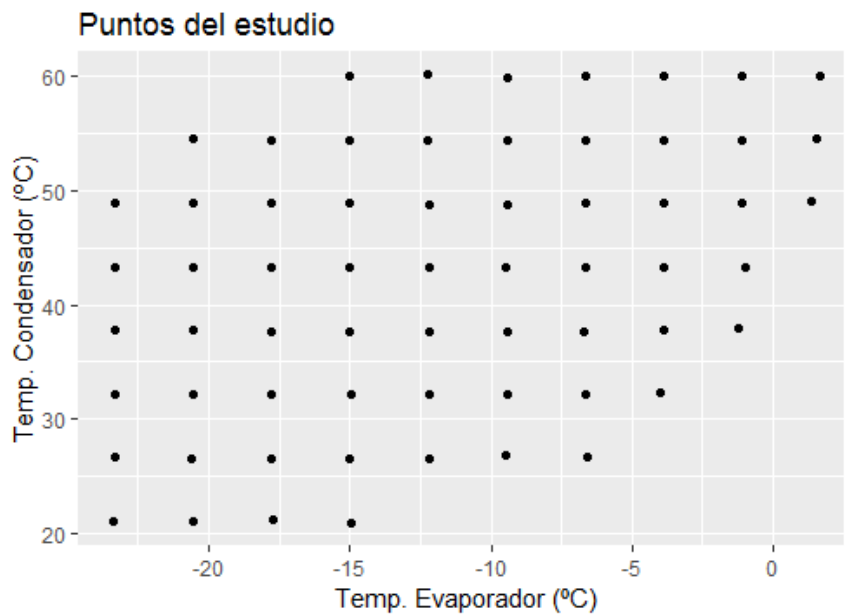


Figura 4.5. Puntos obtenidos de forma experimental en el ensayo

A continuación, se muestran las regiones mapeadas de la superficie de respuesta para el **gasto másico de refrigerante**, usando como factores la temperatura del evaporador y el condensador y manteniendo un sobrecalentamiento constante a 11.11K. La temperatura del evaporador y el condensador se muestra en °C y el gasto másico de refrigerante en kg/h.

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

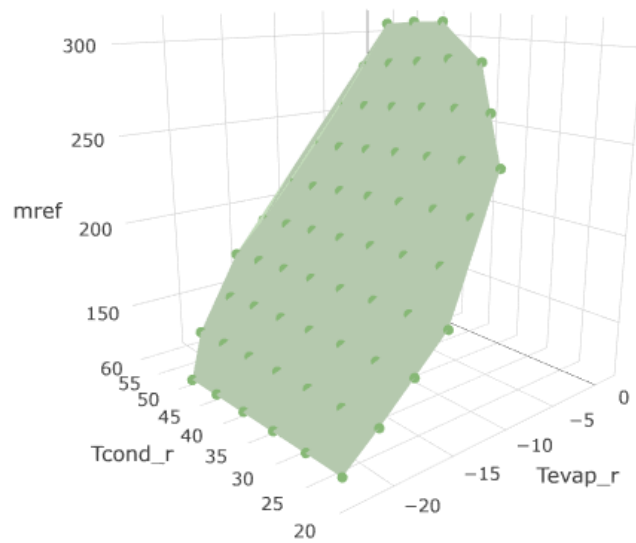


Figura 4.6. Vista cónica de la superficie de estudio para mref

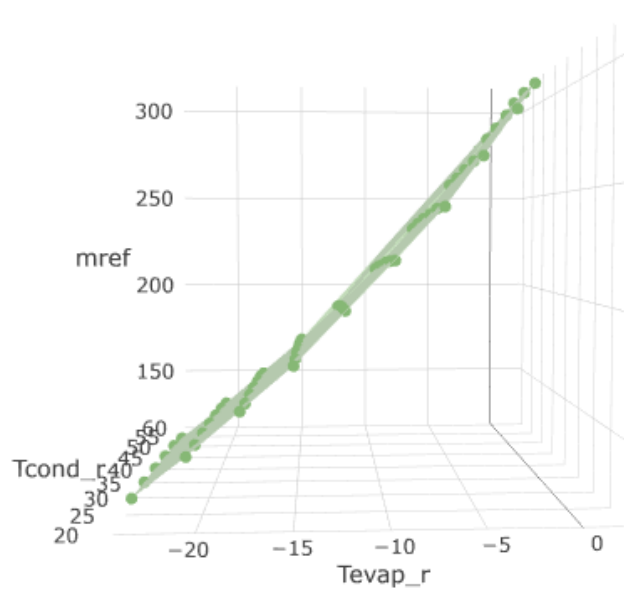


Figura 4.7. Vista lateral de la superficie de estudio para mref

Para el gasto másico del refrigerante podemos observar en la Figura 4.6. que tiene una inclinación similar a la superficie para el trabajo de compresor y la forma de esta se mantiene teniendo el mismo problema que anteriormente. En este caso en la Figura 4.7. podemos

observar una curvatura mucho más leve que en la anterior, por ello, se podría ajustar usando dos niveles, pero en nuestro caso usaremos tres ya que sí que hay cierta curvatura.

Por último, se mostrará en la Figura 4.8. y Figura 4.9. cómo evolucionan el trabajo del compresor, medido en W, y el gasto másico de refrigerante, medido en kg/h, dentro del gráfico de puntos que se han obtenido de forma experimental.

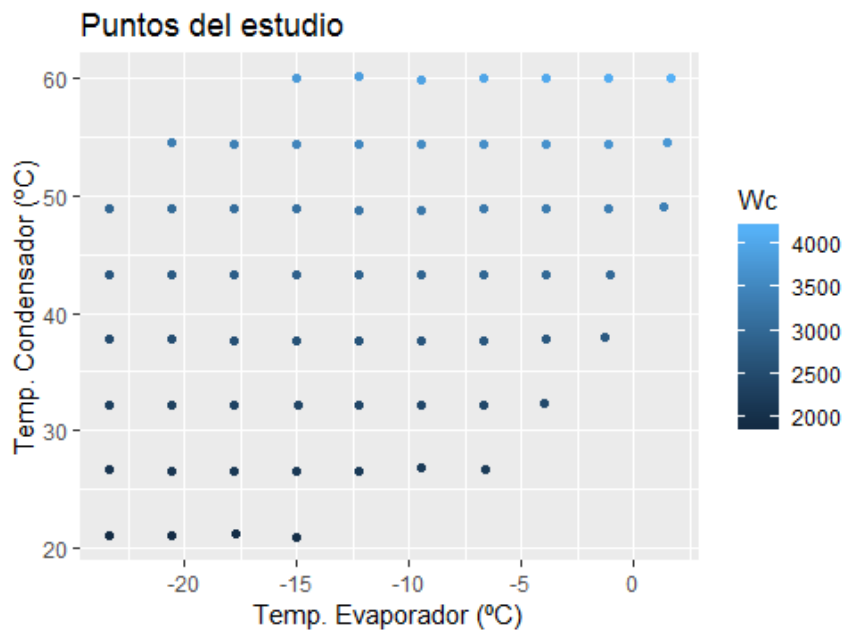


Figura 4.8. Evolución de  $W_c$  en los puntos experimentales



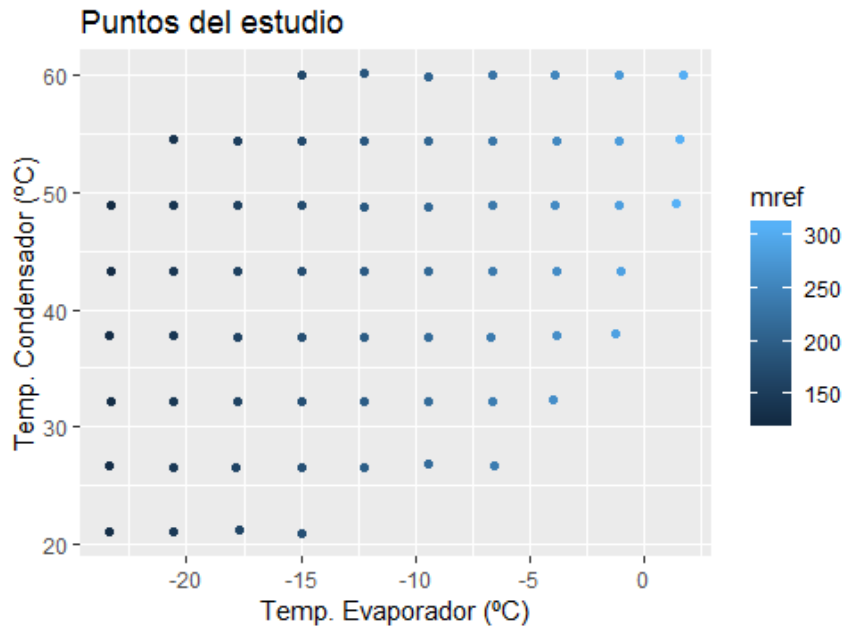


Figura 4.9. Evolución de mref en los puntos experimentales

#### 4.2.2. Métodos escogidos

A la hora de escoger los modelos de diseño de superficie de respuesta debemos tener en cuenta diversos factores:

- Contamos con **dos variables independientes o factores**, por tanto, debemos descartar aquellos que usen un mínimo de tres factores, como son los diseños de Box and Behnken o las matrices de Taguchi (metodologías muy usadas para obtención de puntos).
- Como hemos dicho anteriormente, se necesita un **mínimo de tres niveles** para cada uno de los factores, ya que la superficie presenta cierta curvatura. Teniendo esto en cuenta se escogerán modelos de 3 niveles y 4 niveles. Los modelos de 5 niveles en adelante serán descartados ya que el número de puntos escogido sería elevado y buscamos simplificación.
- Se deben adaptar los modelos escogidos a una **superficie no ortogonal**, usando las dos estrategias comentadas en el apartado 4.2.1.
- En el caso del ajuste para el modelo del polinomio AHRI completo, el cual consta de 10 constantes, debemos escoger un **mínimo de once puntos** para poder ajustar al modelo. Por ello en los modelos en los que obtengamos un número menor de puntos se añadirán puntos en diferentes zonas de la superficie de respuesta (la zona central o en los extremos) con el objetivo de llegar al mínimo de puntos requeridos.
- Para el caso del polinomio reducido se procederá de una manera similar. El polinomio contiene seis constantes, por tanto, debemos tener **un mínimo de siete puntos** para poder llevar a cabo el ajuste del modelo.

Sabiendo todo lo anterior, los modelos escogidos se explican a continuación, así como los puntos escogidos para cada uno de esos modelos de diseño de superficie de respuesta.

#### 4.2.2.1. Diseño central compuesto (CCD)

El diseño central compuesto es el modelo de diseño de superficies de respuesta más utilizado. A la hora de elegir la distribución de puntos sabemos que el diseño central compuesto cuenta con un punto central, cuatro puntos factoriales y 4 axiales, dispuestos tal como se muestra en la Figura 4.10.

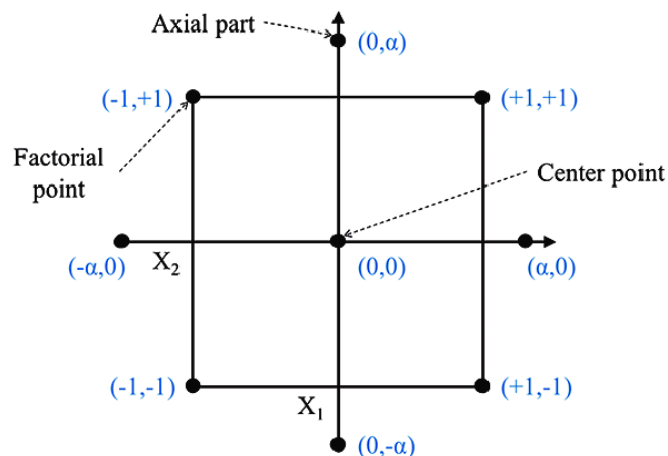


Figura 4.10. Disposición de los puntos en un Diseño Central Compuesto

El valor de  $\alpha$  varía según el número de los factores para lo que lo estamos calculando, según la fórmula:

$$\alpha = (2^k)^{\frac{1}{4}}$$

donde k es el número de factores

Nuestro valor de  $\alpha$  será igual a 1.414. El cual se toma de manera aproximada a la hora de la representación de los puntos dentro de la superficie de respuesta.

Además, como se ha comentado anteriormente, al carecer de una superficie rectangular, se escogerá como superficie de respuesta un cuadrado central dentro de la superficie total. También debemos tener en cuenta que con esta distribución obtenemos nueve puntos en total, lo cual es suficiente para un ajuste del modelo de polinomio reducido (el cual usa seis constantes y necesita siete puntos para ser ajustado) pero es un número insuficiente para el modelo del polinomio AHRI de diez constantes, por ello, se deben añadir dos puntos adicionales. La posición de estos puntos será, tal como se muestra en la Figura 4.12., en las esquinas inferior izquierda y superior derecha. Se escoge la colocación de estos puntos en estas zonas ya que ayudarán a

evitar la interpolación en las zonas que queden fuera del cuadrado central, lo que disminuirá el error en los extremos a la hora de hacer la correlación.

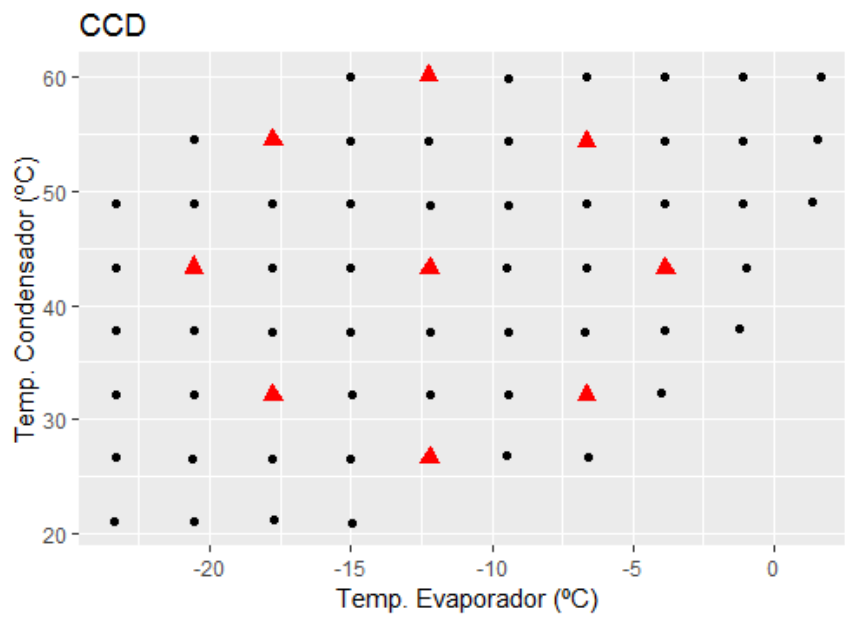


Figura 4.11. Distribución del CCD

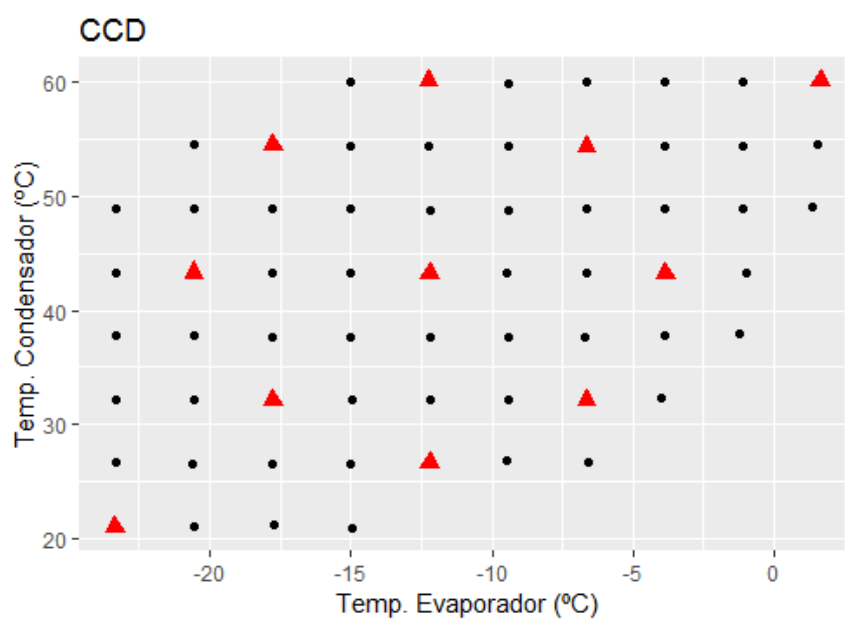


Figura 4.12. Distribución del CCD con dos puntos adicionales

#### 4.2.2.2. Diseño de tres niveles

Este modelo está basado en un diseño  $3^k$  en el que k corresponde al número de factores, obtendremos por tanto nueve puntos de forma que tendremos tres niveles con tres puntos en cada nivel para cada uno de los dos factores. Para la distribución de puntos de este modelo se usan las dos estrategias mencionadas con anterioridad en el apartado 4.2.1. ya que no tenemos una superficie rectangular. Obtendremos por tanto dos tipos de distribuciones diferenciadas:

- En el primer tipo de distribución se va a tomar, al igual que en el diseño central compuesto, una **porción central y cuadrada** como si fuera nuestra superficie de respuesta (Figura 4.13.). Se van a tomar dos puntos adicionales en los extremos de la superficie original para poder tener un mínimo de once puntos a la hora de poder ajustar, de la misma forma y por las mismas razones que en el apartado anterior, tal y como se muestra en la Figura 4.14.

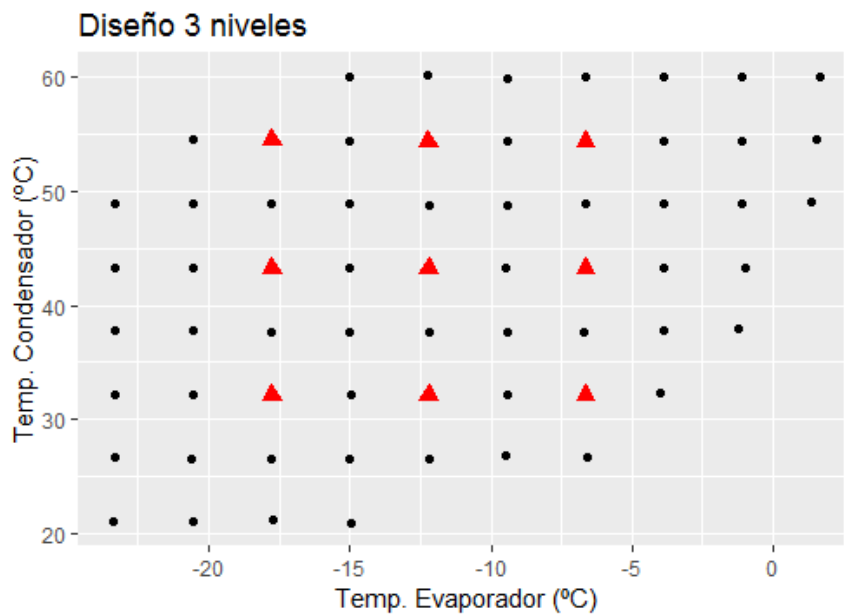


Figura 4.13. Distribución de diseño de tres niveles centrado

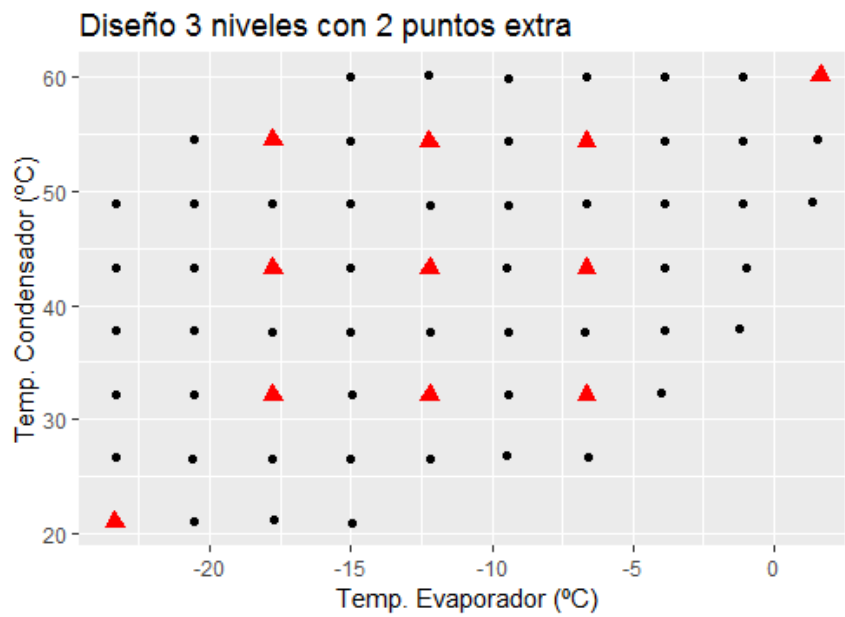


Figura 4.14. Distribución del diseño de tres niveles centrado con dos puntos adicionales

- La otra forma de distribuir los puntos será **usando toda la superficie de respuesta**. Para esta distribución se colocan los puntos sobre la superficie como si esta fuera rectangular (Figura 4.15.) y, posteriormente, se trasladan los puntos que han quedado fuera de la superficie en dirección vertical, tal como se muestra en la Figura 4.16. En el caso de modelo del polinomio AHRI volvemos a tener un número insuficiente de puntos, por ello, se colocan dos puntos adicionales a los lados del punto más centrado para obteniendo así los once puntos necesarios para poder realizar el ajuste (Figura 4.17.).

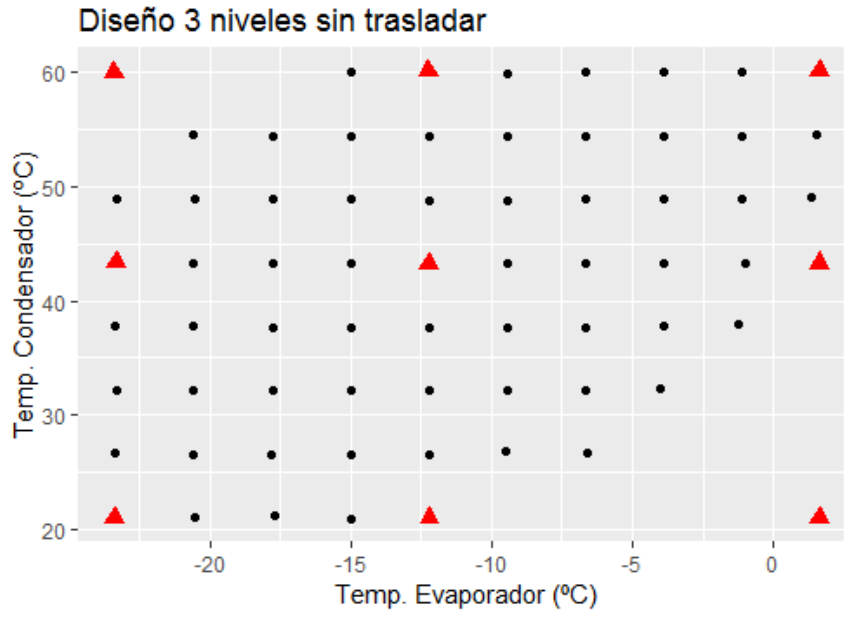


Figura 4.15. Distribución del diseño de tres niveles

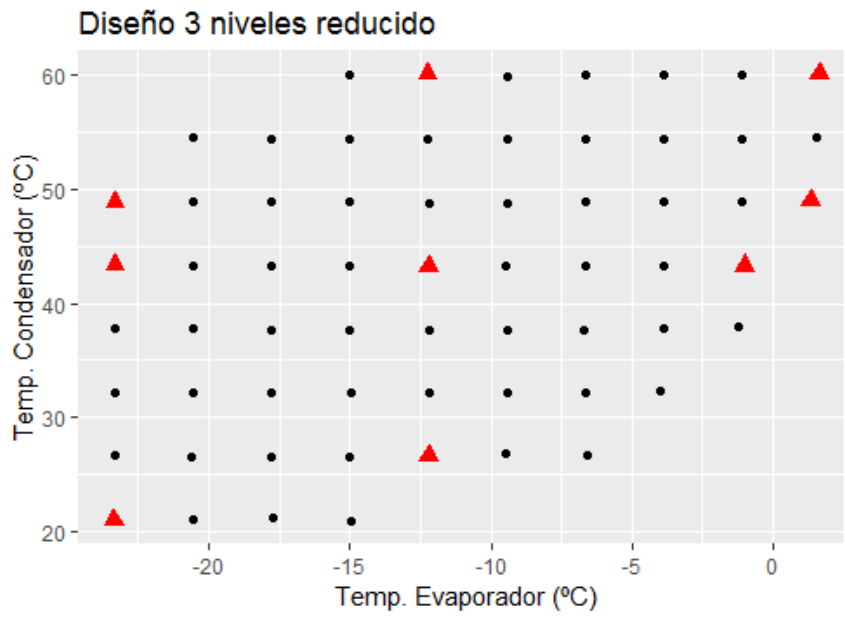


Figura 4.16. Distribución del diseño de tres niveles con traslaciones

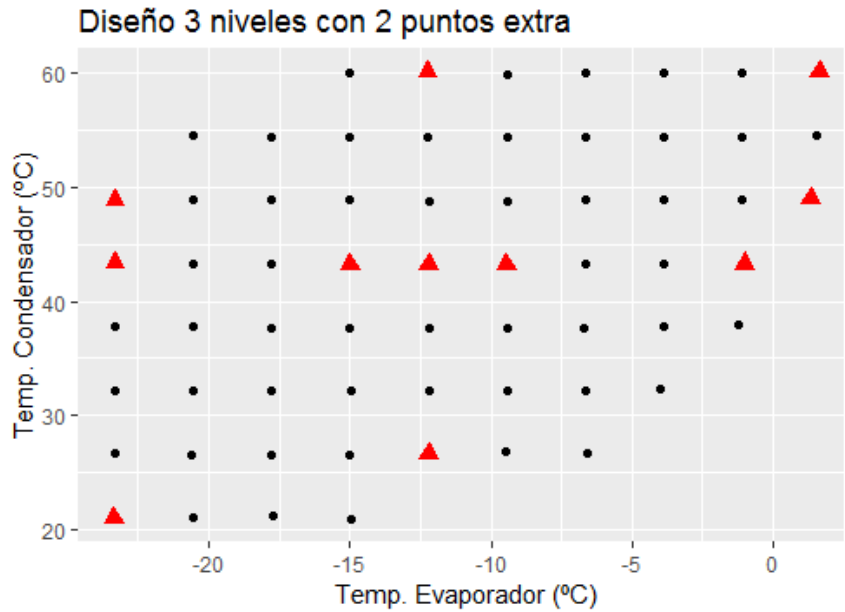


Figura 4.17. Distribución del diseño de tres niveles con traslaciones y dos puntos adicionales

#### 4.2.2.3. Diseño de cuatro niveles

Este modelo está basado en un diseño  $4^k$  en el que  $k$  es igual al número de factores con el que contamos, obtendremos por tanto un total de dieciséis puntos distribuidos en cuatro niveles con cuatro puntos en cada nivel. Para la distribución de los puntos se usarán las mismas estrategias que en el apartado anterior. Además, en este modelo no es necesaria la adición de puntos ya que contamos con un número elevado.

- En el primer tipo de distribución vamos a tomar un **cuadrado central** dentro de la superficie total como la superficie de respuesta (Figura 4.18.). Al no añadir puntos en las esquinas se dará una interpolación en esas zonas dentro del mapa de puntos, lo que puede llevar a un error elevado en los extremos.

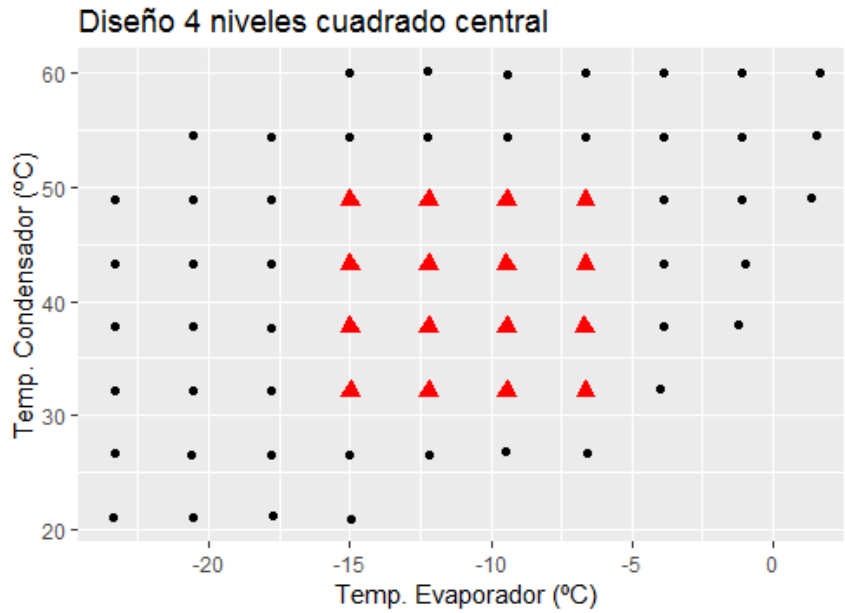


Figura 4.18. Distribución del diseño de cuatro niveles centrado

- Para el segundo tipo de distribución se usará **toda la superficie de respuesta** que sea posible con lo que evitaremos interpolaciones en zonas de la misma que no contenga puntos. Para ello partiendo de la distribución anterior se intentará repartir de forma homogénea y respetando, en la medida de lo posible, el número de niveles y de puntos por nivel. El resultado de esta distribución se puede comprobar en la Figura 4.19., se ha mantenido el número de niveles para la temperatura del evaporador y los cuatro puntos en cada uno de estos niveles.

