



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# Caracterización de compresores de pistón en refrigeración. Confección de las matrices de caracterización experimental de estos mediante diseños experimentales óptimos.

**TRABAJO FINAL DEL**

Grado de Ingeniería Mecánica

**Autor**

Tundidor Hernández, David

**Tutor**

Navarro Peris, Emilio

**Segundo tutor**

Marchante Avellaneda, Javier

CURSO ACADÉMICO: 2020/2021



### Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias a mis tutores, Emilio y Javier por la ayuda y apoyo que me han brindado durante todo el desarrollo del proyecto y el interés que han mostrado para que yo aprendiera lo máximo posible y pudiese valorar el trabajo que tanto aprecian hacer.

## Resumen

Actualmente el uso de bombas de calor y enfriadoras está ampliamente extendido en el sector industrial y en el doméstico. La climatización de edificios o la conservación de alimentos son tan sólo algunas de las innumerables aplicaciones de estas unidades. Estos equipos basan su funcionamiento en el ciclo simple de compresión de vapor identificando como componentes principales los intercambiadores de calor (condensador y evaporador), la válvula de expansión y el compresor. En relación con este último elemento, el compresor, debemos tomar especial cuidado a la hora de seleccionarlo durante el diseño de estas unidades.

El objetivo será proveer a la unidad de la capacidad de refrigeración o calefacción objetivo definida en el diseño junto con un bajo consumo eléctrico del compresor. Es por ello por lo que una caracterización adecuada del compresor es de vital importancia a la hora de diseñar estos equipos.

En relación con la caracterización de compresores, el estándar AHRI 540 (AHRI-540, 2020) define los modelos empíricos que deben ajustar los fabricantes con el objetivo de especificar sus valores de consumo eléctrico y capacidad en catálogo. Lamentablemente el estándar no da indicaciones de donde situar los puntos experimentales en el mapa de trabajo necesarios para el ajuste de los modelos, quedando ampliamente demostrado que una mala definición de estos puntos puede tener como resultado un elevado error en la predicción de los modelos. En este proyecto el estudiante, partiendo de una amplia caracterización experimental de diversos compresores de pistón, realizará la confección de las matrices experimentales haciendo uso de metodologías avanzadas de estadística, los denominados diseños experimentales óptimos. Estas matrices incluirán el mínimo número de puntos necesarios para obtener un elevado grado de precisión de los modelos ajustados. Con ello se pretende cubrir las deficiencias de la actual normativa y definir una metodología clara y de fácil aplicación a la hora de definir las matrices experimentales para la caracterización de compresores.

## **Documentos:**

- 1. Memoria**
- 2. Presupuesto**
- 3. Pliego de condiciones**
- 4. Anexos**

**1º Documento:**  
**MEMORIA**

## Índice general de la memoria

1. Introducción .....	11
1.1 Objeto.....	11
1.2 Justificación y motivación .....	11
1.3 Antecedentes .....	12
2. Datos de partida .....	13
2.1 Funcionamiento del ciclo de refrigeración.....	13
2.2 Compresores utilizados .....	14
3. Polinomio AHRI.....	18
4. Modelos alternativos .....	21
4.1 Polinomio AHRI en dominio en presiones.....	21
4.2 Polinomio AHRI reducido .....	21
5. Diseños experimentales .....	23
6. Herramientas empleadas para el cálculo .....	32
6.1 Obtención de los datos .....	32
6.2 Software empleado .....	33
6.3 Procedimiento empleado.....	33
7. Análisis.....	36
7.1 Obtención del modelo lineal .....	36
7.1.1 Marcadores para el análisis.....	37
7.1.1.1 p-valor .....	37
7.1.1.2 Comparativa entre los valores experimentales y los correlacionados .....	37
7.1.1.3 Error máximo relativo .....	38
7.1.1.4 RMSE .....	39
7.1.2 Análisis de los distintos modelos .....	40
7.2 Selección de puntos mediante diseños experimentales óptimos.....	46
7.2.1 Análisis de residuos.....	46
7.2.2 Otros marcadores.....	46
7.2.3 Determinación de la cantidad de puntos .....	46
7.2.4 Situación de los puntos .....	49
7.2.5 Comparativa entre el modelo de 9 puntos y el modelo TPS.....	52
7.2.6 Modelos obtenidos .....	53
7.3 Modelo para distintos sobrecalentamientos .....	56
8. Conclusiones.....	58
9. Bibliografía .....	59

## Índice de figuras

Ilustración 1. Diagrama P-h.....	13
Ilustración 2. Esquema de un modelo.....	18
Ilustración 3. Trabajo del compresor AHRI 28. ....	19
Ilustración 4. Gasto másico del compresor AHRI 28. ....	19
Ilustración 5. Rango de trabajo de un compresor.....	20
Ilustración 6. Diseño de 3 niveles.....	24
Ilustración 7. Diseño CCD. ....	24
Ilustración 8. Diseño HD.....	25
Ilustración 9. Diseño 3k con puntos extra.....	25
Ilustración 10. Comparativa criterio D con distintos puntos. ....	26
Ilustración 11. Diseño óptimo con criterio D. ....	29
Ilustración 12. Diseño óptimo con criterio A. ....	29
Ilustración 13. Diseño óptimo con criterio G. ....	30
Ilustración 14. Diseño óptimo con criterio I.....	30
Ilustración 15. Esquema diseño calorimétrico. ....	32
Ilustración 16. Puntos proporcionados por informe AHRI 51. ....	33
Ilustración 17. Puntos después de aplicar el TPS. ....	34
Ilustración 18. Gráfica comparativa entre valores experimentales y correlacionados.....	38
Ilustración 19. Wcomp. Temperaturas AHRI 28.....	40
Ilustración 20. Wcomp. Presiones AHRI 28.....	40
Ilustración 21. Wcomp. Temperaturas AHRI 28 red. ....	40
Ilustración 22. Wcomp. Presiones AHRI 28 red.....	40
Ilustración 23. Gasto másico Temperaturas AHRI.....	42
Ilustración 24. Gasto másico Presiones AHRI.....	42
Ilustración 25. Gasto másico Temperaturas AHRI red. ....	42
Ilustración 26. Gasto másico Presiones AHRI red. ....	42
Ilustración 27. Trabajo AHRI 28 SH 11 7 puntos ....	47
Ilustración 28. Trabajo AHRI 28 SH11 9 puntos. ....	47
Ilustración 29. G.másico AHRI 28 SH 11 7 puntos.....	47
Ilustración 30. G.másico AHRI 28 SH 11 9 puntos.....	47
Ilustración 31. AHRI 28 SH11.....	49
Ilustración 32. AHRI 28 SH22.....	49
Ilustración 33. AHRI 28 Ts constante.....	49
Ilustración 34. AHRI 30 SH11.....	49
Ilustración 35. AHRI 30 SH22.....	49
Ilustración 36. AHRI 30 Ts constante.....	49
Ilustración 37. AHRI 51 Ts constante.....	50
Ilustración 38. AHRI 64a SH10.....	50
Ilustración 39. AHRI 64a Ts constante.....	50
Ilustración 40. AHRI 64b SH10.....	51
Ilustración 41. AHRI 64b Ts constante. ....	51
Ilustración 42. AHRI 28 Consumo SH11 para SH22. ....	56
Ilustración 43. AHRI 28 Consumo SH11 para Ts constante. ....	56
Ilustración 44. AHRI 28 G.másico SH11 para SH22. ....	57
Ilustración 45. AHRI 28 G.másico SH11 para Ts constante. ....	57



## Índice de tablas

Tabla 1. Valores informe AHRI 28. ....	15
Tabla 2. Valores informe AHRI 30. ....	15
Tabla 3. Valores informe AHRI 51. ....	16
Tabla 4. Valores informe AHRI 64a. ....	16
Tabla 5. Valores informe AHRI 64b. ....	17
Tabla 6. Ejemplo p-valor.....	37
Tabla 7. p-valor de los coeficientes en función del dominio y modelo.....	41
Tabla 8. p-valor de los coeficientes en función del dominio y modelo.....	42
Tabla 9. Resumen consumo AHRI 28. ....	43
Tabla 10. Resumen gasto másico AHRI 28. ....	43
Tabla 11. Resumen consumo AHRI 30. ....	43
Tabla 12. Resumen gasto másico AHRI 30. ....	44
Tabla 13. Resumen consumo AHRI 51. ....	44
Tabla 14. Resumen gasto másico AHRI 51. ....	44
Tabla 15. Resumen consumo AHRI 64a.....	44
Tabla 16. Resumen gasto másico AHRI 64a. ....	44
Tabla 17. Resumen consumo AHRI 64b. ....	44
Tabla 18. Resumen gasto másico AHRI 64b. ....	45
Tabla 19. Comparativa del modelo de 9 puntos con el de referencia. ....	52

## Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Polinomio AHRI. ....	18
Ecuación 2. Polinomio AHRI en dominio de presiones. ....	21
Ecuación 3. Polinomio AHRI reducido. ....	21
Ecuación 4. Polinomio AHRI reducido en dominio de presiones. ....	21
Ecuación 5. Función f. ....	26
Ecuación 6. Aproximación de Taylor. ....	27
Ecuación 7. Ecuación cuadrática general. ....	27
Ecuación 8. Sistema de ecuaciones. ....	27
Ecuación 9. Sistema de ecuaciones en forma matricial. ....	27
Ecuación 10. Cálculo de la matriz de información. ....	28
Ecuación 11. Sistema de ecuaciones con la matriz de coeficientes aislada. ....	28
Ecuación 12. Covarianza de la matriz de coeficientes. ....	28
Ecuación 13. Función ejemplo. ....	36
Ecuación 14. Polinomio AHRI. ....	36
Ecuación 15. Polinomio de Shao en dominio de presiones. ....	58

# 1. Introducción

## 1.1 Objeto

El objeto del proyecto es fijar una metodología clara y de fácil aplicación para definir las matrices experimentales para la caracterización de compresores de pistón. Actualmente, con la normativa actual, no tenemos unas pautas completas para realizar esta tarea, por lo tanto, buscaremos definir una metodología en base a lo descrito por la norma. Adicionalmente se realizará una comparativa de diversos modelos para la caracterización del consumo eléctrico y el gasto másico partiendo como base de los definidos por la norma e incluyendo diversos modelos alternativos disponibles en la literatura técnica. De este análisis obtendremos un modelo a aplicar que deberemos ajustar con las matrices experimentales definidas, siendo el error de predicción del modelo lo más bajo posible. El conjunto de puntos experimentales obtenidos del diseño experimental deberá también ser el mínimo posible. Esto permitirá a los fabricantes minimizar los costes de experimentación durante la caracterización de estos equipos.

## 1.2 Justificación y motivación

Durante las décadas pasadas, la forma más habitual de obtener calor ha sido mediante el uso de calderas. En los últimos 20 años se ha ido sustituyendo paulatinamente por bombas de calor, que no sólo permiten obtener calor, sino también enfriar. El objetivo de este cambio es mejorar la eficiencia de las instalaciones que hacen uso de calderas (en Europa) que, según la Comisión Europea, su eficiencia media es de alrededor del 60% como máximo (también debido a la vejez de las instalaciones), mientras que la de las bombas de calor es capaz de producir alrededor de 3 unidades de calor por unidad de energía eléctrica. Teniendo en cuenta que la mitad de la energía que se consume en Europa está destinada a la producción de calor y frío, obtendríamos grandes beneficios de la modernización de los equipos. (European Commission, 2016)

Las bombas de calor requieren de un circuito cerrado donde un fluido, al que llamamos refrigerante, circula cíclicamente. Hoy en día, los refrigerantes comúnmente empleados son los hidrofluorocarbonos o HFCs y, en menor medida, refrigerantes naturales y HFOs. Estos refrigerantes, a pesar de todo lo comentado, siguen contribuyendo, aunque en menor medida, con el calentamiento atmosférico y, por tanto, hacer un dimensionamiento lo más óptimo posible, no sólo nos da un incentivo económico, sino ambiental. Cabe recalcar la voluntad de las políticas europeas sobre el uso de refrigerantes las cuales tienen como objetivo la mejora de la eficiencia de las instalaciones así que, cuanto más avancemos en este campo, más versatilidad tendremos en un futuro de cara a las nuevas regulaciones o las modificaciones de estas.

Uno de los elementos que compone el circuito de refrigeración es el compresor, en los cuales nos vamos a centrar en este estudio. Cuando se fabrica un compresor, los fabricantes deben especificar en catálogo valores de su desempeño (consumo eléctrico y gasto másico o capacidad). Tener un buen conocimiento sobre los valores reales de funcionamiento del compresor permite realizar diseños de sistemas de refrigeración y de calefacción de manera óptima.

Por otro lado, obtener valores experimentales de un compresor es un proceso costoso, tanto en el tiempo que hay que emplear como su coste económico, por lo tanto, tener un proceso claro y sencillo para determinar bajo que valores hay que examinar los resultados del compresor nos daría, por un lado, un modelo experimental que sea representativo de cualquier punto de

funcionamiento del compresor y, por otro, un modelo experimental más económico que habiendo tomado los puntos de análisis de manera aleatoria.

Para realizar este tipo de experimentos está actualmente vigente la norma AHRI (“Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute”) 540 en la que podemos encontrar modelos polinomiales capaces de caracterizar el consumo y el gasto másico de refrigerante del compresor. Son estos modelos lo que, mediante datos experimentales, ajustan los fabricantes de compresores para obtener los valores de desempeño del compresor que especifican en catálogo. Estos polinomios tienen un total de 10 coeficientes y son función de las variables independientes que fijan el funcionamiento del compresor, la temperatura de evaporación ( $T_{\text{evap}}$ ) y la temperatura de condensación ( $T_{\text{comp}}$ ). Sin embargo, en la norma no especifica que cantidad de puntos es necesaria, ni donde ubicarlos, en coordenadas de  $T_{\text{evap}}$  y  $T_{\text{cond}}$ , para realizar el ajuste del modelo. Por lo tanto, podemos concluir que, una buena selección de puntos permitirá a los fabricantes obtener una caracterización precisa del compresor y, además, disminuir los costes de experimentación.

### 1.3 Antecedentes

En trabajos anteriores del Instituto de Ingeniería Energética de la Universidad Politécnica de Valencia ya había trabajado en la caracterización de compresor empleando los diseños experimentales clásicos como el CCD (“Central Composite Design”) o los diseños hexagonales, los cuales tienen un uso muy extendido en campos como la industria agrícola, química y farmacológica, aunque con el paso de los años se ha popularizado en otros campos de la industria como el que nos compete, la refrigeración.

El problema de estos diseños clásicos es que no poseen la capacidad de adaptación para realizar análisis de dominios experimentales irregulares. Como el dominio experimental de un compresor es irregular podemos encontrar deficiencias. Es aquí donde entran los diseños óptimos asistidos por ordenador, donde, gracias a las nuevas herramientas computacionales, somos capaces de aplicar diseños experimentales a dominios experimentales irregulares y realizar su análisis teniendo en cuenta esta singularidad.

## 2. Datos de partida

Para caracterizar al compresor, es necesario, previamente, de poseer de una serie de datos. Para entenderlo en profundidad haremos una pequeña revisión del funcionamiento del ciclo de refrigeración a modo informativo y comentaremos las características principales de los datos de los compresores caracterizados y bajo que condiciones se han obtenido los datos experimentales.

### 2.1 Funcionamiento del ciclo de refrigeración

Actualmente, en el campo de la producción de frío y calor, la manera más extendida de obtener frío o calor es mediante el ciclo simple de compresión de vapor. Este ciclo consta de los siguientes componentes: dos intercambiadores de calor (condensador y evaporador), un compresor, una válvula de expansión y un fluido refrigerante.

En este ciclo se hace circular refrigerante que, al pasar por el compresor, genera una diferencia de presión. La zona previa al compresor la llamamos zona de baja presión y, a la posterior, zona de alta presión.

En la zona de baja presión conseguimos que el refrigerante absorba el calor que buscamos trasladar al exterior y, en la zona de alta presión, es donde cedemos ese calor. Dependiendo de que fenómeno de transmisión de calor nos sea útil, hablaremos de equipos de refrigeración, si la ubicación del evaporador nos permite absorber calor y bajar la temperatura, o de bombas de calor, si lo que se pretende es calentar con el calor cedido del condensador, por ejemplo, una vivienda.

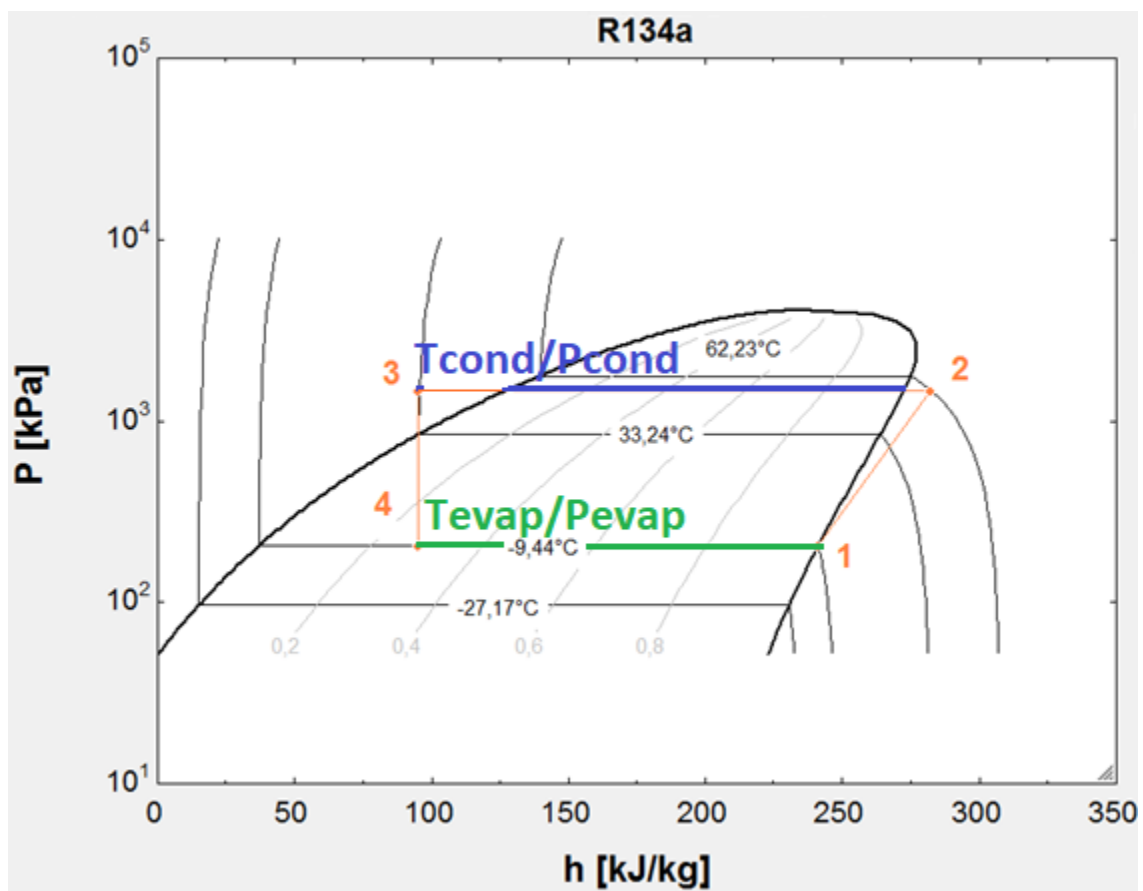


Ilustración 1. Diagrama P-h.

El diagrama P-h que observamos en la ilustración es el diagrama empleado para describir el funcionamiento de un ciclo simple de compresión de vapor donde, las líneas naranjas corresponden con la evolución de presión y de entalpía que desarrolla el refrigerante. Se puede observar una figura cuasi convexa que llamamos campana de Gauss, dentro de la campana es donde se lleva a cabo el cambio de fase del fluido refrigerante.

El cambio que ocurre entre el punto 1 y 2 es la compresión del refrigerante que comentamos anteriormente, el fluido debe de ser succionado (punto 1) por el compresor en fase de vapor para no dañarlo, por este motivo, se aplica un sobrecalentamiento asegurándose de que no entre nada de líquido o un porcentaje muy bajo.

Una vez el refrigerante es comprimido (punto 2) encontramos la zona de descarga del compresor y el fluido es desplazado hasta el condensador (zona de alta presión o zona de condensación). La zona del condensador ocupa desde la descarga del compresor hasta el punto 3, donde el refrigerante pasa de fase de vapor a fase líquida.

El punto 3 marca la entrada la válvula de expansión, reduciendo la presión del fluido hasta su salida en el punto 4. Seguidamente pasa por el evaporador (zona de baja presión o zona de evaporación) donde pasa de fase líquida a fase de vapor y vuelve a entrar en el compresor (punto 1).

Las variables con las que caracterizamos el ciclo simple de compresión de vapor son las siguientes:

**Temperatura de evaporación ( $T_{\text{evap}}$ ):** es la temperatura a la que se encuentra el refrigerante mientras circula por el evaporador.

**Temperatura de condensación ( $T_{\text{cond}}$ ):** es la temperatura a la que se encuentra el refrigerante mientras circula por el condensador.

**Presión de evaporación ( $P_{\text{evap}}$ ):** la presión de evaporación es la presión a la que se encuentra el refrigerante durante todo el recorrido en el evaporador.

**Presión de condensación ( $P_{\text{cond}}$ ):** la presión de evaporación es la presión a la que se encuentra el refrigerante durante todo el recorrido que hace en el condensador.

**Trabajo del compresor ( $W_{\text{comp}}$ ):** es el consumo eléctrico del compresor necesario para trasegar el refrigerante y mantener los dos niveles de presión característicos del ciclo.