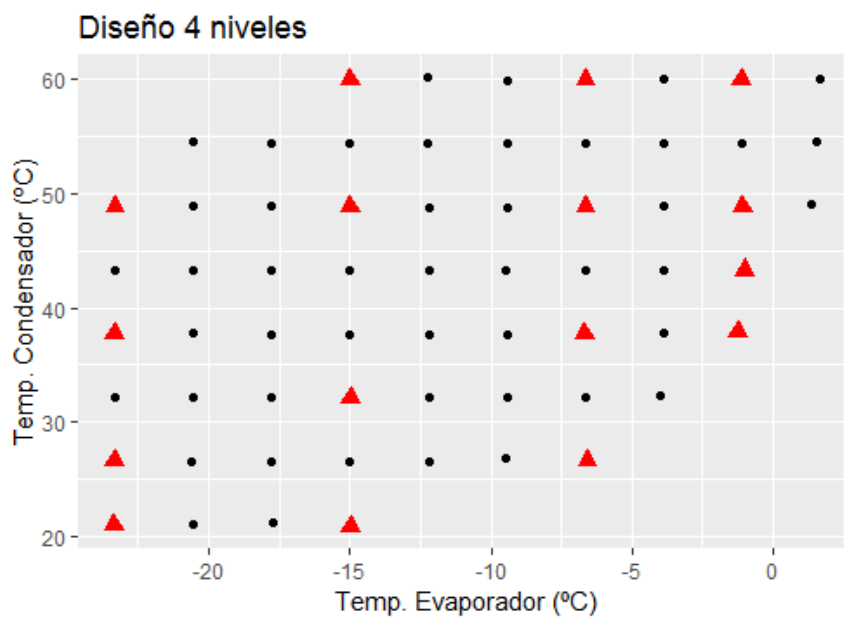


Figura 4.19. Distribución del diseño de cuatro niveles





#### 4.2.2.5. Diseño Central Reducido

Es una variante del diseño central compuesto en el cual eliminamos dos puntos de los cuatro puntos factoriales, obteniendo así un total de siete puntos (Figura 4.22.). Este modelo se usará únicamente para el ajuste del polinomio AHRI reducido ya que no tendría sentido la adición de puntos sobre un modelo que es la versión reducida de otro modelo más complejo, el cual ya se ha utilizado. Al igual que en el diseño central compuesto se tomará una porción central de la superficie ya que la forma de esta no es rectangular. Teniendo esto en cuenta, la distribución de puntos usando este modelo quedaría tal como se muestra en la Figura 4.23.

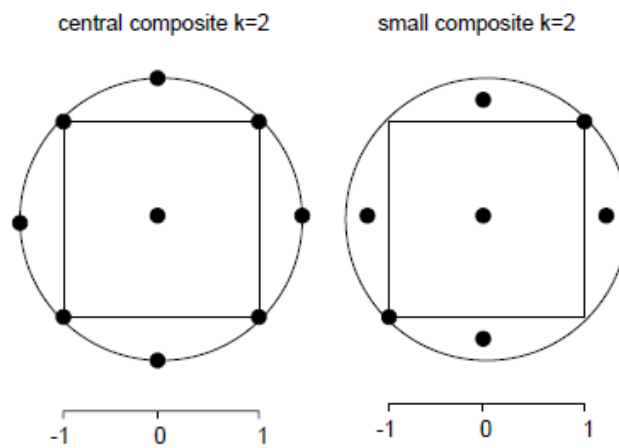


Figura 4.22. Disposición de puntos para el Diseño Central Reducido

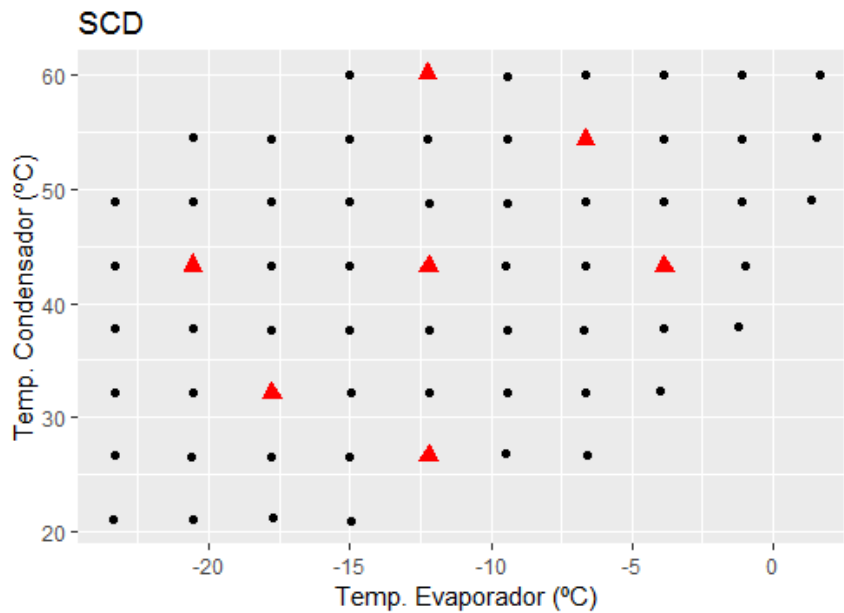


Figura 4.23. Distribución del Diseño Central Reducido

#### 4.2.2.6. Diseño Hexagonal

En este modelo se hará una selección de puntos en forma de hexágono y un punto adicional en el centro del hexágono. Al igual que en el apartado anterior, este modelo es una variación de diseño central compuesto para simplificarlo y reducir el número de puntos escogidos, por tanto, no se usará el modelo para el polinomio AHRI convencional, únicamente para el reducido. Se intenta distribuir los puntos de manera que formen un hexágono lo más amplio posible, la distribución de puntos queda mostrada en la Figura 4.24.

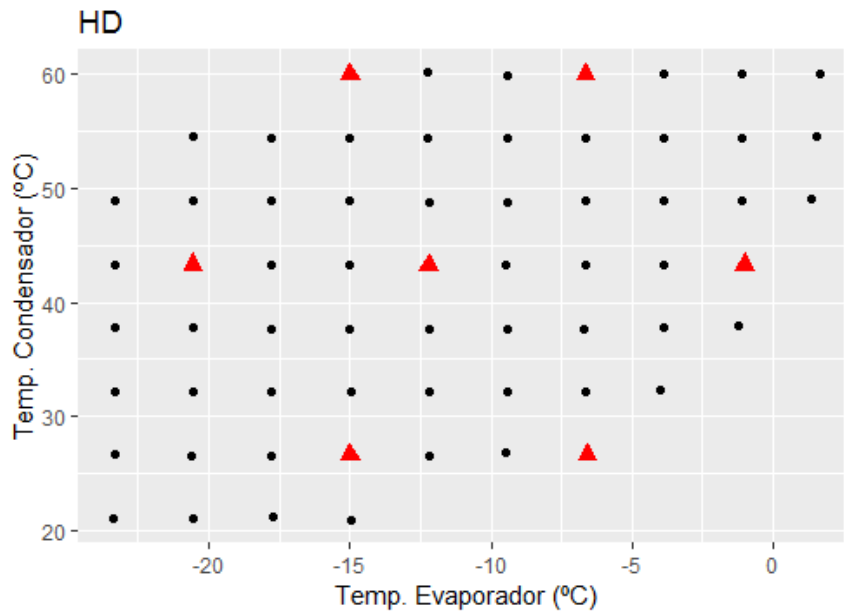


Figura 4.24. Distribución del Diseño Hexagonal

#### 4.2.2.7. Modelo Federov

A diferencia que el resto de los modelos de diseño de superficie de respuesta mencionados en los apartados anteriores, en los que los puntos se escogen de forma manual basándonos en las normas que cada modelo aplica, en modelo Federov se basa en un **algoritmo** para la selección de puntos en base a nuestro marco de datos y se puede aplicar de forma sencilla usando el software de R, utilizado para la selección de puntos del resto de modelos.

El algoritmo Federov escoge los puntos dentro del marco de datos para obtener un diseño óptimo personalizado. Usando este modelo se obtiene una matriz de puntos la cual es la óptima en algún sentido. La manera en que escoge los puntos del diseño es diferente según se aplique uno de los tres criterios que tenemos (criterio “D”, “A” o “I”).

- En el criterio “D” este algoritmo usa el determinante de la matriz de dispersión, para obtener los puntos óptimos.
- Con el criterio “A” usa la inversa de la matriz anterior.

- Usando el criterio "I" se obtienen los puntos usando la matriz traspuesta del marco de datos, multiplicada por la inversa de la matriz de dispersión y dividido entre el número de filas del marco de datos original.

Usando la función para el modelo Federov en R podemos obtener el número de puntos deseado usando cada uno de los criterios. Teniendo esto en cuenta, se obtendrán para el criterio D, A e I once puntos para el modelo que usará el polinomio AHRI convencional y siete puntos para el polinomio AHRI reducido, ya que este es el mínimo de puntos necesarios para poder llevar a cabo el ajuste.

A continuación, se muestra la distribución de puntos de puntos obtenida para el modelo del polinomio AHRI convencional, el cual necesita 11 puntos. La distribución se muestra para los tres criterios del algoritmo Federov ("D", "A" e "I" respectivamente).

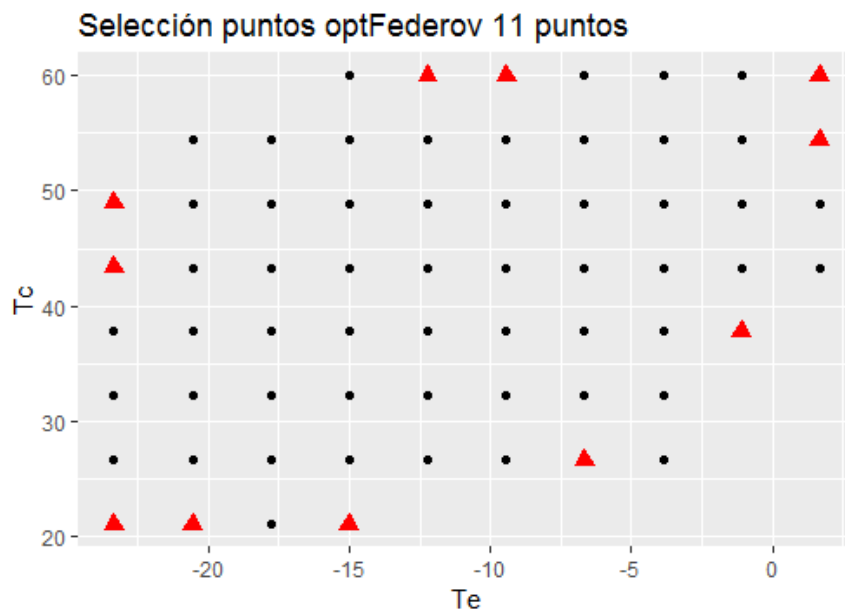


Figura 4.25. Distribución de once puntos del modelo Federov criterio "D"

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

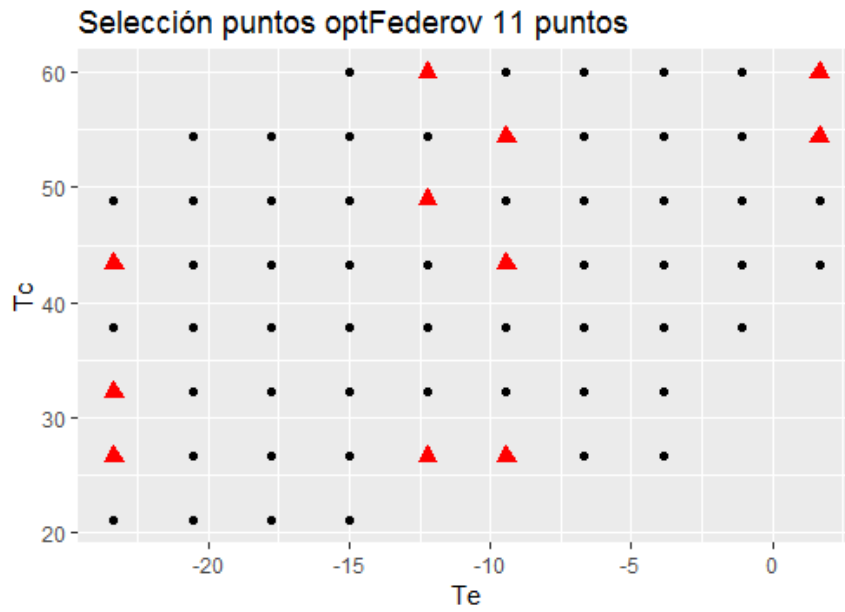


Figura 4.26. Distribución de once puntos del modelo Federov criterio "A"

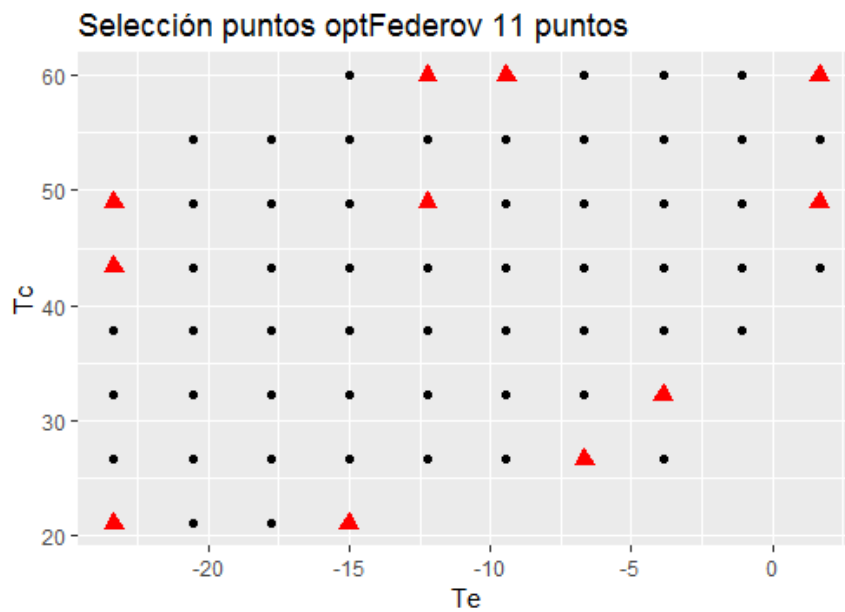


Figura 4.27. Distribución de once puntos del modelo Federov criterio "I"

En las Figuras 4.28, 4.29 y 4.30 se muestra la distribución de puntos para el modelo basado en el polinomio reducido, para el cual necesitamos 7 puntos.

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

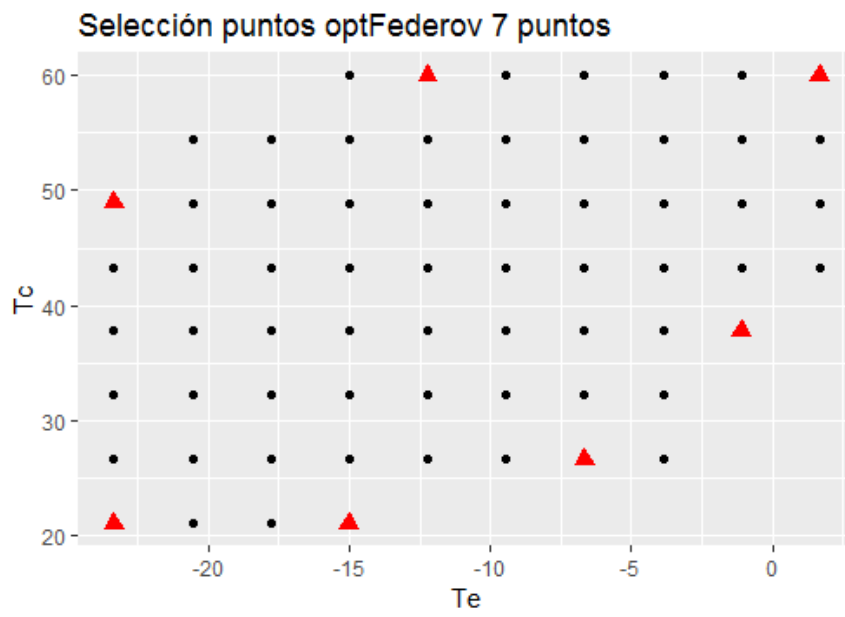


Figura 4.28. Distribución de siete puntos del modelo Federov criterio "D"

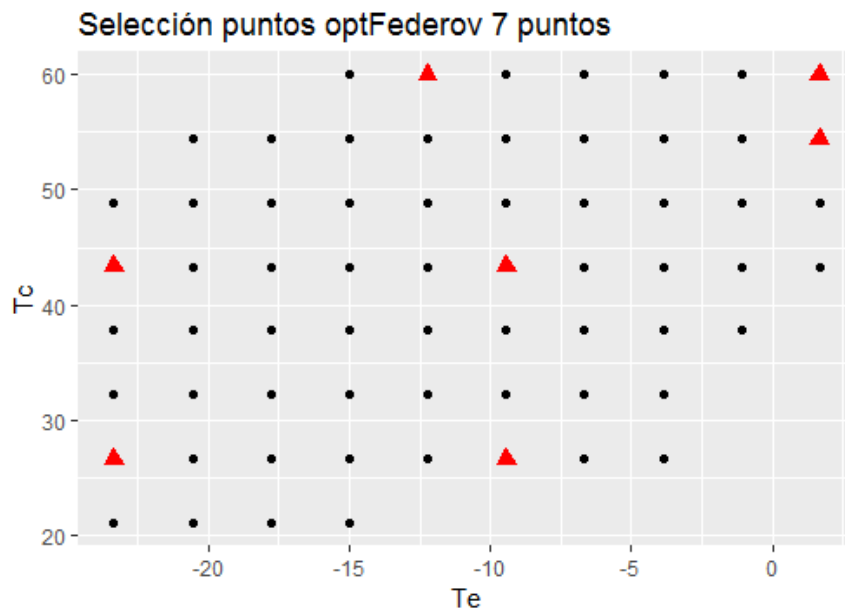


Figura 4.29. Distribución de siete puntos del modelo Federov criterio "A"

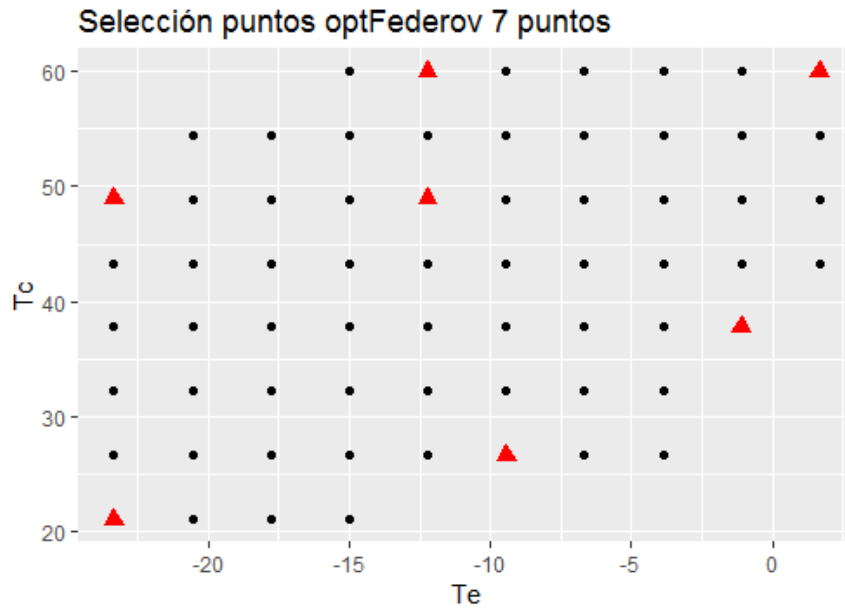


Figura 4.30. Distribución de siete puntos del modelo Federov criterio "I"

## 5. Ajuste de modelos

### 5.1. Introducción

Una vez tenemos la selección y distribución de puntos para cada uno de los diseños de superficie de respuesta debemos usar esos puntos para realizar un ajuste a los modelos matemáticos seleccionados. Este ajuste se llevará a cabo usando el software R, usando la función **lm** la cual realiza una regresión lineal en base a un polinomio predefinido, en nuestro caso estos polinomios serán el polinomio AHRI original y el reducido en cada caso.

En el caso del polinomio AHRI original el polinomio para el cual vamos a ajustar será:

$$W_c = C_1 + C_2 * Te + C_3 * Tc + C_4 * Te^2 + C_5 * Te * Tc + C_6 * Tc^2 + C_7 * Te^3 + C_8 * Tc * Te^2 + C_9 * Te * Tc^2 + C_{10} * Tc^3$$

$$m_{ref} = C_1 + C_2 * Te + C_3 * Tc + C_4 * Te^2 + C_5 * Te * Tc + C_6 * Tc^2 + C_7 * Te^3 + C_8 * Tc * Te^2 + C_9 * Te * Tc^2 + C_{10} * Tc^3$$

Para el trabajo del compresor ( $W_c$ ) y el gasto másico ( $m_{ref}$ ) de refrigerante respectivamente.

A su vez, el modelo para el cual ajustaremos usando el polinomio AHRI reducido será de la siguiente manera:

$$W_c = C_1 + C_2 * Te + C_3 * Tc + C_4 * Te^2 + C_5 * Te * Tc + C_6 * Tc^2$$
$$m_{ref} = C_1 + C_2 * Te + C_3 * Tc + C_4 * Te^2 + C_5 * Te * Tc + C_6 * Tc^2$$

Para el trabajo del compresor ( $W_c$ ) y el gasto másico de refrigerante ( $m_{ref}$ ) respectivamente.

Al realizar la regresión usando el software de R obtendremos una tabla resumen que contiene diversos datos como por ejemplo el valor de cada una de las constantes (los coeficientes de regresión que deben ser aportados por el fabricante según establece la norma AHRI 540 para caracterización de compresores), en nuestro caso nos fijaremos especialmente en el **p-valor**, este valor será usado para comprobar si los coeficientes obtenidos son significativos o no (los coeficientes serán significativos si tiene un valor menor que 0.05). Como en estos casos partimos de un polinomio en base al cual hay que ajustar, sin tener la posibilidad de añadir o eliminar constantes, tener demasiadas constantes no significativas podría indicar que estamos usando un polinomio con demasiadas constantes y se debería simplificar.

Una vez se ha ajustado al modelo procederemos a calcular mediante ese modelo el valor del trabajo del compresor y el gasto másico del refrigerante para los valores de temperatura del evaporador y temperatura del condensador para los que se obtenido un valor de forma experimental de trabajo de compresor y gasto másico de refrigerante. De esta forma, como se muestra en la Figura 5.1., añadiremos a nuestro marco de datos dos variables nuevas ( $W_c_{corr}$  y  $m_{ref}_{corr}$ )



Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

| Pc       | Tc       | Pe       | Te         | mref     | Wc       | Qe       | SC       | SH       | Tsuc       | Td       | Tc_level | Te_level | Te_Tc | Wc_corr  | mref_corr |
|----------|----------|----------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|----------|-------|----------|-----------|
| 22.35657 | 48.84549 | 4.828975 | -6.649981  | 234.9999 | 3281.781 | 23049893 | 14.86190 | 19.82173 | 4.362192   | 76.37556 | 6        | 7        | 7_6   | 3282.022 | 235.0926  |
| 11.16815 | 21.07563 | 2.638516 | -23.368904 | 130.0219 | 1905.210 | 17332704 | 14.84928 | 19.93673 | -12.292915 | 56.35492 | 1        | 1        | 1_1   | 1905.196 | 130.0214  |
| 11.17163 | 21.08705 | 2.939805 | -20.552903 | 145.5959 | 1932.882 | 19652330 | 14.93024 | 19.85542 | -9.522020  | 53.54897 | 1        | 2        | 2_1   | 1927.508 | 145.4209  |
| 11.22891 | 21.27481 | 3.269882 | -17.710316 | 162.7516 | 1956.257 | 22183547 | 15.30633 | 19.60756 | -6.817128  | 51.05910 | 1        | 3        | 3_1   | 1951.273 | 162.3753  |
| 11.11760 | 20.90933 | 3.612530 | -14.981606 | 179.9714 | 1955.619 | 24961720 | 14.87075 | 20.00428 | -3.868088  | 49.02089 | 1        | 4        | 4_1   | 1948.207 | 180.2089  |
| 12.96551 | 26.65190 | 2.641128 | -23.343458 | 129.1530 | 2085.376 | 16116930 | 14.89756 | 19.85340 | -12.313705 | 63.15216 | 2        | 1        | 1_2   | 2091.470 | 129.2628  |
| 12.95503 | 26.62114 | 2.934016 | -20.604839 | 144.1570 | 2116.463 | 18245164 | 14.87825 | 19.94629 | -9.523495  | 60.15343 | 2        | 2        | 2_2   | 2120.130 | 144.2280  |
| 12.95017 | 26.60684 | 3.257449 | -17.813251 | 160.9639 | 2143.467 | 20651350 | 14.88111 | 19.96823 | -6.719774  | 57.42149 | 2        | 3        | 3_2   | 2145.603 | 160.8170  |
| 12.95333 | 26.61612 | 3.609823 | -15.002406 | 179.0980 | 2168.309 | 23272421 | 14.94415 | 19.89229 | -3.951075  | 55.19793 | 2        | 4        | 4_2   | 2167.099 | 178.9899  |
| 12.94714 | 26.59791 | 3.987810 | -12.210095 | 198.6609 | 2182.671 | 26148673 | 14.90919 | 19.86453 | -1.174219  | 53.11327 | 2        | 5        | 5_2   | 2181.732 | 198.6231  |
| 13.00853 | 26.77818 | 4.386470 | -9.474469  | 219.2523 | 2199.609 | 29177975 | 15.24516 | 20.08875 | 1.685969   | 51.78143 | 2        | 6        | 6_2   | 2198.315 | 219.4359  |
| 12.96361 | 26.64637 | 4.837740 | -6.595879  | 241.3083 | 2202.450 | 32546707 | 14.96834 | 19.91669 | 4.468899   | 49.90639 | 2        | 7        | 7_2   | 2195.041 | 243.2688  |
| 14.95997 | 32.19794 | 2.643047 | -23.324760 | 128.1907 | 2277.533 | 14881377 | 15.02832 | 19.78864 | -12.330992 | 70.43540 | 3        | 1        | 1_3   | 2283.213 | 128.3187  |
| 14.95195 | 32.17671 | 2.938929 | -20.560753 | 143.2973 | 2313.304 | 16886818 | 14.90284 | 19.84234 | -9.537139  | 67.11553 | 3        | 2        | 2_3   | 2320.206 | 143.4350  |
| 14.94656 | 32.16249 | 3.262898 | -17.768059 | 159.9649 | 2353.133 | 19124320 | 14.95617 | 19.81365 | -6.760430  | 64.20553 | 3        | 3        | 3_3   | 2354.253 | 160.0100  |
| 14.94461 | 32.15731 | 3.613860 | -14.971438 | 178.0301 | 2383.419 | 21581995 | 14.92686 | 19.76965 | -3.988202  | 61.61181 | 3        | 4        | 4_3   | 2384.436 | 178.0287  |
| 14.94613 | 32.16138 | 3.987764 | -12.210422 | 197.3650 | 2408.985 | 24258297 | 14.96284 | 19.85158 | -1.181708  | 59.48119 | 3        | 5        | 5_3   | 2409.806 | 197.3193  |
| 14.94668 | 32.16285 | 4.391261 | -9.442759  | 218.1158 | 2429.220 | 27170392 | 14.93881 | 19.89859 | 1.612033   | 57.64656 | 3        | 6        | 6_3   | 2429.717 | 218.2626  |
| 14.95563 | 32.18646 | 4.829998 | -6.643588  | 241.1390 | 2443.650 | 30421049 | 14.92789 | 19.87840 | 4.399947   | 55.92193 | 3        | 7        | 7_3   | 2444.701 | 241.1813  |
| 15.01976 | 32.35538 | 5.273460 | -4.003057  | 264.2627 | 2456.748 | 33689268 | 15.26177 | 20.01819 | 7.118238   | 54.58852 | 3        | 8        | 8_3   | 2459.660 | 264.4531  |

Figura 5.1. Marco de datos del CCD para polinomio AHRI

Como se puede comprobar en la Figura 5.1. los valores de las variables obtenidas al partir del modelo y las equivalentes obtenidas de forma experimental son muy similares.

Una vez obtenidas estas variables, se plotearán de forma que el eje de abscisas tengamos las variables obtenidas de forma experimental (Wc y mref) y en el eje de ordenadas su equivalente obtenida a partir del modelo (Wc\_corr y mref\_corr respectivamente) junto a una recta de pendiente igual a uno. De esta forma, si el modelo fuera ideal y los valores de las variables fueran exactamente iguales a los valores de las variables obtenidos de forma experimental todos los puntos ploteados pertenecerían a la recta de pendiente igual a uno (Figura 5.2.).

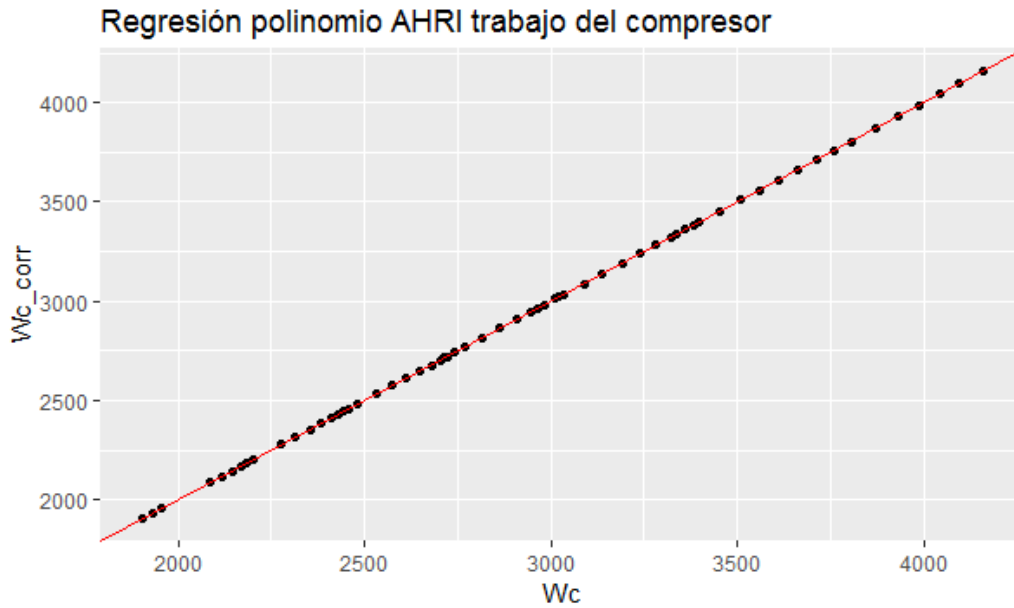


Figura 5.2. Ajuste ideal entre modelo teórico y puntos experimentales

De esta forma podemos comprobar de forma gráfica si el modelo escogido es un buen modelo o los valores difieren demasiado de los valores experimentales.

Otros valores que nos ayudarán a decidir si estamos usando o no un buen modelo serán el error máximo relativo y el RMSE. El error máximo relativo se obtendrá haciendo, para cada uno de los puntos, la resta del valor experimental menos el valor del modelo y dividido entre el valor experimental, de la siguiente forma, para el trabajo del compresor y el gasto másico del refrigerante respectivamente:

$$Error_{rel} = \max \left[ \frac{W_c - W_{c\_corr}}{W_c} \right]$$

$$Error_{rel} = \max \left[ \frac{m_{ref} - m_{ref\_corr}}{m_{ref}} \right]$$

El RMSE (raíz del error cuadrático medio) es una medida de uso frecuente de la diferencia entre los valores estimados por un modelo y los valores experimentales. Este valor es muy utilizado a la hora de comparar dos conjuntos de datos, es positivo y un valor de 0 indicaría un ajuste perfecto a los datos experimentales. Además, es un valor dimensional que en nuestro caso se medirá en Wattios para el trabajo del compresor y en kg/h para el gasto másico del refrigerante. Se obtiene de la siguiente forma:

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{pred,i} - y_i)^2}{n}}$$

Donde:

- $y_{pred,i}$  es el valor predicho por el modelo
- $y_i$  es el valor obtenido de forma experimental
- $n$  es el número de observaciones o puntos que se han tomado

Para nuestro caso el RMSE se calculará usando R con una función que necesita todos los valores obtenidos de forma experimental (los cuales interpreta como actual) y todos los valores que se han obtenido usando el modelo (los cuales interpreta como predicho).

## 5.2. Ajuste del modelo aplicando el polinomio AHRI convencional

### 5.2.1. Ajuste aplicando el Diseño Central Compuesto

A continuación, se estudiará el modelo matemático para una distribución de puntos en base al diseño central compuesto, esta distribución se ha mostrado en el apartado 4.2. En la Figura 5.3. se muestra la correlación entre el trabajo del compresor obtenido de forma experimental y el obtenido a través del modelo, y en la Figura 5.4. se observa esa correlación para el gasto másico del refrigerante.

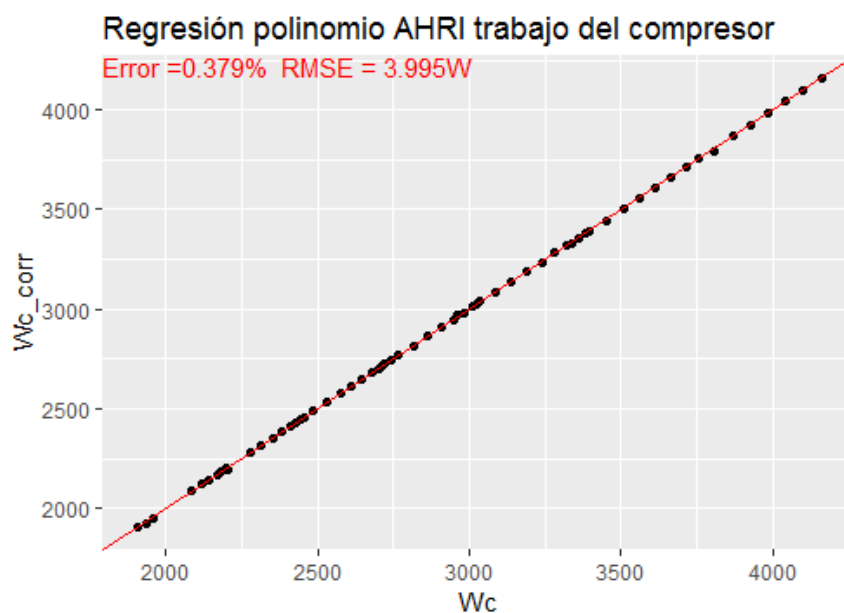


Figura 5.3. Ajuste para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

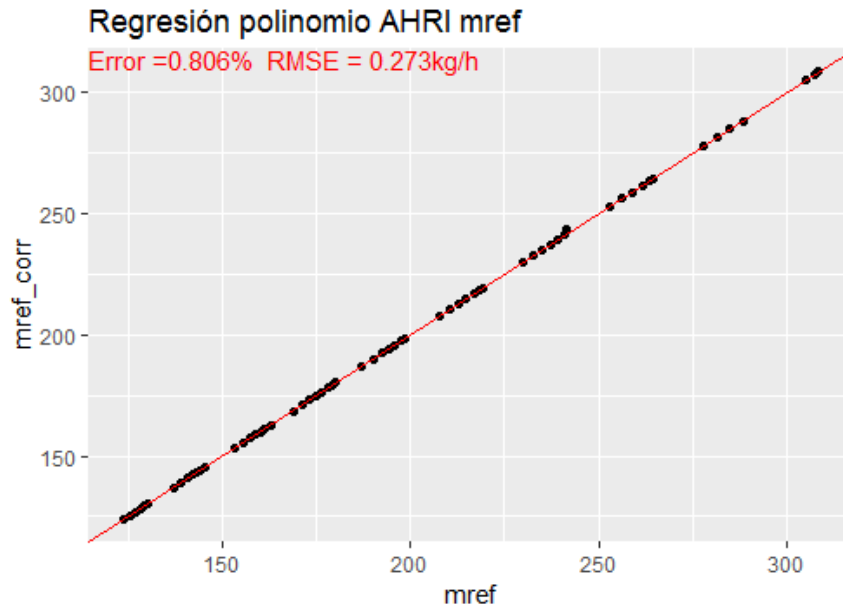


Figura 5.4. Ajuste para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI convencional para mref

Como podemos observar con este modelo obtenemos unos puntos que se ajustan de manera correcta a la recta, el valor del error máximo relativo tanto para el trabajo del compresor como para el gasto másico de refrigerante se podría considerar bajo. Los valores del RMSE también son bajos en comparación a los valores del resto de los modelos.

Gracias a la adición de los dos puntos se ha conseguido un ajuste adecuado en los extremos de la recta.

En las Figuras 5.5 y 5.6. se puede ver el cuadro resumen del ajuste del modelo para el trabajo del compresor y el gasto masico de refrigerante respectivamente, en el que podemos comprobar el valor de las constantes y la significancia de los valores gracias al p-valor ( $Pr(>|t|)$ ).

| Coefficients: |            |            |         |          |
|---------------|------------|------------|---------|----------|
|               | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |
| (Intercept)   | 708.006257 | 572.128752 | 1.237   | 0.433    |
| Te            | -34.691414 | 44.591136  | -0.778  | 0.579    |
| Tc            | 64.278615  | 30.372737  | 2.116   | 0.281    |
| I(Te^2)       | -0.820073  | 1.676348   | -0.489  | 0.710    |
| I(Tc^2)       | -0.540634  | 0.563363   | -0.960  | 0.513    |
| I(Te^3)       | -0.005018  | 0.024150   | -0.208  | 0.870    |
| I(Tc^3)       | 0.006967   | 0.003626   | 1.921   | 0.306    |
| Te:Tc         | 1.115866   | 1.210606   | 0.922   | 0.526    |
| Tc:I(Te^2)    | 0.008770   | 0.019329   | 0.454   | 0.729    |
| Te:I(Tc^2)    | -0.003772  | 0.008462   | -0.446  | 0.733    |

Figura 5.5. Tabla resumen para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI convencional para Wc

| Coefficients: |            |            |         |          |
|---------------|------------|------------|---------|----------|
|               | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |
| (Intercept)   | 3.169e+02  | 2.303e+01  | 13.756  | 0.0462 * |
| Te            | 1.096e+01  | 1.795e+00  | 6.103   | 0.1034   |
| Tc            | -4.597e-01 | 1.223e+00  | -0.376  | 0.7711   |
| I(Te^2)       | 1.513e-01  | 6.749e-02  | 2.243   | 0.2670   |
| I(Tc^2)       | 2.597e-03  | 2.268e-02  | 0.115   | 0.9274   |
| I(Te^3)       | 8.373e-04  | 9.723e-04  | 0.861   | 0.5474   |
| I(Tc^3)       | -4.506e-05 | 1.460e-04  | -0.309  | 0.8094   |
| Te:Tc         | -2.536e-02 | 4.874e-02  | -0.520  | 0.6946   |
| Tc:I(Te^2)    | -4.894e-04 | 7.782e-04  | -0.629  | 0.6426   |
| Te:I(Tc^2)    | 6.474e-05  | 3.407e-04  | 0.190   | 0.8804   |
| ---           |            |            |         |          |

Figura 5.6. Tabla resumen para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI convencional para mref

Podemos comprobar que tanto para el trabajo del compresor como para el gasto másico de refrigerante el p-valor da muy por encima de 0.05 para todas las constantes, esto nos indica que esos valores deberían ser cero, y por ende que este modelo tiene demasiadas constantes y se deberían eliminar para que estas ganaran significancia.

### 5.2.2. Ajuste aplicando el diseño de tres niveles

En este caso se va a comprobar el modelo obtenido usando la distribución en tres niveles. En primer lugar, hablaremos de la distribución en tres niveles usando un cuadrado central dentro de la superficie de estudio y dos puntos adicionales (Figura 4.14). En la Figura 5.7. y 5.8. se puede comprobar la correlación aplicando el modelo del polinomio AHRI para el trabajo del compresor y el gasto másico de refrigerante respectivamente.

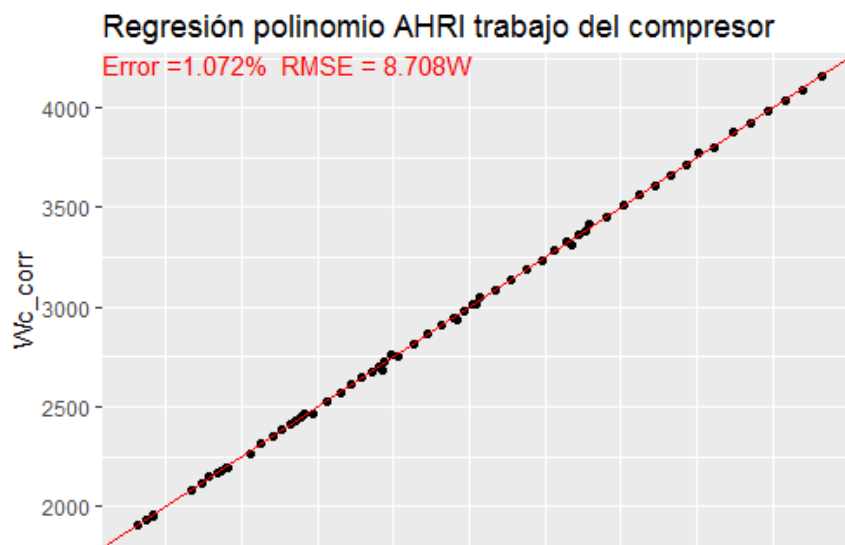


Figura 5.7. Ajuste para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para Wc

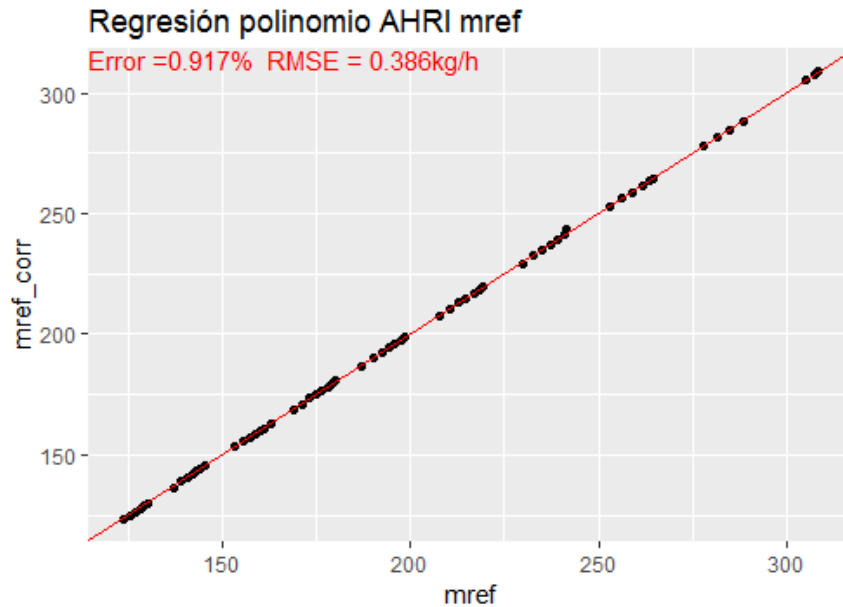


Figura 5.8. Ajuste para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para mref

Podemos ver que se realiza un buen ajuste de los puntos, aunque en el modelo para el trabajo del compresor hay ciertos puntos los cuales se alejan de la recta. Debido a esto, el error máximo relativo y el RMSE obtenido para ese modelo han aumentado en comparación con el diseño central compuesto. La correlación para el gasto másico de refrigerante se mantiene adecuada y con valores de error máximo relativo y RMSE bajos. Al igual que en el diseño central compuesto al añadir los puntos en las esquinas de la superficie conseguimos un buen ajuste en los extremos para ambos modelos.

En las tablas resumen de ambos modelos (Figura 5.9. y 5.10.) podemos comprobar que los valores de las constantes se mantienen relativamente similares al diseño central compuesto (la distribución de puntos de estos dos diseños guarda cierta similitud) y que, al igual que en el caso anterior la mayoría de las constantes no son significativas, por los mismos motivos que en el apartado anterior.

| Coefficients: |            |            |         |          |
|---------------|------------|------------|---------|----------|
|               | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |
| (Intercept)   | 7.973e+02  | 1.889e+02  | 4.220   | 0.148    |
| Te            | -2.050e+01 | 8.599e+00  | -2.383  | 0.253    |
| Tc            | 6.092e+01  | 1.298e+01  | 4.692   | 0.134    |
| I(Te^2)       | 2.228e-01  | 4.569e-01  | 0.488   | 0.711    |
| I(Tc^2)       | -4.730e-01 | 2.922e-01  | -1.619  | 0.352    |
| I(Te^3)       | 1.457e-02  | 8.304e-03  | 1.754   | 0.330    |
| I(Tc^3)       | 6.338e-03  | 2.147e-03  | 2.952   | 0.208    |
| Te:Tc         | 9.808e-01  | 2.432e-01  | 4.032   | 0.155    |
| Tc:I(Te^2)    | -6.466e-04 | 4.888e-03  | -0.132  | 0.916    |
| Te:I(Tc^2)    | -4.874e-03 | 2.443e-03  | -1.995  | 0.296    |

Figura 5.9. Tabla resumen para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para Wc

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

Coefficients:

|             | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |
|-------------|------------|------------|---------|----------|
| (Intercept) | 3.271e+02  | 1.026e+01  | 31.891  | 0.0200 * |
| Te          | 1.134e+01  | 4.669e-01  | 24.282  | 0.0262 * |
| Tc          | -1.127e+00 | 7.049e-01  | -1.598  | 0.3559   |
| I(Te^2)     | 1.698e-01  | 2.481e-02  | 6.845   | 0.0923 . |
| I(Tc^2)     | 1.735e-02  | 1.586e-02  | 1.094   | 0.4715   |
| I(Te^3)     | 1.264e-03  | 4.509e-04  | 2.804   | 0.2181   |
| I(Tc^3)     | -1.539e-04 | 1.166e-04  | -1.320  | 0.4127   |
| Te:Tc       | -3.505e-02 | 1.321e-02  | -2.654  | 0.2294   |
| Tc:I(Te^2)  | -6.138e-04 | 2.654e-04  | -2.313  | 0.2598   |
| Te:I(Tc^2)  | 1.412e-04  | 1.327e-04  | 1.064   | 0.4801   |

---

Figura 5.10. Tabla resumen para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para mref

En segundo lugar, hablaremos de la distribución en tres niveles usando toda la superficie y trasladando los puntos (Figura 4.17.). En este caso se obtienen las correlaciones mostradas en la Figura 5.11 y 5.12.

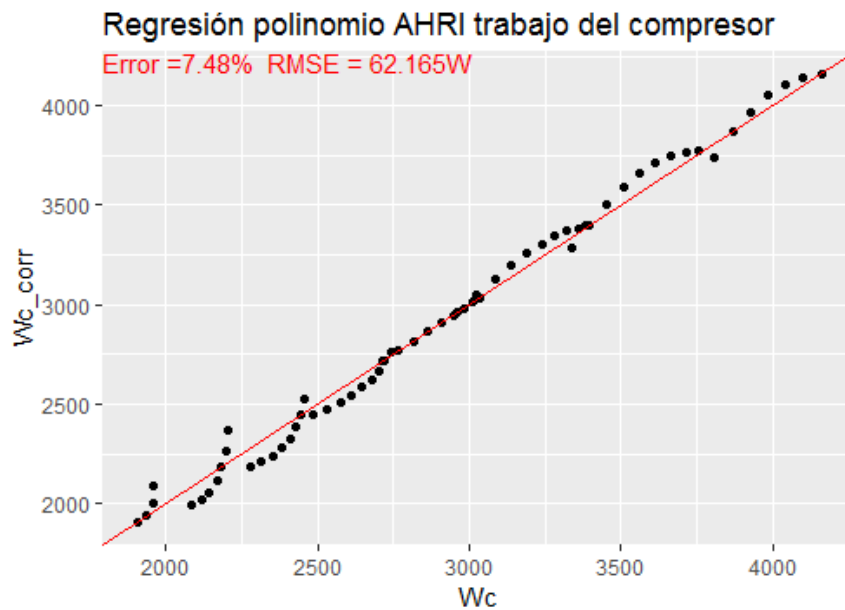


Figura 5.11. Ajuste para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para Wc

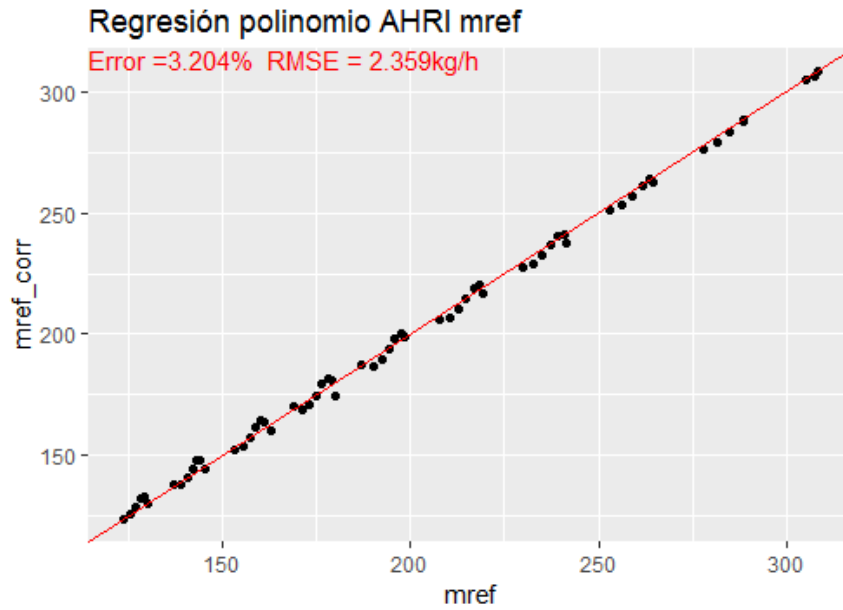


Figura 5.12. Ajuste para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para mref

Se puede ver claramente que, pese a que usando esta distribución se ha intentado cubrir la mayor parte de superficie con el objetivo de evitar interpolación en zonas sin puntos, se ha obtenido un mal modelo y podemos decir que esta distribución de puntos no es adecuada. Esto puede ser debido a que, a causa de las traslaciones que hemos aplicado, se han obtenido niveles en los que había muy pocos puntos, como se puede ver en la distribución, el único nivel con un buen número de puntos es el nivel central de la temperatura del condensador (Figura 5.13), es por eso por lo que en la zona central de la correlación del ajuste del modelo para el trabajo del compresor si ha quedado bien ajustado.

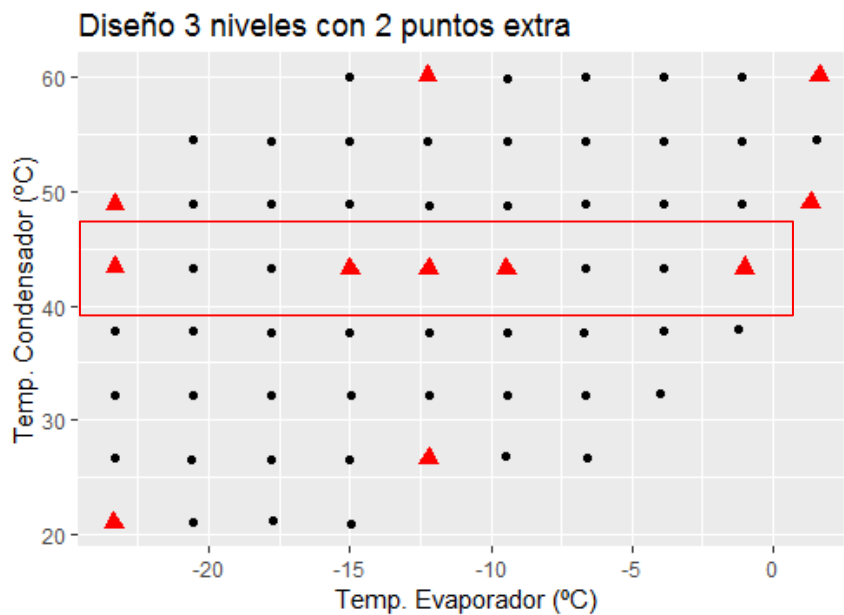


Figura 5.13. Distribución del diseño de tres niveles con traslaciones y dos puntos adicionales



A continuación, se muestra la tabla resumen para para el trabajo del compresor y el gasto másico de refrigerante (Figura 5.14 y 5.15).

| Coefficients: |            |            |         |          |
|---------------|------------|------------|---------|----------|
|               | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |
| (Intercept)   | 6.336e+03  | 6.621e+02  | 9.569   | 0.0663 . |
| Te            | 1.966e+02  | 2.675e+01  | 7.351   | 0.0861 . |
| Tc            | -2.852e+02 | 4.122e+01  | -6.918  | 0.0914 . |
| I(Te^2)       | 2.595e+00  | 3.769e-01  | 6.885   | 0.0918 . |
| I(Tc^2)       | 6.595e+00  | 8.437e-01  | 7.817   | 0.0810 . |
| I(Te^3)       | -6.105e-03 | 9.263e-04  | -6.591  | 0.0959 . |
| I(Tc^3)       | -4.082e-02 | 5.661e-03  | -7.211  | 0.0877 . |
| Te:Tc         | -7.503e+00 | 1.002e+00  | -7.485  | 0.0845 . |
| Tc:I(Te^2)    | -7.148e-02 | 9.202e-03  | -7.767  | 0.0815 . |
| Te:I(Tc^2)    | 7.144e-02  | 8.769e-03  | 8.148   | 0.0777 . |

Figura 5.14. Tabla resumen para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para Wc

| Coefficients: |            |            |         |          |
|---------------|------------|------------|---------|----------|
|               | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |
| (Intercept)   | 1.135e+02  | 1.091e+02  | 1.040   | 0.487    |
| Te            | 3.277e+00  | 4.406e+00  | 0.744   | 0.593    |
| Tc            | 1.241e+01  | 6.790e+00  | 1.827   | 0.319    |
| I(Te^2)       | 4.537e-02  | 6.209e-02  | 0.731   | 0.598    |
| I(Tc^2)       | -2.647e-01 | 1.390e-01  | -1.904  | 0.308    |
| I(Te^3)       | 9.422e-04  | 1.526e-04  | 6.175   | 0.102    |
| I(Tc^3)       | 1.772e-03  | 9.326e-04  | 1.901   | 0.308    |
| Te:Tc         | 2.636e-01  | 1.651e-01  | 1.596   | 0.356    |
| Tc:I(Te^2)    | 2.082e-03  | 1.516e-03  | 1.374   | 0.401    |
| Te:I(Tc^2)    | -2.477e-03 | 1.445e-03  | -1.715  | 0.336    |

Figura 5.15. Tabla resumen para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para mref

Se puede ver cómo cambia el valor de las constantes respecto a los casos anteriores, también es digno de mención que los p-valores para el trabajo del compresor acercan más a 0.05 lo que puede significar que al ser un peor modelo necesita más constantes para poder ajustar bien debido a su complejidad.

### 5.2.3. Ajuste aplicando diseño de cuatro niveles

En este caso se va a aplicar la distribución de puntos en cuatro niveles con cuatro puntos en cada nivel, es lógico pensar que al aumentar el número se obtendrá un mejor modelo, pero al aumentar el número de puntos aumenta el número de ensayos. En primer lugar, nos centraremos en el diseño de cuatro niveles tomando un cuadrado central de la superficie de estudio (Figura 4.18.). Para esa distribución se obtienen las correlaciones mostradas en la Figura 5.16 y 5.17.

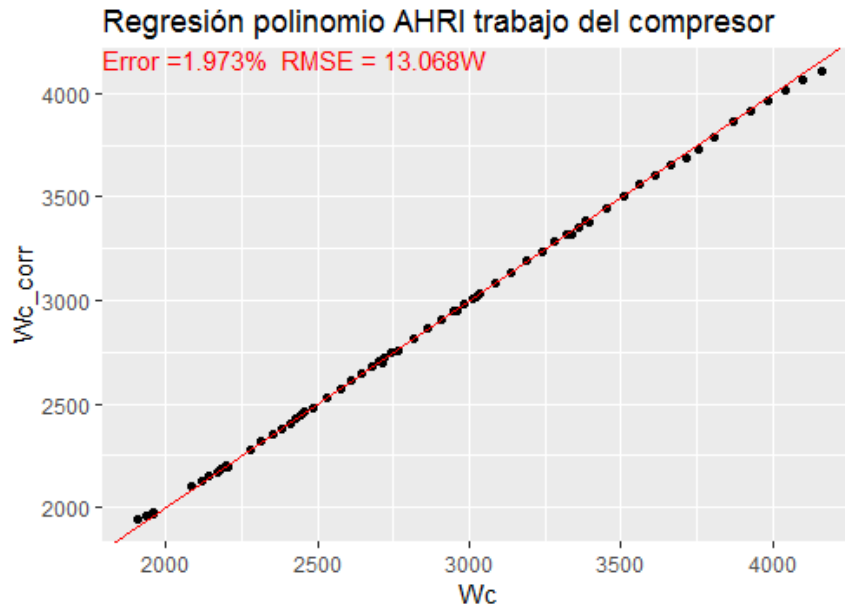


Figura 5.16. Ajuste para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para Wc

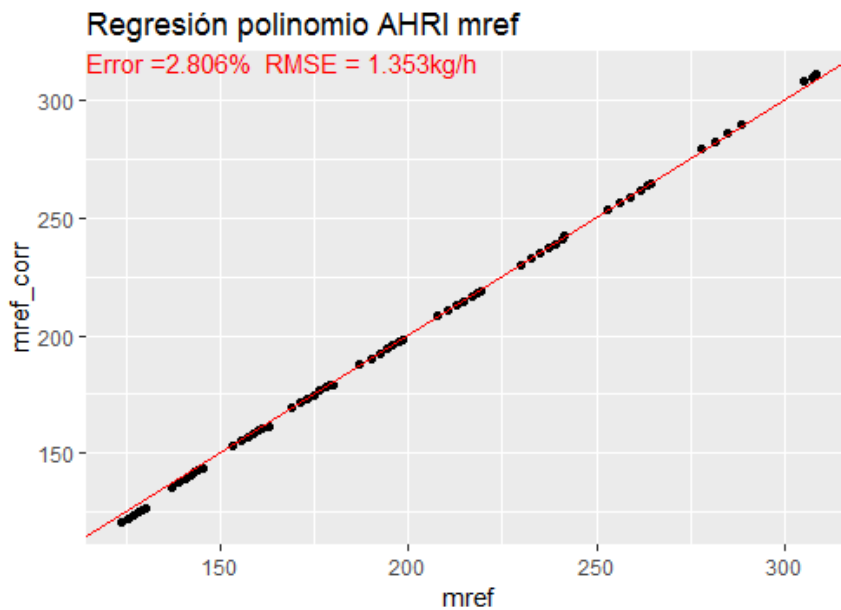


Figura 5.17. Ajuste para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para mref

Se puede ver tanto en la correlación del trabajo del compresor como en la del gasto másico del refrigerante que en los extremos los puntos se alejan de la recta y el ajuste no es el adecuado. Esto es debido a que no se han añadido puntos en las esquinas de la superficie de estudio y únicamente se ha tenido en cuenta el cuadrado central. Esto lleva a tener que interpolar en esas zonas que no tienen puntos aumentando la posibilidad de error y ajustando de forma incorrecta.

Es curioso como en el ajuste del modelo usando tres niveles en un cuadrado central (Figura 5.7.) el error máximo relativo es de 1.072% y el RMSE de 8.708W usando 11 puntos y en este caso

que contamos con un diseño similar, pero ampliando a 16 puntos ambos han aumentado a 1.973% y 13.068W por el hecho de no haber tenido en cuenta la zona de las esquinas de la superficie de estudio.

En las Figuras 5.18 y 5.19 se puede comprobar como algunas de las constantes son significativas, esto puede deberse a que hemos aumentado el número de puntos. También es digno de mención que los valores de las constantes son similares a los valores obtenidos al usar el diseño de tres niveles en un cuadrado central ya que son diseños similares.