**Gasto másico de refrigerante ( $m_{\text{ref}}$ ):** el gasto másico del refrigerante es la cantidad de masa de refrigerante que trasega el compresor.

**Sobrecalentamiento (SH):** es la diferencia de temperatura entre la succión del compresor y la temperatura de evaporación. Con el objetivo de evitar entrada de líquido al compresor, las bombas de calor o equipos de refrigeración suelen trabajar a un SH constante. Esto evita el fallo mecánico del compresor.

## 2.2 Compresores utilizados

La base de datos utilizada para realizar el presente estudio incluye valores de consumo eléctrico y gasto másico de refrigerante, a diferentes valores de  $T_{\text{evap}}$  y  $T_{\text{cond}}$ , para 5 compresores de pistón. Estos datos han sido recolectados de diversos informes publicados por el instituto AHRI dónde se realizó un extenso análisis del desempeño de compresores con nuevos refrigerantes. Los

datos utilizados incluyen los valores de desempeño de los 5 compresores para el refrigerante de referencia, ensayado a diversas condiciones de succión (nivel de SH o temperatura de evaporación fijados). Para referirnos al conjunto de datos de cada compresor, le asignaremos el mismo nombre que el informe consultado, ej. AHRI 28, AHRI 30, etc.

### AHRI 28

Este es el compresor NEK2134 de la marca Embraco. El refrigerante ensayado es R-404A. En el informe nos proveen de los datos básicos del compresor y de las condiciones bajo las que se han realizado los ensayos calorimétricos con los que han obtenido los resultados experimentales. El ensayo se ha realizado a dos niveles de sobrecalentamiento distintos y otro a temperatura de succión constante: sobrecalentamiento de 11K, sobrecalentamiento de 22K y temperatura de succión constante a 18.3°C. Para este compresor, los valores son los siguientes:

Model	NEK2134GK
BOM	958AG71
Application	LBP-HST
S/N	P12RLC52
Oil	POE 22
Motor	CSIR, monophase
Power supply	115V/60Hz
Ambient temperature	35°C
Subcooling	0°C
Fan cooling	270 m <sup>3</sup> /h
Temperature determination	Dewpoint

Tabla 1. Valores informe AHRI 28.

### AHRI 30

Este es el compresor NEK6214Z de la marca Embraco. El refrigerante ensayado es R-134a. En el informe nos proveen de los datos básicos del compresor y de las condiciones bajo las que se han realizado los ensayos calorimétricos con los que han obtenido los resultados experimentales. El ensayo se ha realizado a dos niveles de sobrecalentamiento distintos y otro a temperatura de succión constante: sobrecalentamiento de 11K, sobrecalentamiento de 22K y temperatura de succión constante a 18.3°C. Para este compresor, los valores son los siguientes:

Model	NEK6214Z
BOM	269HG92
Application	HBP-HST
S/N	P12VSP98
Oil	POE 22
Motor	CSIR, monophase
Power supply	115V/60Hz
Ambient temperature	35°C
Subcooling	0°C
Fan cooling	270 m <sup>3</sup> /h
Temperature determination	Dewpoint

Tabla 2. Valores informe AHRI 30.

### AHRI 51

Este es el compresor 4GE-23-40P de la marca Bitzer. El refrigerante empleado es el R-404a y se ha hecho con una sola temperatura de succión constante, 20°C. Los valores de este compresor y las condiciones bajo las que se ha realizado el ensayo son los siguientes:

Model	4GE-23-40P
BOM	269HG92
Application	HBP-HST
S/N	P12VSP98
Oil	POE 22
Motor	2984 CFH
Power supply	380-420v/50Hz
Ambient temperature	35°C
Subcooling	0°C
Fan cooling	270 m3/h
Temperature determination	Dewpoint

Tabla 3. Valores informe AHRI 51.

### AHRI 64a

Este es el compresor FH2511Z de la marca Tecumseh. El refrigerante ensayado es R-404A. En el informe nos proveen de los datos básicos del compresor y de las condiciones bajo las que se han realizado los ensayos calorimétricos con los que han obtenido los resultados experimentales. El ensayo se ha realizado a un nivel de sobrecalentamiento y otro a temperatura de succión constante: sobrecalentamiento de 10K y temperatura de succión constante a 20°C. Para este compresor, los valores son los siguientes:

Model	FH2511Z
Application	LBP
S/N	54 L2114 90 145249 C
Ambient temperature	95°F (35°C)
Subcooling	0 K
Fancooling	yes
Fan airflow	530 CFM (900m3/h)
Temperature determination	Dew point
Motor type	CSR High Start Torque
Power supply	230V 50Hz
Displacement	4.53 cubic inch

Tabla 4. Valores informe AHRI 64a.



**AHRI 64b**

Este es el compresor FH4540Z de la marca Tecumseh. El informe del que se ha obtenido sus datos es el mismo que el anterior y las condiciones son las mismas también, por tanto, se ha analizado con un sobrecalentamiento de 10K y una temperatura de succión constante de 20°C. Los datos específicos son para R-404A. Los valores de este compresor y las condiciones bajo las que se ha realizado el ensayo son los siguientes:

Model	FH4540Z
Application	HBP
S/N	54 L2114 90 145228 C
Ambient temperature	95°F (35°C)
Subcooling	0 K
Fancooling	yes
Fan airflow	2*530 CFM (1800 m3/h)
Temperature determination	Dew point
Motor type	CSR High Start Torque
Power supply	230V 50Hz
Displacement	4.53 cubic inch

*Tabla 5. Valores informe AHRI 64b.*

### 3. Polinomio AHRI

Todo modelo está compuesto por dos tipos de variables, las variables independientes o factores y las variables dependientes o respuestas. En un diseño de experimentos, la variable respuesta es la magnitud física que deseamos caracterizar, mientras que los factores fijan el valor de dicha variable respuesta.

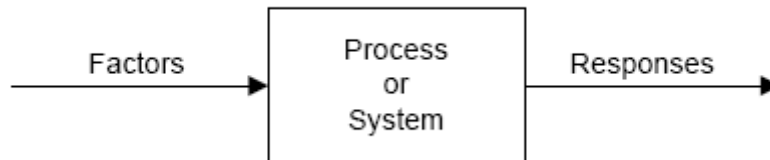


Ilustración 2. Esquema de un modelo.

Como hemos comentado anteriormente, nuestro punto de partida es el polinomio marcado por la norma AHRI. El polinomio es el siguiente:

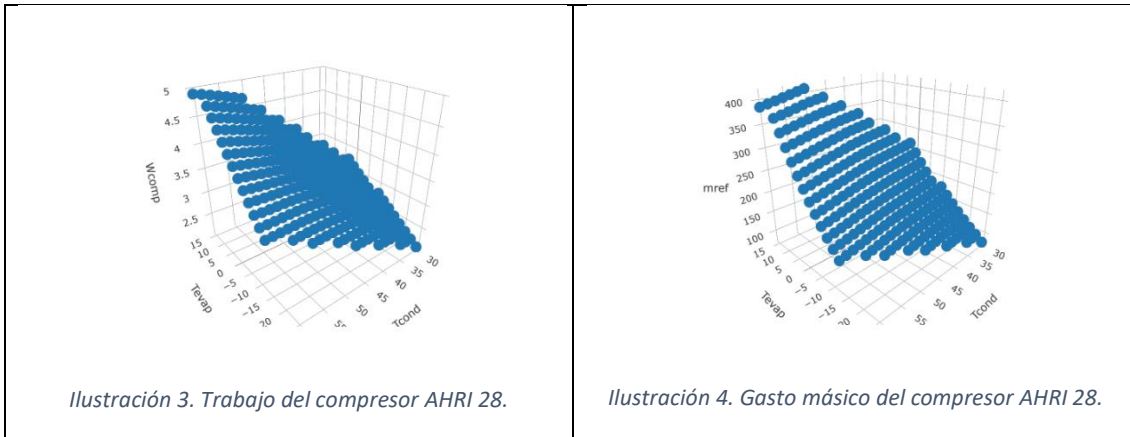
$$W_{comp} = k_0 + k_1 T_{evap} + k_2 T_{cond} + k_3 T_{evap} T_{cond} + k_4 T_{evap}^2 + k_5 T_{cond}^2 + k_6 T_{evap} T_{cond}^2 + k_7 T_{evap}^2 T_{cond} + k_8 T_{evap}^3 + k_9 T_{cond}^3$$
$$m_{ref} = k'_0 + k'_1 T_{evap} + k'_2 T_{cond} + k'_3 T_{evap} T_{cond} + k'_4 T_{evap}^2 + k'_5 T_{cond}^2 + k'_6 T_{evap} T_{cond}^2 + k'_7 T_{evap}^2 T_{cond} + k'_8 T_{evap}^3 + k'_9 T_{cond}^3$$

Ecuación 1. Polinomio AHRI.

Donde:

- $K_i$  son los coeficientes de regresión
- $T_{evap}$  y  $T_{cond}$  son la temperatura de evaporación y la temperatura de condensación respectivamente y son los factores de nuestro modelo.
- $W_{comp}$  y  $m_{ref}$  son las variables respuesta; la primera corresponde al consumo eléctrico del compresor y la segunda al gasto másico trasegado de refrigerante.

Como podemos observar, este polinomio de orden tres consta de 10 coeficientes de regresión bajo un dominio de temperaturas. Para obtener estos 10 coeficientes, es necesario utilizar herramientas de regresión y tener unos puntos de partida, pero la norma no establece estos puntos para ajustar estos coeficientes. Por ese motivo es necesario utilizar los diseños experimentales, porque son estos los que nos permiten fijar la ubicación de los puntos a ensayar necesarios para realizar el ajuste del modelo.

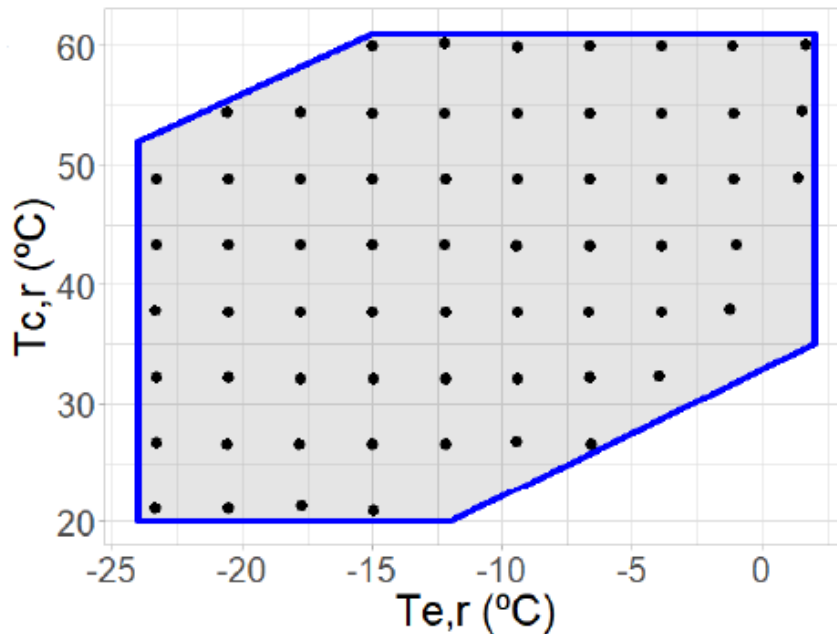


Este polinomio en concreto nos sirve para definir el consumo del compresor y el gasto másico de refrigerante para cada pareja de valores de temperatura y bajo unas condiciones de succión determinadas como se puede observar en la ilustración 3 y 4 respectivamente. Cada variable de temperatura tiene un rango mínimo y máximo que varía según el compresor utilizado o, inclusive, utilizando un refrigerante distinto en un mismo compresor.

Se puede observar en la ilustración 4 como existe una correlación entre el gasto másico del compresor y la temperatura de evaporación y de condensación. Especialmente la de evaporación como se puede apreciar, ya que la pendiente que describe esta superficie es mucho mayor entre la temperatura de evaporación y el gasto másico que entre la temperatura de condensación y el gasto másico.

En el caso del consumo (ilustración 3) la dependencia con la temperatura de evaporación se mantiene. Aunque se sabe que en los compresores scroll, la temperatura de condensación es más relevante que la de evaporación gracias a los trabajos de Javier Marchante Avellaneda, Emilio Navarro Peris y José M. Corberan, podemos afirmar que existe también una dependencia importante entre el consumo y la temperatura de condensación. (Corberan et al., 2021)

Referente al dominio experimental en compresores, los rangos de temperatura de evaporación y condensación definen el rango de funcionamiento de nuestro compresor y podemos representarlo mediante un gráfico bidimensional teniendo en cuenta las variables independientes con la forma del siguiente ejemplo:



*Ilustración 5. Rango de trabajo de un compresor.*

Como podemos observar, se asemeja a un rectángulo. En la parte superior izquierda hay una zona en la que no trabaja a causa de que, al tener valores altos de relación de presión, la temperatura de descarga del compresor es demasiado alta y puede dañarlo. En la parte inferior derecha hay una zona en la que tampoco trabaja ya que la relación de presión es tan pequeña que obtenemos valores excesivamente bajos para la eficiencia del compresor.

Este hecho, como veremos posteriormente, será el principal motivo por el que daremos uso a los diseños óptimos asistidos por ordenador, debido a que nos permitirá adaptar el diseño experimental a este dominio experimental irregular.

Además de lo comentado anteriormente, la norma también añade la posibilidad del uso de los modelos para predecir puntos en condiciones de succión distintas. Es importante remarcar que, una vez obtenemos los datos experimentales a unas condiciones de succión determinada y realizamos el ajuste del modelo, necesitaremos aplicar las correcciones indicadas en la norma para poder predecir valores de consumo eléctrico y gasto másico a otras condiciones de succión. En el caso del gasto másico la norma indica que es necesario realizar un ajuste para predecir puntos a condiciones de succión distintas. Sin embargo, para el consumo del compresor, esto no es necesario y podemos emplear directamente el modelo obtenido.

## 4. Modelos alternativos

Además del modelo anterior, también vamos a explorar otras opciones que, como hemos visto en los trabajos de Adrián Calomarde Herrero y Luis Ródenas Cantó, también son buenas alternativas a la marcada por la norma en compresores de scroll. (Ródenas Cantó et al., 2019)(Calomarde Herrero et al., 2019)

Uno de estos modelos es el mismo polinomio AHRI, pero cambiando las variables independientes. En vez de utilizar las temperaturas de condensación y las temperaturas de evaporación, pasaremos a utilizar las presiones de condensación y las presiones de evaporación. Sabemos, gracias a las investigaciones de Emilio Peris Navarro y Javier Marchante Avellaneda, que el dominio de presiones proporciona una distribución mucho más cercana a un modelo lineal que el dominio de temperaturas en los compresores de scroll, por lo que sería conveniente realizar este mismo análisis para los compresores de pistón. (Marchante-avellaneda et al., 2021)

El otro modelo, que hemos denominado como AHRI reducido, viene de las investigaciones de Shao y Li sobre el uso de un polinomio de grado dos para el análisis experimental de compresor de velocidad variable.

### 4.1 Polinomio AHRI en dominio en presiones

El polinomio AHRI en dominio de presiones queda de la siguiente manera:

$$W_{comp} = k_0 + k_1 P_{evap} + k_2 P_{cond} + k_3 P_{evap} P_{cond} + k_4 P_{evap}^2 + k_5 P_{cond}^2 + k_6 P_{evap} P_{cond}^2 + k_7 P_{evap}^2 P_{cond} + k_8 P_{evap}^3 + k_9 P_{cond}^3$$
$$m_{ref} = k'_0 + k'_1 P_{evap} + k'_2 P_{cond} + k'_3 P_{evap} P_{cond} + k'_4 P_{evap}^2 + k'_5 P_{cond}^2 + k'_6 P_{evap} P_{cond}^2 + k'_7 P_{evap}^2 P_{cond} + k'_8 P_{evap}^3 + k'_9 P_{cond}^3$$

*Ecuación 2. Polinomio AHRI en dominio de presiones.*

Como se puede observar, es un polinomio de grado tres con 10 coeficientes, 2 variables independientes, presión de condensación y presión de evaporación, y es usado para hallar las dos variables respuesta mencionadas en el anterior apartado, trabajo del compresor y gasto másico de refrigerante.

### 4.2 Polinomio AHRI reducido

El polinomio AHRI reducido, como ya hemos dicho, viene de las investigaciones de Shao y Li (Shao et al., 2004) en el que utilizan este polinomio para la obtención de un modelo experimental. El dominio original de este polinomio es el de temperaturas, pero por lo descrito anteriormente, también se hará uso del dominio de presiones. Su forma es la siguiente:

$$W_{comp} = k_0 + k_1 T_{evap} + k_2 T_{cond} + k_3 T_{evap} T_{cond} + k_4 T_{evap}^2 + k_5 T_{cond}^2$$
$$m_{ref} = k'_0 + k'_1 T_{evap} + k'_2 T_{cond} + k'_3 T_{evap} T_{cond} + k'_4 T_{evap}^2 + k'_5 T_{cond}^2$$

*Ecuación 3. Polinomio AHRI reducido.*

$$W_{comp} = k_0 + k_1 P_{evap} + k_2 P_{cond} + k_3 P_{evap} P_{cond} + k_4 P_{evap}^2 + k_5 P_{cond}^2$$
$$m_{ref} = k'_0 + k'_1 P_{evap} + k'_2 P_{cond} + k'_3 P_{evap} P_{cond} + k'_4 P_{evap}^2 + k'_5 P_{cond}^2$$

*Ecuación 4. Polinomio AHRI reducido en dominio de presiones.*

Este polinomio cuenta con 6 coeficientes de regresión y las variables respuesta son las mismas que en los anteriores modelos. Aparte de ser utilizado por estos autores, este polinomio es

ampliamente empleado en diseños experimentales de superficie de respuesta cuando se desconoce el modelo que hay que emplear y, por tanto, se parte de un modelo simple hasta obtener nuestro modelo más complejo.

## 5. Diseños experimentales

“La estadística está definida como la ciencia de recoger, analizar y hallar conclusiones de los datos. Los datos son usualmente recogidos mediante encuestas de muestreo, estudios de observación o experimentos.” (Atkinson, 2015)

A la hora de querer retratar un sistema podemos hacerlo de 3 maneras distintas dependiendo de cómo funciona el modelo que pretendemos retratar. Estos son: modelo teórico, modelo empírico y modelo semi-empírico.

Un modelo teórico está basado en unas leyes físicas que guían los procesos obtenidos mediante deducción a partir de conceptos e ideas. Estos modelos son ampliamente empleados en campos como la física y química teórica.

Los modelos empíricos, por otro lado, buscan relaciones significativas entre las variables mediante procesos estadísticos. Para su obtención, es necesario contar con un conjunto mínimo de datos experimentales con los que poder ajustar el modelo. Este tipo de modelos son los que vamos a emplear para nuestra resolución.

Por último, los modelos semi-empíricos, están contruidos bajo una base teórica, pero requiere de algún ajuste empírico para poder utilizarlo.

Los modelos empíricos nos permiten describir las causas de un proceso y cuantificar la relevancia de las distintas variables que intervienen en el mismo. Estos modelos son utilizados cuando buscamos relaciones causa-efecto como es en nuestro caso.

El primer paso para obtener un modelo empírico es plantear uno y comprobar si este modelo es válido o parcialmente válido para determinadas circunstancias. En nuestro caso, este paso no es necesario porque contamos con 4 modelos distintos obtenidos mediante la literatura y la norma existente.

Para cuantificar la dependencia de las distintas variables que intervienen en nuestro modelo hacemos uso de inferencia estadística. Los diseños experimentales buscan realizar una selección lógica de puntos para obtener la mayor información posible minimizando la cantidad de puntos necesarios.

Como hemos visto en el apartado anterior, tenemos una variable dependiente definida por dos variables independientes, este tipo de modelos están clasificados, dentro de diseños experimentales, como diseños de superficie de respuesta. Este modelo viene definido por una pareja de puntos de temperatura que, respectivamente, tendrán un valor de gasto másico y un valor de consumo del compresor y vienen limitadas dentro de un rango por las condiciones físicas de funcionamiento de nuestro compresor. El dominio experimental de la superficie de respuesta es irregular y es, esta característica, la que presenta problemas si decidimos usar los métodos experimentales clásicos.

Los métodos experimentales clásicos necesitan de tener una base ortogonal para poder realizar el análisis, pero en nuestro caso, no es así, haciendo que su uso no llegue a ser del todo óptimo.

Algunos de los diseños clásicos más comunes son: los diseños de tres niveles ( $3^k$ ), los diseños CCD y los diseños hexagonales (HD).

- Diseños de 3 niveles: estos diseños basados en los modelos  $3^k$  donde k corresponde al número de factores y requiere un número determinado de puntos. Como nuestros modelos tienen dos factores, necesitamos 9 puntos. Este método subdivide un área rectangular en 3 niveles situando en su centro un punto central.