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  8.438e+02  1.192e+02  7.078 0.000197 ***
Te          -3.192e+01  6.801e+00 -4.693 0.002227 **
Tc           5.457e+01  8.637e+00  6.318 0.000397 ***
I(Te^2)     -4.379e-01  4.819e-01 -0.909 0.393742
I(Tc^2)     -2.908e-01  2.115e-01 -1.375 0.211596
I(Te^3)     -2.542e-03  1.386e-02 -0.183 0.859697
I(Tc^3)      4.677e-03  1.726e-03  2.710 0.030218 *
Te:Tc       1.182e+00  1.905e-01  6.205 0.000443 ***
Tc:I(Te^2)  4.139e-04  4.030e-03  0.103 0.921079
Te:I(Tc^2)  -6.982e-03  2.019e-03 -3.459 0.010566 *
---
    
```

Figura 5.18. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  3.065e+02  6.537e+00  46.881 5.25e-10 ***
Te           1.147e+01  3.730e-01  30.749 9.93e-09 ***
Tc           4.202e-01  4.736e-01  0.887 0.40443
I(Te^2)      2.147e-01  2.643e-02  8.122 8.28e-05 ***
I(Tc^2)     -1.774e-02  1.160e-02 -1.530 0.16996
I(Te^3)      2.661e-03  7.601e-04  3.500 0.00999 **
I(Tc^3)      1.063e-04  9.465e-05  1.123 0.29840
Te:Tc       -1.849e-02  1.045e-02 -1.770 0.11998
Tc:I(Te^2)  -5.964e-04  2.210e-04 -2.699 0.03070 *
Te:I(Tc^2)  -5.001e-05  1.107e-04 -0.452 0.66516
---
    
```

Figura 5.18. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

En segundo lugar, se va a mostrar el ajuste del modelo usando cuatro niveles repartidos por toda la superficie.

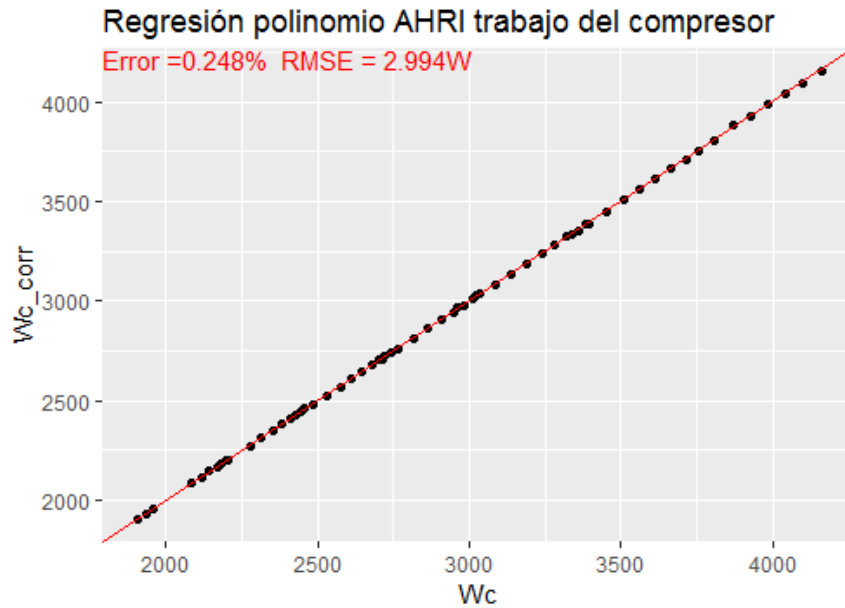


Figura 5.19. Ajuste para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para Wc

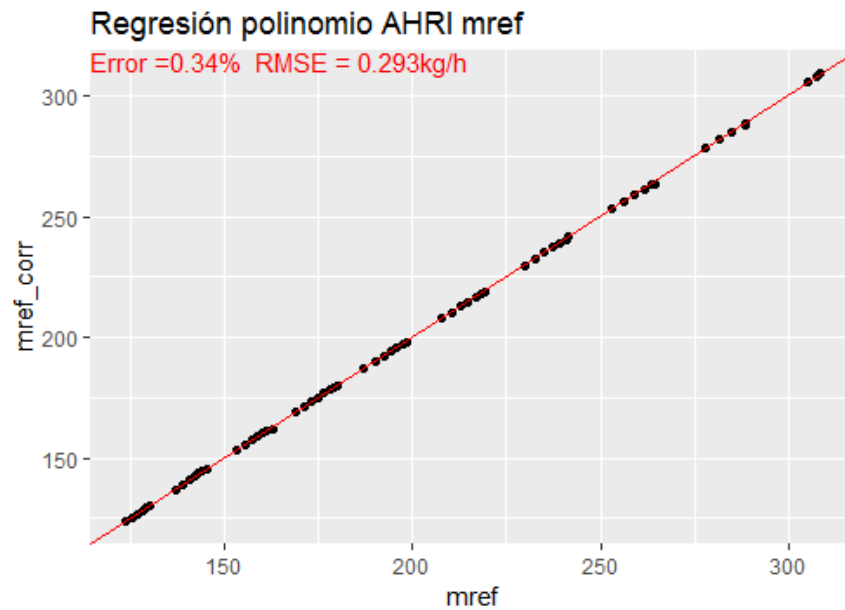


Figura 5.20. Ajuste para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para mref

Podemos comprobar que en este caso tanto para el trabajo del compresor (Figura 5.19.), como para el gasto de refrigerante (Figura 5.20.) tenemos el valor más bajo hasta ahora de error máximo relativo y RMSE. Esto es debido al mayor número de puntos y a su distribución dentro de la superficie, en este caso, a diferencia del diseño de tres niveles distribuido por toda la superficie, las traslaciones de los puntos han dejado los niveles similares a los que habría si la superficie fuera rectangular permitiendo tener la mayoría de los niveles con tres o más puntos. Se puede observar también en la Figura 5.21. y 5.22. que el p-valor nos muestra que las constantes son en su mayoría significativas, lo que puede ser motivo del mayor número de

puntos que hemos tomado lo que hace que este modelo tenga más complejidad y necesite este número de constantes para poder ser ajustado.

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  7.500e+02  7.985e+01  9.392 3.23e-05 ***
Te           -3.551e+01  5.613e+00 -6.326 0.000394 ***
Tc           6.205e+01  4.782e+00 12.977 3.75e-06 ***
I(Te^2)      -8.102e-01  1.912e-01 -4.239 0.003847 **
I(Tc^2)      -5.031e-01  9.730e-02 -5.170 0.001295 **
I(Te^3)      -3.806e-03  3.048e-03 -1.249 0.251876
I(Tc^3)       6.748e-03  6.683e-04 10.097 2.01e-05 ***
Te:Tc        1.175e+00  1.778e-01  6.610 0.000301 ***
Tc:I(Te^2)   8.744e-03  2.409e-03  3.630 0.008401 **
Te:I(Tc^2)   -4.821e-03  1.470e-03 -3.279 0.013512 *
---
    
```

Figura 5.21. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.964e+02  9.296e+00 31.882 7.72e-09 ***
Te           9.890e+00  6.535e-01 15.134 1.32e-06 ***
Tc           5.967e-01  5.567e-01  1.072 0.319334
I(Te^2)      1.469e-01  2.225e-02  6.600 0.000304 ***
I(Tc^2)     -1.467e-02  1.133e-02 -1.295 0.236280
I(Te^3)      1.166e-03  3.548e-04  3.287 0.013360 *
I(Tc^3)      4.515e-05  7.780e-05  0.580 0.579895
Te:Tc        1.744e-02  2.070e-02  0.843 0.427352
Tc:I(Te^2)  -1.343e-04  2.805e-04 -0.479 0.646749
Te:I(Tc^2)  -3.057e-04  1.712e-04 -1.786 0.117233
---
    
```

Figura 5.22. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

#### 5.2.4. Ajuste aplicando el diseño envolvente

Esta distribución de puntos (Figura 4.21.) se escogió descartando otras dos distribuciones posibles (Figura 5.23 y 5.24.) las cuales daban un error máximo relativo y un RMSE mayor. De esta forma se eligió este diseño por su buen ajuste del modelo.

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

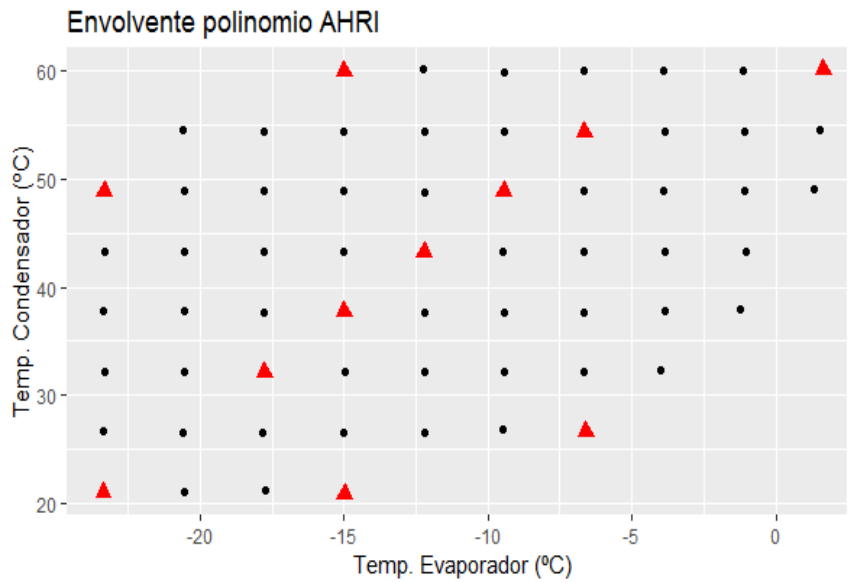


Figura 5.23. Distribución descartada para diseño envolvente

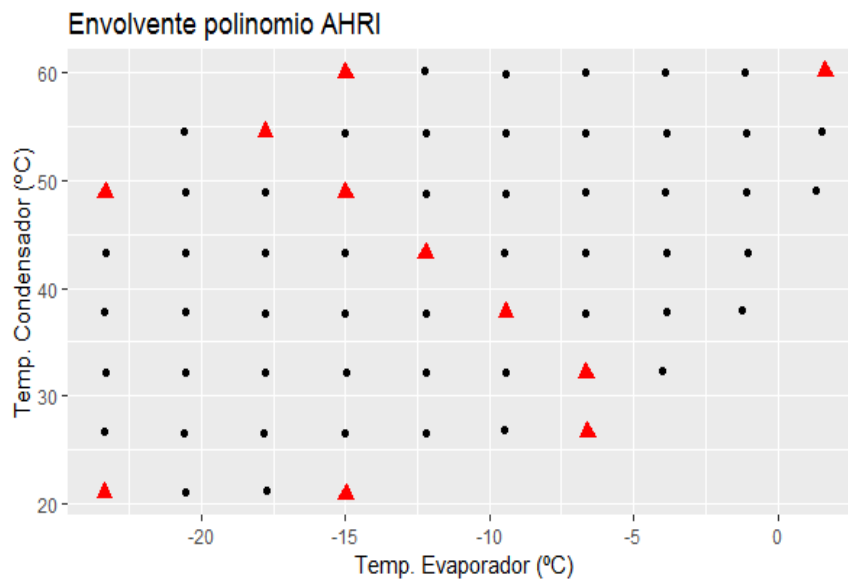


Figura 5.24. Distribución descartada para diseño envolvente

En la Figura 5.25. y Figura 5.26. se puede comprobar que se realiza un buen ajuste utilizando el modelo, el error máximo relativo es algo mayor para el gasto másico de refrigerante, este valor aumenta por uno de los puntos en la zona extrema superior que queda algo más alejado de la recta roja.

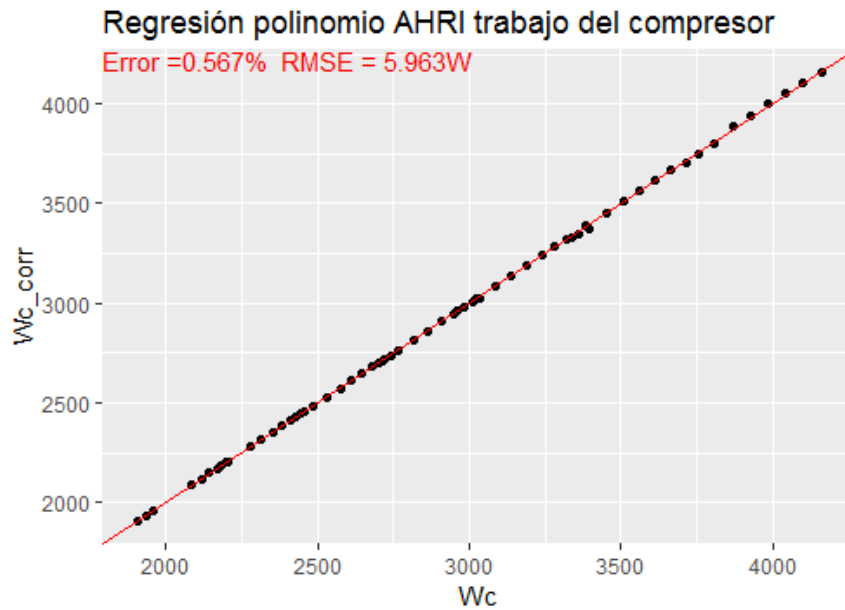


Figura 5.25. Ajuste para el diseño envolvente usando polinomio AHRI convencional para Wc

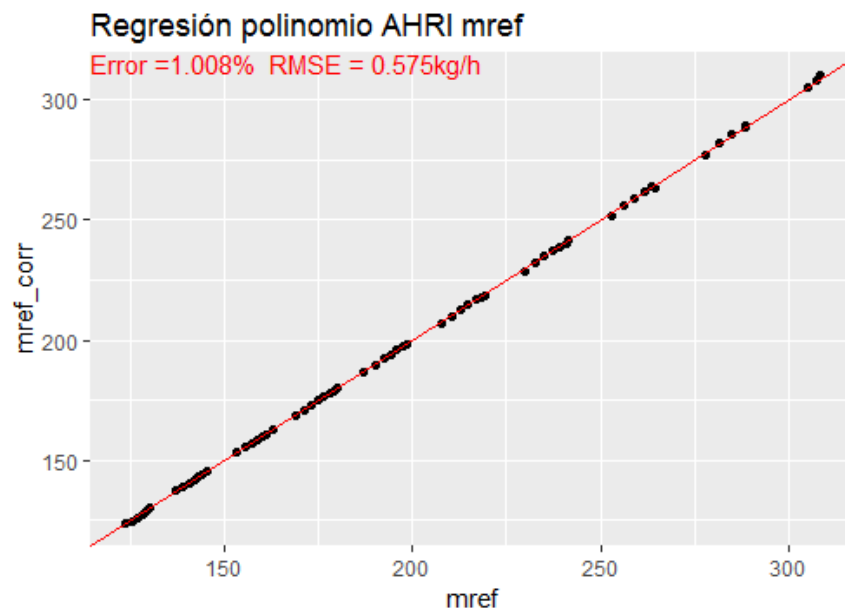


Figura 5.26. Ajuste para el diseño envolvente usando polinomio AHRI convencional para mref

En las Figuras 5.27. y 5.28. volvemos a ver valores para las constantes similares al resto de los valores de anteriores diseños. De la misma forma, tenemos de nuevo unos valores del p-valor que nos indican que estas constantes no son significativas en su mayoría y que de nuevo deberíamos retirar constantes para tener un modelo más simplificado.

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  8.025e+02  3.807e+01  21.079  0.0302 *
Te           -3.098e+01  2.614e+00 -11.851  0.0536 .
Tc           5.963e+01  2.373e+00  25.125  0.0253 *
I(Te^2)      -9.119e-01  2.045e-01  -4.460  0.1404
I(Tc^2)      -5.011e-01  3.968e-02 -12.629  0.0503 .
I(Te^3)      -8.313e-03  4.777e-03  -1.740  0.3320
I(Tc^3)       7.188e-03  3.832e-04  18.759  0.0339 *
Te:Tc        8.506e-01  1.971e-01   4.315  0.1450
Tc:I(Te^2)   6.560e-03  1.123e-03   5.842  0.1079
Te:I(Tc^2)   -1.221e-03  2.435e-03  -0.502  0.7040
---
    
```

Figura 5.27. Tabla resumen para el diseño envolvente usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.867e+02  1.988e+00 144.257  0.00441 **
Te           8.734e+00  1.365e-01  63.996  0.00995 **
Tc           9.700e-01  1.239e-01   7.828  0.08089 .
I(Te^2)      1.316e-01  1.068e-02  12.324  0.05155 .
I(Tc^2)     -1.579e-02  2.072e-03  -7.622  0.08305 .
I(Te^3)      1.314e-03  2.494e-04   5.267  0.11944
I(Tc^3)      1.169e-06  2.001e-05   0.058  0.96286
Te:Tc        6.775e-02  1.029e-02   6.583  0.09597 .
Tc:I(Te^2)   3.548e-04  5.863e-05   6.052  0.10424
Te:I(Tc^2)   -7.860e-04  1.271e-04  -6.183  0.10208
    
```

Figura 5.28. Tabla resumen para el diseño envolvente usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

### 5.2.5. Ajuste aplicando el modelo Federov

En los modelos obtenidos a partir del algoritmo Federov se distribuyen los puntos de tal forma que se obtengan modelos óptimos siguiendo los tres criterios (“D”, “A” e “I”), pero esto no significa que usando este algoritmo vayamos a obtener los valores más bajos de error máximo relativo y RMSE para cada uno de los criterios usados. Usando las diferentes distribuciones estamos ajustando a un modelo previamente dado por la norma (en este caso ajustamos en base al polinomio AHRI), en lugar de ir añadiendo términos poco a poco, lo que puede llevar a que en ciertos criterios del algoritmo obtengamos modelos que no sean los adecuados.

En primer lugar, hablaremos del ajuste usando el criterio D. En este criterio los puntos se reparten por la envolvente de la superficie (Figura 4.25.). A causa de esto, como podemos comprobar en la Figura 5.29., tenemos un mal ajuste en la zona central ya que solo hemos tomado puntos en la envolvente obligando al modelo a interpolar para todos los puntos de la zona central. El modelo obtenido para el gasto másico de refrigerante está peor ajustado, como



podemos comprobar muchos puntos no se encuentran en la recta roja y algunos de ellos están alejados, aumentando considerablemente el error máximo relativo.

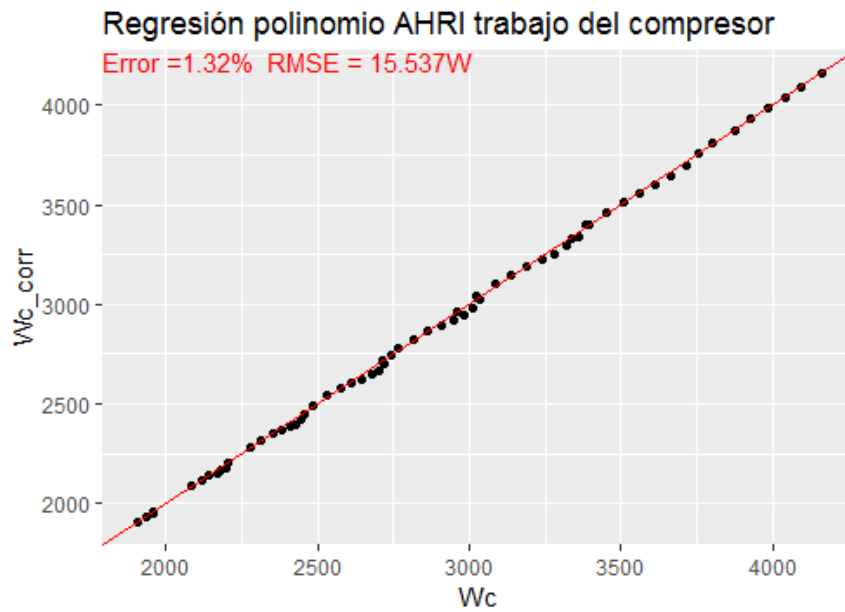


Figura 5.29. Ajuste para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

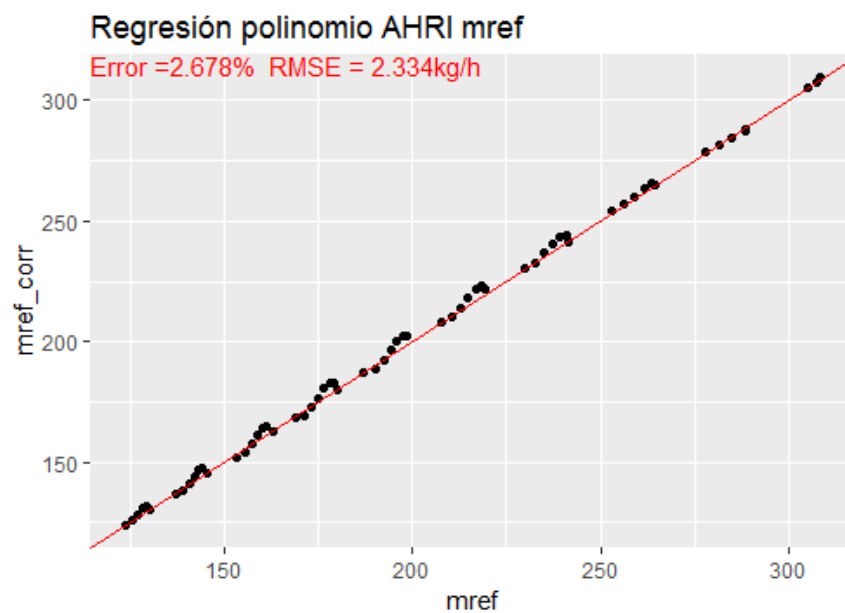


Figura 5.30. Ajuste para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Pasando a las tablas resumen del ajuste del modelo (Figura 5.31. y Figura 5.32.) volvemos a tener unos p-valores que nos indican que estas constantes no son significativas, en este caso ninguna de ellas.

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

| Coefficients: |            |            |         |          |
|---------------|------------|------------|---------|----------|
|               | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |
| (Intercept)   | 1.654e+03  | 7.025e+02  | 2.355   | 0.256    |
| Te            | 4.164e+01  | 4.540e+01  | 0.917   | 0.527    |
| Tc            | 1.474e+01  | 4.058e+01  | 0.363   | 0.778    |
| I(Te^2)       | 1.893e+00  | 1.453e+00  | 1.303   | 0.417    |
| I(Tc^2)       | 2.960e-01  | 7.756e-01  | 0.382   | 0.768    |
| I(Te^3)       | 3.324e-02  | 1.827e-02  | 1.819   | 0.320    |
| I(Tc^3)       | 2.379e-03  | 4.944e-03  | 0.481   | 0.714    |
| Te:Tc         | -1.025e+00 | 1.313e+00  | -0.780  | 0.578    |
| Tc:I(Te^2)    | -2.001e-02 | 1.677e-02  | -1.193  | 0.444    |
| Te:I(Tc^2)    | 1.204e-02  | 9.906e-03  | 1.216   | 0.438    |

Figura 5.31. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI convencional para Wc

| Coefficients: |            |            |         |          |
|---------------|------------|------------|---------|----------|
|               | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |
| (Intercept)   | 1.692e+02  | 3.106e+01  | 5.448   | 0.116    |
| Te            | 2.262e+00  | 2.007e+00  | 1.127   | 0.462    |
| Tc            | 8.136e+00  | 1.794e+00  | 4.535   | 0.138    |
| I(Te^2)       | -1.075e-01 | 6.425e-02  | -1.673  | 0.343    |
| I(Tc^2)       | -1.654e-01 | 3.429e-02  | -4.823  | 0.130    |
| I(Te^3)       | -1.830e-03 | 8.080e-04  | -2.265  | 0.265    |
| I(Tc^3)       | 1.053e-03  | 2.186e-04  | 4.817   | 0.130    |
| Te:Tc         | 2.206e-01  | 5.806e-02  | 3.799   | 0.164    |
| Tc:I(Te^2)    | 2.763e-03  | 7.414e-04  | 3.727   | 0.167    |
| Te:I(Tc^2)    | -1.707e-03 | 4.380e-04  | -3.898  | 0.160    |

Figura 5.32. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI convencional para mref

En segundo lugar, hablaremos del ajuste usando el criterio "A". Usando este criterio y tal como se muestra en la Figura 4.26., los puntos se distribuyen en tres niveles de forma que en este caso la zona central sí que cuenta con puntos. Esto hace que, como se muestra en la Figura 5.33 y 5.34., la zona central esté mejor ajustada y el modelo obtenido sea bueno tanto para el trabajo del compresor como para el gasto másico de refrigerante.

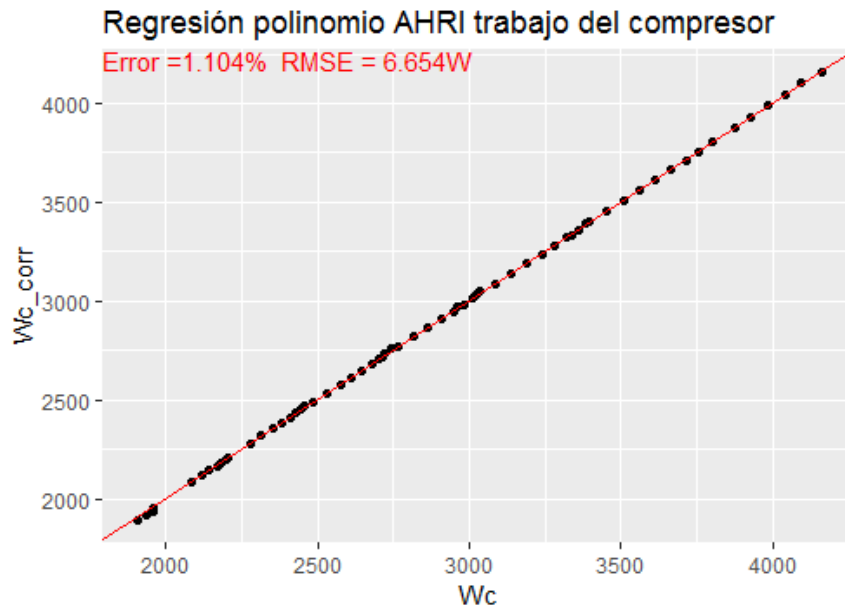


Figura 5.33. Ajuste para el diseño Federov criterio "A" usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

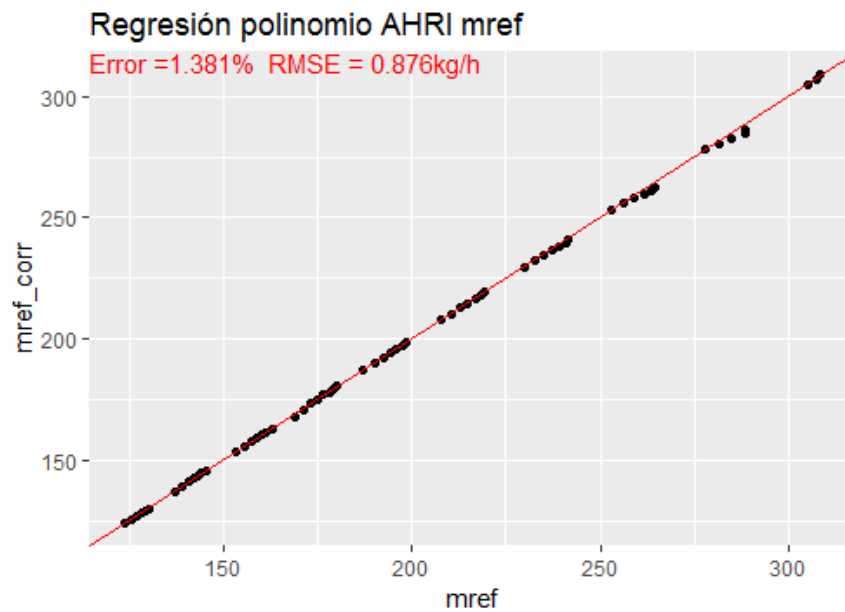


Figura 5.34. Ajuste para el diseño Federov criterio "A" usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

En las tablas resumen para el ajuste del modelo (Figura 5.35. y 5.36.) se muestra de nuevo que la mayoría de las constantes no son significativas.

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

| Coefficients: |            |            |         |          |
|---------------|------------|------------|---------|----------|
|               | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |
| (Intercept)   | 7.465e+02  | 3.751e+02  | 1.990   | 0.296    |
| Te            | -3.392e+01 | 3.383e+01  | -1.002  | 0.499    |
| Tc            | 6.401e+01  | 2.272e+01  | 2.818   | 0.217    |
| I(Te^2)       | -7.098e-01 | 1.155e+00  | -0.614  | 0.649    |
| I(Tc^2)       | -5.674e-01 | 4.792e-01  | -1.184  | 0.446    |
| I(Te^3)       | -7.887e-04 | 1.844e-02  | -0.043  | 0.973    |
| I(Tc^3)       | 7.319e-03  | 3.396e-03  | 2.155   | 0.277    |
| Te:Tc         | 1.229e+00  | 1.015e+00  | 1.211   | 0.439    |
| Tc:I(Te^2)    | 1.057e-02  | 1.453e-02  | 0.727   | 0.600    |
| Te:I(Tc^2)    | -5.531e-03 | 7.958e-03  | -0.695  | 0.613    |

Figura 5.35. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "A" usando polinomio AHRI convencional para Wc

| Coefficients: |            |            |         |              |
|---------------|------------|------------|---------|--------------|
|               | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t )     |
| (Intercept)   | 3.059e+02  | 4.473e-01  | 683.917 | 0.000931 *** |
| Te            | 8.680e+00  | 4.035e-02  | 215.133 | 0.002959 **  |
| Tc            | -5.018e-01 | 2.709e-02  | -18.523 | 0.034335 *   |
| I(Te^2)       | 6.425e-02  | 1.378e-03  | 46.634  | 0.013649 *   |
| I(Tc^2)       | 1.019e-02  | 5.715e-04  | 17.838  | 0.035651 *   |
| I(Te^3)       | 8.415e-05  | 2.199e-05  | 3.827   | 0.162703     |
| I(Tc^3)       | -1.093e-04 | 4.050e-06  | -26.991 | 0.023575 *   |
| Te:Tc         | 1.430e-02  | 1.210e-03  | 11.822  | 0.053723 .   |
| Tc:I(Te^2)    | 6.188e-04  | 1.732e-05  | 35.717  | 0.017819 *   |
| Te:I(Tc^2)    | 4.320e-06  | 9.490e-06  | 0.455   | 0.728044     |

Figura 5.36. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "A" usando polinomio AHRI convencional para mref

En tercer lugar, hablaremos del ajuste usando el criterio "I" del algoritmo de Federov. Como vemos en la Figura 5.37. y 5.38. para este ajuste del modelo obtenemos un mejor valor del error máximo relativo para el trabajo del compresor pero peor para el gasto másico de refrigerante, en comparación con los otros criterios seleccionados. En el caso del gasto másico de refrigerante se muestra claramente en la correlación que los puntos no se ajustan a la recta roja de forma óptima.

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

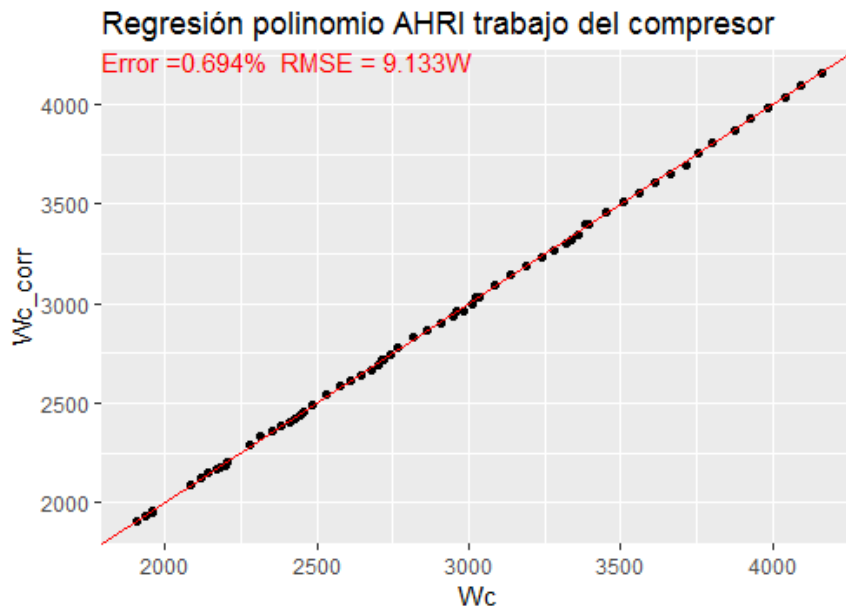


Figura 5.37. Ajuste para el diseño Federov criterio "I" usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

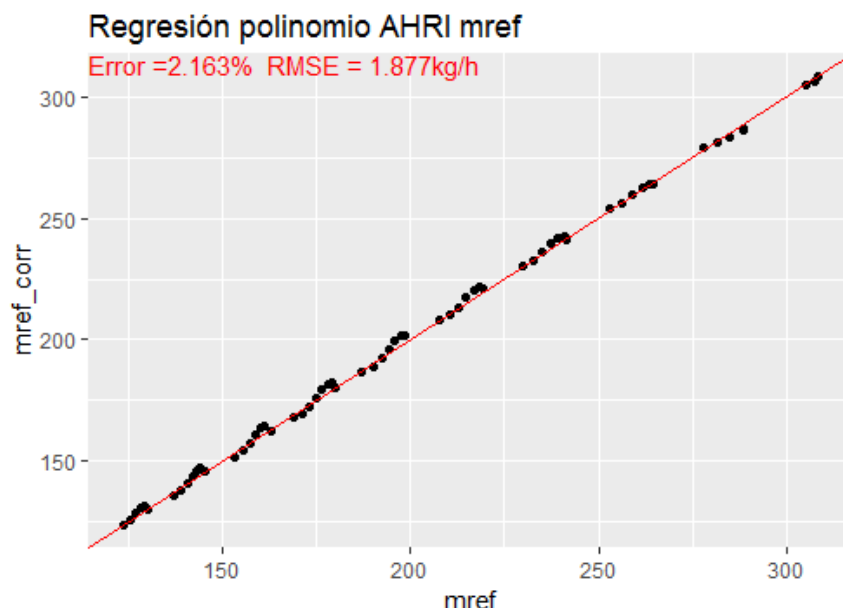


Figura 5.38. Ajuste para el diseño Federov criterio "I" usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

Se comprueba también que al igual que en los casos anteriores no tenemos ninguno de los valores de las constantes del significativos (Figura 5.39. y 5.40.)

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.178e+03  1.477e+02  7.975  0.0794 .
Te           1.323e+01  8.862e+00  1.493  0.3757
Tc           4.290e+01  8.895e+00  4.823  0.1302
I(Te^2)      1.016e+00  2.693e-01  3.772  0.1650
I(Tc^2)     -2.464e-01  1.776e-01 -1.388  0.3975
I(Te^3)      2.266e-02  3.614e-03  6.268  0.1007
I(Tc^3)      5.816e-03  1.176e-03  4.945  0.1270
Te:Tc       -1.834e-01  2.728e-01 -0.672  0.6232
Tc:I(Te^2)  -9.814e-03  3.365e-03 -2.916  0.2103
Te:I(Tc^2)   5.527e-03  2.152e-03  2.568  0.2364
---
    
```

Figura 5.39. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "I" usando polinomio AHRI convencional para  $W_c$

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.969e+02  2.996e+01  6.570  0.0962 .
Te           3.613e+00  1.798e+00  2.009  0.2940
Tc           6.416e+00  1.805e+00  3.555  0.1746
I(Te^2)     -8.493e-02  5.465e-02 -1.554  0.3640
I(Tc^2)     -1.329e-01  3.603e-02 -3.688  0.1686
I(Te^3)     -1.757e-03  7.334e-04 -2.395  0.2518
I(Tc^3)      8.614e-04  2.386e-04  3.610  0.1720
Te:Tc        1.666e-01  5.536e-02  3.009  0.2042
Tc:I(Te^2)  2.317e-03  6.829e-04  3.393  0.1825
Te:I(Tc^2)  -1.197e-03  4.367e-04 -2.742  0.2226
---
    
```

Figura 5.40. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "I" usando polinomio AHRI convencional para  $m_{ref}$

### 5.3. Ajuste del modelo basado en el polinomio AHRI reducido

#### 5.3.1. Ajuste aplicando el Diseño Central Compuesto

En este caso se va a ajustar el modelo usando el diseño central compuesto usando la distribución mostrada en la Figura 4.11. Como el ajuste se hará para el modelo basado en el polinomio AHRI reducido no se necesita agregar puntos al diseño original como pasaba en el apartado 5.2.1. En las Figuras 5.41. y 5.42. podemos comprobar el ajuste y la correlación del trabajo del compresor, así como del gasto másico de refrigerante.

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

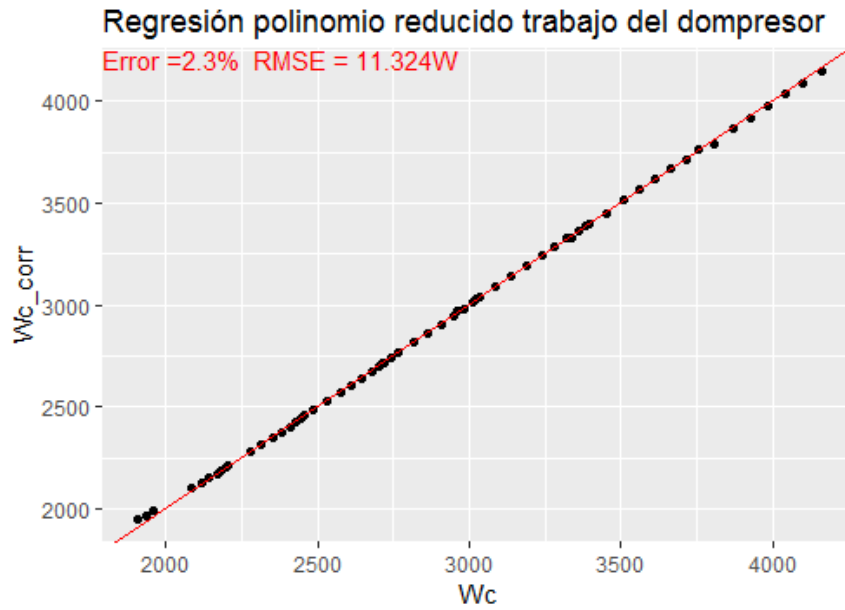


Figura 5.41. Ajuste para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI reducido para Wc

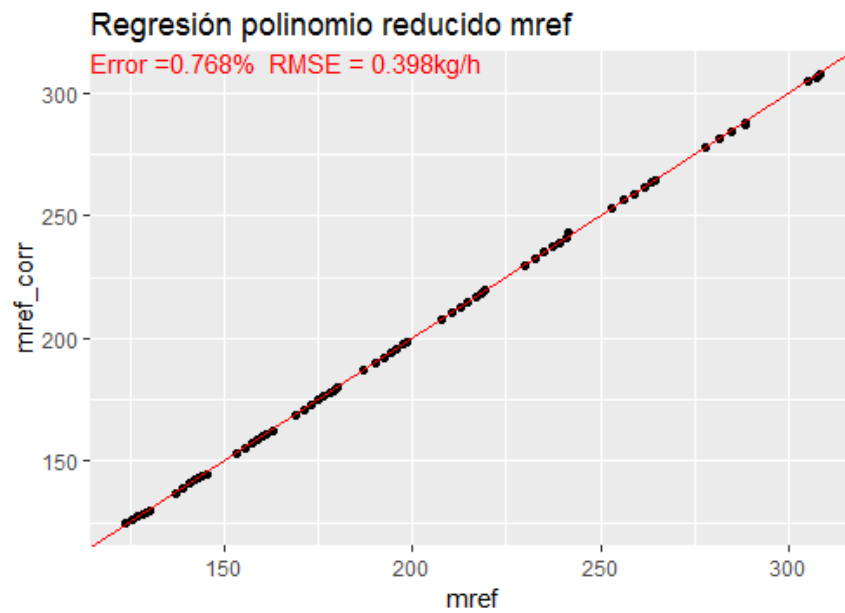


Figura 5.42. Ajuste para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI reducido para mref

Como podemos comprobar tanto el error máximo relativo como el RMSE han aumentado con respecto al diseño central compuesto. El aumento más acusado ha sido para el trabajo del compresor donde se aprecia gráficamente que los puntos en los extremos no ajustan como deberían. Esto es debido a la falta de puntos en las esquinas de la superficie de estudio como consecuencia de la eliminación de esos puntos.

En la Figura 5.43. y Figura 5.44. se muestra la tabla resumen del ajuste del modelo en la que se aprecia en el p-valor que las constantes se muestran más significativas a causa del menor número de puntos y usar un polinomio con menos términos.

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 1355.37213    82.24727  16.479 0.000486 ***
Te          -16.52852     4.47825   -3.691 0.034496 *
Tc           21.20592     3.13256    6.770 0.006587 **
I(Te^2)     -0.25618     0.14108   -1.816 0.167016
I(Tc^2)      0.41222     0.03488   11.820 0.001302 **
Te:Tc       0.57404     0.06538    8.780 0.003112 **
    
```

Figura 5.43. Tabla resumen para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 3.083e+02  1.541e+00 200.017 2.76e-07 ***
Te          9.989e+00  8.393e-02 119.020 1.31e-06 ***
Tc         -8.077e-02  5.871e-02  -1.376 0.26260
I(Te^2)     9.944e-02  2.644e-03  37.611 4.13e-05 ***
I(Tc^2)    -4.054e-03  6.536e-04  -6.203 0.00844 **
Te:Tc      -7.811e-03  1.225e-03  -6.375 0.00781 **
---
    
```

Figura 5.44. Tabla resumen para el Diseño Central Compuesto usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Aun así, se muestra como ciertas constantes siguen sin ser significativas lo que podría arreglarse eliminando incluso los términos cuadráticos del polinomio.

### 5.3.2. Ajuste aplicando el modelo de tres niveles

Para este ajuste se va a distinguir entre el modelo tomando un cuadrado central de la superficie de estudio y el modelo usando toda la superficie de estudio y realizando las traslaciones necesarias.

En primer lugar, hablaremos del ajuste del modelo usando el polinomio AHRI reducido tomando únicamente un cuadrado central dentro de toda la superficie de estudio. En este caso al igual que pasaba con el diseño central compuesto no se van a añadir puntos en las esquinas de la superficie ya que contamos con nueve puntos y para ajustar este modelo necesitamos un mínimo de siete.

A causa de la falta de estos puntos y como se puede ver en la Figura 5.45. y Figura 5.46. han aumentado los valores del error máximo relativo y RMSE especialmente en el caso del ajuste para el trabajo del compresor donde, de nuevo, los puntos en los extremos no están ajustados correctamente a causa de la falta de esos puntos, obligando al modelo a interpolar.



Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

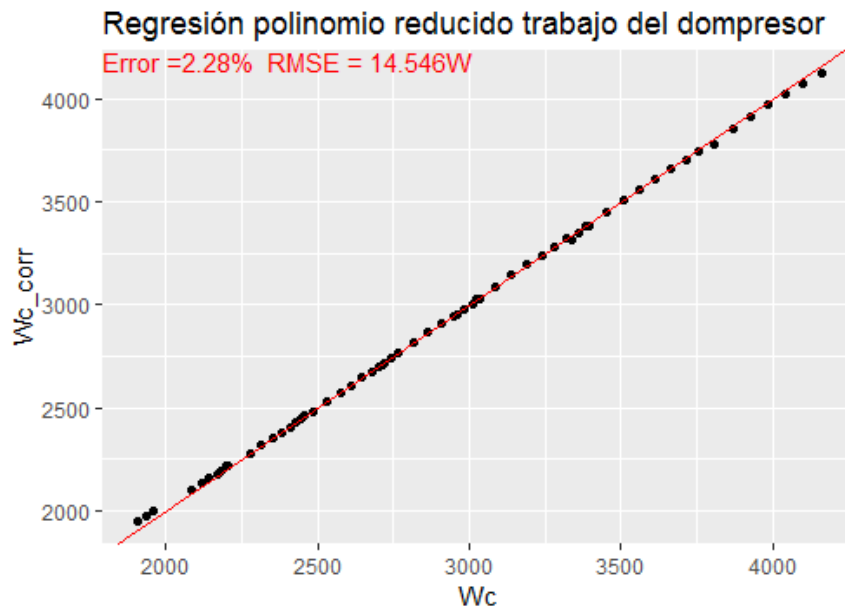


Figura 5.45. Ajuste para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

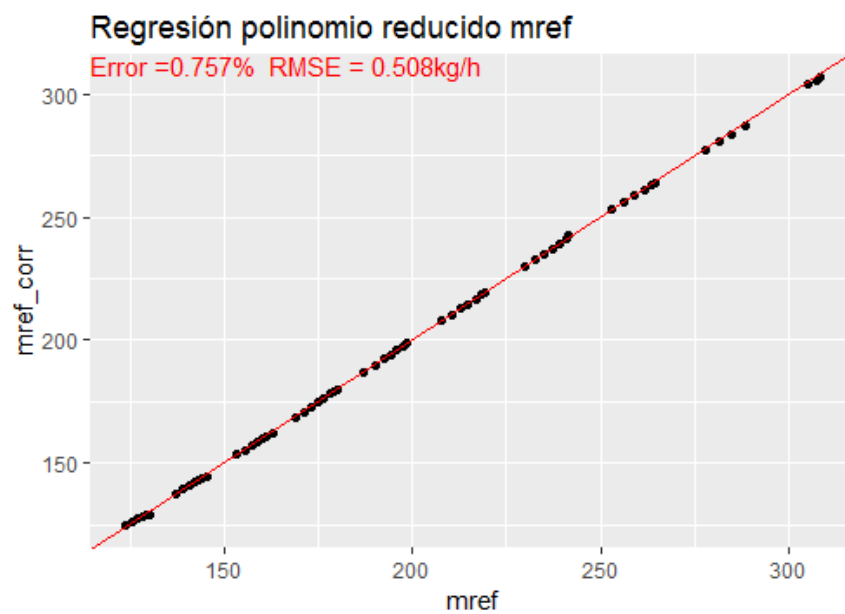


Figura 5.46. Ajuste para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

En la tabla resumen del ajuste (Figura 5.47. y 5.48.) podemos ver como los coeficientes de regresión vuelven a ser significativos, tal como lo muestra el p-valor. Debido al menor número de términos del polinomio.

```

Coefficients:
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 1360.51604 29.25439 46.506 2.19e-05 ***
Te          -18.47412  1.66804 -11.075 0.001577 **
Tc           20.96185  1.27350  16.460 0.000488 ***
I(Te^2)     -0.33849  0.05760  -5.877 0.009830 **
I(Tc^2)      0.40999  0.01440  28.473 9.51e-05 ***
Te:Tc        0.57386  0.02037  28.177 9.81e-05 ***
---
    
```

Figura 5.47. Tabla resumen para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

```

Coefficients:
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 3.071e+02 1.943e+00 158.058 5.58e-07 ***
Te          9.908e+00 1.108e-01 89.433 3.08e-06 ***
Tc         -5.138e-02 8.458e-02 -0.607 0.586444
I(Te^2)     9.689e-02 3.826e-03 25.328 0.000135 ***
I(Tc^2)    -4.370e-03 9.564e-04 -4.569 0.019663 *
Te:Tc      -7.812e-03 1.353e-03 -5.775 0.010323 *
---
    
```

Figura 5.48. Tabla resumen para el diseño de tres niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

En segundo lugar, se va a comprobar el ajuste del modelo para una distribución de tres niveles usando toda la superficie de estudio. En este caso a diferencia del modelo ajustado para el polinomio AHRI original se puede apreciar en la Figura 5.49. y Figura 5.50. que se ha hecho un buen ajuste de los puntos con un valor de error máximo relativo y RMSE más bajos que en el otro caso. La razón de esto es la reducción del número de los términos lo que permite tener un modelo más simplificado combinado con la ausencia de los puntos centrales que para el caso del polinomio AHRI se habían añadido lo que hace que el modelo ajuste mejor ya que tenemos unos niveles con los puntos mejor repartidos.

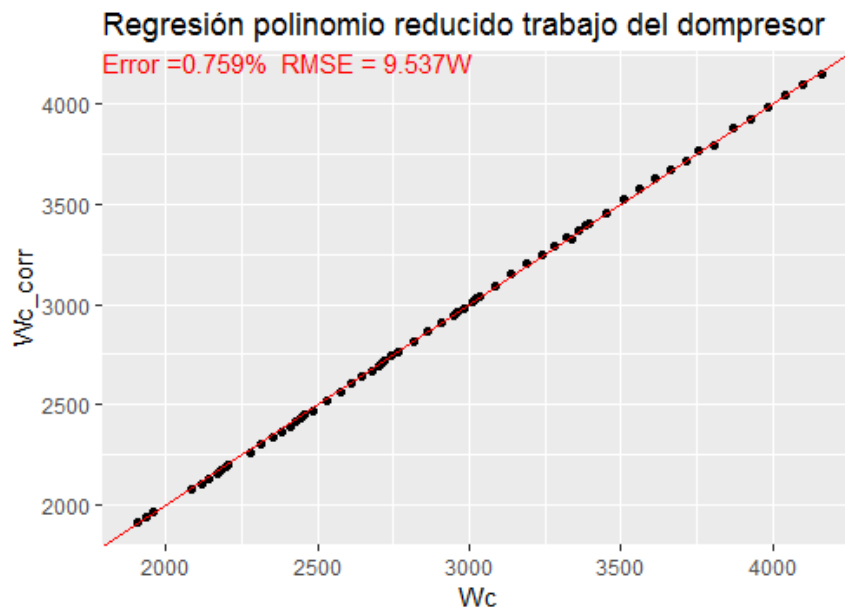


Figura 5.49. Ajuste para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

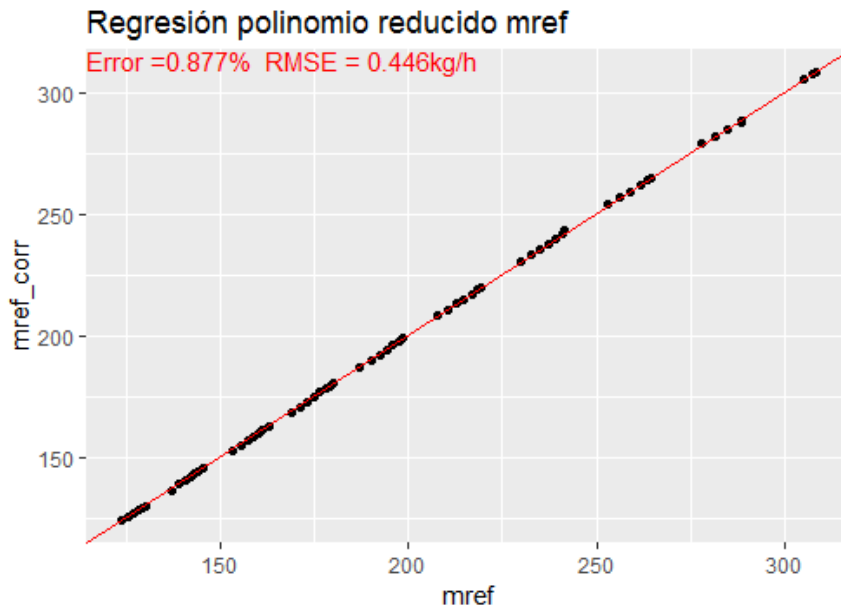


Figura 5.50. Ajuste para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para mref

Los valores de los coeficientes de regresión se vuelven a mostrar significativos, aunque algo menos que para el modelo usando el diseño distribuido en un cuadrado central (Figura 5.51. y 5.52.).

Coefficients:

|             | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |    |
|-------------|------------|------------|---------|----------|----|
| (Intercept) | 1296.85188 | 128.99553  | 10.053  | 0.00210  | ** |
| Te          | -16.87303  | 5.55298    | -3.039  | 0.05593  | .  |
| Tc          | 23.22498   | 4.77326    | 4.866   | 0.01658  | *  |
| I(Te^2)     | -0.30897   | 0.08293    | -3.726  | 0.03367  | *  |
| I(Tc^2)     | 0.39666    | 0.04419    | 8.976   | 0.00292  | ** |
| Te:Tc       | 0.56070    | 0.08463    | 6.626   | 0.00700  | ** |

---

Figura 5.51. Tabla resumen para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para Wc

Coefficients:

|             | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |     |
|-------------|------------|------------|---------|----------|-----|
| (Intercept) | 308.091191 | 5.155089   | 59.764  | 1.03e-05 | *** |
| Te          | 9.924798   | 0.221915   | 44.723  | 2.46e-05 | *** |
| Tc          | -0.055432  | 0.190755   | -0.291  | 0.7903   |     |
| I(Te^2)     | 0.098591   | 0.003314   | 29.750  | 8.34e-05 | *** |
| I(Tc^2)     | -0.004251  | 0.001766   | -2.407  | 0.0953   | .   |
| Te:Tc       | -0.005805  | 0.003382   | -1.716  | 0.1846   |     |

---

Figura 5.52. Tabla resumen para el diseño de tres niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para mref

### 5.3.3. Ajuste aplicando el diseño de cuatro niveles

En este caso al igual que en el anterior vamos a diferenciar entre el ajuste aplicando el diseño en un área central de la superficie y el ajuste aplicando el diseño repartido por toda ella.

Comenzamos con el ajuste usando un cuadrado central. En este caso, al igual que en el caso del polinomio AHRI, no tenemos puntos en las esquinas de la superficie, usamos por tanto la misma distribución y el mismo número de puntos que para el polinomio AHRI original.

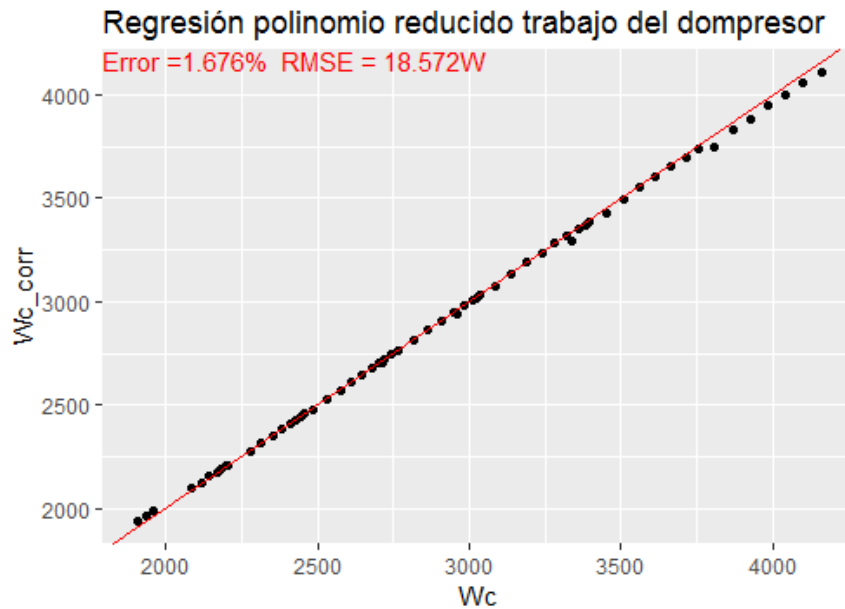


Figura 5.53. Ajuste para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

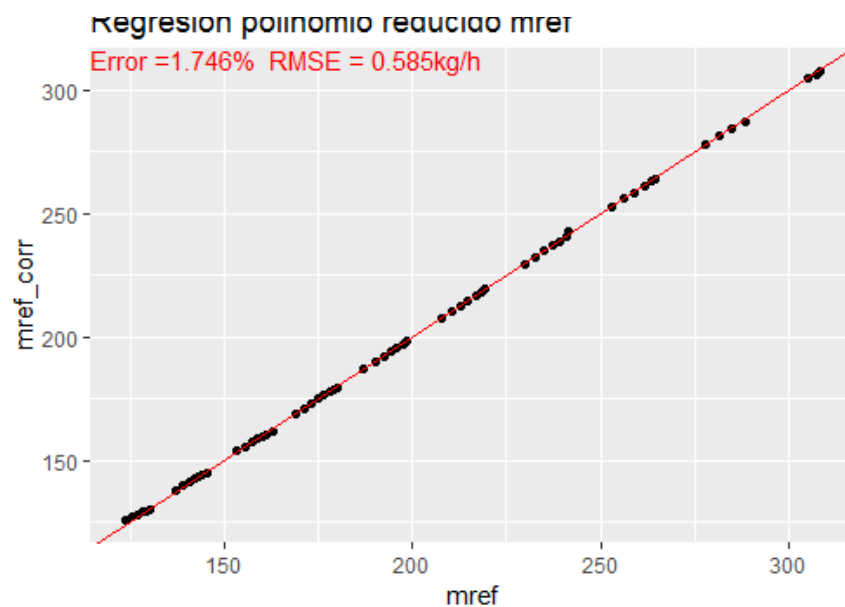


Figura 5.54. Ajuste para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

En la Figura 5.53. y Figura 5.54. podemos ver como el valor del error máximo relativo y el RMSE han bajado con respecto al mismo diseño ajustado para el polinomio AHRI convencional. Esta

bajada es más clara para el gasto másico de refrigerante donde se ha logrado reducir más de un 1% el error máximo relativo. De la misma forma se puede ver en las mismas gráficas que los puntos se ajustan mejor, aunque manteniendo el problema en los extremos para el trabajo del compresor donde no ajustan correctamente.

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.268e+03  1.797e+01  70.53 5.78e-16 ***
Te          -1.951e+01  1.076e+00 -18.12 1.53e-09 ***
Tc           2.571e+01  8.199e-01  31.36 4.12e-12 ***
I(Te^2)     -3.423e-01  3.890e-02  -8.80 2.61e-06 ***
I(Tc^2)      3.523e-01  9.737e-03  36.18 8.66e-13 ***
Te:Tc       6.048e-01  1.485e-02  40.73 2.37e-13 ***
---
    
```

Figura 5.55. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  3.086e+02  1.017e+00 303.463 < 2e-16 ***
Te           1.013e+01  6.088e-02 166.404 < 2e-16 ***
Tc          -7.576e-02  4.639e-02  -1.633  0.131
I(Te^2)      1.039e-01  2.201e-03  47.235 4.69e-14 ***
I(Tc^2)     -4.301e-03  5.509e-04  -7.807 8.23e-06 ***
Te:Tc       -9.703e-03  8.400e-04 -11.551 1.72e-07 ***
---
    
```

Figura 5.56. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles centrado usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

En la Figura 5.55. y Figura 5.56. podemos ver la tabla resumen del ajuste. En este casi todos los coeficientes de las tablas se muestran significativos, esto nos puede indicar que en este caso deberíamos añadir algún término más al modelo ya que podría no estar ajustando correctamente usando sólo seis coeficientes. Esto se debe a que en este caso tenemos un número elevado de puntos y únicamente seis coeficientes.

A continuación, comprobaremos el ajuste usando cuatro niveles repartidos por toda la superficie, al igual que en el caso anterior se usará la misma distribución que para el modelo basado en el polinomio AHRI original y el mismo número de puntos.