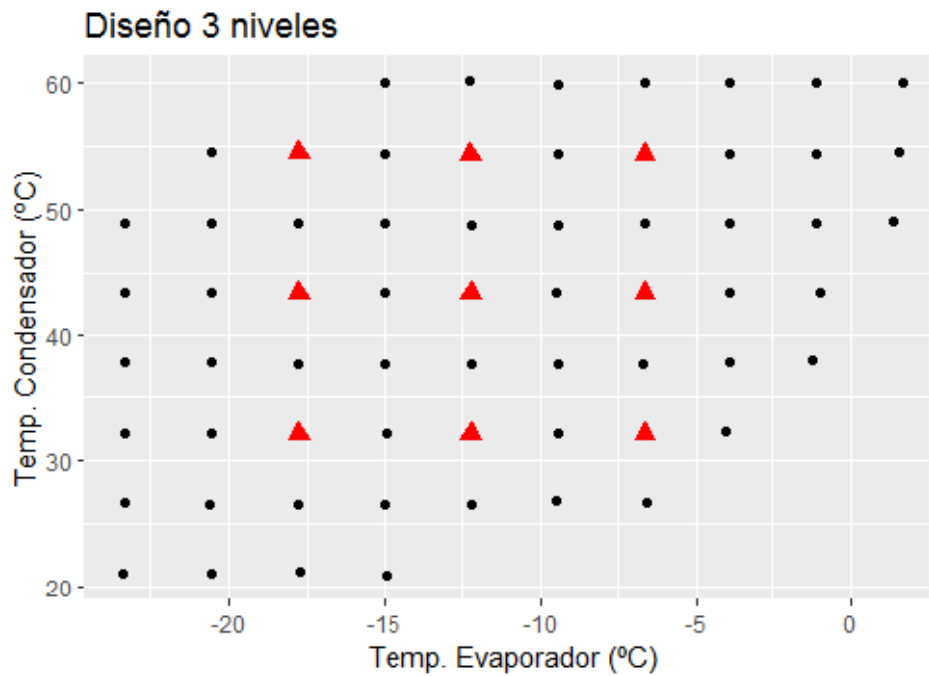


Ilustración 6. Diseño de 3 niveles.

- Diseños CCD: este diseño es el más extendido dentro de los modelos de superficie de respuesta. Su nombre viene del inglés Central Composite Design. Establece un punto en el centro y añade 4 puntos axiales y 4 factoriales haciendo un total de 9 puntos.

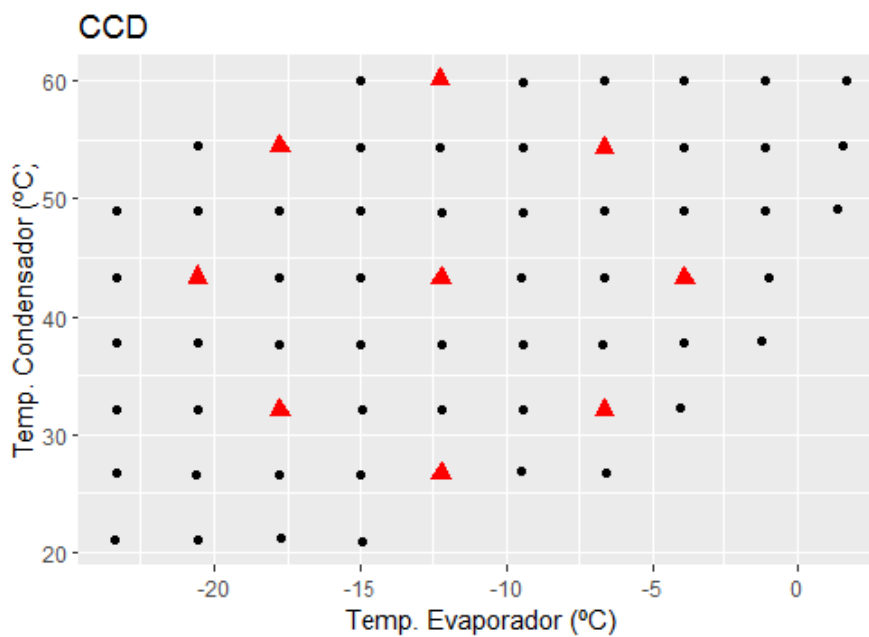
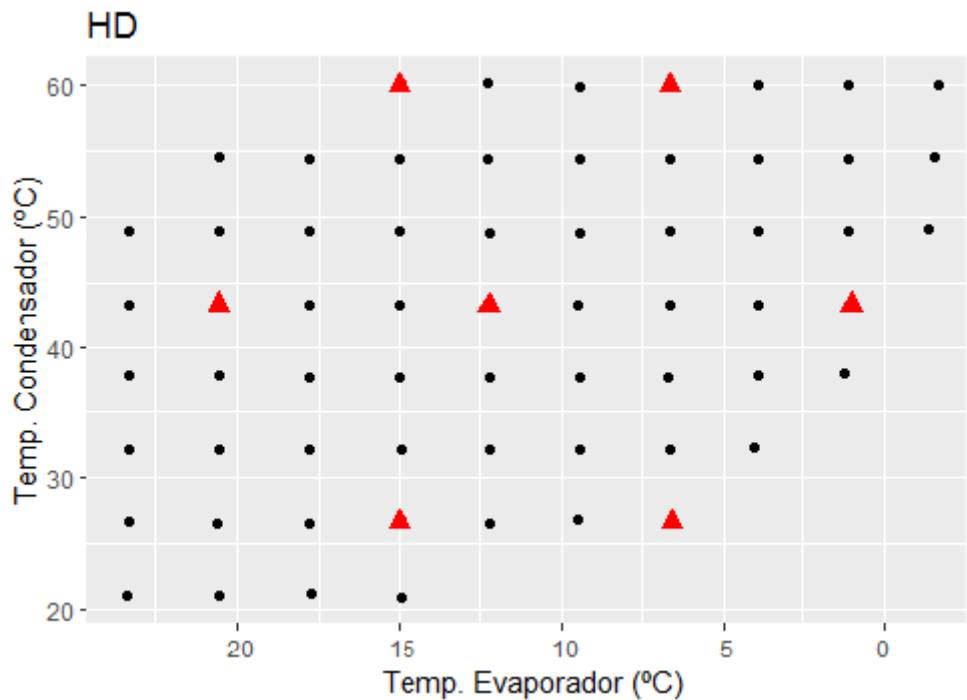


Ilustración 7. Diseño CCD.

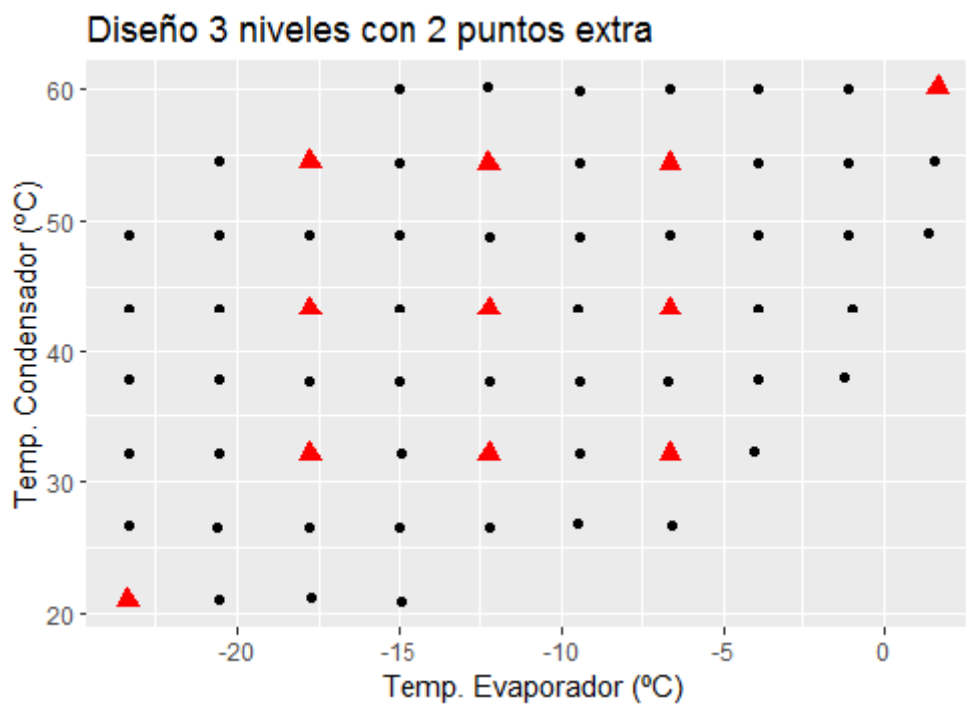


- Diseños hexagonales: intenta escoger los puntos dentro del mallado que haga asemejarse a un hexágono. Es un modelo reducido del CCD.



*Ilustración 8. Diseño HD.*

Como hemos visto, estos modelos preseleccionan los puntos de diseños de nuestra superficie, esto hace que, al tratarse de una superficie irregular, realizar una preselección deje fuera del análisis los puntos extremos de nuestra superficie. Para solventar esto se suele agregar puntos extremos de manera manual.



*Ilustración 9. Diseño 3k con puntos extra.*

Se puede apreciar que, aunque algunos lo eviten en mayor o menor medida, quedan zonas de nuestra superficie que no son representadas por ningún punto cercano. Es en este momento donde entran los diseños experimentales asistidos por ordenador.

Los diseños experimentales asistidos por ordenador nos permiten plantear diseños que se adaptan a dominios experimentales irregulares.

Para el siguiente ejemplo de diseño asistido por ordenador hemos extraído las siguientes ilustraciones de un artículo hecho por Emilio Peris Navarro y Javier Marchante Avellaneda.(Marchante Avellaneda et al., 2020) Para ello utilizaron un algoritmo del paquete estadístico R que explicaremos y utilizaremos más adelante. Los resultados fueron los siguientes:

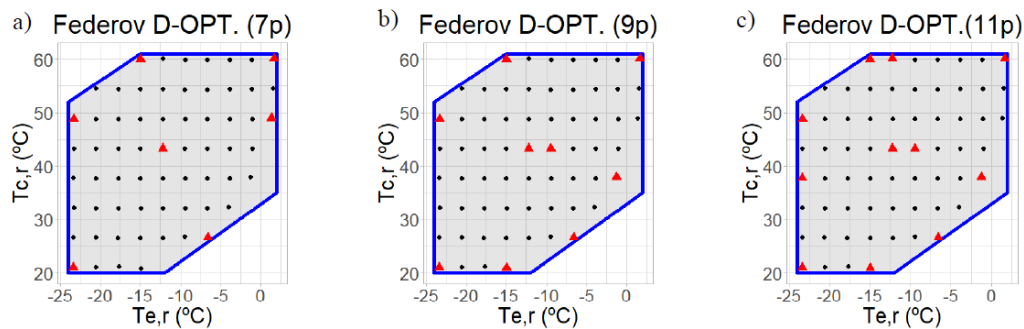


Ilustración 10. Comparativa criterio D con distintos puntos.

Como se puede observar, estos diseños sí que han escogido puntos que abarcan la mayor parte de nuestra superficie de diseño, ahora nos queda profundizar en cómo funcionan estas metodologías en sí.

En los métodos de superficie de respuesta, la relación entre la respuesta ( $y$ ) y los factores ( $x_i$ ) son, normalmente, no lineales con una ecuación del tipo:

$$y = f(x) + \varepsilon$$

Ecuación 5. Función  $f$ .

Para dos variables independientes podemos escribir esta ecuación como  $y = f(x_1, x_2) + \varepsilon$  donde  $f$  es una función no lineal y  $\varepsilon$  es el efecto aleatorio del error experimental. Cuando la función es desconocida, puede ser aproximada cerca de un punto que hemos llamado  $x_{10}, x_{20}$ . Haciendo uso de las aproximaciones de Taylor podemos llegar a que:

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2) \approx & f(x_{10}, x_{20}) + (x_1 - x_{10}) \left. \frac{\partial f(x_1, x_2)}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_{10}, x_2=x_{20}} \\ & + (x_2 - x_{20}) \left. \frac{\partial f(x_1, x_2)}{\partial x_2} \right|_{x_1=x_{10}, x_2=x_{20}} \\ & + \frac{(x_1 - x_{10})^2}{2} \left. \frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_1^2} \right|_{x_1=x_{10}, x_2=x_{20}} \\ & + \frac{(x_2 - x_{20})^2}{2} \left. \frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_2^2} \right|_{x_1=x_{10}, x_2=x_{20}} \\ & + \frac{(x_1 - x_{10})(x_2 - x_{20})}{2} \left. \frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_1 \partial x_2} \right|_{x_1=x_{10}, x_2=x_{20}} \end{aligned}$$

*Ecuación 6. Aproximación de Taylor.*

Que conduce a una ecuación cuadrática general con la forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 + \epsilon$$

*Ecuación 7. Ecuación cuadrática general.*

Esta ecuación cuadrática general provee de una buena aproximación de la función  $f$  y puede ser usada para interpolar dentro de esta región. Es, además, bastante flexible y con los coeficientes adecuados puede describir una gran variedad de superficies. (Atkinson, 2015)

Observamos que esta ecuación cuadrática que describe Atkinson coincide con el modelo propuesto por Shao y Li, dándonos más motivos por los que utilizar este modelo alternativo a la hora de plantear nuestros modelos experimentales.

Como el objetivo último de nuestro modelo es obtener los valores de los coeficientes, realizaremos un modelo de regresión con, al menos, la misma cantidad de ecuaciones que coeficientes. En el caso de la ecuación cuadrática general, tenemos 6 coeficientes de regresión, por lo tanto, necesitamos por lo menos 6 ecuaciones. Este sistema de ecuaciones tendría una forma como la siguiente:

$$\begin{aligned} Y_1 &= \beta_0 + \beta_1 X_{11} + \beta_2 X_{12} + \beta_3 X_{11}^2 + \beta_4 X_{12}^2 + \beta_5 X_{11} X_{12} + \epsilon_1 \\ Y_2 &= \beta_0 + \beta_1 X_{21} + \beta_2 X_{22} + \beta_3 X_{21}^2 + \beta_4 X_{22}^2 + \beta_5 X_{21} X_{22} + \epsilon_2 \\ &\dots \\ Y_n &= \beta_0 + \beta_1 X_{n1} + \beta_2 X_{n2} + \beta_3 X_{n1}^2 + \beta_4 X_{n2}^2 + \beta_5 X_{n1} X_{n2} + \epsilon_n \end{aligned}$$

*Ecuación 8. Sistema de ecuaciones.*

Donde:

- $X_{i1}$  y  $X_{i2}$  corresponde con las coordenadas de los puntos dentro del dominio experimental.
- $Y_i$  corresponde con el valor de las variables respuesta.
- $\epsilon_i$  corresponde con el valor error.

En nuestro caso vamos a asumir una distribución normal de errores con media 0, por lo tanto, el parámetro  $\epsilon_i$  vamos a dejar de representar a modo de simplificar la explicación.

Este sistema de ecuaciones podemos representarla de manera matricial con la siguiente forma:

$$Y = X\beta$$

*Ecuación 9. Sistema de ecuaciones en forma matricial.*

Siendo:

$$Y = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_n \end{pmatrix}; X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & X_{11}^2 & X_{12}^2 & X_{11}X_{12} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & X_{21}^2 & X_{22}^2 & X_{21}X_{22} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & X_{n1}^2 & X_{n2}^2 & X_{n1}X_{n2} \end{bmatrix}; \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \end{pmatrix}$$

Esta matriz  $X$  se llama **matriz de diseño** y es la base sobre la cual se van a desarrollar el resto de las matrices involucradas.

La primera de ellas la llamamos **matriz de información** ( $X^T X$ ), compuesta por la multiplicación de la transpuesta consigo misma.

$$X^T X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ X_{11} & X_{21} & \dots & X_{n1} \\ X_{12} & X_{22} & \dots & X_{n2} \\ X_{11}^2 & X_{21}^2 & \dots & X_{n1}^2 \\ X_{12}^2 & X_{22}^2 & \dots & X_{n2}^2 \\ X_{11}X_{12} & X_{21}X_{22} & \dots & X_{n1}X_{n2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & X_{11}^2 & X_{12}^2 & X_{11}X_{12} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & X_{21}^2 & X_{22}^2 & X_{21}X_{22} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & X_{n1}^2 & X_{n2}^2 & X_{n1}X_{n2} \end{bmatrix}$$

*Ecuación 10. Cálculo de la matriz de información.*

La segunda es la **matriz de dispersión**  $(X^T X)^{-1}$ , la cual es la inversa de la matriz de información.

Como hemos comentado unos párrafos atrás, nuestro objetivo último de tener un modelo es hallar el valor de los coeficientes, así que vamos a reescribir la ecuación 9 de la siguiente manera:

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

*Ecuación 11. Sistema de ecuaciones con la matriz de coeficientes aislada.*

A la hora de hallar los valores de los coeficientes que caractericen de manera adecuada nuestro compresor, nos interesa que la covarianza de estos sea lo más pequeña posible. La covarianza de la matriz de coeficientes se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Cov}(\beta) = (X^T X)^{-1} \sigma^2$$

*Ecuación 12. Covarianza de la matriz de coeficientes.*

En el caso de los diseños asistidos por ordenador, encontramos el uso de criterios de optimalidad, representados por letras, para definir qué elementos de la matriz de información o matriz de dispersión o submatrices de estas son optimizados. Una vez establecido el criterio, el algoritmo computacional es ejecutado escogiendo al azar una cantidad de puntos  $n$  de nuestro dominio experimental, repitiendo este proceso hasta que encontrar el grupo de puntos que cumplen mejor para ese criterio.

Hay dos grupos bien diferenciados de criterios de optimalidad, los que buscan maximizar la matriz de información y aquellos que están interesados en los valores predictivos. Los del primer grupo son:

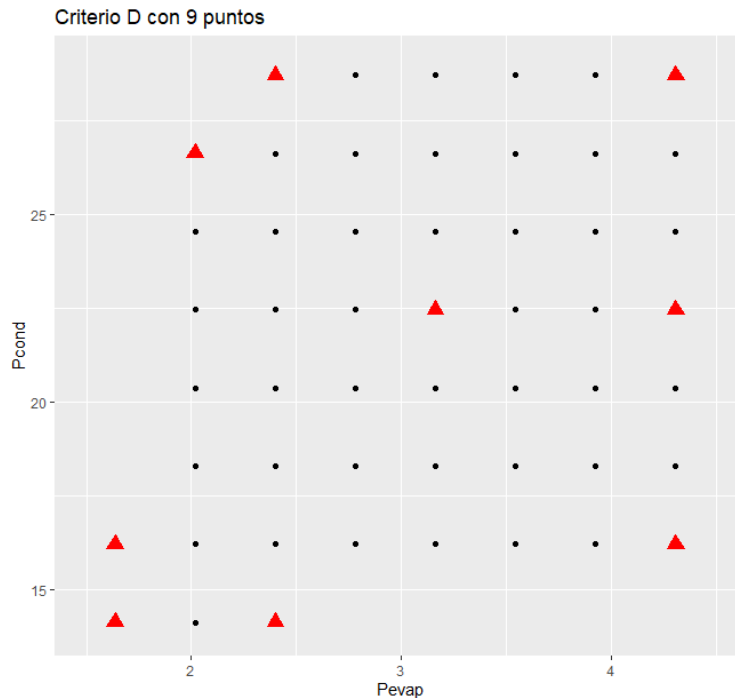


Ilustración 11. Diseño óptimo con criterio D.

**D-optimalidad:** es el más común de los criterios dentro de los diseños óptimos. Busca maximizar el determinante de la matriz de información  $|X^T X|$ , es decir, provee diseños minimizando la varianza generalizada de los parámetros estimados. Para ello busca encontrar los puntos  $n$  que 'le permite abarcar mayor volumen de la región experimental' (Eriksson et al. 2000, p. 216).

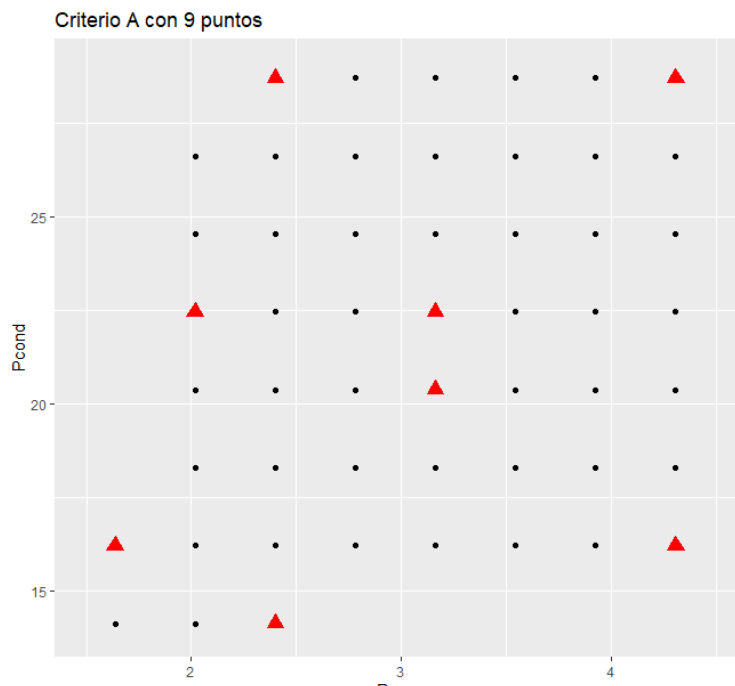


Ilustración 12. Diseño óptimo con criterio A.

**A-optimalidad:** este criterio es raramente utilizado. 'La matriz de diseño se considera como A-optimalidad cuando la traza de la matriz de dispersión  $(X^T X)^{-1}$  es mínima' (Triefenbach, 2008). Como la varianza de los coeficientes de regresión son los elementos diagonales de  $\sigma^2(X^T X)^{-1}$ , un diseño que minimice la traza minimiza la media de la varianza de los coeficientes de regresión.

**E-optimalidad:** minimiza la varianza de la combinación lineal menos importante a través de maximizar el mínimo autovector de la matriz de información.

**C-optimalidad:** es interesante para estimar la varianza mínima de la combinación entre los parámetros  $k_n$  y un vector conocido de parámetros. Se usa sobre todo para minimizar un punto  $x_0$  en concreto que nos interese.

Los siguientes 3 criterios pertenecen al segundo grupo mencionado y son los siguientes:

**V-optimalidad:** a diferencia de los otros 2, los cuales se enfocan en la matriz de información o dispersión, este criterio busca minimizar la varianza de predicción promedio de unos puntos concretos de la región experimental.