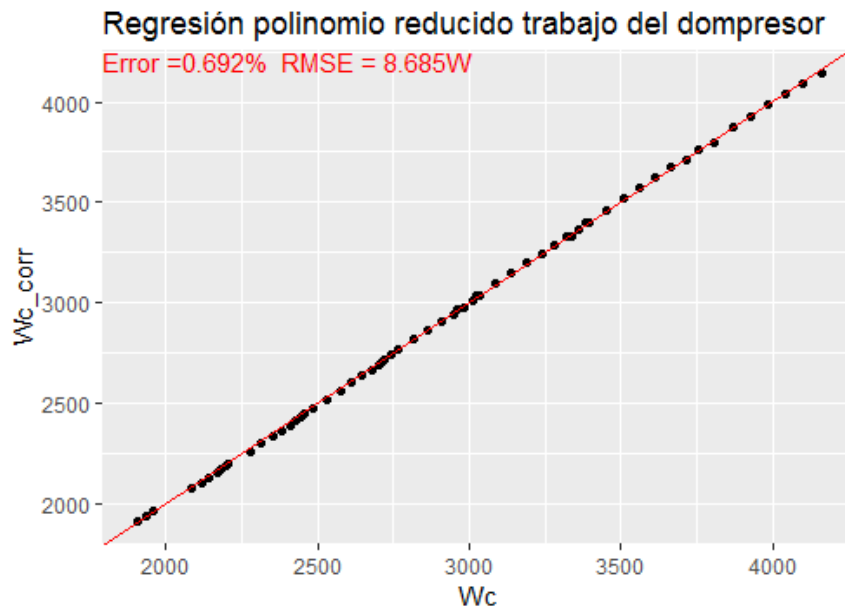


Figura 5.57. Ajuste para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para Wc

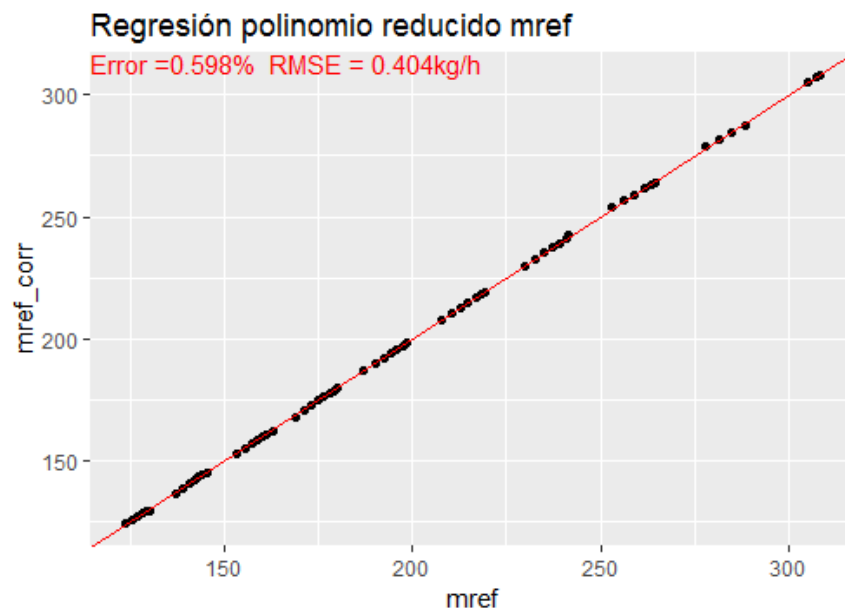


Figura 5.58. Ajuste para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para mref

En este caso el ajuste usado para este modelo es peor que el obtenido usando el polinomio AHRI convencional, obtenemos mayores valores de error máximo relativo y de RMSE, tal como se muestra en la Figura 5.57. y 5.58. El mayor aumento es en el trabajo del compresor en el que habíamos obtenido el valor más pequeño de error máximo relativo y ha aumentado en medio punto en este caso. Se puede ver como hay ciertos puntos en la parte baja de la gráfica que no ajustan correctamente.

En las Figuras 5.59. y 5.60. se muestra la tabla resumen del ajuste y de nuevo podemos ver como los coeficientes obtenidos tanto para el trabajo del compresor como para el gasto másico de refrigerante se muestran significativos, lo que de nuevo nos lleva a pensar que se ha tomado un número elevado de puntos y para conseguir un modelo que prediga correctamente deberíamos usar más términos.

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 1314.89082   54.01659  24.342 6.43e-11 ***
Te          -15.71385    2.69481  -5.831 0.000114 ***
Tc           22.67455    2.12412  10.675 3.84e-07 ***
I(Te^2)     -0.28846     0.05793  -4.979 0.000416 ***
I(Tc^2)      0.39874     0.02164  18.422 1.29e-09 ***
Te:Tc        0.53880     0.03830  14.067 2.24e-08 ***
---
    
```

Figura 5.59. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 305.232460   3.531156  86.440 < 2e-16 ***
Te           9.882054    0.176164  56.096 7.13e-15 ***
Tc           0.034535    0.138857   0.249 0.80817
I(Te^2)     0.099743     0.003787  26.337 2.74e-11 ***
I(Tc^2)    -0.004976     0.001415  -3.517 0.00483 **
Te:Tc      -0.004771     0.002504  -1.905 0.08318 .
    
```

Figura 5.60. Tabla resumen para el diseño de cuatro niveles distribuido usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

#### 5.3.4. Ajuste aplicando el diseño envolvente

Este diseño similar al usado en el apartado 5.2.4. usa seis puntos que tomamos con los vértices de la superficie de estudio y en este caso solo un punto central, ya que para ajustar este modelo basta con siete puntos. De la misma forma que el otro diseño se colocó el punto central en diferentes posiciones para obtener el menor valor posible de error máximo relativo y RMSE para el trabajo del compresor y el gasto másico de refrigerante.

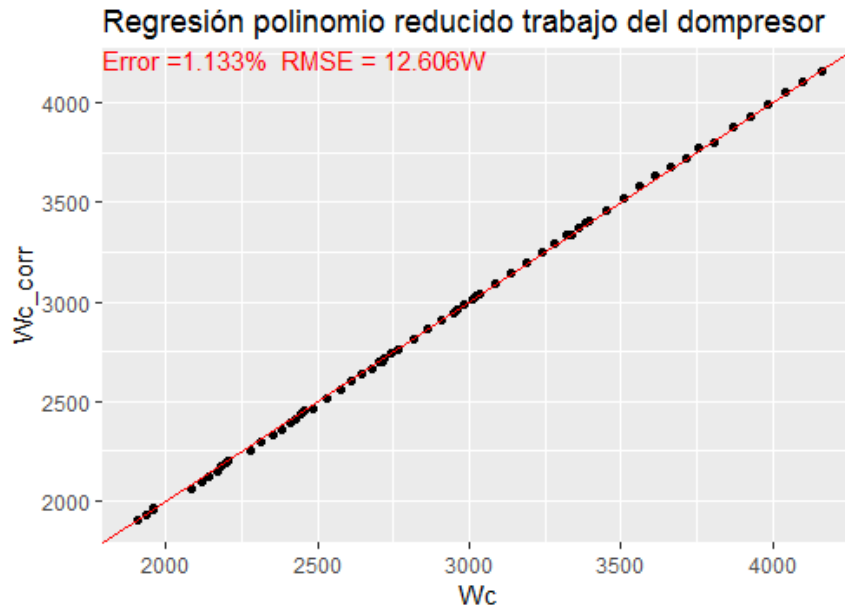


Figura 5.61. Ajuste para el diseño envolvente usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

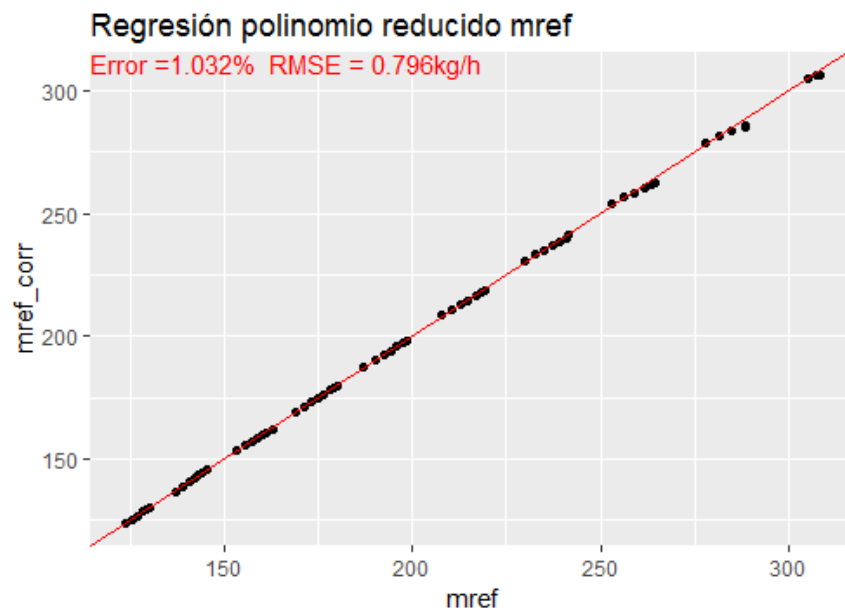


Figura 5.62. Ajuste para el diseño envolvente usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Podemos ver en la Figura 5.61. y la Figura 5.62. como no ajusta de forma totalmente adecuada, especialmente para el gasto másico de refrigerante. Si comparamos los valores de error máximo relativo y RMSE con el modelo equivalente para el polinomio AHRI convencional se comprueba que los valores han crecido, especialmente para el trabajo del compresor. Esto puede ser causa de un número menor de puntos escogidos lo que lleva a un ajuste incorrecto en la zona central.



Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

Coefficients:

|             | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |
|-------------|------------|------------|---------|----------|
| (Intercept) | 1336.31224 | 46.95145   | 28.462  | 0.0224 * |
| Te          | -14.51754  | 2.55270    | -5.687  | 0.1108   |
| Tc          | 21.80326   | 1.94494    | 11.210  | 0.0566 . |
| I(Te^2)     | -0.28261   | 0.05274    | -5.358  | 0.1175   |
| I(Tc^2)     | 0.41173    | 0.02049    | 20.092  | 0.0317 * |
| Te:Tc       | 0.53036    | 0.03290    | 16.121  | 0.0394 * |

---

Figura 5.63. Tabla resumen para el diseño envolvente usando polinomio AHRI reducido para Wc

Coefficients:

|             | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t )   |
|-------------|------------|------------|---------|------------|
| (Intercept) | 3.013e+02  | 1.289e+00  | 233.717 | 0.00272 ** |
| Te          | 9.387e+00  | 7.010e-02  | 133.908 | 0.00475 ** |
| Tc          | 2.693e-02  | 5.341e-02  | 0.504   | 0.70274    |
| I(Te^2)     | 9.024e-02  | 1.448e-03  | 62.298  | 0.01022 *  |
| I(Tc^2)     | -3.769e-03 | 5.628e-04  | -6.696  | 0.09437 .  |
| Te:Tc       | 1.069e-04  | 9.034e-04  | 0.118   | 0.92501    |

---

Figura 5.64. Tabla resumen para el diseño envolvente usando polinomio AHRI reducido para mref

Si nos fijamos en las tablas resumen del ajuste podemos ver como en este diseño no tenemos apenas valores significativos para los coeficientes de regresión. Esto nos indica que este modelo se podría simplificar aún más eliminando más términos lo que nos lleva a deducir que no es un buen modelo por su bajo número de puntos y mala distribución de estos.

### 5.3.5. Ajuste aplicando el Diseño Central Reducido (SCD)

Este diseño es una variante del diseño central compuesto el cual usa un menor número de puntos y con el que se puede obtener un modelo más simplificado (Figura 4.23.).

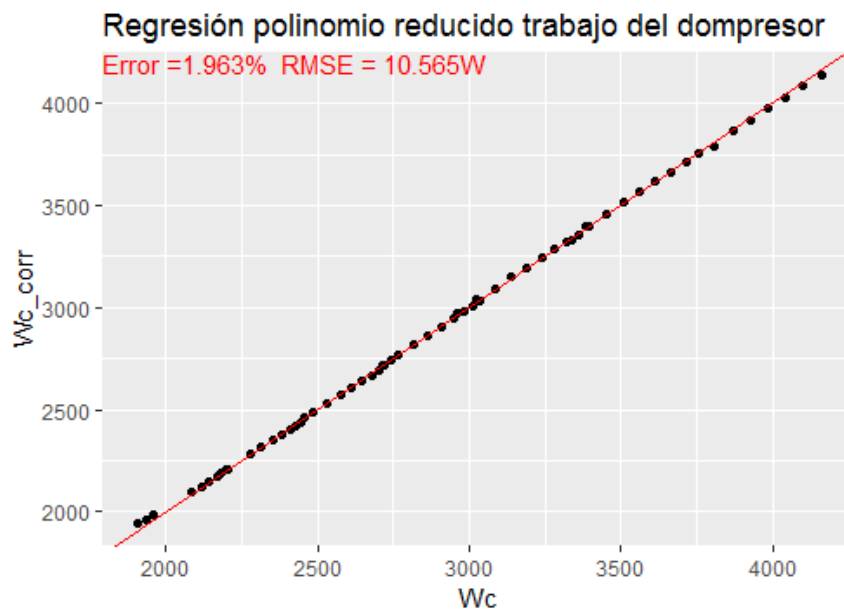


Figura 5.65. Ajuste para el Diseño Central Reducido usando polinomio AHRI reducido para Wc

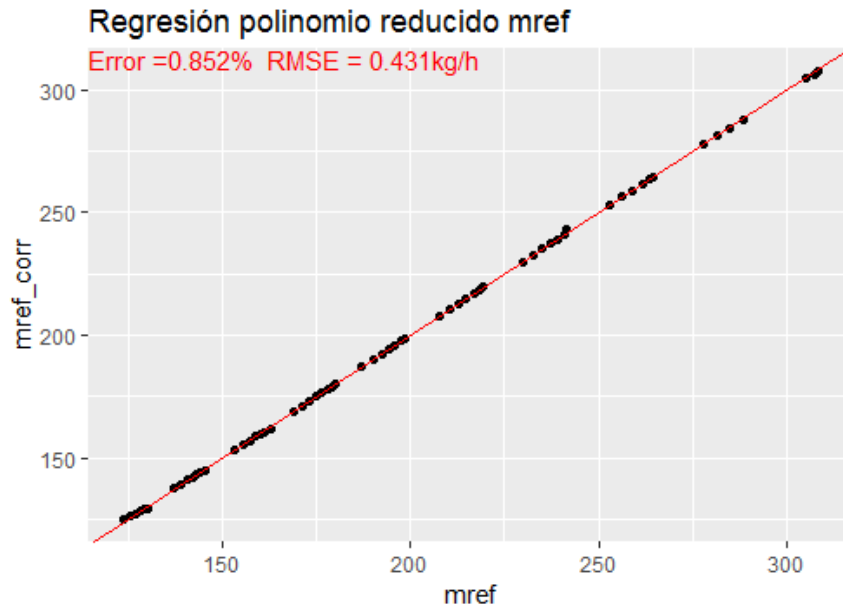


Figura 5.66. Ajuste para el Diseño Central Reducido usando polinomio AHRI reducido para mref

En la Figura 5.65. y Figura 5.66. podemos ver como el modelo no es del todo correcto, especialmente para el trabajo del compresor. Los valores de error máximo relativo y RMSE en ese caso no son óptimos y en la gráfica se aprecia que no se ajusta a la recta roja en los extremos, debido a la ausencia de puntos en las esquinas de la superficie de estudio.

En cuanto a las tablas resumen obtenidas para el ajuste del modelo, nos volvemos a encontrar de nuevo con que los coeficientes obtenidos no son significativos, lo que no da indicios de que el modelo no es exacto y que el número de puntos es quizás demasiado bajo.

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 1366.6636   139.4513   9.800  0.0647 .
Te          -15.2119     8.4829  -1.793  0.3238
Tc           20.8299     4.7329   4.401  0.1422
I(Te^2)     -0.2498     0.1947  -1.283  0.4215
I(Tc^2)      0.4136     0.0481   8.598  0.0737 .
Te:Tc        0.5397     0.1505   3.585  0.1732
---
    
```

Figura 5.67. Tabla resumen para el Diseño Central Reducido usando polinomio AHRI reducido para Wc

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 309.226594   2.905148 106.441 0.00598 **
Te           10.052761   0.176721  56.885 0.01119 *
Tc          -0.102766   0.098599  -1.042 0.48683
I(Te^2)      0.099707   0.004057  24.579 0.02589 *
I(Tc^2)     -0.003992   0.001002  -3.983 0.15659
Te:Tc       -0.009089   0.003136  -2.898 0.21154
---
    
```

Figura 5.68. Tabla resumen para el Diseño Central Reducido usando polinomio AHRI reducido para mref

### 5.3.6. Ajuste aplicando el Diseño Hexagonal (HD)

Este diseño se podría considerar una variante del diseño envolvente y diseño central reducido. La disposición de los puntos es la que permita cubrir un área mayor de la superficie de estudio para evitar zonas grandes sin puntos (Figura 4.24.).

De esta forma el ajuste obtenido se muestra en la Figura 5.69. y Figura 5.70., se puede ver un ajuste similar al del apartado anterior en el que en el trabajo del compresor los puntos no se ajustan a la recta en los extremos. De la misma forma los valores del error máximo relativo y el RMSE también son similares a los obtenidos en el apartado anterior.

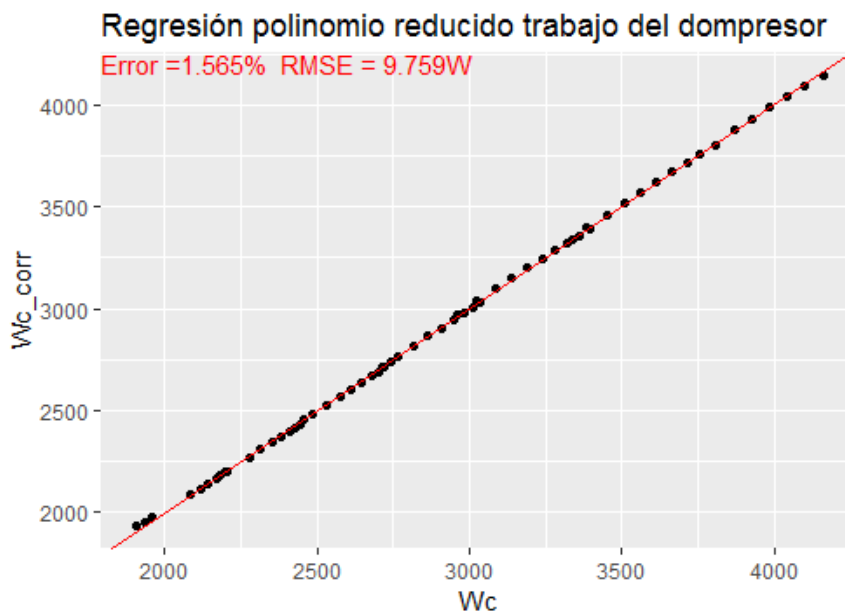


Figura 5.69. Ajuste para el Diseño Hexagonal usando polinomio AHRI reducido para Wc

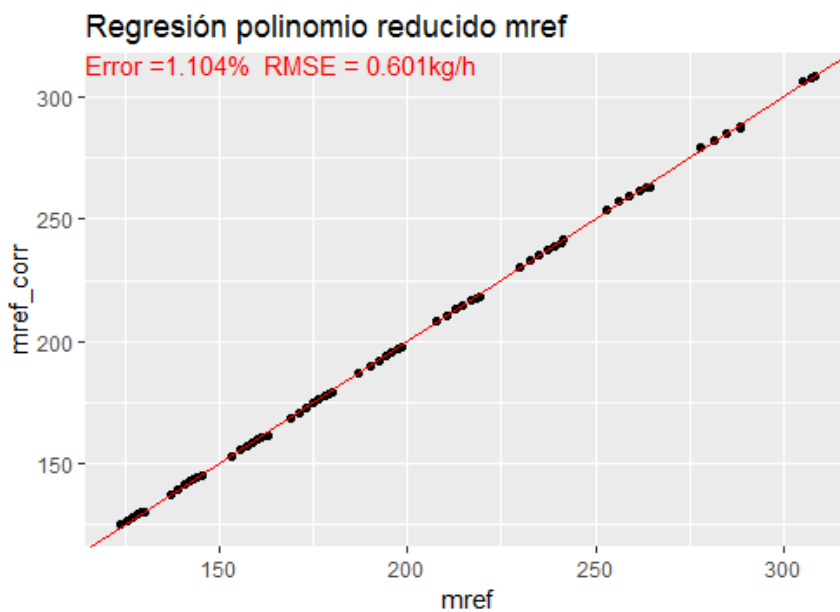


Figura 5.70. Ajuste para el Diseño Hexagonal usando polinomio AHRI reducido para Wc

Al igual que en el ajuste del modelo anterior los coeficientes no se muestran significativos (Figura 5.71. y 5.72.), se obtienen también muy similares los valores estimados de los coeficientes en comparación al apartado anterior.

| Coefficients: |            |            |         |          |
|---------------|------------|------------|---------|----------|
|               | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |
| (Intercept)   | 1365.97620 | 41.26624   | 33.102  | 0.0192 * |
| Te            | -15.88970  | 2.27353    | -6.989  | 0.0905 . |
| Tc            | 20.19461   | 1.71092    | 11.803  | 0.0538 . |
| I(Te^2)       | -0.27739   | 0.07089    | -3.913  | 0.1593   |
| I(Tc^2)       | 0.42643    | 0.01908    | 22.345  | 0.0285 * |
| Te:Tc         | 0.53970    | 0.03867    | 13.955  | 0.0455 * |
| ---           |            |            |         |          |

Figura 5.71. Tabla resumen para el Diseño Hexagonal usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

| Coefficients: |            |            |         |          |
|---------------|------------|------------|---------|----------|
|               | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |
| (Intercept)   | 302.155786 | 10.242786  | 29.499  | 0.0216 * |
| Te            | 9.832574   | 0.564319   | 17.424  | 0.0365 * |
| Tc            | 0.135624   | 0.424671   | 0.319   | 0.8032   |
| I(Te^2)       | 0.103209   | 0.017595   | 5.866   | 0.1075   |
| I(Tc^2)       | -0.005589  | 0.004737   | -1.180  | 0.4476   |
| Te:Tc         | -0.002518  | 0.009600   | -0.262  | 0.8367   |
| ---           |            |            |         |          |

Figura 5.72. Tabla resumen para el Diseño Hexagonal usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

Con esto podemos concluir que el diseño centra reducido y el modelo hexagonal, ambos basados en el diseño central compuesto, no dan tan buen resultado en el ajuste de modelo como este, debido probablemente al escaso número de puntos que se ha tomado y como están distribuidos por la superficie.

### 5.3.7. Ajuste aplicando el diseño Federov

Como se ha comentado en otros apartados, este diseño usa algoritmos para obtener un modelo óptimo, al partir nosotros de un modelo previamente dado (el modelo basado en el polinomio AHRI reducido) podemos obtener modelos que presenten un error máximo relativo y un RMSE elevado. En este caso, como estamos usando pocos puntos las diferentes distribuciones de puntos dependiendo del criterio elegido será similar, tal como se muestra en la Figura 4.28., Figura 4.29. y Figura 4.30.

Aplicando el criterio “D”, obtenemos una distribución de puntos en la envolvente de la superficie, es por eso por lo que, tal como se muestra en la Figura 5.73., en la zona central de la recta para el trabajo del compresor los puntos no se ajustan correctamente aumentando el valor de error máximo relativo y de RMSE. En el caso del ajuste del modelo para el gasto másico del refrigerante (Figura 5.74.) se puede ver en la propia gráfica que no ajusta correctamente ya que los puntos no siguen la recta roja central.

En comparación a criterio “D” del diseño Federov de once puntos el ajuste para el trabajo del compresor se ha mantenido similar mientras que el ajuste para el gasto másico de refrigerante ha mejorado considerablemente.

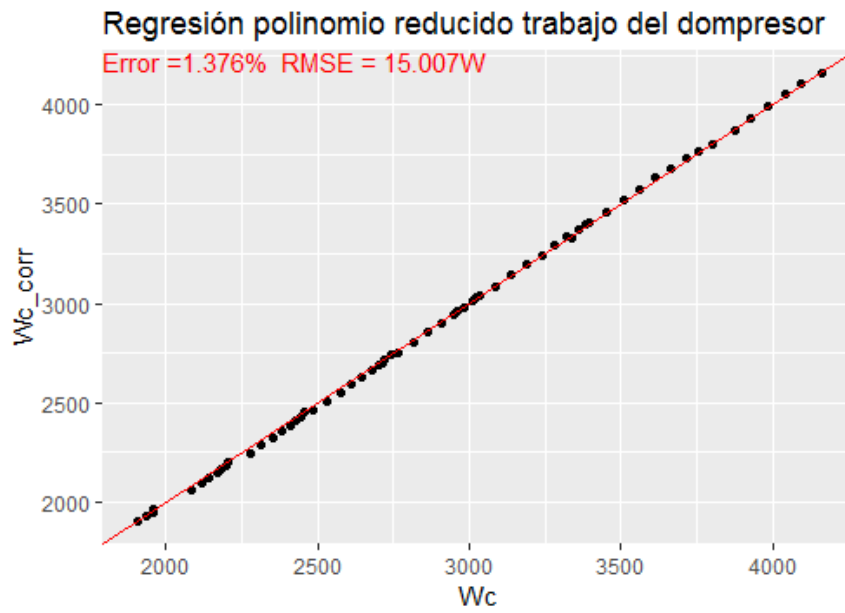


Figura 5.73. Ajuste para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

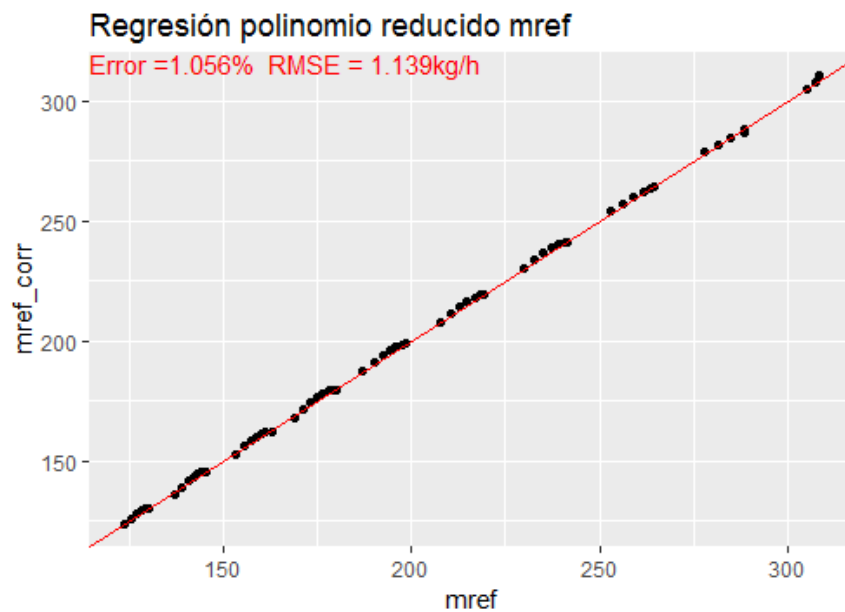


Figura 5.74. Ajuste para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$

En cuanto a las tablas resumen del ajuste (Figura 5.75. y Figura 5.76.), al igual que en el resto de los diseños de siete puntos, obtenemos p-valores que indican que los valores de los coeficientes no son significativos, lo que nos lleva a deducir que este diseño es demasiado simple y que el número de puntos es demasiado bajo.

Coefficients:

|             | Estimate  | Std. Error | t value | Pr(> t ) |
|-------------|-----------|------------|---------|----------|
| (Intercept) | 1375.3970 | 296.2421   | 4.643   | 0.135    |
| Te          | -12.3644  | 12.9270    | -0.956  | 0.514    |
| Tc          | 20.0782   | 12.5925    | 1.594   | 0.357    |
| I(Te^2)     | -0.2309   | 0.2419     | -0.954  | 0.515    |
| I(Tc^2)     | 0.4306    | 0.1270     | 3.391   | 0.183    |
| Te:Tc       | 0.5128    | 0.1670     | 3.071   | 0.200    |

Figura 5.75. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI reducido para Wc

Coefficients:

|             | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |
|-------------|------------|------------|---------|----------|
| (Intercept) | 290.717014 | 12.584675  | 23.101  | 0.0275 * |
| Te          | 9.110128   | 0.549151   | 16.589  | 0.0383 * |
| Tc          | 0.595432   | 0.534944   | 1.113   | 0.4660   |
| I(Te^2)     | 0.084987   | 0.010277   | 8.269   | 0.0766 . |
| I(Tc^2)     | -0.010343  | 0.005395   | -1.917  | 0.3061   |
| Te:Tc       | 0.004515   | 0.007092   | 0.637   | 0.6391   |
| ---         |            |            |         |          |

Figura 5.76. Tabla resumen para el diseño Federov criterio "D" usando polinomio AHRI reducido para mref

Teniendo en cuenta que tanto los valores de los coeficientes estimados como los p-valores de los diseños que usan los criterios restantes (criterio "A" y criterio "I") son muy similares no se incluirán en los ajustes de los modelos de esos criterios.

A continuación, se mostrará el ajuste del modelo usando el criterio A. Usando este criterio se toman tres niveles dentro de la superficie tomando puntos en la zona central, es por eso que gráficamente el modelo ajusta mejor los puntos que con el criterio "D", como se muestra en la Figura 5.77. y Figura 5.78.

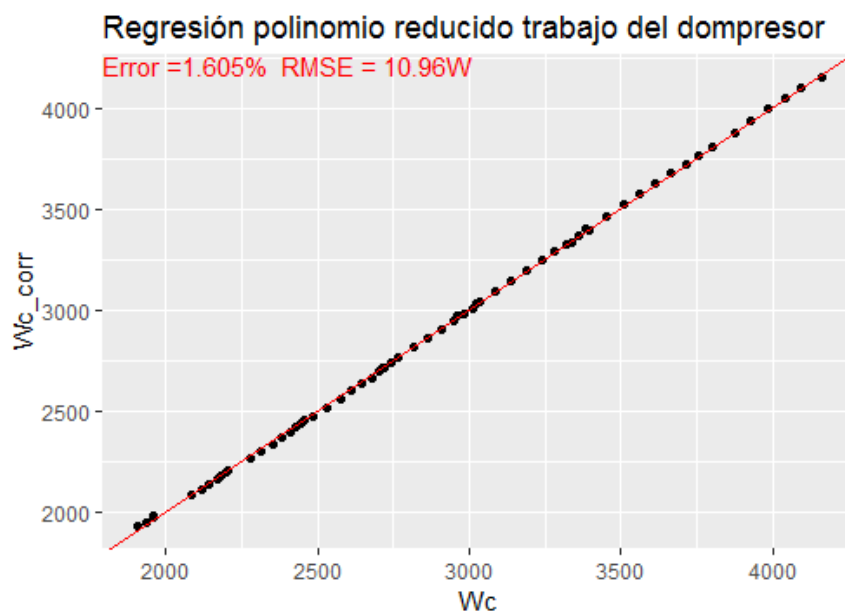


Figura 5.77. Ajuste para el diseño Federov criterio "A" usando polinomio AHRI reducido para Wc

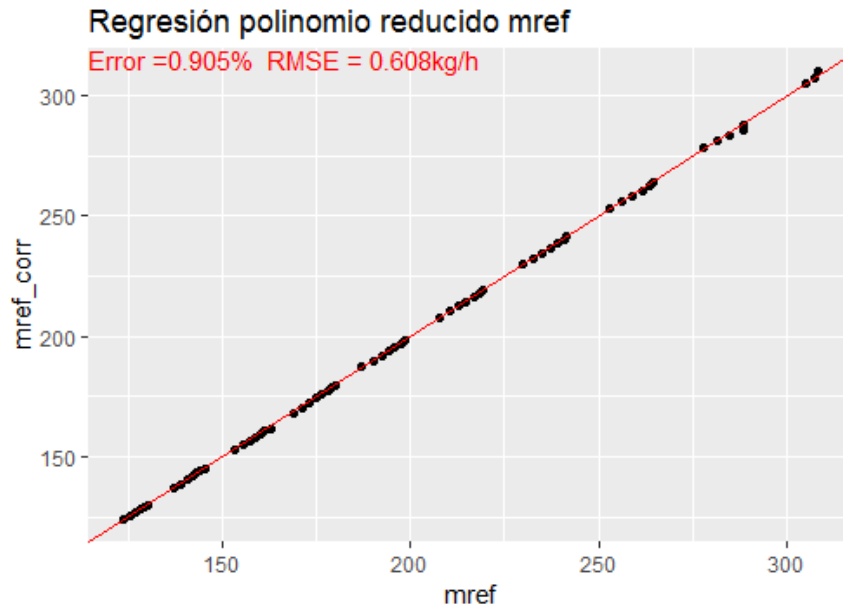


Figura 5.78. Ajuste para el diseño Federov criterio "A" usando polinomio AHRI reducido para mref

Si comparamos los valores obtenidos para el error máximo relativo y el RMSE con los obtenidos para el mismo criterio usando el modelo del polinomio AHRI convencional podemos observar cómo han crecido para el trabajo del compresor y como disminuyen para el gasto másico de refrigerante.