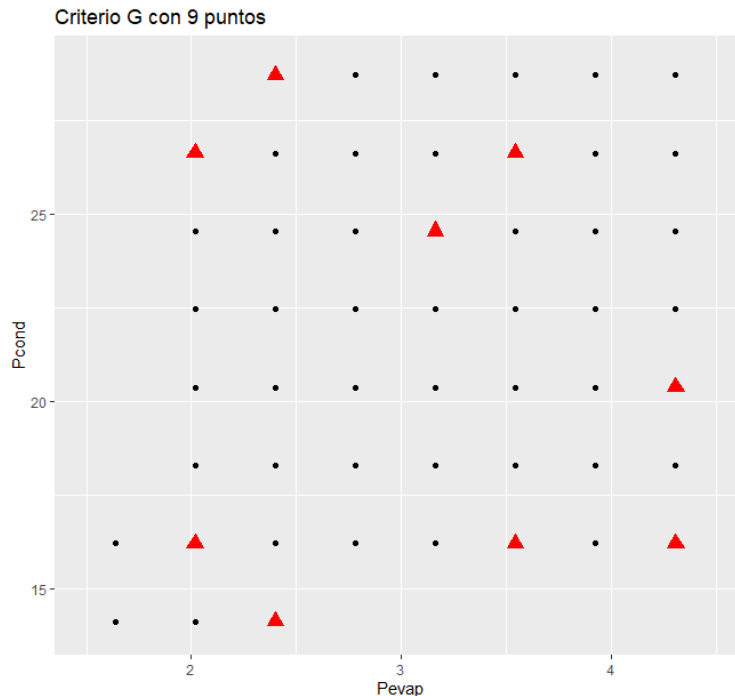


Ilustración 13. Diseño óptimo con criterio G.

**G-optimalidad:** busca minimizar la varianza máxima de los valores esperados. Es uno de los más populares y, se obtiene el mismo resultado que con D-optimalidad cuando trabajamos con diseños continuos en lugar de diseños exactos.

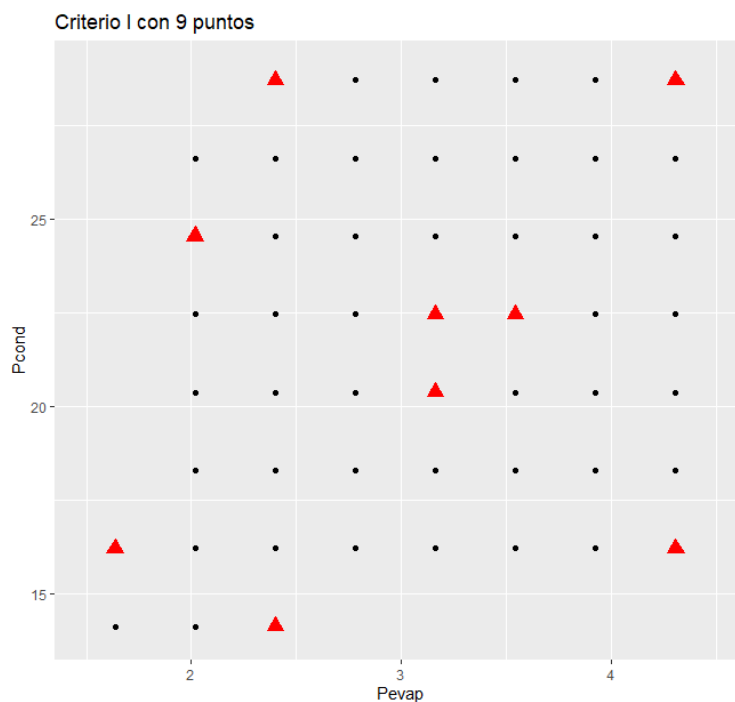


Ilustración 14. Diseño óptimo con criterio I.

**I-optimalidad:** permite minimizar la varianza media de los valores esperados sobre una región específica de la superficie de respuesta. Esta región depende de los puntos replicados que se generen, lo cual ocurre cuando tenemos más puntos que coeficientes  $k_n$ . Por lo general, obtenemos una varianza mayor en las esquinas de nuestra superficie de diseño que la D-optimalidad, pero más reducida que está en la parte central de la región.

En lo que corresponde al diseño experimental, hemos decidido emplear el criterio de optimalidad D porque, además de ser el más empleado, es el que mejor funciona cuando no

disponemos de la cantidad de puntos necesaria para cubrir un mallado en todo el dominio experimental y busca abarcar mayor área del dominio experimental, por ejemplo: Imaginemos un mallado compuesto por 60 puntos pero sólo pudiéramos disponer de 10, de estos 60, ¿qué 10 puntos podríamos usar para que se acercara al modelo que usa los 60 puntos?

## 6. Herramientas empleadas para el cálculo

Para determinar qué modelo de los anteriores (AHRI y AHRI reducido en ambos dominios) es el mejor y desarrollar nuestro diseño experimental óptimo, necesitamos, primeramente, de una base de datos de puntos experimentales de nuestro compresor y, segundo, de un programa estadístico que nos permita desarrollar los cálculos.

### 6.1 Obtención de los datos

Este apartado describe la forma general de cómo se han realizado los ensayos experimentales reflejados en los informes AHRI que se han consultado. Para obtener datos experimentales de un compresor debemos emplear ensayos calorimétricos. Estos ensayos constan de los elementos básicos de un ciclo de refrigeración que son: un compresor (parte central de nuestro trabajo), un evaporador, un condensador, alguna/s válvula/s de expansión, un calentador (en el caso de que aplicamos un sobrecalentamiento al sistema) y un subenfriador (para realizar subenfriamientos). Para controlar las temperaturas y presiones del evaporador y del condensador se utiliza las distintas válvulas de expansión y el calentador.

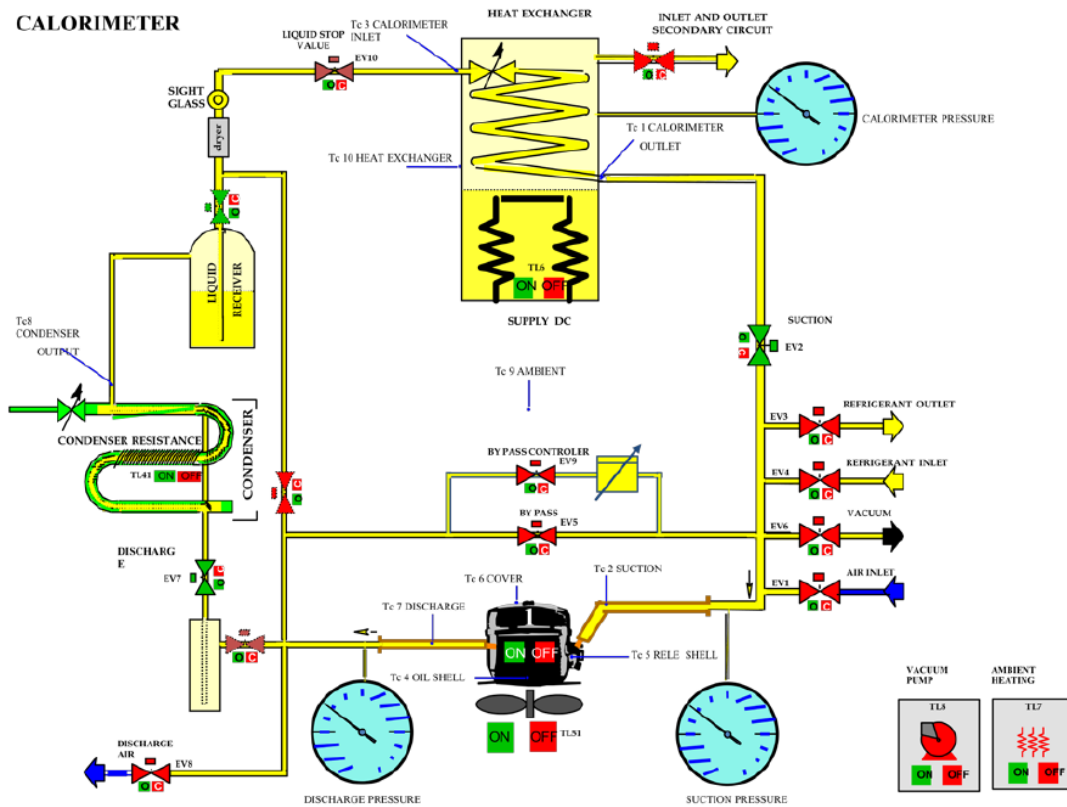


Ilustración 15. Esquema diseño calorimétrico.

En puntos determinados del dispositivo experimental se colocan distintos sensores para poder ajustar las temperaturas de ensayo y, seguidamente, podamos medir las variables que nos interesen como el gasto másico de refrigerante o el consumo del compresor.

Las indicaciones seguidas para ejecutar estos ensayos calorimétricos son los establecidos por la norma ISO 917.



## 6.2 Software empleado

El software que vamos a emplear es el lenguaje de programación R, a través de la herramienta R Studio. R es un lenguaje empleado especialmente en estadística, es de código abierto y está disponible para los sistemas operativos tradicionales.

Este lenguaje de programación dispone de algunos paquetes básicos, pero lo más importante es la cantidad de paquetes que son creados por la comunidad. Es utilizado por muchos científicos e investigadores de distintos campos para sus análisis estadísticos, por este motivo, estos paquetes son tan diversos y complejos, a la vez que completos.

Para resolver el problema de fondo de este proyecto, utilizaremos el paquete AlgDesign, concretamente la función `optFederov` (a la que nos referiremos como Federov o algoritmo de Federov durante el resto del proyecto), que nos permite utilizar distintos criterios de optimalidad previamente preprogramados.

## 6.3 Procedimiento empleado

Para poder emplear un diseño experimental óptimo necesitamos primero una serie de materias: el **funcional** del modelo, un **mallado fino de puntos** que recorra todo el dominio experimental, delimitar la cantidad de **puntos del diseño** y especificar el **criterio de optimalidad** que queramos utilizar.

En nuestro caso tenemos 4 posibles **funcionales** (los modelos comentados anteriormente), aunque previamente haremos un estudio para determinar que funcional nos conviene emplear para nuestro diseño experimental óptimo.

Con respecto al **mallado fino de puntos**, hemos decidido emplear un modelo de regresión no-paramétrico a los datos de los compresores de los informes AHRI porque, como se puede observar en la siguiente ilustración, la cantidad de puntos que nos proporcionaban era escasa y no llegaba a abarcar todo el dominio experimental y, realizar un ensayo calorimétrico que abarque todo el dominio tiene un alto coste económico.

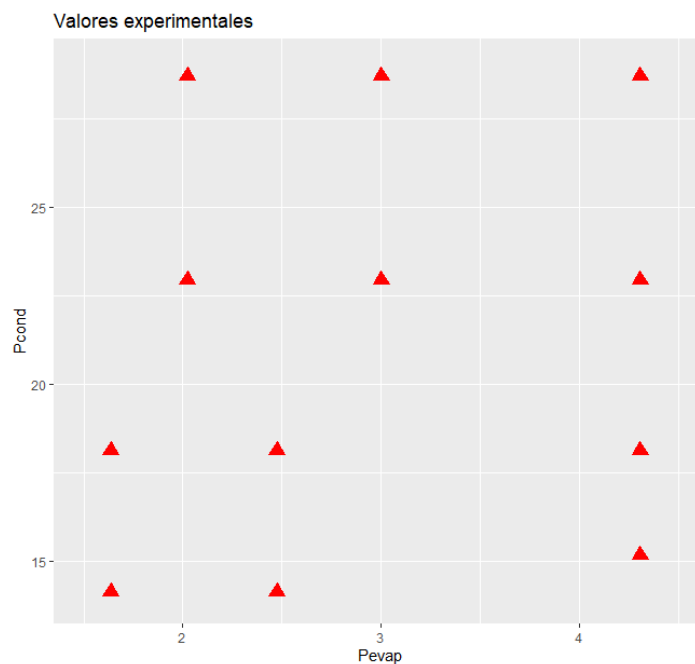


Ilustración 16. Puntos proporcionados por informe AHRI 51.

Realizar una interpolación tradicional de puntos no es el método adecuado puesto que, como ya hemos visto en el diagrama de superficie de respuesta, tenemos un dominio irregular, así que nos hace falta una manera de interpretar donde están los límites de funcionamiento para no hallar puntos que el compresor no sea capaz de reproducir. Para hacer frente a este problema, hemos empleado una interpolación suave de puntos, conocida en inglés como *Thin Plate Spline* (TPS). Este método de interpolación se basa en añadir penalizaciones en aquellas zonas donde nuestra superficie se curve, obteniendo una interpolación suave y continua.

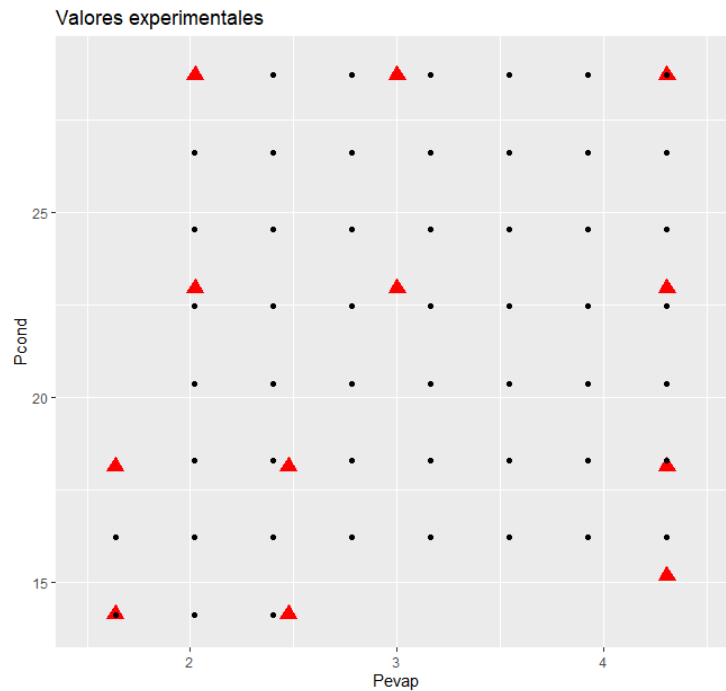


Ilustración 17. Puntos después de aplicar el TPS.

En la ilustración 17 puede observarse el resultado de la aplicación del TPS donde, en rojo vemos los datos del informe y, en negro, los valores obtenidos por el TPS.

Delimitar la cantidad de **puntos del diseño** a emplear es una de las respuestas que tratamos de buscar en este proyecto, por tanto, todavía no podemos establecer una cantidad óptima de puntos. Para averiguar esta cantidad de puntos óptima vamos a ejecutar el algoritmo de Federov con 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19 y 21. Es evidente que no podríamos emplear 7 y 9 puntos si gastáramos el funcional del polinomio AHRI puesto que, al tener 10 coeficientes necesitaríamos, al menos 10 puntos. En el caso de que después de realizar el análisis de los modelos nos quedáramos el polinomio AHRI en cualquiera de los dominios, estas dos opciones serían automáticamente descartadas

Hemos decidido empezar a analizar por 7 puntos por las recomendaciones que comenta Chatfield en las que afirma que, para un polinomio de orden 2, hay que emplear al menos esta cantidad. Hemos decidido no sobrepasar los 21 puntos puesto que los ensayos de compresores destinados a caracterizarlos no suelen sobrepasar ese número. (Chatfield et al., 2002)

Por último, hemos empleado **criterio de optimalidad D** por los motivos descritos anteriormente.

El algoritmo de Federov nos devolverá la selección de puntos (sólo las coordenadas de las variables independientes) que cumpla mejor con ese criterio de optimalidad. Para nuestro caso, esta selección de puntos la usaremos posteriormente para realizar una regresión lineal y

comparar todos los ajustes realizados con **distintos puntos del diseño** para determinar cuál es la cantidad de puntos con la que obtenemos una mejor relación entre la información obtenida y el coste.

## 7. Análisis

Para poder resolver nuestra problemática hemos dividido el análisis en 3 partes. En la primera compararemos los distintos modelos para cada compresor con el objetivo de observar las tendencias que se producen. Tras la comparativa seleccionaremos uno de los 4 modelos, el más ventajoso. Ese modelo será el que utilizaremos en la parte restante del análisis.

En la segunda parte, daremos respuesta al objetivo principal de este trabajo, describir una metodología clara para la caracterización de nuestros compresores, es decir, determinaremos cuales y cuantos puntos dentro de nuestro dominio experimental serían necesarios para obtener los coeficientes de regresión de nuestro modelo.

En la tercera parte utilizaremos, el modelo ajustado con las submuestras definidas en la segunda parte para realizar la predicción de puntos a condiciones de succión distintas. El objetivo será determinar si la corrección incluida en la norma obtiene buenos resultados para los modelos planteados.

### 7.1 Selección del modelo

El modelo lineal es un modelo matemático utilizado para calcular, mediante una aproximación, la relación entre una variable dependiente  $Y$  y una serie de variables independientes  $X_i$  ajustando una sucesión de parámetros  $\lambda_n$ , es decir:

$$Y = \lambda_0 X_0 + \dots + \lambda_m X_m$$

*Ecuación 13. Función ejemplo.*

En este caso, el valor  $Y$  será el trabajo del compresor  $W_{comp}$  o el gasto másico  $m_{ref}$  según el valor que deseamos aproximar. Nuestras variables independientes  $X_n$  serán las diferentes variables que conforman los polinomios AHRI o AHRI reducido, por ejemplo:

$$W_{comp} \approx \lambda_0 + \lambda_1 T_{evap} + \lambda_2 T_{cond} + \lambda_3 T_{evap} T_{cond} + \lambda_4 T_{evap}^2 + \lambda_5 T_{cond}^2 + \lambda_6 T_{evap} T_{cond}^2 + \lambda_7 T_{evap}^2 T_{cond} + \lambda_8 T_{evap}^3 + \lambda_9 T_{cond}^3$$
$$m_{ref} \approx \lambda'_0 + \lambda'_1 T_{evap} + \lambda'_2 T_{cond} + \lambda'_3 T_{evap} T_{cond} + \lambda'_4 T_{evap}^2 + \lambda'_5 T_{cond}^2 + \lambda'_6 T_{evap} T_{cond}^2 + \lambda'_7 T_{evap}^2 T_{cond} + \lambda'_8 T_{evap}^3 + \lambda'_9 T_{cond}^3$$

*Ecuación 14. Polinomio AHRI.*

Para su resolución se usa modelos de regresión lineal los cuales buscan obtener el valor de los coeficientes de regresión. El cálculo de estos coeficientes se realizará mediante el software R, para ser exactos la función  $\text{lm}()$ . Esta recibe como argumentos el polinomio que deseamos aproximar y un conjunto de datos, en este caso será el mallado de puntos calculado previamente mediante el TPS, y obtenemos como resultado los coeficientes calculados mediante el método de mínimos cuadráticos. Es importante remarcar que, en esta primera parte, utilizamos todo el conjunto de puntos generados por el TPS debido a que únicamente queremos identificar el modelo más ventajoso de los 4 propuestos.

Una vez ajustado el modelo, lo utilizaremos para calcular unas predicciones del trabajo del compresor  $W_{comp\text{corr}}$  y gasto másico  $m_{ref\text{corr}}$ , haciendo uso de los valores  $X_{evap}$  y  $X_{cond}$  obtenidos experimentalmente (siendo  $X$  la temperatura o presión según el dominio en el que nos encontremos). Para ello utilizaremos la función de R  $\text{predict}()$ .

### 7.1.1 Marcadores para el análisis

Denominamos por marcadores a los diferentes aspectos de interés de nuestro método y resultados, que nos permitirán tomar una decisión sobre el modelo más ventajoso para realizar la caracterización de compresores de pistón.

#### 7.1.1.1 p-valor

Posterior a ejecutar `lm()` podremos ejecutar `summary.lm()` y obtener una tabla donde se analiza la importancia de los diferentes coeficientes. Por ejemplo:

	Estimate	Std.error	tvalue	Pr(> t )
(Intercept)	1,72E-01	8,41E-03	20,4440009	1,16E-63
Pevap	7,32E-02	3,45E-03	21,2003717	6,59E-67
Pcond	-4,96E-03	1,06E-03	-4,6825632	3,92E-06
I(Pcond^2)	-6,06E-05	4,74E-05	-1,2773356	2,02E-01
I(Pevap^2)	-2,03E-02	9,84E-04	-20,5893427	2,76E-64
I(Pcond^3)	4,28E-07	7,23E-07	0,5916065	5,54E-01
I(Pevap^3)	1,76E-03	1,13E-04	15,6503067	3,44E-43
Pevap:Pcond	6,87E-03	1,75E-04	39,2960907	1,11E-137
Pcond:I(Pevap^2)	-2,89E-04	1,82E-05	-15,8977222	3,15E-44
Pevap:I(Pcond^2)	-4,41E-05	3,38E-06	-13,0437605	1,59E-32

Tabla 6. Ejemplo p-valor.

De las diferentes columnas la de mayor interés será la última, donde se analiza si el coeficiente asociado tiene una importancia significativa sobre los resultados. Para ser exactos, se realiza un contraste de hipótesis donde se comparan los resultados teniendo en cuenta todos los coeficientes y los resultados teniendo en cuenta todos los coeficientes salvo el analizado, siendo la hipótesis nula que ambos resultados son iguales y la hipótesis alternativa que no lo son.

Si el p-valor es menor que cierto valor (en este caso tomaremos como criterio de significancia 0.05) se descarta la hipótesis nula y podemos afirmar que dicho coeficiente es significativo. Por otro lado, si el p-valor es mayor que 0.05 podremos afirmar que dicho coeficiente no resulta significativo, si tenemos en cuenta los demás, y por tanto el polinomio está sobre determinado. Esto nos ayudará a determinar si los modelos polinomiales analizados poseen términos sin significancia. En caso de tenerlos, sería preferible un modelo con un menor número de predictores.

#### 7.1.1.2 Comparativa entre los valores experimentales y los correlacionados

El siguiente marcador que tendremos en cuenta será una comprobación visual de la gráfica de los valores predichos contra los valores experimentales. Es decir, representaremos en el eje de abscisas los valores  $W_{compcorr}$  y  $m_{refcorr}$  y en el eje de coordenadas los valores  $W_{comp}$  y  $m_{ref}$ ,

de tal forma que, en el caso de una predicción perfecta, la gráfica a formar debería ser una recta con pendiente 1. Por ejemplo:

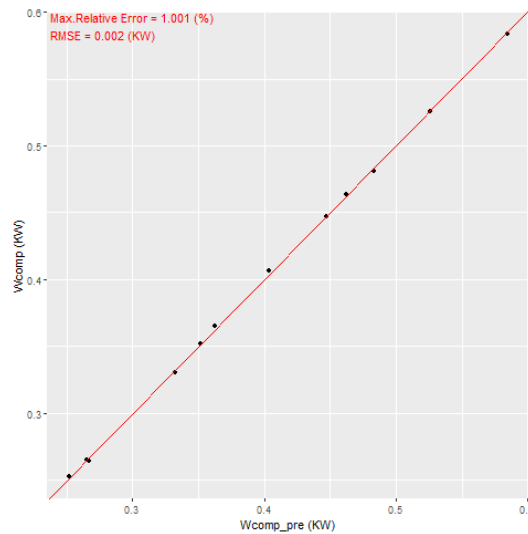


Ilustración 18. Gráfica comparativa entre valores experimentales y correlacionados.

De esta forma resulta sencillo ver la desviación de las predicciones y el signo de la diferencia. También puede resultar útil para ver si de verdad los factores que hemos usado tienen una dependencia lineal o no, si los puntos de la gráfica quedaran dentro de una misma línea vertical significa que el modelo escogido no es el correcto.

Además, si los puntos resultantes formaran una línea curva en lugar de recta quiere decir que nos faltarían elementos cuadráticos y cúbicos que corrigieran esas desviaciones.

Como se puede observar en el ejemplo, los puntos negros quedan, prácticamente, superpuestos sobre la línea roja, eso quiere decir que el valor obtenido mediante nuestra correlación es igual o casi igual al experimental.

### 7.1.1.3 Error máximo relativo

El error máximo relativo calcula, de forma porcentual, la diferencia relativa máxima entre el valor experimental y el valor predicho. Es decir, en el caso del trabajo,

$$\text{Error}_{rel} = \max\left(\frac{W_c - W_c}{W_c}\right)$$

Y de forma análoga para el gasto másico.

Cabe destacar que este marcador puede llevar a conclusiones engañosas por dos motivos:

1. **Resulta más sensible en la primera parte del recorrido.** Por ejemplo, un valor exacto de 1 y un valor predicho de 1.5 aporta un error relativo de un 50% mientras que un valor exacto de 20 y un valor predicho de 20.5 aporta un error relativo del 2.5%, pese a que ambos errores totales sean de 0.5. Esto puede llevarnos a cierto tipo de contradicción con el marcador gráfico descrito anterior ya que no se encuentran representados los valores relativos.
2. **Es sensible a los valores extremos.** Dado que se realiza la elección del máximo, pese que la gran mayoría mantengan un error relativo bajo, si un punto tiene un error relativo alto, este será el único valor que se verá reflejado.

Para que una diferencia entre errores máximos relativos será considerada importante deberá ser mayor del 5%.

#### 7.1.1.4 RMSE

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) es el último marcador que tendremos en cuenta. Este se calcularía mediante la siguiente fórmula:

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

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 que se utilizan.

El valor de este marcador reside en ser la media cuadrática de la diferencia entre valor predicho y valor experimental, de tal forma que no resulta tan sensible a los valores extremos y mantiene la misma importancia a lo largo del recorrido.

Adicionalmente, los valores que toma son no negativos, siendo 0 únicamente en el caso de que la predicción coincida con los valores exactos.

Por último, cabe destacar que es un valor dimensional, de tal forma que conservará las unidades propias de cada variable, KW para el trabajo del compresor y kg/h para el gasto másico.

### 7.1.2 Análisis de los distintos modelos

Se expondrá un análisis de los casos más destacables de los diferentes compresores estudiados. En el anexo se encuentran los resultados de cada compresor. En este caso, hemos cogido el compresor AHRI 28 para hacer una descripción que es extrapolable a cualquiera de los otros.

Nota: sólo se ha seleccionado una condición de succión para cada compresor, para el compresor AHRI 28 y el AHRI 30 se ha usado un sobrecalentamiento de 11.11K, para el AHRI 64a y el AHRI 64b se ha usado un sobrecalentamiento de 10K y el AHRI 51 sólo dispone una condición de succión.

#### AHRI 28

##### Trabajo del compresor

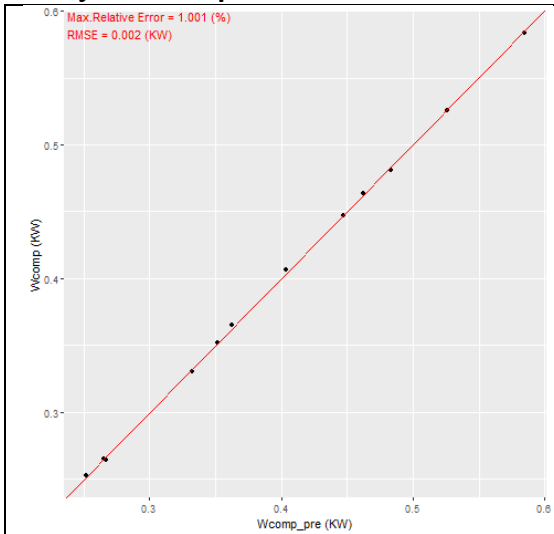


Ilustración 19. Wcomp. Temperaturas AHRI 28.

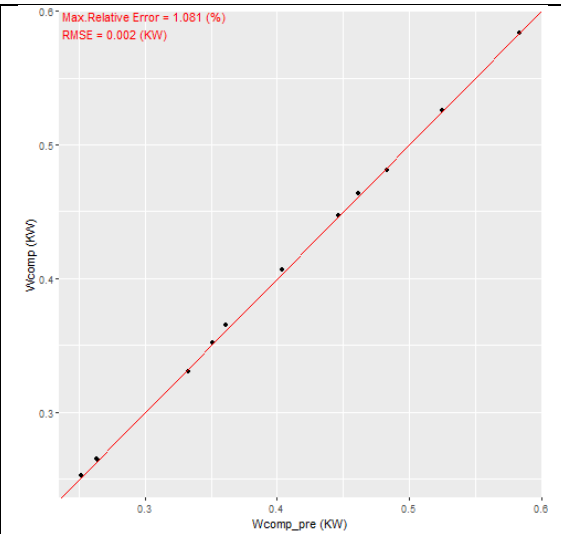


Ilustración 20. Wcomp. Presiones AHRI 28.

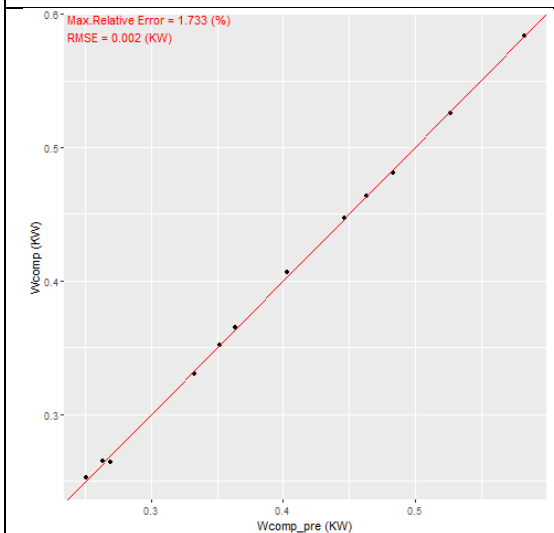


Ilustración 21. Wcomp. Temperaturas AHRI 28 red.

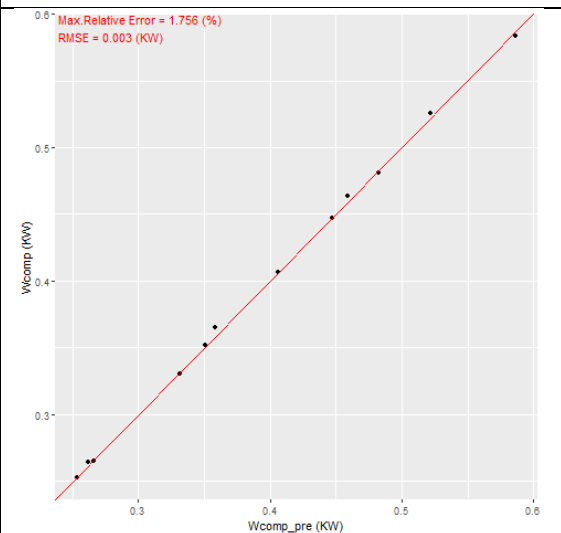


Ilustración 22. Wcomp. Presiones AHRI 28 red.



Dom/Mod.	Temperaturas	Presiones	Temp. Reducido	Pre. Reducido
-	1.955E-160	1.162E-63	0	8.537E-154
Xevap	4.208E-12	6.590E-67	1.366E-210	5.403E-292
Xcond	5.167E-41	3.917E-06	3.257E-298	9.077E-11
Xcond^2	0.362	0.202	1.401E-82	1.074E-115
Xevap^2	3.454E-08	2.759E-64	1.949E-120	1.030E-271
Xcond^3	0.516	0.554	-	-
Xevap^3	3.335E-09	3.444E-43	-	-
Xevap*Xcond	3.505E-62	1.110E-137	0	0
Xevap*Xcond^2	3.147E-17	3.149E-44	-	-
Xevap^2*Xcond	1.084E-15	1.593E-32	-	-

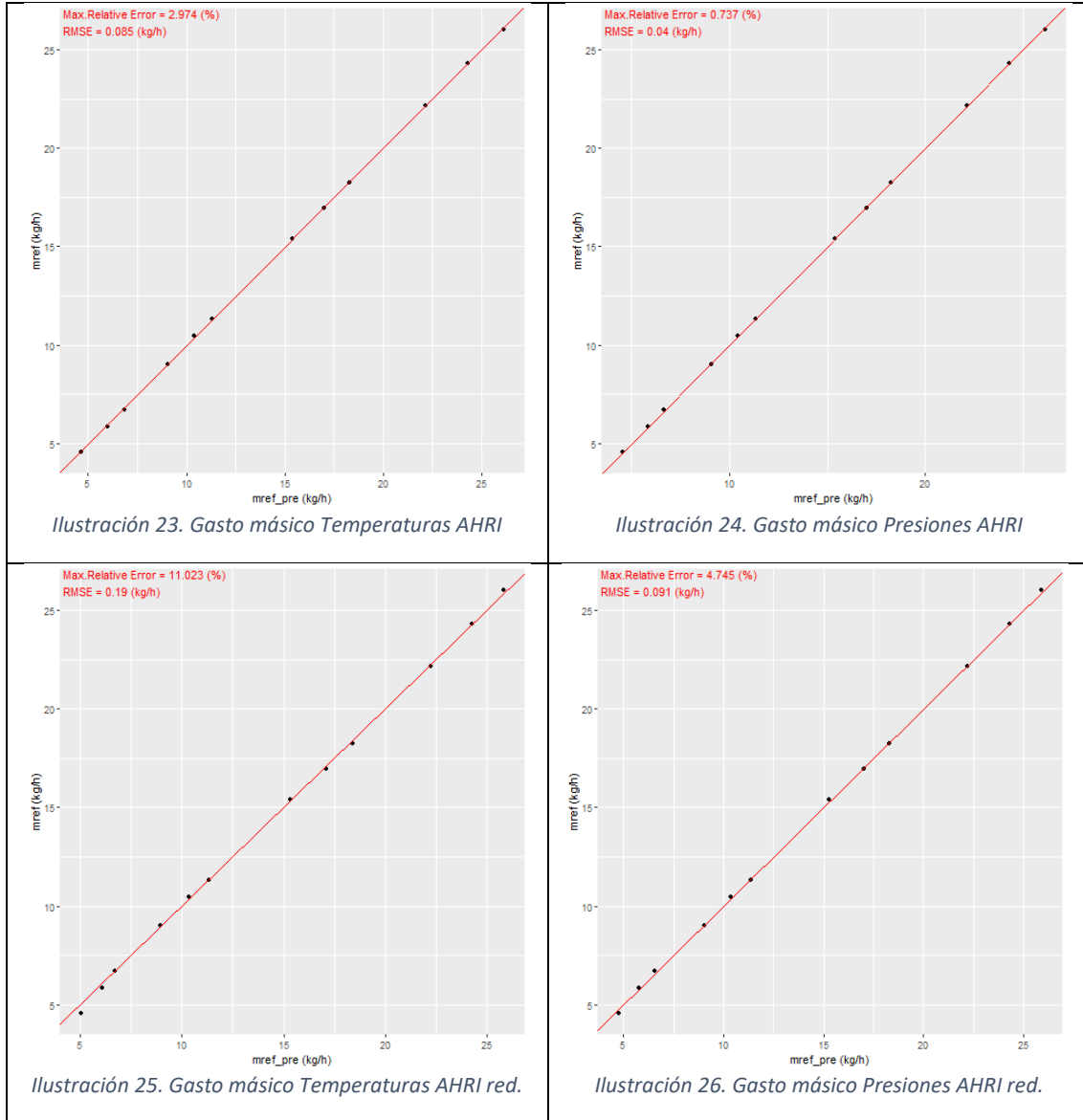
Tabla 7. p-valor de los coeficientes en función del dominio y modelo.

En este caso trabajamos con un compresor AHRI 28. Siguiendo los marcadores por el orden anteriormente descrito lo primero que llama la atención es los p-valores de los coeficientes cuadráticos y cúbicos. Tanto para el dominio de presión como el de temperatura del modelo de la norma, los valores de dichos coeficientes resultan no significativos, obteniendo un sistema sobre ajustado.

En cualquier caso, el hecho de que el polinomio AHRI completo este sobre ajustado será una tendencia que se repetirá a lo largo de la mayoría de los compresores como posteriormente veremos. Por otro lado, observamos que tanto las gráficas como los valores de error máximo relativo como de RMSE son muy similares tanto entre los diferentes dominios como los diferentes polinomios.

Como conclusión, el modelo AHRI reducido puede obtener resultados significativamente equivalentes con un coste considerablemente reducido.

## Gasto másico



Dom/Mod.	Temperaturas	Presiones	Temp. Reducido	Pre. Reducido
-	2.935E-245	0.639	0	4.266E-26
Xevap	1.493E-241	1.384E-245	0	0
Xcond	2.585E-11	0.001	1.308E-21	8.896E-12
Xcond^2	0.090	0.956	6.953E-35	0.052
Xevap^2	3.443E-126	8.169E-70	0	3.133E-156
Xcond^3	0.018	6.958E-06	-	-
Xevap^3	8.392E-26	9.618E-08	-	-
Xevap*Xcond	7.528E-45	3.758E-12	2.157E-114	1.127E-213
Xevap*Xcond^2	1.858E-52	5.510E-151	-	-
Xevap^2*Xcond	0.004	1.020E-68	-	-

Tabla 8. p-valor de los coeficientes en función del dominio y modelo.

Siguiendo con el AHRI 28, estudiamos el gasto másico. En este caso nos volvemos a encontrar que el polinomio AHRI completo se encuentra sobre ajustado (aunque el AHRI reducido para dominio de presión este sobre determinado este será un hecho puntual que no se extiende a los resultados de otros compresores, además de que supera por la mínima el valor de 0.05).

Lo que sí que nos llama la atención es la diferencia entre el error máximo relativo entre el AHRI completo y el AHRI reducido en dominio de temperaturas, siendo una diferencia de un 8%. Por otro lado, pese a crecer, el error máximo relativo no muestra una diferencia significativa en el dominio de presiones.

Este comportamiento se repite en otros compresores, lo que nos lleva a pensar que el dominio de presiones resulta más beneficioso a la hora de plantear el modelo que el dominio de temperaturas. Además, el modelo de presiones tiene otro beneficio añadido, sabemos, gracias a los trabajos, nuevamente, de Javier Marchante Avellaneda y Emilio Peris Navarro, que ofrece un ajuste aceptable para el consumo en el caso de usemos refrigerantes distintos en el compresor. (Marchante-avellaneda et al., 2021)

### Tablas resumen

En las siguientes tablas se dispondrá de un resumen del análisis realizado a cada compresor con los diferentes modelos como los analizados previamente. Se indica si el modelo esta sobre ajustado o no y los valores de RMSE y máximo error relativo.

#### AHRI 28

Dom/Mod.	Temperaturas	Presiones	Temp. Reducido	Pre. Reducido
<b>Coefficientes no significativos</b>	Sí	Sí	No	No
<b>Error relativo máximo</b>	1.001%	1.081%	1.733%	1.1756%
<b>RMSE</b>	0.002(KW)	0.002(KW)	0.002(KW)	0.003(KW)

Tabla 9. Resumen consumo AHRI 28.

Dom/Mod.	Temperaturas	Presiones	Temp. Reducido	Pre. Reducido
<b>Coefficientes no significativos</b>	Sí	Sí	No	Sí
<b>Error relativo máximo</b>	2.974%	0.737%	11.023%	4.745%
<b>RMSE</b>	0.085(kg/h)	0.04(kg/h)	0.19(kg/h)	0.091(kg/h)

Tabla 10. Resumen gasto másico AHRI 28.

#### AHRI 30

Dom/Mod.	Temperaturas	Presiones	Temp. Reducido	Pre. Reducido
<b>Coefficientes no significativos</b>	Sí	Sí	No	No
<b>Error relativo máximo</b>	0.385%	0.395%	0.774%	0.634%
<b>RMSE</b>	0.001(KW)	0.001(KW)	0.003(KW)	0.002(KW)

Tabla 11. Resumen consumo AHRI 30.

Dom/Mod.	Temperaturas	Presiones	Temp. Reducido	Pre. Reducido
<b>Coefficientes no significativos</b>	Sí	Sí	No	no
<b>Error relativo máximo</b>	0.478%	0.49%	1.238%	1.489%
<b>RMSE</b>	0.083(kg/h)	0.085(kg/h)	0.098(kg/h)	0.101(kg/h)

Tabla 12. Resumen gasto másico AHRI 30.

#### AHRI 51

Dom/Mod.	Temperaturas	Presiones	Temp. Reducido	Pre. Reducido
<b>Coefficientes no significativos</b>	Sí	Sí	No	No
<b>Error relativo máximo</b>	0.944%	2.16%	3.064%	2.742%
<b>RMSE</b>	0.071(KW)	0.133(KW)	0.151(KW)	0.219(KW)

Tabla 13. Resumen consumo AHRI 51.

Dom/Mod.	Temperaturas	Presiones	Temp. Reducido	Pre. Reducido
<b>Coefficientes no significativos</b>	Sí	Sí	No	no
<b>Error relativo máximo</b>	1.245%	0.34%	9.978%	1.638%
<b>RMSE</b>	3.144(kg/h)	2.314(kg/h)	15.556(kg/h)	5.104(kg/h)

Tabla 14. Resumen gasto másico AHRI 51.

#### AHRI 64a

Dom/Mod.	Temperaturas	Presiones	Temp. Reducido	Pre. Reducido
<b>Coefficientes no significativos</b>	Sí	Sí	No	No
<b>Error relativo máximo</b>	1.581%	1.064%	1.915%	2.407%
<b>RMSE</b>	0.012(KW)	0.011(KW)	0.015(KW)	0.002(KW)

Tabla 15. Resumen consumo AHRI 64a.

Dom/Mod.	Temperaturas	Presiones	Temp. Reducido	Pre. Reducido
<b>Coefficientes no significativos</b>	Sí	Sí	No	no
<b>Error relativo máximo</b>	3.84%	0.839%	2.341%	1.217%
<b>RMSE</b>	0.95(kg/h)	0.278(kg/h)	0.874(kg/h)	0.373(kg/h)

Tabla 16. Resumen gasto másico AHRI 64a.

#### AHRI 64b

Dom/Mod.	Temperaturas	Presiones	Temp. Reducido	Pre. Reducido
<b>Coefficientes no significativos</b>	Sí	Sí	No	No
<b>Error relativo máximo</b>	0.624%	0.439%	1.883%	2.075%
<b>RMSE</b>	0.01(KW)	0.009(KW)	0.019(KW)	0.023(KW)

Tabla 17. Resumen consumo AHRI 64b.

Dom/Mod.	Temperaturas	Presiones	Temp. Reducido	Pre. Reducido
<b>Coefficientes no significativos</b>	Sí	Sí	No	no
<b>Error relativo máximo</b>	1.168%	1.862%	1.675%	0.92%
<b>RMSE</b>	0.902(kg/h)	0.552(kg/h)	1.057(kg/h)	0.631(kg/h)

Tabla 18. Resumen gasto másico AHRI 64b.

Para referirnos a cada modelo, hemos simplificado los nombres donde:

- Temperaturas y Presiones (Temp. y Pre.) corresponde con el dominio de las variables dependientes del polinomio, temperaturas y presiones respectivamente.
- Reducido corresponde con el polinomio de grado 2. Si no se especifica es el de grado 3.

El apartado de coeficientes no significativos nos indica si, en alguno de los modelos, uno de los coeficientes tiene un p valor mayor a 0.05.