En tercer lugar, tenemos el modelo usando el criterio "I" del modelo Federov, la distribución de puntos usada con este criterio es similar a la usada con el criterio "A" por lo que obtendremos valores similares a los del criterio anterior. Como se observa en la Figura 5.79. y figura 5.80., en el ajuste para el trabajo del compresor se aprecian puntos fuera de la recta en la zona inferior de la misma, debido al escaso número de puntos en la zona inferior izquierda. Para el modelo del gasto másico de refrigerante comprobamos que ajusta de una manera más exacta que mediante el criterio A. Si comparamos estos resultados con los obtenidos para el modelo basado en el polinomio AHRI podemos comprobar que los valores del error máximo relativo y del RMSE para el trabajo del compresor han aumentado mientras que estos valores para el gasto másico de refrigerante han disminuido considerablemente.

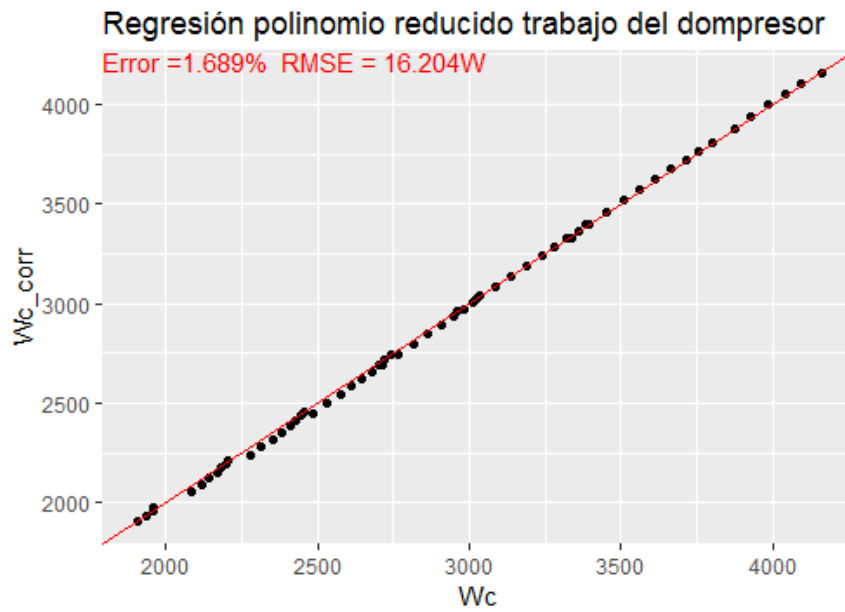


Figura 5.79. Ajuste para el diseño Federov criterio "1" usando polinomio AHRI reducido para  $W_c$

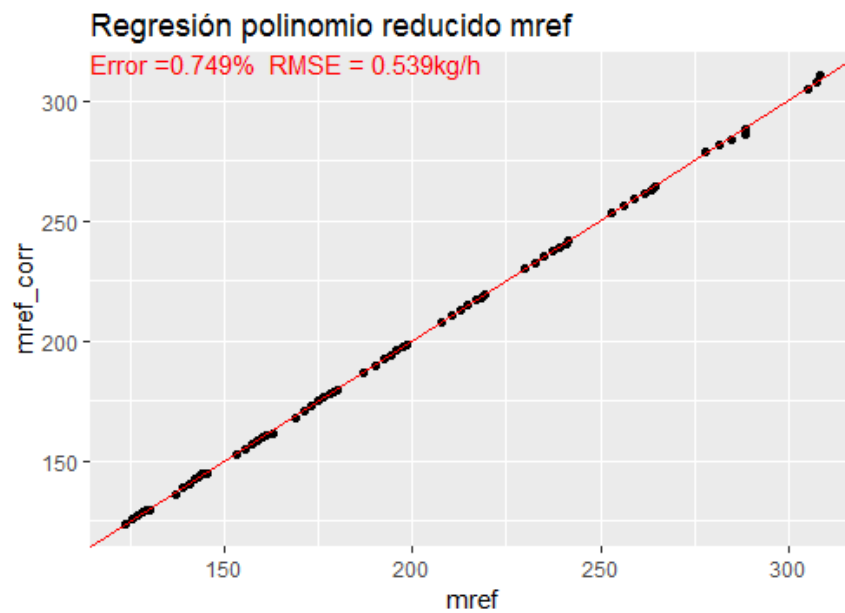


Figura 5.80. Ajuste para el diseño Federov criterio "1" usando polinomio AHRI reducido para  $m_{ref}$



## 6. Planteamiento de soluciones alternativas

En este apartado se van a comentar las posibles soluciones que se podrían haber adoptado a la hora de cumplir con el objetivo del trabajo. En primer lugar, se podrían haber escogido unas metodologías de diseño de experimento diferentes. Dentro de las metodologías algunas de las que se han descartado han sido:

- El **diseño de cinco niveles**, tanto para un cuadrado central como repartido en toda la superficie de estudio. Este diseño nos permitiría obtener un valor aún menos de error máximo relativo y de RMSE y un ajuste mejor que el resto de los diseños, pero se descartó por el excesivo número de puntos que implica.
- Ciertas metodologías clásicas como son las tablas de **Taguchi**, el cuadrado grecolatino o **hiper grecolatino y Box and Behnken**, muy usadas, pero tienen un mínimo de tres factores y en nuestro caso solo tenemos dos (temperatura del evaporador y del condensador).
- El **clustering** o algoritmo de agrupamiento, en el que se asigna un número de grupos (o *clusters*) de antemano y mediante este algoritmo se agrupan por su cercanía y se simplifican en un punto central, el cual tiene el valor de las medias de los valores de su grupo. De esta forma, se pueden crear tantos grupos como puntos necesitemos dependiendo del modelo utilizado. Los inconvenientes que presenta esta técnica son principalmente dos: el número de puntos experimentales de los que partimos debería ser mayor para conseguir grupos de una forma y tamaño similar; los puntos centrales que obtenemos en cada *cluster* no son puntos reales medidos de forma experimental, son puntos obtenidos mediante las medias de los puntos del mismo grupo, por tanto se debería aumentar de nuevo el número de puntos usando un *kriging* (o krigeaje) que es una técnica de interpolación para usar puntos centrales que no se obtengan mediante medias si no mediante una interpolación de los datos experimentales.

En segundo lugar, vamos a citar los diferentes softwares que se podrían haber empleado para el cálculo, graficado y obtención de los modelos que hemos usado para cada una de las metodologías de diseño de experimentos. Entre las alternativas rechazadas se encuentran:

- **Excel**, con el cual se pueden hacer los cálculos de regresiones, graficado y ajuste de modelos de forma rápida, además es un software familiar con un uso muy prolongado. La diferencia con el software utilizado es que en este caso se pueden introducir funciones propias y aplicarlas en cualquier punto lo que hace que se puedan obtener los datos de forma más sencilla.
- **Matlab**, el cual permite realizar cálculos de forma matemática y visual de manera sencilla. Una de las principales ventajas de este lenguaje es que usa funciones ya desarrolladas por una comunidad amplia, las cuales se pueden descubrir a través de foros, lo que permite aprender su uso de forma cómoda. La desventaja que puede presentar este lenguaje es que puede ser menos intuitivo y más difícil de dominar que otros entornos de programación.
- **EES**, el cual es un programa creado para resolver ecuaciones, llevar a cabo regresiones lineales y no lineales, hacer conversión de unidades y generar gráficos de forma rápida.

Una de sus mayores ventajas relacionadas con este trabajo es la incorporación de funciones termo físicas y tablas con información sobre un gran número de refrigerantes. El principal inconveniente de este software es que se comprar una licencia para su uso.

## 7. Solución adoptada

Teniendo en cuenta las alternativas que se han mencionado en el apartado anterior, hablaremos ahora de las metodologías de diseño de experimentos, los modelos y el software que se ha elegido para la realización del trabajo. Comenzando por las metodologías de diseño de experimentos empleadas, como hemos hablado anteriormente se han elegido las mostradas en el apartado 4 ya que son las que nos permitían adaptarnos a nuestro caso, en el que partimos de **dos factores** y queremos **un máximo de cuatro y un mínimo de tres niveles**. Se ha escogido el algoritmo (o método) de Federov ya que en teoría era capaz de obtener un diseño óptimo de distribución de puntos y su implementación en el software utilizado era muy sencilla.

Continuando con los modelos escogidos, el modelo usando el **polinomio AHRI** establecido por la norma era de uso obligado ya que es el que los fabricantes usan para poder caracterizar sus compresores. Sabiendo esto y teniendo en cuenta que la cantidad de puntos que íbamos a obtener iba a ser pequeña (tanto por el uso de únicamente dos factores como por la simplificación que este trabajo busca), se estudió la posibilidad de emplear un **polinomio reducido** con el que poder obtener un modelo simplificado (tal como se explica en el apartado 3.2.) para comprobar cómo se comportaría este modelo en comparación al modelo del polinomio AHRI convencional para averiguar si el modelo convencional que debe usarse según la norma puede llegar a ser demasiado extenso en algunas ocasiones.

Para concluir hablaremos del **software** utilizado en el trabajo, justificando por qué ha sido elegido. Algunas de las ventajas que este software ofrece es que es de código abierto y gratuito; tiene una comunidad muy amplia de usuarios que permite aprender de forma sencilla, descargar paquetes y funciones externas; permite el uso de forma sencilla del algoritmo de Federov para obtener diferentes distribuciones de puntos según su criterio; se pueden crear funciones dentro del entorno y poder aplicarlas en cualquier momento en el código (en nuestro caso se crea una función que realiza al modelo conveniente, muestre la tabla resumen del ajuste y cree una gráfica mostrando la correlación entre la variable experimental y la del modelo).

## 8. Análisis de los resultados

En la Tabla 3.1. del ANEXO II podemos visualizar un resumen de los valores de error máximo relativo y RMSE para cada una de las metodologías de diseño de experimentos en ambos modelos.

La tabla se divide principalmente en el modelo 1 (el modelo usando el polinomio AHRI proporcionado por la norma) y el modelo 2 (el modelo usando el polinomio reducido). En amarillo se ha marcado el menor valor para cada una de las columnas. Para realizar el estudio de los resultados se va a estudiar la tabla en **el uso de cada modelo por separado**, posteriormente estudiaremos si ha **sido positiva o no la inclusión del modelo usando el polinomio reducido** y finalmente indicaremos cual es **la mejor metodología para caracterizar un compresor** usando el menor número de puntos posible.

Comenzamos con el estudio de **resultados para el modelo 1**. Lo primero que podemos apreciar es que los valores más pequeños se han obtenido para el diseño de cuatro niveles trasladado a toda la superficie (a excepción del RMSE para el gasto másico de refrigerante, por una diferencia mínima), este es el diseño que contiene un mayor número de puntos y además esos puntos están distribuidos por toda la superficie de respuesta, por lo que es lógico que este modelo se adapta de mejor forma a los resultados experimentales. Al tener los puntos tan distribuidos se evitan zonas vacías lo que permite evitar la interpolación para grandes zonas evitando que aumente el error máximo relativo y el RMSE.

Debemos mencionar también el elevado valor de error y RMSE que obtenemos usando el diseño de tres niveles repartidos por la superficie, el cual se pensó que daría un resultado similar a su equivalente de cuatro niveles. El problema es que a la hora de hacer las traslaciones para adaptar el diseño a la forma de la superficie y añadir puntos en la zona central se ha creado un nivel central para la temperatura del condensador con un número elevado de puntos dejando el resto de las zonas de la superficie prácticamente vacías. Todo esto hace que el modelo de tres niveles en un cuadrado central de la superficie resulte un modelo mejor en comparación con el modelo repartido por la superficie.

En cuanto al uso del algoritmo Federov en sus tres criterios se han obtenido valores mayores de error y RMSE a los esperados obteniendo modelos peores a los deseados. El mejor modelo dentro de los criterios es el que usa el criterio A con el que se obtiene un valor intermedio del error máximo relativo para el trabajo del compresor y los menores valores para el error del gasto másico de refrigerante y ambos RMSE. La obtención de un modelo peor al esperado inicialmente puede deberse a que la forma de nuestra superficie de respuesta no es cuadrada, así como al escaso número de puntos que estamos distribuyendo (once puntos en este caso).

Pasando al diseño envolvente debemos añadir que se han obtenido buenos resultados obteniendo un modelo que se ajusta a los valores experimentales utilizando únicamente once puntos. Debemos mencionar que esta distribución de puntos no está basada en ninguna metodología de diseño de experimentos sino en propias comprobaciones y cálculos de regresiones y errores a través del software R.

Para concluir con los resultados de este modelo hablaremos del **Diseño Central Compuesto (CCD)** con el que se obtiene el mejor valor de RMSE para el gasto másico del refrigerante en todo

este modelo y proporcionalmente al número de puntos se han obtenido los mejores valores. Tomando prácticamente un tercio menos de puntos con respecto al diseño de cuatro niveles (once puntos en el CCD y dieciséis en el diseño de cuatro niveles) se han obtenido un valor muy similar para el error máximo relativo en el trabajo del compresor. Esto es debido a la buena distribución del propio diseño unida a los puntos que se han añadido en las esquinas de la superficie para asegurar un ajuste correcto en los extremos de la correlación.

Continuamos hablando del **modelo 2**. En este modelo el número de puntos decrecerá excepto en la metodología de diseño en cuatro niveles que mantendremos los dieciséis puntos. En primer lugar, nos fijaremos en esa metodología, al igual que en el modelo 1, aplicando esta distribución obtenemos el mejor valor en los errores relativos y RMSE tanto para el trabajo del compresor como para el gasto masico de refrigerante. A pesar de no tener coeficientes significativos por el hecho de tener un número elevado de puntos para este modelo se obtiene el mejor ajuste de modelo al igual que en el anterior.

Una de las diferencias más significativas en comparación con el modelo anterior está en el modelo obtenido usando el diseño de tres niveles repartido en toda la superficie. Se puede comprobar que al prescindir de los puntos centrales se obtienen tres niveles mejor definidos lo que conduce a un mejor modelo. Como se muestra en las Figuras 5.49. y 5.50. se ajusta mucho mejor a la recta que en el modelo 1 y se obtienen valores significativos. Esto es debido no solo a la reducción de puntos si no que el modelo se ve beneficiado al usar un modelo más simplificado en el que se han eliminado términos, ya que un buen número de coeficientes se muestran significativos (Figura 5.51. y Figura 5.52.).

Pasando al Diseño Central Compuesto (CCD) se puede apreciar como los valores del error máximo relativo y RMSE para el trabajo del compresor se han elevado considerablemente con respecto al modelo AHRI convencional mientras que estos valores para el gasto másico de refrigerante se han mantenido muy similares. En la Figura 5.41. y 5.42. se comprueba gráficamente como este modelo no ajusta correctamente los puntos a la recta debido a la ausencia de los puntos añadidos en el modelo 1. En este caso, contrariamente al diseño de tres niveles repartido en toda la superficie, la ausencia de los puntos extra lleva a un modelo peor para el trabajo del compresor.

A continuación, hablaremos de los modelos usando siete puntos (el mínimo necesario). Comenzamos con el diseño central simplificado y diseño hexagonal para los que se han obtenido valores similares. En el diseño central simplificado obtenemos mejores valores de para el gasto másico de refrigerante y en el hexagonal mejores valores para el trabajo del compresor. En ambos diseños se obtienen unos ajustes gráficos similares en los que se comprueba como en los extremos los modelos no ajustan correctamente, lo que aumenta el valor de error y RMSE.

En el caso del diseño envolvente vemos como se obtiene un resultado similar al modelo central simplificado y hexagonal, aumentando el valor en este caso del RMSE para el trabajo del compresor y gasto másico de refrigerante. En este caso el problema se encuentra en las zonas entre el centro y los extremos del ajuste, ya que estas zonas carecen prácticamente puntos llevando a un ajuste incorrecto de en estas, tal como se muestra en la Figura 5.61. y 5.62. Por

este motivo si comparamos el error obtenido en este caso para el trabajo del compresor se observa cómo ha aumentado al doble del valor anterior y en el RMSE un aumento de más del doble.

Para los diseños basados en el algoritmo de Federov en sus tres criterios podemos observar cómo los valores de error máximo relativo y RMSE para el trabajo del compresor se han elevado considerablemente mientras que estos valores para el gasto másico de refrigerante han decrecido con respecto al modelo 1. De la misma forma que en el modelo 1 se obtiene el modelo usando el criterio "A" como el más equilibrado de los tres.

Podemos ver que en todos los diseños para el modelo basado en el polinomio AHRI reducido que usan únicamente siete puntos hemos obtenido ajustes no demasiado correctos. Si observamos las tablas resumen del ajuste de todos estos modelos comprobaremos que obtenemos valores no significativos en su mayoría para los coeficientes. Esto lo que nos muestra es que, aunque usemos un modelo basado en un polinomio de seis constantes, siete puntos son demasiado pocos para poder ajustar a un modelo que se adapte correctamente a los valores obtenidos de forma experimental.

Concluyendo con el modelo 2, el diseño con el que obtenemos un mejor modelo en el caso de tomar siete puntos sería el diseño envolvente con el que obtenemos el menor valor de error máximo relativo para el trabajo del compresor de todos los diseños de siete puntos y un valor relativamente bueno de error para el gasto másico y para ambos RMSE. Si pasamos al mejor diseño de todo el modelo 2 en este caso el mejor modelo es el que se obtiene usando el **diseño de tres niveles trasladado a toda la superficie** de estudio, obteniendo valores similares al diseño de cuatro niveles para el trabajo del compresor y valores no demasiado elevados para el gasto másico de refrigerante.

En cuanto a si ha sido o no positiva la inclusión de un modelo basado en el polinomio AHRI reducido debemos decir que este polinomio nos ha permitido ajustar un modelo sin necesidad de añadir puntos a las metodologías clásicas, obteniendo buenos ajustes en algunos casos. También ha permitido ajustar modelos con relativamente buenos resultados usando únicamente siete puntos. Por todo esto podemos concluir que la adición de este modelo ha sido beneficiosa y ha permitido incluir más variedad de resultados y metodologías usando un menor número de puntos.

Para concluir con este apartado hablaremos de la mejor metodología para poder caracterizar un compresor tomando el menor número de puntos posibles. Teniendo en cuenta todo lo dicho anteriormente esta metodología es la del **Diseño Central Compuesto (CCD)** con dos puntos adicionales en las esquinas de la superficie de respuesta. Usando este diseño hemos podido obtener un modelo con valores bajos de error máximo relativo y RMSE tanto para el trabajo del compresor como para el gasto másico de refrigerante utilizando once puntos. Además, para este modelo se ha usado el polinomio AHRI convencional que al fin y al cabo es el que establece la norma que se debe usar para la caracterización de un compresor.

## 9. Conclusiones

Para concluir con el trabajo debemos resaltar la utilidad que puede tener este estudio en el campo de la refrigeración comercial. Para los fabricantes de compresores obtener los coeficientes de regresión para el modelo AHRI conlleva un elevado número de ensayos, de tiempo y, por tanto, un elevado coste económico. En este caso hemos comparado el ensayo de 63 puntos que se llevó a cabo por parte del *Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute (AHRI) Low-GWP Alternative Refrigerants Evaluation Program (Low-GWP AREP)* con un Diseño Central Compuesto el cual consta de 11 puntos obteniendo un error máximo relativo entre ambos ensayos del 0.379% y 0.806% y una raíz del error cuadrático medio de 3.995W y 0.273 kg/h para el trabajo del compresor y el gasto másico de refrigerante respectivamente.

Podemos concluir por tanto que hemos conseguido un modelo prácticamente idéntico al original, pero tomando 52 puntos menos, lo que supone un ahorro muy elevado para los fabricantes.

Del mismo modo se ha realizado el estudio para el resto de los refrigerantes para los que se llevó a cabo el ensayo inicial las cuales se encuentran en el ANEXO II, obteniendo resultados muy similares en proporción a los obtenidos para el R404a.

## 10. Bibliografía

[1] Som Shrestha, Vishaldeep Sharma y Omar Abdelaziz "Test Report #21" proporcionado por el "Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute (AHRI) Low-GWP Alternative Refrigerants Evaluation Program (Low-GWP AREP)"

[2] "Especificaciones Copeland ZS21KAEPFV" <https://climate.emerson.com/en-us/shop/1/copeland-sku-zs21kae-pfv-818>

[3] AHRI STANDARD 540 "2015 Standard for Performance Rating Of Positive Displacement Refrigerant Compressors and Compressor Units"

[4] Shuangquan Shao, Wenxing Shi, Xianting Li y Huajun Chen "Performance representation of variable-speed compressor for invertir air conditioners base don experimental data"



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



## DOCUMENTO 2º: PRESUPUESTO

## Índice del presupuesto

|   |    |
|---|----|
| 1. Coste de personal.....               | 88 |
| 2. Coste de material inventariable..... | 88 |
| 3. Coste de software.....               | 89 |
| 4. Presupuesto total.....               | 89 |



## 1. Coste de personal

En este apartado se analizarán los costes de los diferentes miembros del equipo que ha integrado el proyecto. Este equipo cuenta con dos profesores titulares de universidad y un becario. Para el cálculo de este coste se tienen en cuenta las reuniones con ambos profesores, el tiempo invertido por ellos y el becario, así como el tiempo de realización de cálculos, obtención de datos y redacción del presente trabajo. El precio de la mano de obra es el recomendado para personal de plantilla por la Universidad Politécnica de Valencia. En la Tabla 2.1. se muestran estos costes de forma desglosada.

|                    | Horas [h] | Mano de obra [€/h] | Subtotal [€]     |
|--------------------|-----------|--------------------|------------------|
| Profesor Titular 1 | 100       | 37.7               | 3770             |
| Profesor Titular 2 | 30        | 37.7               | 1131             |
| Becario            | 340       | 5.33               | 1812.20          |
|                    |           | <b>Total</b>       | <b>6713.20 €</b> |

Tabla 2.1. Costes de personal

## 2. Coste de material inventariable

Para el cálculo de costes de los materiales inventariables debemos tener en cuenta que en este trabajo se ha usado un ordenador portátil *Toshiba Satellite* de 8 GB de RAM y procesador i5 además de un ordenador fijo perteneciente al departamento de termodinámica. En la tabla 2.2 se muestran los costes de materiales, los periodos de amortización se obtienen del servicio de gestión de la I+D+i de la Universidad Politécnica de Valencia.

Para el cálculo del coste total se usará la fórmula:

$$\text{Coste} = \frac{A}{B} \times C \times D$$

Donde

- A es el valor de los meses de uso del equipo
- B es el periodo de amortización del equipo
- C es el coste del equipo
- D es el porcentaje de uso del equipo durante el estudio

|                        | Meses de uso | Periodo amort. [años] | Coste [€]    | Porcentaje de uso del equipo [%] |
|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|----------------------------------|
| Ordenador portátil     | 4            | 6                     | 800          | 80                               |
| Ordenador departamento | 4            | 6                     | 1200         | 20                               |
|                        |              |                       | <b>Total</b> | <b>746.60 €</b>                  |

Tabla 2.2. Costes de materiales

### 3. Coste de software

En este apartado se tienen en cuenta el coste de las licencias de los diferentes programas empleados para el cálculo, el graficado y la redacción del trabajo. En la Tabla 2.3. se muestran los programas, así como el coste de la licencia de cada uno de ellos. En este caso el total asciende a cero euros ya que la licencia de Microsoft Office se obtiene gratuita a través de la universidad y R es un software de código abierto sin licencia

|                       | Horas [h] | Subtotal [€]  |
|-----------------------|-----------|---------------|
| Microsoft Office 2019 | 170       | 0.00          |
| R Studio              | 80        | 0.00          |
| <b>Total</b>          |           | <b>0.00 €</b> |

Tabla 2.3. Coste de software

### 4. Presupuesto total

El coste de presupuesto total se obtiene sumando los subtotales anteriormente obtenidos, añadiendo un impuesto al valor añadido (IVA) del 21% y los gastos extra que suponen el uso de instalaciones, luz, material adicional, fotocopias, etc. De esta forma se obtiene un presupuesto para el trabajo de **diez mil trescientos ochenta con treinta y un céntimos.**

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

|                     |     | Coste [€]         |
|---------------------|-----|-------------------|
| Coste de personal   |     | 6713.20           |
| Coste de materiales |     | 746.60            |
| Coste de software   |     | 0.00              |
| Subtotal            |     | 7459.80           |
| Gastos extra        | 15% | 1118.97           |
| IVA                 | 21% | 1801.54           |
| <b>Total</b>        |     | <b>10380.31 €</b> |

*Tabla 2.4. Presupuesto total*



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

# DOCUMENTO 3º: ANEXOS

## ANEXO I: CÓDIGO EN R STUDIO

### 1. Script principal

```
1
2 #R404a
3
4 library(excel.link)
5 library(ggplot2)
6 library(units)
7 library(Metrics)
8
9 source('source/corrwc.R')
10 source('source/corrmref.R')
11 source('source/corrwcred.R')
12 source('source/corrmrefred.R')
13
14
15
16 x1.read.file(filename = '../data/R404a.xlsx')
17 df<-x1.read.file(filename = '../data/R404a.xlsx')
18 df
19
20
21
22
23 #-----Cambio de unidades de la variables del data frame-----
24 df$Pc=set_units(df$Pc,'psi')
25 df$Pe=set_units(df$Pe,'psi')
26 df$Tc=set_units(df$Tc,'Fahrenheit')
27 df$Te=set_units(df$Te,'Fahrenheit')
28 df$Tsuc=set_units(df$Tsuc,'Fahrenheit')
29 df$Td=set_units(df$Td,'Fahrenheit')
30 df$mref=set_units(df$mref,'lb/h')
31 df$wc=set_units(df$wc,'w')
32 df$qe=set_units(df$qe,'Btu')
33
34 df$Pc=set_units(df$Pc,'bar')
35 df$Pe=set_units(df$Pe,'bar')
36 df$Tc=set_units(df$Tc,'celsius')
37 df$Te=set_units(df$Te,'celsius')
38 df$Tsuc=set_units(df$Tsuc,'celsius')
39 df$Td=set_units(df$Td,'celsius')
40 df$mref=set_units(df$mref,'kg/h')
41 df$wc=set_units(df$wc,'w')
42 df$qe=set_units(df$qe,'J')
43
44
45
46
47 df2<-df
48 df2$Pc<-drop_units(df2$Pc)
49 df2$Pe<-drop_units(df2$Pe)
50 df2$Tc<-drop_units(df2$Tc)
51 df2$Te<-drop_units(df2$Te)
52 df2$Tsuc<-drop_units(df2$Tsuc)
53 df2$Td<-drop_units(df2$Td)
54 df2$mref<-drop_units(df2$mref)
55 df2$wc<-drop_units(df2$wc)
56 df2$qe<-drop_units(df2$qe)
57
58
59 #-----
60
61
62
63
64
```

## Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

```
65 #Escogemos de todo el data frame los valores que tengan SH=11.11
66
67 df3 <- subset(df2,Id=="SH=11.11")
68 df3
69
70 ggplot(df3,aes(x=Te,y=Tc, colour=wc)) +
71   geom_point()+
72   labs(title = "Puntos del estudio",x="Temp. Evaporador (°C)", y="Temp. Condensador (°C)")
73
74
75
76 ggplot(df3,aes(x=Te,y=Tc, colour=mref)) +
77   geom_point()+
78   labs(title = "Puntos del estudio",x="Temp. Evaporador (°C)", y="Temp. Condensador (°C)")
79
80
81
82
83
84
85 head(df3)
86
87 df3$Te_Tc<-NA
88
89 head(df3)
90
91 for(i in 1:nrow(df3)) {
92
93   df3[i , 'Te_Tc']<-paste0(df3[i , 'Te_level'], '_',df3[i , 'Tc_level'])
94
95
96 }
97
98
99 df_prueba<-df3[df3$Te_Tc %in% c('1_1',
100                                '2_1',
101                                '3_1',
102                                '4_1'),]
103
104 ggplot() +
105   geom_point(data = df3, aes(x = Te, y = Tc)) +
106   geom_point(data = df_prueba, aes(x = Te, y = Tc), color = 'red', shape = 17)
107
108 #####
109
110
111
112
113
114 #####
115
116
117
118
119
120 #Cálculo para un diseño 3k
121
122 #-----SIN TRASLADAR-----
123 #xl.read.file(filename = '../data/CCDpre.xlsx')
124 #dfCCDpre <- xl.read.file(filename = '../data/CCDpre.xlsx')
125
```