En vista de los resultados y sabiendo un modelo sobre ajustado no es deseable, es preferible la utilización de los modelos reducidos, es decir, el polinomio de grado 2.

Como se puede observar en los datos y ya hemos dicho anteriormente, el gasto másico da mejores resultados en todos los casos menos en el AHRI 30, que no representa grandes diferencias entre emplear un dominio u otro.

Queda así justificado el uso del dominio de presiones en lugar del dominio de temperaturas como marca la norma y, por lo dicho anteriormente, el polinomio de grado 2.

Por lo tanto, podemos concluir que el modelo más ventajoso es el polinomio AHRI reducido en dominio de presiones.

## 7.2 Selección de puntos mediante diseños experimentales óptimos

Después de haber escogido el polinomio AHRI reducido bajo un dominio de presiones toca concluir el número de puntos y dónde ubicarlos en el dominio experimental para caracterizar nuestros compresores.

Para decidir cuantos puntos son los indicados modelizaremos el trabajo del compresor y el gasto másico utilizando 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19 y 21 puntos obtenidos a partir del criterio de optimalidad D y bajo el algoritmo de Federov. Una vez ajustado los modelos de  $W_{comp}$  y  $m_{ref}$  con las distintas submuestras obtenemos los valores predichos como en la sección anterior. Estos valores los someteremos a un análisis de residuos.

Para finalizar graficaremos los puntos que nos ha seleccionado el diseño experimental óptimo con la cantidad de puntos que establezcamos después de realizar el análisis de residuos.

### 7.2.1 Análisis de residuos

Entendemos como residuo a la diferencia entre el valor experimental y el valor predicho. Para el análisis gráfico de residuos representaremos en el eje de abscisas el valor predicho del compresor y en el eje de coordenadas el residuo. Este será el primer marcador que observaremos para considerar si el error es menor entre un número de puntos y los siguientes. Entendiendo por mejor, visualmente, una menor dispersión de los puntos y que estos se encuentren centrados en el valor 0 del eje de coordenadas. También se destacarán aquellos puntos que presenten una gran dispersión.

### 7.2.2 Otros marcadores

Otros marcadores que utilizaremos para el estudio de la mejoría son:

- **Error máximo relativos.** Este marcador nos permite ver si hay algún punto en particular donde el error relativo es especialmente grande.
- **Error medio relativo.** Este marcador representa la media de los errores relativos.
- **RMSE.** Este marcador permite observar la distancia entre los puntos y el valor 0 del eje de coordenadas de forma absoluta.

La principal diferencia entre el RMSE y el error medio relativo es que el primero trabaja con valores absolutos mientras que el segundo trabaja con valores relativos. Ambos resultan complementarios ya que una variación alta del error medio relativo puede implicar poca dispersión, pero sería una muy mala aproximación. Mientras que, especialmente si trabajamos con sumas grandes, podemos tener un error relativo bajo, pero un RMSE alto.

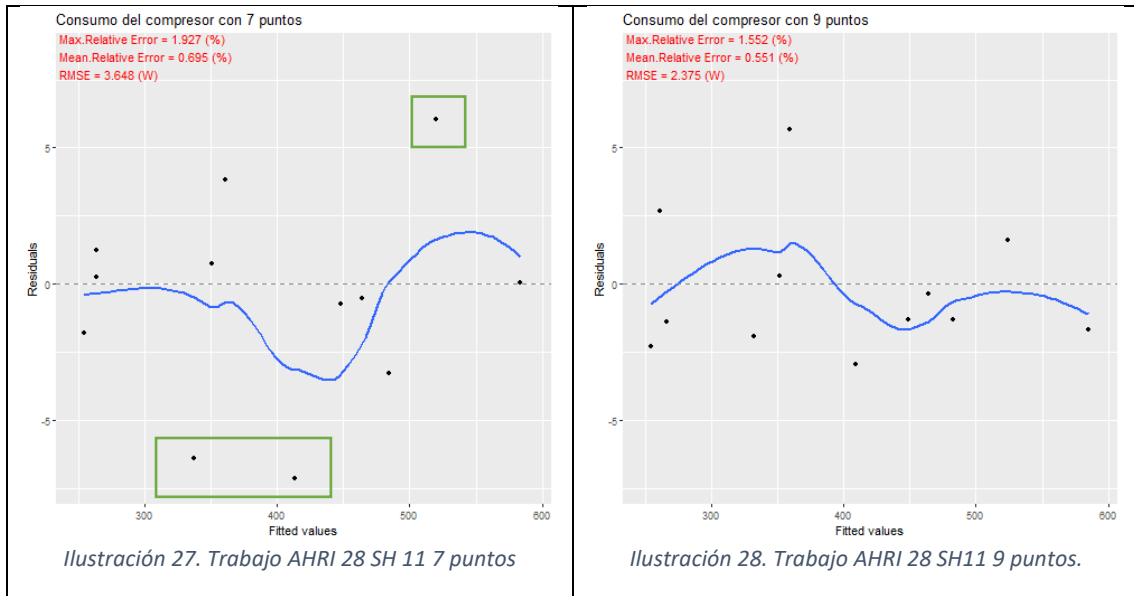
### 7.2.3 Determinación de la cantidad de puntos

Tras haber realizado los distintos análisis de residuos se ha encontrado un patrón presente en la gran mayoría de compresor y es que, cuando pasamos de modelizar nuestros compresores con 7 puntos a 9 puntos, la dispersión de los puntos realiza un gran salto a la baja y, los puntos situados en la parte más extrema del gráfico se congregan con el resto de los puntos más cercanos al eje central, obteniendo por lo tanto un menor residuo.

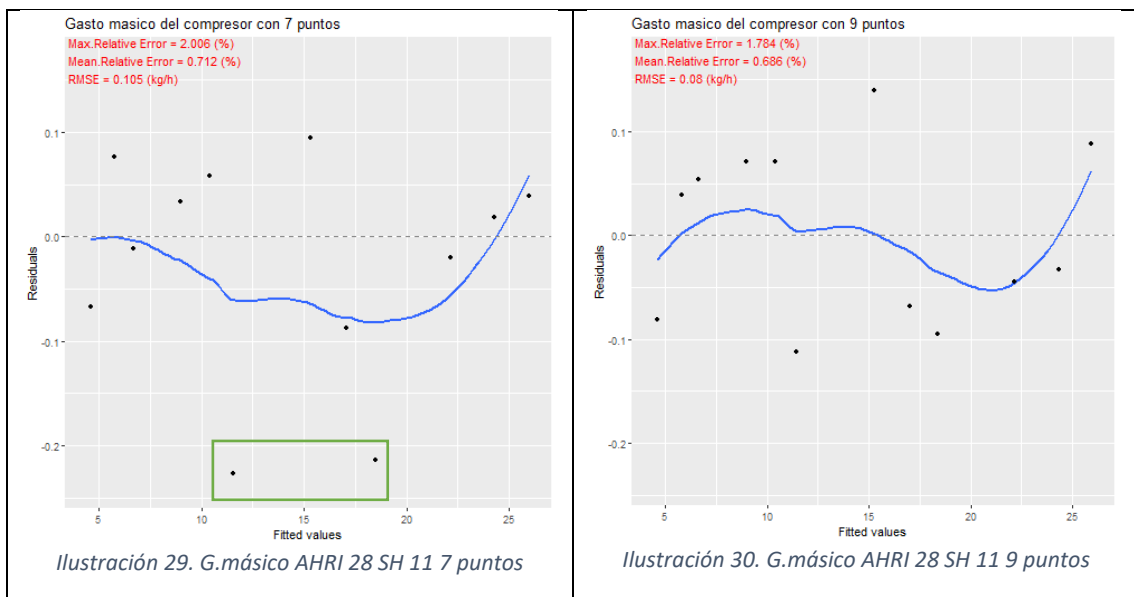
Si nos fijamos en el RMSE nos damos cuenta de que el salto más grande también se da cuando pasamos de 7 a 9 puntos. Ha habido una excepción, el consumo del compresor en el caso del AHRI 51 en el que el RMSE no ha variado por el aumento de puntos. Una vez ajustamos los modelos con más puntos, la mejora se atenúa acercándose a una progresión logarítmica.

Con respecto a los errores relativos, no se ha encontrado un patrón como se ha podido encontrar en el RMSE. En algunos casos, el error medio relativo sigue una progresión cercana a la descrita con el RMSE pero en otros no seguía una progresión lógica.

### AHRI 28. Consumo del compresor con un sobrecalentamiento de 11°K



### AHRI 28. Gasto másico del compresor con un sobrecalentamiento de 11°K



En este ejemplo podemos observar lo que hemos descrito en los anteriores párrafos, los puntos enmarcados en el recuadro verde se encuentran en las partes más extremas del gráfico y, cuando pasamos al modelo con 9 puntos, estos puntos se aproximan mucho más al eje de 0. También se puede observar que el RMSE baja notablemente en ambos casos, sobre todo en el consumo pasando de 3.648 Watios a 2.375 Watios.

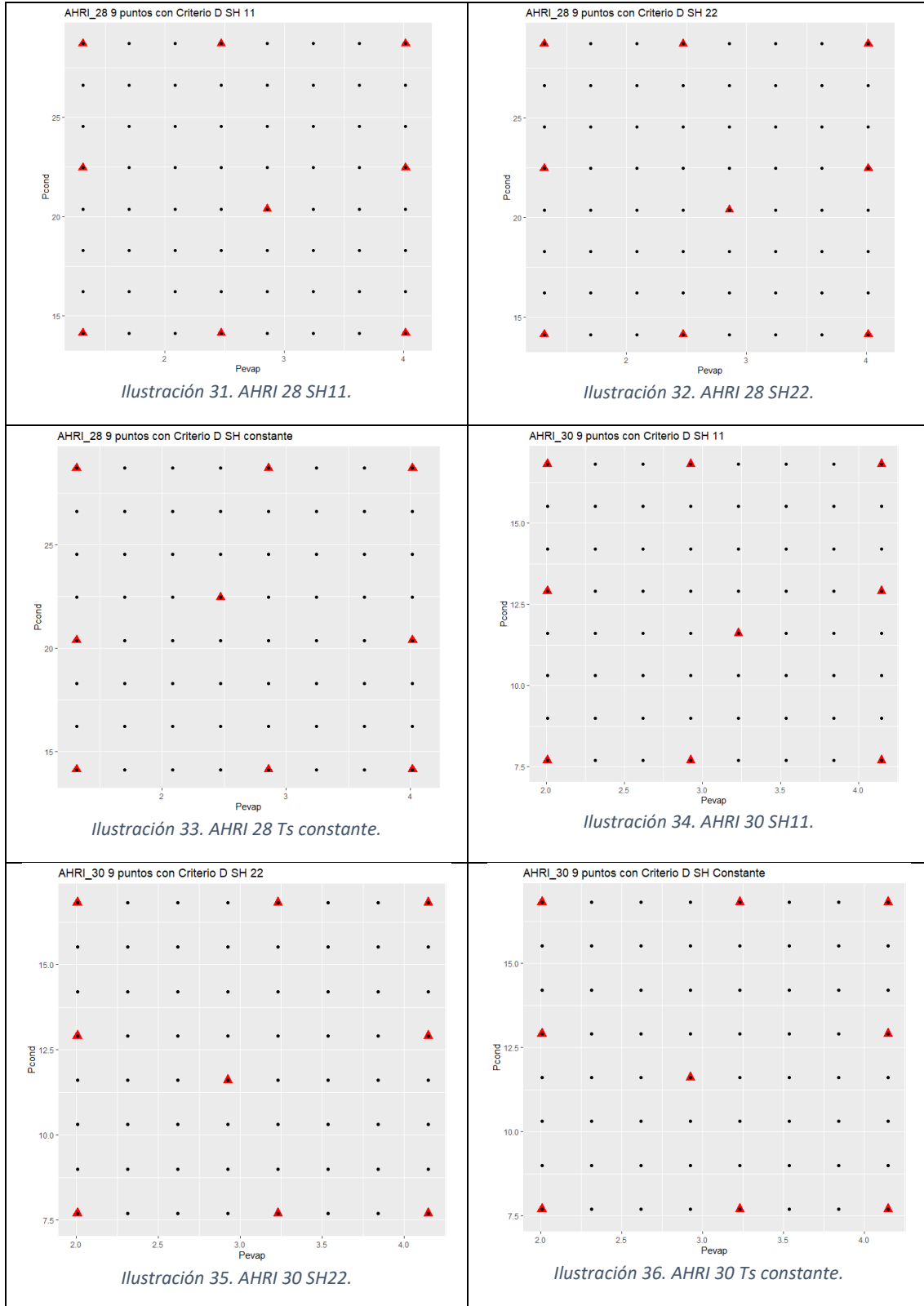
Si se desea ver todos los resultados del análisis de residuos de los distintos compresores diríjase al Anexo 1.

Del análisis realizado podemos concluir que los diseños obtenidos con un total de 9 puntos presentan un bajo error de predicción con una cantidad mínima de puntos, mejorando notablemente los resultados de los diseños experimentales plateados con 7 puntos.



### 7.2.4 Situación de los puntos

Habiendo determinado que la cantidad de puntos óptima para caracterizar nuestro compresor es de 9 puntos, vamos a visualizar a modo informativo, donde deberíamos experimentar dentro de nuestra superficie regular. Hemos graficado los 9 puntos que nos ha seleccionado el algoritmo de nuestro mallado de puntos y estos han sido los resultados:



Observando los compresores AHRI 28 y AHRI 30, los cuales disponen de un dominio prácticamente regular, podemos apreciar que la distribución se configura con un punto central, 4 puntos en las esquinas y, otros 4, entre las esquinas de estos.

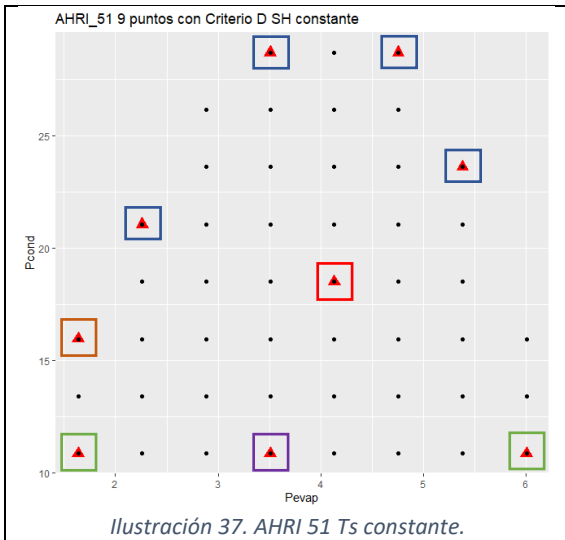


Ilustración 37. AHRI 51 Ts constante.

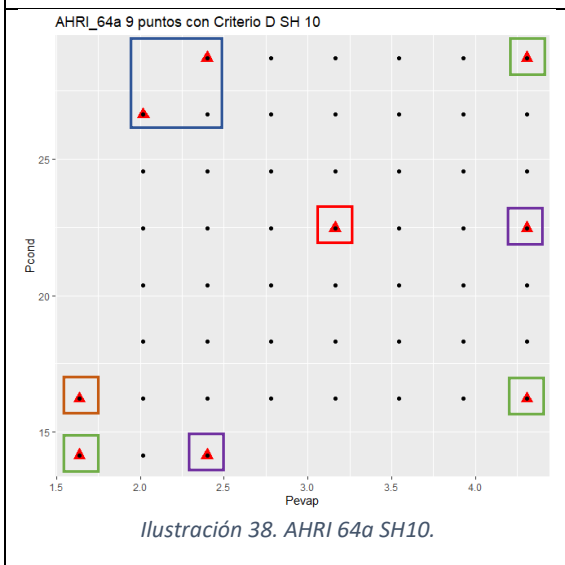


Ilustración 38. AHRI 64a SH10.

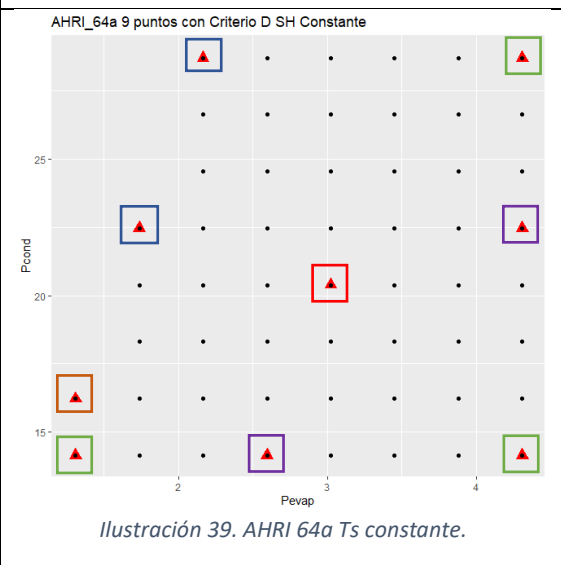
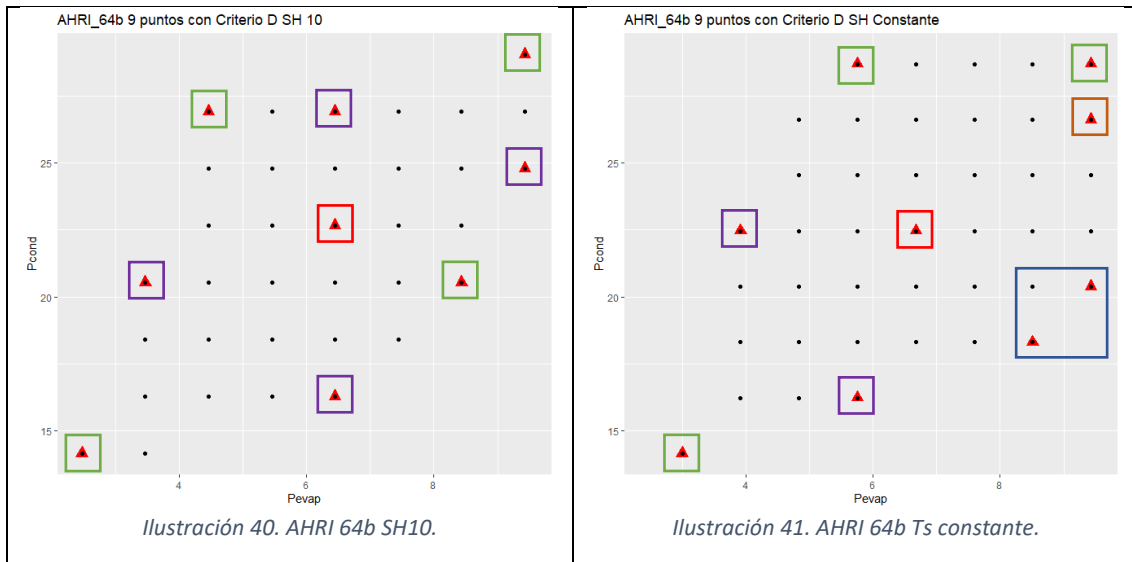


Ilustración 39. AHRI 64a Ts constante.



En el caso del AHRI 51, AHRI 64a y AHRI 64b el resultado es completamente distinto porque dejamos de tener una superficie regular. Lo único que no cambia en ninguno de los compresores es la selección de un punto central como se ha marcado con el recuadro rojo. El resto de puntos varía, aunque siempre sitúa 4 puntos en las esquinas como se observa en los recuadros verdes. Cuando no hay un punto que podamos catalogar como esquina, coge dos puntos colindantes en su lugar como se ha recalcado en el recuadro azul. El resto de puntos son puntos intermedios (recuadros morados), exceptuando a cuando escoge una esquina utilizando dos puntos, entonces coge el punto que sigue a la esquina colindante como se ve con el recuadro naranja.

A modo de conclusión, las ilustraciones dejan claro que la distribución óptima propuesta por el algoritmo de Federov consta de puntos en el perímetro del polígono descrito por el dominio con la adición de puntos centrales.

### 7.2.5 Comparativa entre el modelo de 9 puntos y el modelo TPS

Para ver la eficacia de usar el modelo con 9 puntos vamos a compararlo con el modelo obtenido utilizando todos los puntos del TPS. Para realizar esta comparativa emplearemos el mismo método que utilizamos cuando comparamos los modelos AHRI y AHRI reducido. Por tanto, se volverá a hacer uso del RMSE, el error máximo relativo y el gráfico entre las variables correlacionadas con las medidas experimentalmente.

Hay que tener en cuenta las condiciones de succión de los distintos compresores a la hora de realizar el modelo, por tanto, hemos obtenido los modelos para cada temperatura de succión.

		Modelo 9 puntos				Modelo TPS			
		Consumo		Gasto másico		Consumo		Gasto másico	
		RMSE (W)	Max. error relativo (%)	RMSE (kg/h)	Max. error relativo (%)	RMSE (W)	Max. error relativo (%)	RMSE (kg/h)	Max. error relativo (%)
AHRI 28	SH 11	2.357	1.569	0.08	1.784	2.561	1.715	0.085	3.824
	SH 22	2.222	1.380	0.112	2.587	2.485	1.228	0.111	4.429
	T. succión constante	2.831	1.412	0.133	2.786	3.050	1.441	0.134	4.992
AHRI 30	SH 11	2.113	0.668	0.094	0.62	2.099	0.500	0.093	1.166
	SH 22	1.932	0.556	0.121	0.842	1.880	0.511	0.122	0.986
	T. succión constante	2.086	0.537	0.087	0.656	2.013	0.576	0.087	0.648
AHRI 51	T. succión constante	199.29	3.479	4.853	1.547	211.58	2.647	5.416	1.886
AHRI 64a	SH 10	22.321	2.845	0.398	1.566	20.719	2.377	0.375	1.128
	T. succión constante	14.907	2.344	0.58	3.477	16.333	1.852	0.545	4.064
AHRI 64b	SH 10	20.947	1.833	0.592	1.28	20.245	1.549	0.574	1.026
	T. succión constante	16.006	1.355	1.502	1.549	17.456	1.554	1.527	1.385

Tabla 19. Comparativa del modelo de 9 puntos con el de referencia.

Como se puede concluir después de observar el RMSE y el máximo error relativo, no hay grandes diferencias entre emplear los 9 puntos obtenidos mediante el criterio de optimalidad D y el modelo con todos los puntos del TPS, así que podemos afirmar que el modelo de 9 puntos nos lleva a una correlación de nuestro modelo aceptable.

Si observamos el gráfico de las variables correlacionadas entre ambos modelos los resultados son también muy buenos, en el caso del consumo de los compresores se puede apreciar que los resultados son un poco peores en el modelo de 9 puntos, pero entran dentro un rango

aceptable. El gasto másico, por otro lado, da un resultado inclusive mejor que el consumo. Si se desea ver los gráficos comparativos entre el valor obtenido por el modelo ajustado y el valor experimental, están adjuntados en el *Anexo 2*.

### 7.2.6 Modelos obtenidos

Después de analizar y concluir que el modelo de 9 puntos es el óptimo para realizar una caracterización de nuestro compresor, vamos a ver qué resultados nos ha dado para cada compresor en función de su temperatura de succión.

#### Para el compresor AHRI 28:

- Con sobrecalentamiento constante a 11K

$$W_{comp} = 110.289 + 94.075P_{evap} + 1.143P_{cond} - 1.377 \times 10^{-1}P_{cond}^2 - 12.242P_{evap}^2 + 3.258 P_{evap}P_{cond}$$

$$m_{ref} = -3.86 \times 10^{-1} + 6.671P_{evap} - 9.14 \times 10^{-2}P_{cond} + 2.906 \times 10^{-4}P_{cond}^2 + 2.043 \times 10^{-1}P_{evap}^2 - 44.719 \times 10^{-2}P_{evap}P_{cond}$$

- Con sobrecalentamiento constante a 22K

$$W_{comp} = 117.47 + 88.826P_{evap} + 8.121 \times 10^{-1}P_{cond} - 1.414 \times 10^{-1}P_{cond}^2 - 11.718P_{evap}^2 + 3.42P_{evap}P_{cond}$$

$$m_{ref} = -1.321 + 6.344P_{evap} + 1.638 \times 10^{-2}P_{cond} - 1.97 \times 10^{-3}P_{cond}^2 + 2.524 \times 10^{-1}P_{evap}^2 - 4.498 \times 10^{-2}P_{evap}P_{cond}$$

- Con temperatura de succión constante

$$W_{comp} = 117.543 + 84.769P_{evap} + 9.931 \times 10^{-1}P_{cond} - 1.46 \times 10^{-1}P_{cond}^2 - 11.64P_{evap}^2 + 3.558P_{evap}P_{cond}$$

$$m_{ref} = 8.628 \times 10^{-1} + 6.196P_{evap} - 3.316 \times 10^{-2}P_{cond} - 8.315 \times 10^{-4}P_{cond}^2 + 2.311 \times 10^{-1}P_{evap}^2 - 3.972 \times 10^{-2}P_{evap}P_{cond}$$

#### Para el compresor AHRI 30:

- Con sobrecalentamiento constante a 11K

$$W_{comp} = 148.297 + 141.531P_{evap} + 8.308P_{cond} - 2.313 \times 10^{-1}P_{cond}^2 - 7.353P_{evap}^2 + 3.375 P_{evap}P_{cond}$$

$$m_{ref} = -4.416 + 12.781P_{evap} + 5.506 \times 10^{-2}P_{cond} - 1.314 \times 10^{-2}P_{cond}^2 - 8.596 \times 10^{-2}P_{evap}^2 - 7.369 \times 10^{-2}P_{evap}P_{cond}$$

- Con sobrecalentamiento constante a 22K

$$W_{comp} = 174.523 + 122.812P_{evap} + 7.727P_{cond} - 2.361 \times 10^{-1}P_{cond}^2 - 5.90P_{evap}^2 + 3.82P_{evap}P_{cond}$$

$$m_{ref} = -3.919 + 12.553P_{evap} + 2.252 \times 10^{-2}P_{cond} - 9.654 \times 10^{-3}P_{cond}^2 - 5.65 \times 10^{-2}P_{evap}^2 - 3.076 \times 10^{-2}P_{evap}P_{cond}$$

- Con temperatura de succión constante

$$W_{comp} = 151.684 + 130.747P_{evap} + 9.874P_{cond} - 2.569 \times 10^{-1}P_{cond}^2 - 5.062P_{evap}^2 + 3.124P_{evap}P_{cond}$$

$$m_{ref} = -4.34 + 12.074P_{evap} + 7.323 \times 10^{-2}P_{cond} - 1.36 \times 10^{-2}P_{cond}^2 + 1.053 \times 10^{-1}P_{evap}^2 - 1.207 \times 10^{-2}P_{evap}P_{cond}$$

#### Para el compresor AHRI 51:

- Con sobrecalentamiento constante a 10K

$$W_{comp} = 1374.611 + 2289.876P_{evap} + 374.453P_{cond} - 13.533P_{cond}^2 - 327.976P_{evap}^2 + 144.821P_{evap}P_{cond}$$

$$m_{ref} = -11.552 + 338.400P_{evap} - 6.423P_{cond} + 0.156P_{cond}^2 + 11.317P_{evap}^2 - 3.195P_{evap}P_{cond}$$

#### Para el compresor AHRI 64a:

- Con sobrecalentamiento constante a 10K

$$W_{comp} = 493.838 + 542.52P_{evap} + 13.957P_{cond} - 1.291P_{cond}^2 - 39.246P_{evap}^2 + 14.973P_{evap}P_{cond}$$

$$m_{ref} = 1.516 + 44.419P_{evap} - 1.612P_{cond} + 4.326 \times 10^{-3}P_{cond}^2 + 7.739 \times 10^{-1}P_{evap}^2 - 2.22 \times 10^{-1}P_{evap}P_{cond}$$

- Con temperatura de succión constante

$$W_{comp} = 382.216 + 613.991P_{evap} + 16.905P_{cond} - 1.23P_{cond}^2 - 46.43P_{evap}^2 + 13.226P_{evap}P_{cond}$$

$$m_{ref} = -4.913 + 43.069P_{evap} - 1.364P_{cond} + 5.308 \times 10^{-3}P_{cond}^2 + 9.437 \times 10^{-1}P_{evap}^2 - 2.701 \times 10^{-1}P_{evap}P_{cond}$$

#### Para el compresor AHRI 64b:

- Con sobrecalentamiento constante a 10K

$$W_{comp} = 814.115 + 339.194P_{evap} + 37.089P_{cond} - 1.531P_{cond}^2 - 15.850P_{evap}^2 + 9.254P_{evap}P_{cond}$$

$$m_{ref} = -15.364 + 57.468P_{evap} - 2.895P_{cond} - 1.239 \times 10^{-2}P_{cond}^2 - 3.192 \times 10^{-1}P_{evap}^2 - 5.803 \times 10^{-2}P_{evap}P_{cond}$$

- Con temperatura de succión constante

$$W_{comp} = 566.548 + 367.001P_{evap} + 51.182P_{cond} - 1.405P_{cond}^2 - 12.942P_{evap}^2 + 5.829P_{evap}P_{cond}$$

$$m_{ref} = -25.197 + 49.295P_{evap} - 9.335 \times 10^{-1}P_{cond} - 3.997 \times 10^{-2}P_{cond}^2 + 5.173 \times 10^{-1}P_{evap}^2 - 1.455 \times 10^{-1}P_{evap}P_{cond}$$



### 7.3 Modelo para distintos sobrecalentamientos

En este apartado adicional, vamos a utilizar nuestros dos modelos, el consumo y el gasto másico del compresor ajustado a un nivel sobrecalentamiento, para predecir el comportamiento de nuestro compresor a otro nivel de sobrecalentamiento o temperatura de succión constante. Con ello pretendemos evaluar la eficacia de la corrección a aplicar para cambios en condiciones a succión que plantea la norma.

Lo que conocemos a través de la literatura es que, en el caso del consumo del compresor, no es necesaria ninguna corrección. Sin embargo, en el caso de gasto másico, hay que realizar una corrección intermedia como estableció A. E. Dabiri y C. K. Rice y recoge la normativa AHRI 540. La corrección es la siguiente:

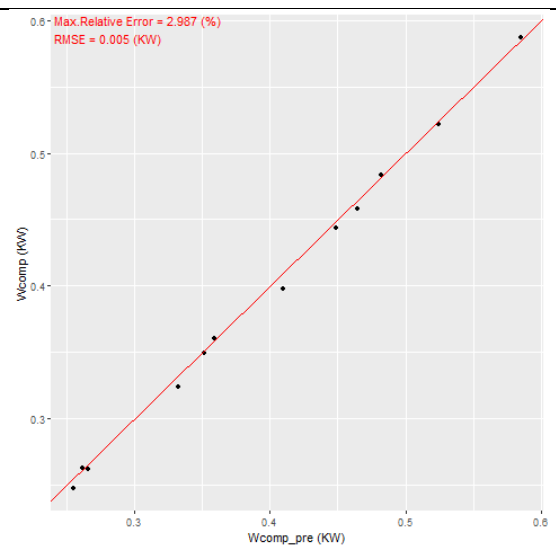
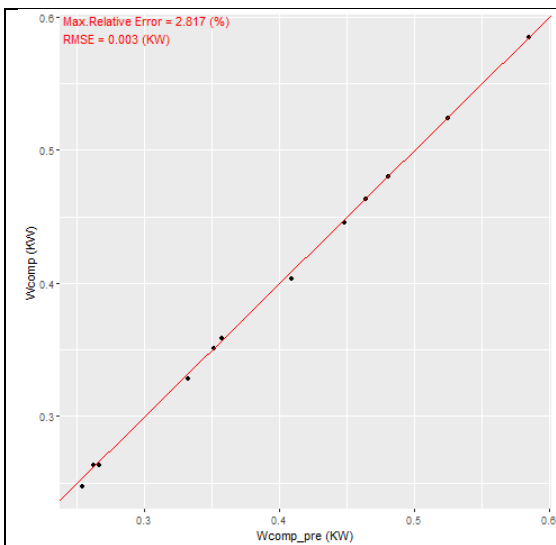
$$\dot{m}_{\text{corrected}} = \{1 + F_v[(v_{\text{rated}}/v_{\text{corrected}}) - 1]\} \cdot \dot{m}_{\text{rated}}$$

Donde:

- $\dot{m}_{\text{corrected}}$  es el gasto másico correlacionado
- $F_v$  es el factor de corrección de la eficiencia volumétrica, que en nuestro caso es 0.75
- $v_{\text{rated}}$  corresponde con el volumen específico del mismo punto bajo el modelo obtenido con el sobrecalentamiento previo
- $v_{\text{corrected}}$  es el volumen específico del punto con el sobrecalentamiento objetivo
- $\dot{m}_{\text{rated}}$  es el gasto másico del mismo bajo el modelo obtenido con el sobrecalentamiento previo

Evidentemente no hemos podido probar el compresor AHRI 51 por no disponer de análisis con diferentes temperaturas de succión. Los compresores AHRI 28 y AHRI 30 se ha usado el modelo de 9 puntos con sobrecalentamiento de 11.11K para caracterizarlo con 22.22K y temperatura de succión constante a 18.3°C. Por otro lado, para los compresores AHRI 64a y AHRI 64b se ha usado el modelo con un sobrecalentamiento de 10K para caracterizar a temperatura de succión constante a 20°C.

#### AHRI 28





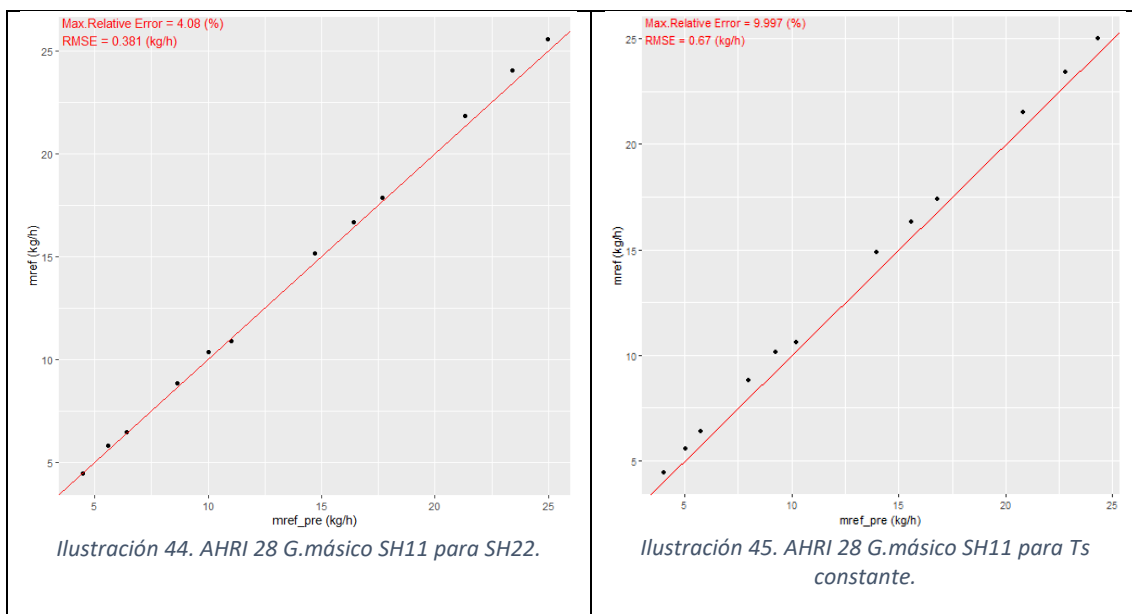
En estas ilustraciones comparamos los valores de consumo del compresor AHRI 28 con 9 puntos y una temperatura de succión constante a 11K para caracterizarlo en las otras dos condiciones de succión y los hemos comparado con los valores experimentales originales del informe AHRI.

Se puede apreciar en las imágenes que los puntos están situados, prácticamente, sobre la línea diagonal roja y los valores de RMSE y Max. Relative Error son bajos queriendo decir que el modelo de regresión funciona perfectamente para distintas temperaturas de succión.

Podemos afirmar entonces que el modelo de consumo ajustado a un sobrecalentamiento puede ser usado para realizar una predicción del consumo con cualquier otra condición de succión en compresores de pistón.

En el caso del gasto másico el resultado es el siguiente:

### AHRI 28



Como se puede observar, en el caso del AHRI 28, cuando buscamos modelizar bajo temperatura de succión constante, los puntos no yacen sobre la línea roja que indicaría una regresión perfecta. Ocurre lo mismo para el AHRI 30. Esta pequeña desviación no es capaz de corregirla la corrección de Dabiri. Pese a todo, los resultados son buenos.

Podemos afirmar, en conclusión, que, aplicando la corrección de Dabiri somos capaces de predecir el comportamiento del gasto másico con unas condiciones de succión distintas a las del ajuste del modelo original para compresores de pistón.

## 8. Conclusiones

Después del análisis se puede concluir que, de los 4 modelos planteados inicialmente, el que recomendamos usar, en el caso de los compresores de pistón, es el modelo de Shao bajo un dominio de presiones. Su configuración es la siguiente:

$$W_{comp} = k_0 + k_1 P_{evap} + k_2 P_{cond} + k_3 P_{evap} P_{cond} + k_4 P_{evap}^2 + k_5 P_{cond}^2$$
$$m_{ref} = k'_0 + k'_1 P_{evap} + k'_2 P_{cond} + k'_3 P_{evap} P_{cond} + k'_4 P_{evap}^2 + k'_5 P_{cond}^2$$

*Ecuación 15. Polinomio de Shao en dominio de presiones.*

En el apartado de selección de puntos, hemos podido determinar que lo más eficiente es usar 9 puntos puesto que un aumento de puntos no mejora de forma significativa la predicción del modelo. La ubicación de los mismo se realiza de manera automática mediante:

- Selección de puntos candidatos dentro del dominio experimental (mallado fino de puntos). Ubicación en coordenadas  $P_{evap}$  y  $P_{cond}$ .
- Informe de la expresión polinomial del modelo a aplicar. No es necesario valor de coeficientes, únicamente la forma del funcional (términos lineales, interacciones, etc).
- Aplicación del algoritmo de Federov con el criterio de optimalidad D para una selección de 9 puntos.

Por último, hemos utilizado un modelo con un sobrecalentamiento constante para predecir el comportamiento del compresor a otras condiciones de succión distintas. En el caso del consumo, los datos obtenidos son muy buenos, por tanto, obteniendo un modelo con unas características de succión concretas podríamos caracterizar para cualquier condición de succión.

En el caso del gasto másico, el modelo requiere realizar la corrección de Dabiri incluida en la normativa. Tras analizar los resultados podemos concluir que dicha corrección funciona obteniendo buenos resultados para todo el conjunto de datos y compresores analizados.

## 9. Bibliografía

- AHRI-540. (2020). *Performance Rating of Positive Displacement Refrigerant Compressors AHRI Standard 540*.
- Atkinson, A. C. (2015). Optimal Design. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, 1–17. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat04090.pub2>
- Calomarde Herrero, A., Navarro Peris, E., & Marchante Avellaneda, J. (2019). *Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores de pistón dentro del campo de la refrigeración comercial*.
- Chatfield, C., Zidek, J., Columbia, B., Pole, A., West, M., & Harrison, J. (2002). CHAPMAN & HALL / CRC Texts in Statistical Science Series Series Editors. In *New York*.
- Corberan, J. M., Marchante-avellaneda, J., Navarro-Peris, E., & Shrestha, S. S. (2021). A critical analysis of the characterization of scroll compressors mass flowrate. *10th IIR Conference on Compressors and Refrigerants, January*, 6–8. <https://doi.org/10.18462/iir.compr.2021.0415>
- European Commission. (2016). An EU strategy on heating and cooling 2016. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Marchante-avellaneda, J., Corberan, J. M., Navarro-peris, E., Shrestha, S. S., & Information, C. (2021). *A critical analysis of the characterization of scroll compressors energy consumption Universitat Politècnica de València , Institute for Energy Engineering , Energy and Transportation Science Division , Oak Ridge National Laboratory , Contact Information . 1–11*.
- Marchante Avellaneda, J., Navarro Peris, E., & Corberán, J. M. (2020). Comparación y selección de diseños experimentales óptimos para compresores scroll: herramientas estadísticas para conformar las matrices de ensayo. *179*, 1–7.
- Ródenas Cantó, L., Navarro Peris, E., & Marchante Avellaneda, J. (2019). *Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores de pistón dentro del campo de la refrigeración comercial*.
- Shao, S., Shi, W., Li, X., & Chen, H. (2004). Performance representation of variable-speed compressor for inverter air conditioners based on experimental data. *International Journal of Refrigeration*, 27(8), 805–815. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.02.008>
- Tiefenbach, F. (2008). Design of Experiments The D-Optimal Approach and Its Implementation As a Computer Algorithm. In *Prikladnaya Mekhanika* (Vol. 1, Issue 1). South Westphalia University of Applied Sciences.

**2º Documento:  
PRESUPUESTO**

## Índice del presupuesto

1. Objeto.....	62
2. Presupuesto parcial.....	62
2.1 Coste del personal.....	62
2.2 Coste del material inventariable.....	66
3. Coste total.....	67

## 1. Objeto

El objeto de este documento es presupuestar el coste de la realización de este proyecto. Se explicará, punto por punto, las distintas partidas de gasto y la justificación de los precios utilizados. Los costes parciales representan, de forma íntegra, el coste total del proyecto y se recoge en un presupuesto global.

Para realizar este proyecto no se ha necesitado de materiales fungibles, dietas o viajes, subcontrataciones u otros gastos de distinta índole, por lo que solo se ha analizado el coste del personal y el coste del material inventariable.

El último apartado está dedicado al presupuesto total del proyecto donde, a lo señalado previamente, se le añade el Impuesto sobre el Valor Añadido (I.V.A) que actualmente se encuentra en el 21% en carácter general.

## 2. Presupuesto parcial

### 2.1 Coste del personal

El personal involucrado, es decir, la mano de obra directa (m.o.d), para elaboración de este proyecto consta de un profesor de universidad titulado, un investigador predoctoral y un becario. Para estimar el coste de este apartado contamos con el número de horas dedicadas en reuniones y, además, en el caso del becario, el tiempo necesario de investigación, de realización de cálculos y de creación del documento.

El coste salarial bruto anual de cada uno de ellos se ha obtenido del documento proporcionado por la Universitat Politècnica de València para la elaboración de presupuestos y se ha dividido por el número de horas laborales al año.

$$\text{Días previstos de trabajo} = 365 - (2 \times 48 + 15) - 31 - 5 = 218$$

$$\text{Horas previstas de trabajo} = 218 \times 8 = 1744$$

*Ecuación 1. Cálculo de horas de trabajo anuales.*

Donde:

- 365 corresponde con el número de días de un año no bisiesto.
- $(2 \times 48 + 15)$  corresponde al número de días de fines de semana y festivos
- el 31 a las vacaciones
- 5 a los días de licencia o enfermedad y 8 por el número máximo de horas de trabajo al día.

Para calcular el coste real del trabajador a la empresa, hay que tener en cuenta las cotizaciones a la seguridad social. Dependiendo de si es un contrato o un convenio encontramos tipos distintos.