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

```
126
127 dfCCDpre<-df3[df3$Te_Tc %in% c('1_1',
128                               '1_5',
129                               '1_8',
130                               '5_1',
131                               '5_5',
132                               '5_8',
133                               '10_1',
134                               '10_5',
135                               '10_8'),]
136
137
138
139
140
141 ggplot(df3,aes(Te,Tc)) +
142   geom_point() + geom_point(data=dfCCDpre, aes(Te,Tc),colour='red', size=3, shape=17)+
143   labs(title = "Diseño 3 niveles sin trasladar",x="Temp. Evaporador (°C)",
144         y="Temp. Condensador (°C)")
145
146
147
148 #-----TRASLADADO CON POLINOMIO AHRI-----
149
150 #se realizan las traslaciones necesarias y añadiendo dos puntos |
151 #xl.read.file(filename = '../data/CCD.xlsx')
152 #dfCCD <- xl.read.file(filename = '../data/CCD.xlsx')
153
154 dfCCD<-df3[df3$Te_Tc %in% c('1_1',
155                             '1_5',
156                             '1_6',
157                             '4_5',
158                             '5_2',
159                             '5_5',
160                             '5_8',
161                             '6_5',
162                             '9_5',
163                             '10_6',
164                             '10_8'),]
165
166
167
168
169 ggplot(df3,aes(Te,Tc)) +
170   geom_point() + geom_point(data=dfCCD, aes(Te,Tc),colour='red', size=3, shape=17)+
171   labs(title = "Diseño 3 niveles con 2 puntos extra",x="Temp. Evaporador (°C)",
172         y="Temp. Condensador (°C)")
173
174 #regresión para el trabajo del compresor
175
176 corrw(df_DoE = dfCCD, df_tot = df3)
177
178 #regresión para mref
179
180 corrmref(df_DoE = dfCCD, df_tot = df3)
181
182 #-----TRASLADADO CON POLINOMIO REDUCIDO (9 PUNTOS)-----
183
184 #se usa la matriz de 9 puntos para usar el polinomio reducido
185
186 #xl.read.file(filename = '../data/CCDred.xlsx')
187 #dfCCDred <- xl.read.file(filename = '../data/CCDred.xlsx')
```

## Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

```
188
189 dfCCDred<-df3[df3$Te_Tc %in% c('1_1',
190                               '1_5',
191                               '1_6',
192                               '5_2',
193                               '5_5',
194                               '5_8',
195                               '9_5',
196                               '10_6',
197                               '10_8'),]
198
199
200
201 ggplot(df3,aes(Te,Tc)) +
202   geom_point() + geom_point(data=dfCCDred, aes(Te,Tc),colour='red', size=3, shape=17)+
203   labs(title = "Diseño 3 niveles reducido",x="Temp. Evaporador (°C)",
204         y="Temp. Condensador (°C)")
205
206
207 #regresión para el trabajo del compresor
208
209 corrwcred(df_DoE = dfCCDred, df_tot = df3)
210
211 #regresión para mref
212
213 corrmrefred(df_DoE = dfCCDred, df_tot = df3)
214 #-----
215
220
221
222 #cálculo para un CCD en el que se coge como superficie de respuesta un cuadrado central
223
224 #-----POLINOMIO REDUCIDO (9 PUNTOS)-----
225
226 #xl.read.file(filename = '../data/CCD2pre.xlsx')
227 #dfCCD2pre <- xl.read.file(filename = '../data/CCD2pre.xlsx')
228
229 dfCCD2pre<-df3[df3$Te_Tc %in% c('2_5',
230                               '3_3',
231                               '3_7',
232                               '5_2',
233                               '5_5',
234                               '5_8',
235                               '7_3',
236                               '7_7',
237                               '8_5'),]
238
239
240
241
242
243
244 ggplot(df3,aes(Te,Tc)) +
245   geom_point() + geom_point(data=dfCCD2pre, aes(Te,Tc),colour='red', size=3, shape=17)+
246   labs(title = "CCD",x="Temp. Evaporador (°C)", y="Temp. Condensador (°C)")
247
248
249
250 #usamos el polinomio reducido para calcular el modelo
251
252
```



## Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

```
253
254 #regresión para el trabajo del compresor
255
256 corrwcred(dfCCD2pre,df3)
257
258 #regresión para mref
259
260 corrmrefred(dfCCD2pre,df3)
261
262 #-----POLINOMIO AHRI-----
263
264 #añadimos dos puntos en los extremos
265
266
267 #xl.read.file(filename = '../data/ccd2.xlsx')
268 #dfCCD2 <- xl.read.file(filename = '../data/ccd2.xlsx')
269
270
271 dfCCD2<-df3[df3$Te_Tc %in% c('2_5',
272                             '3_3',
273                             '3_7',
274                             '5_2',
275                             '5_5',
276                             '5_8',
277                             '7_3',
278                             '7_7',
279                             '8_5',
280                             '1_1',
281                             '10_8'),]
282
283
284
285
286
287
288
289 ggplot(df3,aes(Te,Tc)) +
290   geom_point() + geom_point(data=dfCCD2, aes(Te,Tc),colour='red', size=3, shape=17)+
291   labs(title = "CCD",x="Temp. Evaporador (°C)", y="Temp. Condensador (°C)")
292
293
294 #calculamos la regresion usando el polinomio AHRI standard
295
296 #regresión para el trabajo del compresor
297
298 corrw(dfCCD2,df3)
299
300
301 #regresión para mref
302
303 corrmref(dfCCD2,df3)
304
305
306
307
308
309 #-----
310
311
312
313
314
315
316 #Cálculo para un diseño 3k en un cuadrado central de la superficie de respuesta
317
```

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

```
318 #-----POLINOMIO AHRI (9 + 2 PUNTOS EXTRA)-----
319 #xl.read.file(filename = '../data/3k.xlsx')
320 #df3k <- xl.read.file(filename = '../data/3k.xlsx')
321
322 df3k<-df3[df3$Te_Tc %in% c(
323     '3_3',
324     '3_5',
325     '3_7',
326     '5_3',
327     '5_5',
328     '5_7',
329     '7_3',
330     '7_7',
331     '7_5',
332     '1_1',
333     '10_8'),]
334
335
336
337
338
339
340
341 ggplot(df3,aes(Te,Tc)) +
342   geom_point() + geom_point(data=df3k, aes(Te,Tc),colour='red', size=3, shape=17)+
343   labs(title = "Diseño 3 niveles con 2 puntos extra",x="Temp. Evaporador (°C)",
344         y="Temp. condensador (°C)")
345
346
347 #regresión para el trabajo del compresor
348
349 corrwk(df3k,df3)
350
351
352 #regresión para mref
353
354 corrmref(df3k,df3)
355
356
357 #-----POLINOMIO REDUCIDO (9 PUNTOS)-----
358
359 #xl.read.file(filename = '../data/3kred.xlsx')
360 #df3kred <- xl.read.file(filename = '../data/3kred.xlsx')
361
362 df3kred<-df3[df3$Te_Tc %in% c(
363     '3_3',
364     '3_5',
365     '3_7',
366     '5_3',
367     '5_5',
368     '5_7',
369     '7_3',
370     '7_7',
371     '7_5'),]
372
373
374
375
376
377
378 ggplot(df3,aes(Te,Tc)) +
379   geom_point() + geom_point(data=df3kred, aes(Te,Tc),colour='red', size=3, shape=17)+
380   labs(title = "Diseño 3 niveles",x="Temp. Evaporador (°C)", y="Temp. condensador (°C)")
381
```

## Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

```
---
382 #regresión para trabajo del compresor
383 corrwcred(df3kred,df3)
384
385 #regresión para mref
386 corrmrefred(df3kred,df3)
387
388
389
390 #-----
391
392
393
394
395 #Cálculo para un diseño 4k en un cuadrado central de la superficie de respuesta
396
397
398 #-----POLINOMIO AHRI (16 PUNTOS)-----
399
400
401 #xl.read.file(filename = '../data/4kpre.xlsx')
402 #df4kpre <- xl.read.file(filename = '../data/4kpre.xlsx')
403
404
405
406 df4kpre<-df3[df3$Te_Tc %in% c(
407     '4_3',
408     '4_4',
409     '4_5',
410     '4_6',
411     '5_3',
412     '5_4',
413     '5_5',
414     '5_6',
415     '6_3',
416     '6_4',
417     '6_5',
418     '6_6',
419     '7_3',
420     '7_4',
421     '7_5',
422     '7_6'),]
423
424
425
426
427
428
429
430
431 ggplot(df3,aes(Te,Tc)) +
432   geom_point() + geom_point(data=df4kpre, aes(Te,Tc),colour='red', size=3, shape=17)+
433   labs(title = "Diseño 4 niveles cuadrado central",x="Temp. Evaporador (°C)",
434         y="Temp. Condensador (°C)")
435
436
437 #regresión para el trabajo del compresor
438 corrw(df4kpre,df3)
439
```

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

```
440 #regresión para mref
441 corrmref(df4kpre,df3)
442
443
444
445 -----POLINOMIO REDUCIDO (16 PUNTOS)-----
446
447
448 #xl.read.file(filename = '../data/4kpre.xlsx')
449 #df4kpre <- xl.read.file(filename = '../data/4kpre.xlsx')
450
451
452 df4kpre<-df3[df3$Te_Tc %in% c(
453     '4_3',
454     '4_4',
455     '4_5',
456     '4_6',
457     '5_3',
458     '5_4',
459     '5_5',
460     '5_6',
461     '6_3',
462     '6_4',
463     '6_5',
464     '6_6',
465     '7_3',
466     '7_4',
467     '7_5',
468     '7_6'),]
469
470
471
472
473
474 ggplot(df3,aes(Te,Tc)) +
475   geom_point() + geom_point(data=df4kpre, aes(Te,Tc),colour='red', size=3, shape=17)+
476   labs(title = "Diseño 4 niveles cuadrado central",x="Temp. Evaporador (°C)",
477         y="Temp. Condensador (°C)")
478
479
480 #regresión para le trabajo del compresor
481 corrwcred(df4kpre,df3)
482
483 #regresión para mref
484 corrmrefred(df4kpre,df3)
485
486 -----
487
488
489
490
491
492 #Cálculo para un diseño 4k trasladado a toda la superficie
493
494 -----POLINIMIO AHRI (16 PUNTOS)-----
495
496
497 #xl.read.file(filename = '../data/4k.xlsx')
498 #df4k <- xl.read.file(filename = '../data/4k.xlsx')
499
```

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

```
500 df4k<-df3[df3$Te_Tc %in% c(
501   '1_1',
502   '1_2',
503   '1_4',
504   '1_6',
505   '4_1',
506   '4_3',
507   '4_6',
508   '4_8',
509   '7_2',
510   '7_4',
511   '7_6',
512   '7_8',
513   '9_4',
514   '9_5',
515   '9_6',
516   '9_8'),]
517
518
519 ggplot(df3,aes(Te,Tc)) +
520   geom_point() + geom_point(data=df4k, aes(Te,Tc),colour='red', size=3, shape=17)+
521   labs(title = "Diseño 4 niveles",x="Temp. Evaporador (°C)", y="Temp. Condensador (°C)")
522
523
524 #regresión para el trabajo del compresor
525
526 corrw(df4k,df3)
527
528
529 #regresión para mref
530 corrmref(df4k,df3)
531
```

```
532 ~ #-----POLINOMIO REDUCIDO (16 PUNTOS)-----
533
534
535 #xl.read.file(filename = '../data/4k.xlsx')
536 #df4k <- xl.read.file(filename = '../data/4k.xlsx')
537
538
539 df4k<-df3[df3$Te_Tc %in% c(
540   '1_1',
541   '1_2',
542   '1_4',
543   '1_6',
544   '4_1',
545   '4_3',
546   '4_6',
547   '4_8',
548   '7_2',
549   '7_4',
550   '7_6',
551   '7_8',
552   '9_4',
553   '9_5',
554   '9_6',
555   '9_8'),]
556
557 ggplot(df3,aes(Te,Tc)) +
558   geom_point() + geom_point(data=df4k, aes(Te,Tc),colour='red', size=3, shape=17)+
559   labs(title = "Diseño 4 niveles",x="Temp. Evaporador (°C)", y="Temp. Condensador (°C)")
560
561
562 #regresión para el trabajo del compresor
563 corrwred(df4k,df3)
```

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

```
564
565
566 #regresión para mref
567 corrmrefred(df4k,df3)
568
569
570 #-----
571
572
573
574 #cálculo para small composite design (SCD)
575
576 #-----POLINOMIO REDUCIDO (7 PUNTOS)-----
577
578
579 #xl.read.file(filename = '../data/SCD.xlsx')
580 #dfSCD <- xl.read.file(filename = '../data/SCD.xlsx')
581
582
583 dfSCD<-df3[df3$Te_Tc %in% c(
584   '2_5',
585   '3_3',
586   '5_2',
587   '5_5',
588   '5_8',
589   '7_7',
590   '8_5'),]
591
592
593
594
595 ggplot(df3,aes(Te,Tc)) +
596   geom_point() + geom_point(data=dfSCD, aes(Te,Tc),colour='red', size=3, shape=17)+
597   labs(title = "SCD",x="Temp. Evaporador (°C)", y="Temp. Condensador (°C)")
598
599
600 #regresión para el trabajo del compresor
601 corrwcred(dfSCD,df3)
602
603 #regresión para mref
604 corrmrefred(dfSCD,df3)
605
606 #-----
607
608
609
610
611 #cálculo para hexagonal design (HD)
612
613 #-----POLINOMIO REDUCIDO (7 PUNTOS)-----
614
615
616 #xl.read.file(filename = '../data/HD.xlsx')
617 #dfHD <- xl.read.file(filename = '../data/HD.xlsx')
618
619
620 dfHD<-df3[df3$Te_Tc %in% c(
621   '2_5',
622   '4_2',
623   '4_8',
624   '5_5',
625   '7_2',
626   '7_8',
627   '9_5'),]
628
629
630
```

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

```
631
632
633
634
635 ggplot(df3,aes(Te,Tc)) +
636   geom_point() + geom_point(data=dfHD, aes(Te,Tc),colour='red', size=3, shape=17)+
637   labs(title = "HD",x="Temp. Evaporador (°C)", y="Temp. Condensador (°C)")
638
639
640 #regresión para el trabajo del compresor
641 corrwcred(dfHD,df3)
642
643 #regresión para mref
644 corrmrefred(dfHD,df3)
645
646
647
648
649 ~-----
650
651
652
653
654 #Cálculo para puntos envolvente
655
656 ~-----POLINOMIO AHRI-----
657
658
659 dfENV<-df3[df3$Te_Tc %in% c(
660   '1_1',
661   '1_6',
662   '4_1',
663   '4_8',
664   '7_2',
665   '10_8',
666   '5_5',
667   '6_6',
668   '4_6',
669   '6_4',
670   '4_4'),]
671
672
673
674
675 ggplot(df3,aes(Te,Tc)) +
676   geom_point() + geom_point(data=dfENV, aes(Te,Tc),colour='red', size=3, shape=17)+
677   labs(title = "Envolvente polinomio AHRI",x="Temp. Evaporador (°C)",
678         y="Temp. Condensador (°C)")
679
680
681
682 corrw(dfENV,df3)
683
684 corrmref(dfENV,df3)
685
686
687 ~-----POLINOMIO REDUCIDO-----
688
```

## Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

```
688
689
690 dfENVred<-df3[df3$Te_Tc %in% c(
691   '1_1',
692   '1_6',
693   '4_1',
694   '4_8',
695   '7_2',
696   '10_8',
697   '5_5'),]
698
699
700
701
702 ggplot(df3,aes(Te,Tc)) +
703   geom_point() + geom_point(data=dfENVred, aes(Te,Tc),colour='red', size=3, shape=17)+
704   labs(title = "Envolvente polinomio reducido",x="Temp. Evaporador (°C)",
705         y="Temp. Condensador (°C)")
706
707
708
709 corrwred(dfENVred,df3)
710
711 corrmrefred(dfENVred,df3)
712
713
714
715
716 #-----
717
718
```

## 2. Funciones creadas

```
1
2 #-----REGRESIÓN TRABAJO COMPRESOR----POLINOMIO AHRI-----
3
4
5
6 corrw= function(df_DoE, df_tot){
7
8   library(Metrics)
9   library(ggplot2)
10
11   wcccd<-lm(data=df_DoE, wc~Te+Tc+I(Te^2)+Te:Tc+I(Tc^2)+I(Te^3)+Tc:I(Te^2)+Te:I(Tc^2)+I(Tc^3))
12
13   df_tot$wc_corr<-predict(wcccd, newdata = df_tot)
14
15   error2<-max(100*(abs(df_tot$wc-df_tot$wc_corr)/df_tot$wc))
16   rmse1 <- rmse(actual = df_tot$wc , predicted = df_tot$wc_corr)
17
18   grafico<-ggplot(data = df_tot, aes(x = wc, y = wc_corr))+
19     geom_point() +
20     geom_abline(intercept=0,slope=1,colour='red')+
21     annotate(geom = 'text',x=-Inf, y=Inf,hjust=0, vjust=1,
22            label=paste0("Error = ", round(error2,3),'%', " RMSE = ",
23                          round(rmse1,3), 'w'),colour='red')+
24     labs(title = "Regresión polinomio AHRI trabajo del compresor")
25
26   print(summary(wcccd))
27   print(grafico)
28
29
30
31
32 }
```



## Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

```
1
2 #-----REGRESIÓN MASA REFRIGERANTE----POLINOMIO AHRI-----
3
4
5
6 corrmref= function(df_DoE, df_tot){
7
8   library(Metrics)
9   library(ggplot2)
10
11   mrefCCD<-lm(data=df_DoE, mref~Te+Tc+I(Te^2)+Te:Tc+I(Tc^2)+I(Te^3)+Tc:I(Te^2)+Te:I(Tc^2)+I(Tc^3))
12
13   df_tot$mref_corr<-predict(mrefCCD, newdata = df_tot)
14
15   error2<-max(100*(abs(df_tot$mref-df_tot$mref_corr)/df_tot$mref_corr))
16   rmse1 <- rmse(actual = df_tot$mref , predicted = df_tot$mref_corr)
17
18   grafico<-ggplot(df_tot,aes(mref,mref_corr))+
19     geom_point() +
20     geom_abline(intercept=0,slope=1,colour='red')+
21     annotate(geom = 'text',x=-Inf, y=Inf,hjust=0, vjust=1,
22            label=paste0('Error =', round(error2,3),'%', ' RMSE = ',
23                        round(rmse1,3), 'kg/h'),colour='red')+
24     labs(title = "Regresión polinomio AHRI mref")
25
26
27
28   print(summary(mrefCCD))
29   print(grafico)
30
31
32
33
34 }
```

```
1
2 #-----REGRESIÓN MASA REFRIGERANTE----POLINOMIO REDUCIDO-----
3
4
5
6 corrmrefred= function(df_DoE, df_tot){
7
8   library(Metrics)
9   library(ggplot2)
10
11   mrefCCD<-lm(data=df_DoE, mref~Te+Tc+I(Te^2)+Te:Tc+I(Tc^2))
12
13   df_tot$mref_corr<-predict(mrefCCD, newdata = df_tot)
14
15   error2<-max(100*(abs(df_tot$mref-df_tot$mref_corr)/df_tot$mref_corr))
16   rmse1 <- rmse(actual = df_tot$mref , predicted = df_tot$mref_corr)
17
18   grafico<-ggplot(df_tot,aes(mref,mref_corr))+
19     geom_point() +
20     geom_abline(intercept=0,slope=1,colour='red')+
21     annotate(geom = 'text',x=-Inf, y=Inf,hjust=0, vjust=1,
22            label=paste0('Error =', round(error2,3),'%', ' RMSE = ',
23                        round(rmse1,3), 'kg/h'),colour='red')+
24     labs(title = "Regresión polinomio reducido mref")
25
26
27
28   print(summary(mrefCCD))
29   print(grafico)
30
31
32
33
34 }
```

## Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

```
1
2 #-----REGRESIÓN TRABAJO COMPRESOR-----POLINOMIO REDUCIDO-----
3
4 corrwcred= function(df_DoE, df_tot){
5
6   library(Metrics)
7   library(ggplot2)
8
9   wcccd<-lm(data=df_DoE, wc~Te+Tc+I(Te^2)+Te:Tc+I(Tc^2))
10
11   df_tot$wc_corr<-predict(wcccd, newdata = df_tot)
12
13   error2<-max(100*(abs(df_tot$wc-df_tot$wc_corr)/df_tot$wc))
14   rmse1 <- rmse(actual = df_tot$wc , predicted = df_tot$wc_corr)
15
16   grafico<-ggplot(df_tot,aes(wc,wc_corr))+
17     geom_point() +
18     geom_abline(intercept=0,slope=1,colour='red')+
19     annotate(geom = 'text',x=-Inf, y=Inf,hjust=0, vjust=1,
20            label=paste0('Error =', round(error2,3),'%', ' RMSE = ',
21                       found(rmse1,3), 'w'),colour='red')+
22     labs(title = "Regresión polinomio reducido trabajo del compresor")
23
24   print(summary(wcccd))
25   print(grafico)
26
27
28
29
30 }
```

Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores scroll dentro del campo de la refrigeración comercial

ANEXO II: TABLAS RESUMEN PARA TODOS LOS REFRIGERANTES

## R404a

| Diseño              | Modelo 1 (10 ctes) |          |        |             |           | Modelo 2 (6 ctes)  |          |        |             |           |
|---------------------|--------------------|----------|--------|-------------|-----------|--------------------|----------|--------|-------------|-----------|
|                     | Error max relativo |          | RMSE   |             | Nº puntos | Error max relativo |          | RMSE   |             | Nº puntos |
|                     | Wc (%)             | mref (%) | Wc (W) | mref (kg/h) |           | Wc (%)             | mref (%) | Wc (W) | mref (kg/h) |           |
| 3k cuadrado central | 1.072              | 0.917    | 8.708  | 0.386       | 11        | 2.28               | 0.757    | 14.546 | 0.508       | 9         |
| 3k trasladado       | 7.48               | 3.2      | 62.165 | 2.359       | 11        | 0.759              | 0.877    | 9.537  | 0.846       | 9         |
| CCD                 | 0.379              | 0.806    | 3.995  | 0.273       | 11        | 2.3                | 0.768    | 11.324 | 0.398       | 9         |
| 4k cuadrado central | 1.973              | 2.806    | 13.068 | 1.353       | 16        | 1.676              | 1.7746   | 18.572 | 0.585       | 16        |
| 4k trasladado       | 0.248              | 0.34     | 2.994  | 0.293       | 16        | 0.692              | 0.598    | 8.685  | 0.404       | 16        |
| Envolvente          | 0.567              | 1.008    | 5.963  | 0.575       | 11        | 1.133              | 1.032    | 12.606 | 0.796       | 7         |
| SCD                 | -                  | -        | -      | -           | -         | 1.963              | 0.852    | 10.565 | 0.431       | 7         |
| HD                  | -                  | -        | -      | -           | -         | 1.565              | 1.104    | 9.759  | 0.601       | 7         |
| Federov "D"         | 1.32               | 2.678    | 15.537 | 2.334       | 11        | 1.376              | 1.056    | 15.007 | 1.139       | 7         |
| Federov "A"         | 1.104              | 1.381    | 6.654  | 0.876       | 11        | 1.605              | 0.905    | 10.96  | 0.608       | 7         |
| Federov "I"         | 0.694              | 2.163    | 9.133  | 1.877       | 11        | 1.689              | 0.749    | 16.204 | 0.539       | 7         |

Tabla 3.1. Resultados para R404a

## ARM31a

| Diseño              | Modelo 1 (10 ctes) |          |         |             |           | Modelo 2 (6 ctes)  |          |        |             |           |
|---------------------|--------------------|----------|---------|-------------|-----------|--------------------|----------|--------|-------------|-----------|
|                     | Error max relativo |          | RMSE    |             | Nº puntos | Error max relativo |          | RMSE   |             | Nº puntos |
|                     | Wc (%)             | mref (%) | Wc (W)  | mref (kg/h) |           | Wc (%)             | mref (%) | Wc (W) | mref (kg/h) |           |
| 3k cuadrado central | 1.007              | 10.69    | 5.75    | 0.293       | 11        | 2.165              | 0.938    | 12.548 | 0.424       | 9         |
| 3k trasladado       | 22.387             | 7.719    | 103.847 | 3.391       | 11        | 0.907              | 0.592    | 9.431  | 0.322       | 9         |
| CCD                 | 1.583              | 2.393    | 10.49   | 0.488       | 11        | 1.35               | 1.381    | 9.993  | 0.306       | 9         |
| 4k cuadrado central | 2.039              | 4.513    | 15      | 1.88        | 16        | 2.018              | 2.119    | 18.71  | 0.715       | 16        |
| 4k trasladado       | 0.567              | 0.665    | 2.956   | 0.239       | 16        | 0.771              | 0.775    | 8.839  | 0.323       | 16        |
| Envolvente          | 2.225              | 0.698    | 17.901  | 0.351       | 11        | 0.927              | 0.903    | 11.728 | 0.341       | 7         |
| SCD                 | -                  | -        | -       | -           | -         | 1.337              | 1.331    | 10.11  | 0.305       | 7         |
| HD                  | -                  | -        | -       | -           | -         | 0.778              | 1.204    | 9.583  | 0.321       | 7         |
| Federov "D"         | 1.249              | 1.222    | 14.12   | 0.582       | 11        | 1.656              | 1.921    | 14.993 | 0.917       | 7         |
| Federov "A"         | 0.941              | 1.388    | 5.27    | 0.352       | 11        | 1.417              | 1.402    | 9.418  | 0.4230      | 7         |
| Federov "I"         | 1.397              | 1.966    | 7.537   | 1.124       | 11        | 1.56               | 1.007    | 13.888 | 0.396       | 7         |

Tabla 3.2. Resultados para ARM31a

## D2Y65

| Diseño              | Modelo 1 (10 ctes) |          |        |             |           | Modelo 2 (6 ctes)  |          |        |             |           |
|---------------------|--------------------|----------|--------|-------------|-----------|--------------------|----------|--------|-------------|-----------|
|                     | Error max relativo |          | RMSE   |             | Nº puntos | Error max relativo |          | RMSE   |             | Nº puntos |
|                     | Wc (%)             | mref (%) | Wc (W) | mref (kg/h) |           | Wc (%)             | mref (%) | Wc (W) | mref (kg/h) |           |
| 3k cuadrado central | 1.567              | 1.271    | 8.378  | 0.394       | 11        | 3.272              | 1.245    | 17.992 | 0.493       | 9         |
| 3k trasladado       | 17.306             | 49.736   | 87.862 | 17.026      | 11        | 1.229              | 1.339    | 12.644 | 0.506       | 9         |
| CCD                 | 0.986              | 2.377    | 7.954  | 0.585       | 11        | 1.866              | 1.55     | 12.525 | 0.493       | 9         |
| 4k cuadrado central | 5.286              | 1.306    | 32.34  | 0.683       | 16        | 2.868              | 2.656    | 25.83  | 0.629       | 16        |
| 4k trasladado       | 0.66               | 1.073    | 3.914  | 0.364       | 16        | 1.005              | 1.201    | 11.697 | 0.443       | 16        |
| Envolvente          | 3.467              | 1.237    | 30.578 | 0.541       | 11        | 1.279              | 1.387    | 16.228 | 0.503       | 7         |
| SCD                 | -                  | -        | -      | -           | -         | 1.941              | 1.752    | 12.779 | 0.484       | 7         |
| HD                  | -                  | -        | -      | -           | -         | 1.032              | 1.676    | 12.627 | 0.506       | 7         |
| Federov "D"         | 1.37               | 1.684    | 17.508 | 0.835       | 11        | 1.955              | 2.292    | 18.669 | 1.364       | 7         |
| Federov "A"         | 2.188              | 1.696    | 7.418  | 0.641       | 11        | 1.437              | 1.691    | 16.965 | 0.59        | 7         |
| Federov "I"         | 1.108              | 2.032    | 11.57  | 0.972       | 11        | 1.996              | 1.588    | 18.999 | 0.555       | 7         |

Tabla 3.3. Resultados para D2Y65

## L40

| Diseño              | Modelo 1 (10 ctes) |          |        |             | Nº puntos | Modelo 2 (6 ctes)  |          |        |             | Nº puntos |
|---------------------|--------------------|----------|--------|-------------|-----------|--------------------|----------|--------|-------------|-----------|
|                     | Error max relativo |          | RMSE   |             |           | Error max relativo |          | RMSE   |             |           |
|                     | Wc (%)             | mref (%) | Wc (W) | mref (kg/h) |           | Wc (%)             | mref (%) | Wc (W) | mref (kg/h) |           |
| 3k cuadrado central | 2.63               | 2.607    | 16.263 | 0.523       | 11        | 3.069              | 3.009    | 18.464 | 0.782       | 9         |
| 3k trasladado       | 353                | 5000     | 1653   | 68          | 11        | 2.269              | 1.141    | 13.583 | 0.34        | 9         |
| CCD                 | 0.918              | 1.162    | 5.223  | 0.289       | 11        | 2.451              | 1.754    | 13.361 | 0.399       | 9         |
| 4k cuadrado central | 1.832              | 5.869    | 15.553 | 1.426       | 16        | 3.085              | 3.027    | 18.744 | 0.761       | 16        |
| 4k trasladado       | 0.474              | 0.862    | 4.03   | 0.232       | 16        | 0.763              | 0.669    | 9.004  | 0.341       | 16        |
| Envolvente          | 1.919              | 1.102    | 14.323 | 0.291       | 11        | 1.304              | 1.017    | 13.645 | 0.394       | 7         |
| SCD                 | -                  | -        | -      | -           | -         | 2.758              | 2.24     | 13.844 | 0.526       | 7         |
| HD                  | -                  | -        | -      | -           | -         | 1.26               | 1.345    | 10.536 | 0.367       | 7         |
| Federov "D"         | 1.843              | 4.345    | 18.337 | 1.457       | 11        | 1.343              | 2.585    | 16.562 | 1.339       | 7         |
| Federov "A"         | 0.666              | 1.68     | 5.587  | 0.414       | 11        | 1.611              | 1.469    | 20.487 | 0.714       | 7         |
| Federov "I"         | 1.036              | 0.674    | 10.309 | 0.322       | 11        | 1.299              | 1.123    | 13.56  | 0.356       | 7         |

Tabla 3.4. Resultados para L40