Las bases y los tipos de cotización vigentes de los contratos de trabajo para el año 2021 son los siguientes:

- Por contingencias comunes: 23.60 %
- Desempleo: 5.50 %
- FOGASA: 0.2%
- Formación Profesional: 0.6%

En el caso de los convenios de formación para becarios encontramos un coste fijo mensual distribuido entre los siguientes conceptos:

- Por contingencias comunes: 42.56 €
- Desempleo: 57.75 €
- Fondo de Garantía Salarial (FOGASA): 3.23 €
- Por accidentes de Trabajo y Enfermedades Profesionales: 5.85 €

El sueldo anual bruto de cada uno de ellos es el siguiente:

<i>Concepto</i>	<i>Unidad</i>	<i>Coste</i>
<i>Salario bruto anual</i>	€/año	68016
<i>Comunes</i>	€/año	16051.78
<i>Desempleo</i>	€/año	3740.88
<i>FOGASA</i>	€/año	136.03
<i>Formación profesional</i>	€/año	408.10
<i>Total</i>	€/año	88352.79

Tabla 1. Sueldo anual bruto de un profesor titular.

<i>Concepto</i>	<i>Unidad</i>	<i>Coste</i>
<i>Salario bruto anual</i>	€/año	43582.56
<i>Comunes</i>	€/año	10285.48
<i>Desempleo</i>	€/año	2397.04
<i>FOGASA</i>	€/año	87.17
<i>Formación profesional</i>	€/año	261.50
<i>Total</i>	€/año	56613.75

Tabla 2. Sueldo anual bruto de un investigador predoctoral.

<i>Concepto</i>	<i>Unidad</i>	<i>Coste</i>
<i>Salario bruto anual</i>	€/año	18508.29
<i>Comunes</i>	€/mes	42.56
<i>Desempleo</i>	€/mes	57.75
<i>FOGASA</i>	€/mes	3.23
<i>Accidentes de trabajo</i>	€/mes	5.85
<i>Total</i>	€/año	19820.97

Tabla 3. Sueldo anual bruto de un becario.

Ahora procedemos a calcular, a partir del coste anual, el coste por hora de cada uno de los trabajadores.

$$P. \text{ hora profesor titular} = 88352.79 \frac{\text{€}}{\text{año}} \div 1744 \frac{\text{horas lab.}}{\text{año}} = 50.66 \text{ €/hora}$$

$$P. \text{ hora I. predoctoral} = 56613.75 \frac{\text{€}}{\text{año}} \div 1744 \frac{\text{horas lab.}}{\text{año}} = 32.46 \text{ €/hora}$$

$$\text{Becario} = 19820.97 \frac{\text{€}}{\text{año}} \div 1744 \frac{\text{horas lab.}}{\text{año}} = 11.37 \text{ €/hora}$$

*Ecuación 2. Cálculo salario por hora.*

El proyecto ha tenido una duración aproximada de unos 4 meses con una reunión de media con el profesor titulado superior para seguir sus indicaciones y tener una evaluación continua del trabajo realizado. La duración media de las reuniones fue de 2 horas. Además, también evaluó la redacción del proyecto con un coste en tiempo aproximado de 8 horas.

Con respecto al profesor titular, hubo una reunión inicial de 2 horas y una evaluación del proyecto durante la parte final del mismo.

<i>Referencia</i>	<i>Oficio</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
<i>MOD 1</i>	Profesor titular	h.	10	50.66	506.60
<i>MOD 2</i>	Investigador predoctoral	h.	40	32.46	1298.40
<i>MOD 3</i>	Becario	h.	700	11.37	7959
<i>Total m.o.d</i>					<i>9764 €</i>

*Tabla 4. Total coste del personal.*



Referencia	Trabajo	Profesional	Ud.	Cantidad	Precio	Parcial
<b>1</b>	<b>Estudios previos</b>					
1.1	Familiarización con Rstudio	Becario	h	8	11.37	90.96
1.2	Búsqueda bibliográfica	Becario	h	63	11.37	716.31
1.3	Familiarización código R	Becario	h	8	11.37	90.96
<b>2</b>	<b>Estudio teórico</b>					
2.1	Comprobación de los algoritmos encontrados	Becario	h	35	11.37	397.95
2.2	Adecuación de los datos	Becario	h	4	11.37	45.48
2.3	Simulación de modelos	Becario	h	120	11.37	1364.4
2.4	Análisis de los resultados	Becario	h	30	11.37	341.1
<b>3</b>	<b>Reuniones</b>					
3.1	Reuniones Becario	Becario	h	32	11.37	363.84
3.2	Reuniones investigador predoctoral	Investigador predoctoral	h	32	32.46	1038.72
3.3	Reuniones profesor titular	Profesor titular	h	2	50.66	101.32
<b>4</b>	<b>Revisiones</b>					
	Revisión Investigador predoctoral	Investigador predoctoral	h	8	32.46	259.68
	Revisión profesor titular	Profesor titular	h	8	50.66	405.28
<b>5</b>	<b>Redacción del proyecto</b>					
5.1	Redacción y elaboración	Becario	h	400	11.37	4548
					Total	9764

Tabla 5. Desglose de horas.

## 2.2 Coste del material inventariable

En este apartado se estimará el coste de los equipos que se hayan usado durante el proyecto, teniendo en cuenta su amortización y tiempo de uso. En este caso, se ha usado un ordenador de sobremesa con 8gb de RAM DDR3 en dual-channel, el procesador i5-4690 de Intel, una placa base con el chipset H-81, fuente de alimentación seasonic plus bronze de 550W y una caja NOX Hummer y acompañado, como periféricos, por una pantalla Full HD de Samsung, un teclado y un ratón. El coste de este equipo asciendo a los 750€

Además del ordenador de mesa, se ha empleado un portátil destinado a ofimática para la redacción del documento. Consta de un i5 de octava generación de Intel, 8gb de RAM y una pantalla full HD cuyo coste es de 699€.

Como el software empleado es de código abierto, no hay ningún coste asociado. Sin embargo, la licencia de Windows 10 sí tiene un coste, pero como es proporcionada por la universidad no se ha añadido.

Para calcular su amortización se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$\frac{A}{B} \times C \times D$$

*Ecuación 3. Fórmula amortización.*

Donde A es el número de horas que el equipo se va a usar en el proyecto, B es su periodo de amortización (obtenido de las tablas del documento de la UPV), C es el coste del equipo y D es el porcentaje de uso del equipo en el proyecto.

Para equipos informáticos, como es nuestro caso, el periodo de amortización es de 4 años. De esos 4 años, la cantidad de horas laborales son:

$$\text{Periodo de amortización} = 4 \text{ años} \times 218 \times \frac{\text{días}}{\text{año}} \times 8 \text{ horas} = 6976 \text{ horas}$$

*Ecuación 4. Cálculo del periodo de amortización.*

Donde:

- 218 corresponde al número de días laborales al año.
- 8 el número de horas que dura una jornada laboral completa.

Referencia	Equipo	Tiempo de uso (horas)	Periodo de amortización (horas)	Coste del equipo (€)	Porcentaje de uso (%)	Parcial
CMI 1	Ordenador de sobremesa	700	6976	750	70	52.68
CMI 2	Portátil	700	6976	699€	30	21.04
					Total	73.72 €

*Tabla 6. Coste del material inventariable.*

### 3. Coste total

Para el coste total del proyecto se ha tenido en cuenta unos gastos extra del 15% por gastos de papelería u otra miscelánea, además del IVA (Impuesto sobre el Valor Añadido) que actualmente se encuentra en el 21%.

<i>Concepto</i>	<i>Parcial</i>	<i>Total</i>
<i>Personal</i>	9764	
<i>Material inventariable</i>	73.72	
		9837.72
<i>Gastos extra (15%)</i>	1475.66	
	Sin IVA	11313.38
	Con IVA (21%)	13689.19 €

*Tabla 7. Coste total del proyecto.*

El coste total del proyecto asciende a:

**# ONCE MIL SEISCIENTOS OCHENTA Y NUEVE EUROS CON DIECINUEVE CÉNTIMOS #**

**3º Documento:**  
**PLIEGO DE CONDICIONES**

## Índice del pliego de condiciones

1. Objeto.....	70
2. Condiciones de la ejecución .....	70
2.1 Obtención de los datos .....	70
2.2 Análisis.....	74
2.2.1 Elección del modelo .....	74
2.2.2 Obtención del número de puntos .....	76
2.2.3 Predicción del compresor con condiciones de succión distintas a las del modelo ....	80

## 1. Objeto

En este documento pasaremos a ver los procesos empleados durante la elaboración de este trabajo.

Para ellos hemos subdividido este documento en dos partes, en el primero detallaremos la procedencia de los datos empleados y su consecuente tratamiento para la obtención de un mallado fino de puntos que sea representativo de nuestro dominio experimental del compresor. En el segundo utilizaremos estos dominios para realizar todos los análisis posteriores.

## 2. Condiciones de la ejecución

### 2.1 Obtención de los datos

Lo primero que necesitamos son datos experimentales de un compresor que nos abarque todo el dominio experimental del mismo. Los datos han sido obtenidos del instituto AHRI publicados en su página web [ahrinet.org](http://ahrinet.org) y de acceso libre. En estos documentos realizan una serie de ensayos en el que comparan un refrigerante que como característica principal es su menor GWP (Global-warming Potencial) con uno de los refrigerantes de diseño. En nuestro caso hemos cogido el refrigerante de diseño del compresor y le hemos hecho una regresión no paramétrica para obtener un mallado fino de puntos como se comentó en la memoria.

Para realizar esta interpolación hemos programado una función en el programa Rstudio en lenguaje R y el paquete `fields` con la siguiente forma:

```
>Thin_plate_regression = function(df_model, npoints_side = 10,
extrapolate = F){
>  as.numeric.factor <- function(x) {as.numeric(levels(x))[x]}
>  output<-list()
>  pacman::p_load(fields)
  #Sección de código con generación de malla regular aplicando
raster e interpolación tipo kriging
  #Librerías necesarias
  #raster --> Mallado regular aplicando dominio geolocalizado.
División en retícula x e y asignando medidas para lados de
retícula y asignación de calores z a retícula
  #sp y rgdal --> librerías adicionales de entornos
geolocalizados para definición de punto, líneas y polígonos.
  #fields --> librería con interpolación tipo kriging o tps. Se
aplican funciones Tps() e interpolate().
  # datos experimentales que se utilizarán en el modelo
>  df_model
>  variable_names<-names(df_model)
```

```

# Modelo tipo Tps (Thin plate regression). Regresión no-
paramétrica parecida al kriging
> tps = Tps(df_model[, 1:2], df_model[, 3])
# Rangos x y según niveles para realizar la interpolación

> rangeX = range(df_model[, 1])
> rangeY = range(df_model[, 2])
> vec_x<-seq(from = rangeX[1]+1E-6, to = rangeX[2]-1E-6,
length.out = npoints_side)
> vec_y<-seq(from = rangeY[1]+1E-6, to = rangeY[2]-1E-6,
length.out = npoints_side)
# valores de z para el grid de x e y
> model_prediction<-predictSurface(object = tps, grid.list =
data.frame(x = vec_x, y = vec_y), extrap = extrapolate)
> z_matrix<-model_prediction[[8]] ; dimnames(z_matrix) = list(x
= vec_x, y = vec_y)
> predict_grid<-as.data.frame.table(x = z_matrix) ;
names(predict_grid)<-c('x', 'y', 'z')
> predict_grid<-data.frame(x =
as.numeric.factor(predict_grid$x), y =
as.numeric.factor(predict_grid$y), z = predict_grid$z) ;
names(predict_grid)<-variable_names
> predict_grid<-predict_grid[!is.na(predict_grid[,3]) ,]
#Objeto de salida. Se guarda el modelo Tps (objeto Tps) y la
predicción del grid (data.frame(x, y, z))
output[[1]]<-tps
output[[2]]<-predict_grid
attributes(output)$names<-c('Model', 'Predicted_grid')
return(output)
}

```

Una vez obtenida la función debemos cargar los datos de los informes, para ello hemos volcado los datos de los informes en un Excel y los hemos clasificado de manera individual asignándole

a cada condición de succión un número para poder diferenciarlos como podemos ver en el siguiente ejemplo:

id	Pevap	Pcond	Tevap	Tcond	SH	Wcomp	mref
1	4.01741086	14.143838	-12	30	11.1	0.464	26.02
1	3.00191603	14.143838	-20	30	11.1	0.4065	18.26
1	2.02232102	14.143838	-30	30	11.1	0.3305	11.32
1	1.30974923	14.143838	-40	30	11.1	0.2642	6.69
1	4.01741086	20.4432559	-12	45	11.1	0.5258	24.29
1	3.00191603	20.4432559	-20	45	11.1	0.4473	16.96
1	2.02232102	20.4432559	-30	45	11.1	0.3519	10.45
1	1.30974923	20.4432559	-40	45	11.1	0.2648	5.82
1	4.01741086	28.7105553	-12	60	11.1	0.5835	22.13
1	3.00191603	28.7105553	-20	60	11.1	0.4811	15.39
1	2.02232102	28.7105553	-30	60	11.1	0.3649	9.03
1	1.30974923	28.7105553	-40	60	11.1	0.2525	4.54
2	4.01741086	14.143838	-12	30	22.2	0.463	25.61
2	3.00191603	14.143838	-20	30	22.2	0.4031	17.9
2	2.02232102	14.143838	-30	30	22.2	0.3282	10.91
2	1.30974923	14.143838	-40	30	22.2	0.2629	6.49
2	4.01741086	20.4432559	-12	45	22.2	0.5236	24.09
2	3.00191603	20.4432559	-20	45	22.2	0.4454	16.69
2	2.02232102	20.4432559	-30	45	22.2	0.3512	10.36
2	1.30974923	20.4432559	-40	45	22.2	0.2628	5.81
2	4.01741086	28.7105553	-12	60	22.2	0.5848	21.84
2	3.00191603	28.7105553	-20	60	22.2	0.4805	15.18
2	2.02232102	28.7105553	-30	60	22.2	0.3587	8.84
2	1.30974923	28.7105553	-40	60	22.2	0.2468	4.46
3	4.01741086	14.143838	-12	30	30.3	0.4584	25.01
3	3.00191603	14.143838	-20	30	38.3	0.3981	17.4
3	2.02232102	14.143838	-30	30	48.3	0.3244	10.59
3	1.30974923	14.143838	-40	30	58.3	0.263	6.39
3	4.01741086	20.4432559	-12	45	30.3	0.5218	23.39
3	3.00191603	20.4432559	-20	45	38.3	0.4439	16.33
3	2.02232102	20.4432559	-30	45	48.3	0.3495	10.15
3	1.30974923	20.4432559	-40	45	58.3	0.2619	5.58
3	4.01741086	28.7105553	-12	60	30.3	0.587	21.49
3	3.00191603	28.7105553	-20	60	38.3	0.4836	14.88
3	2.02232102	28.7105553	-30	60	48.3	0.3605	8.79
3	1.30974923	28.7105553	-40	60	58.3	0.2474	4.41

Tabla 20. Informe AHRI 28.

A la temperatura de succión 11.1K le hemos asignado el número 1, a la 22.2K el 2 y, en el caso de temperatura de succión constante a 18.3°C el número 3.

Para cargar los datos en el Rstudio hemos empleado el paquete `openxlsx()` para obtener el data frame y el paquete `stringr()` para poder juntar líneas de caracteres. En función de si



queremos utilizar un modelo con dominio de presiones y temperaturas seleccionaremos, evidentemente, unas columnas u otras. En el siguiente ejemplo hemos cargado el compresor AHRI 28 y hemos creado distintos data frames en función del modelo que vayamos a emplear y la condición de succión bajo la que vamos a caracterizar:

```
#Previamente se creará la variable COMPRESOR con el nombre del
archivo del informe. En nuestro caso la variable COMPRESOR es
AHRI_28 porque es como hemos identificado al informe.
```

```
>df <- as.data.frame(read_excel(str_c("../data/Datos a
revisar/",COMPRESOR,".xlsx")))
```

```
>id=1
```

```
>df1 <- df[df$id==id, c( 'mref','Wcomp','Pevap', 'Pcond')]
```

```
>df3 <- df[df$id==id, c( 'mref','Wcomp','Tevap', 'Tcond')]
```

El siguiente paso es aplicar el modelo de regresión no paramétrico a estos data frames para obtener el mallado fino de puntos.

```
source("funciones a usar/Thin_plate_regression.R")
```

```
df_tps_Wcomp<-Thin_plate_regression(df_model =
df1[,c('Pevap','Pcond','Wcomp')], npoints_side =
20)$Predicted_grid
```

```
df_tps_mref<-Thin_plate_regression(df_model =
df1[,c('Pevap','Pcond','mref')], npoints_side =
20)$Predicted_grid
```

```
df_tps_1 <- cbind(mref=df_tps_mref$mref,df_tps_Wcomp)
```

En npoints\_side hemos puesto 20 correspondiente al número de subdivisiones por eje que realiza el mallado, por tanto al tener 20 por cada eje, generaremos un total de 400 puntos.

Con este paso realizado ya podemos proceder con el análisis.

## 2.2 Análisis

En este apartado veremos cómo se ha realizado las 3 partes correspondientes al análisis. La primera parte corresponde con la comparación de los 4 modelos que disponemos para caracterizar nuestros compresores, en el segundo la cantidad de puntos necesaria para la aplicación de diseños óptimos y, por último, como hemos empleado los modelos obtenidos para representar el compresor con distintas características de succión.

### 2.2.1 Elección del modelo

Lo primero de todo será realizar el modelado mediante el data frame del TPS gracias a la función `lm()` la cual viene de serie con Rstudio.

```
#Resolución lineal trabajo del compresor con AHRI
```

```
>Model1P=lm(data=df_tps_1, formula=Wcomp ~ Pevap + Pcond +  
Pevap:Pcond + I(Pcond^2) + I(Pevap^2)+ I(Pcond^3) + I(Pevap^3) +  
(I(Pevap^2):Pcond) + (Pevap:I(Pcond^2)))
```

```
#Resolución lineal gasto másico del compresor con AHRI
```

```
>Model2P=lm(data=df_tps_1, formula=mref ~ Pevap + Pcond +  
Pevap:Pcond + I(Pcond^2) + I(Pevap^2)+ I(Pcond^3) + I(Pevap^3) +  
(I(Pevap^2):Pcond) + (Pevap:I(Pcond^2)))
```

Ahora que ya tenemos nuestro modelo podemos utilizar la función `predict()`, también de serie de Rstudio, para obtener los valores de consumo y gasto másico en los puntos originales de los informes de la siguiente manera:

```
#Insertamos la columna predicha de Wcomp en el data frame
```

```
>df1$Wcomp_corr<- predict(Model1P, newdata=df1)
```

```
#Insertamos la columna predicha de gasto másico en el data frame
```

```
>df1$mref_corr<- predict(Model2P, newdata=df1)
```

Ahora vamos a utilizar una función que hemos preprogramado que nos proporciona un gráfico de correlación junto con los valores de error máximo relativo y error cuadrático medio. La función tiene la siguiente forma:

```
>Correlation_graph = function (x_predicted, y_experimental ,  
name_x = 'x', name_y = 'y', units_xy = '-') {
```

```
> pacman::p_load(Metrics)
```

```
> df<-data.frame(x = x_predicted, y = y_experimental)
```

```

> Max_relative_error<-max(100*(abs(df$x-df$y)/df$y))

> RMSE<-rmse(actual = df$y, predicted = df$x)

> p<-ggplot(data = df, aes(x = x, y = y)) +
>   geom_point() +
>   geom_abline(intercept = 0, slope = 1, colour = 'red') +
>   labs( x = paste0(name_x, ' (', units_xy, ')'), y =
paste0(name_y, ' (', units_xy, ')'))+
annotate(geom = 'text', x = -Inf, y = Inf, hjust = 0, vjust = 1,
colour = 'red',
        label = paste0(' Max.Relative Error = ',
                        round(Max_relative_error, 3),
                        ' (%)\\n',
                        ' RMSE = ',
                        round(RMSE, 3),
                        ' (',
                        units_xy,
                        ')')
        ))
> return(p)
}

```

Ahora simplemente utilizamos la función comparando los valores proporcionados por el modelo y los valores originales de la siguiente manera:

```

>Correlation_graph(df1$Wcomp_corr,df1$Wcomp,"Wcomp_pre","Wcomp",
"KW")

```

Ahora replicamos este proceso para los otros 3 modelos y para cada compresor. Lo que restaría sería comparar los 4 modelos como se indica en la memoria.

### 2.2.2 Obtención del número de puntos

Para realizar este paso decir que, en el apartado anterior, gracias al análisis, hemos determinado que el funcional del modelo que vamos a emplear, para lo que queda de este apartado, es el funcional de grado dos con dominio de presiones.

Ahora procederemos a aplicar la función `optFederov()` del paquete `AlgDesign` con el objetivo de obtener una selección de puntos lógica que cumpla con lo detallado y su consecuente modelo. Para ello volvemos a partir del TPS obtenido previamente de la siguiente manera:

```
> l_Federov<-list()
>l_Model1 <- list()
>l_Model2 <- list()
>l_seleccion <- list()
>for(i in c(7,9,11,13,15,17,19,21)){
  >l_seleccion[[paste0("points", i)]]<-optFederov(~Pevap + Pcond
+ Pevap:Pcond + I(Pevap^2) + I(Pcond^2),
          data = df_tps,
          nTrials = i,
          criterion = 'D'
  )$design
  #Resolución lineal trabajo del compresor con AHRI reducido
  >l_Model1[[paste0("points",
i)]] = lm(data=l_seleccion[[paste0("points", i)]], formula=Wcomp ~
Pevap + Pcond + Pevap:Pcond + I(Pcond^2) + I(Pevap^2))

  #Resolución lineal gasto másico del compresor con AHRI reducido
  >l_Model2[[paste0("points",
i)]] = lm(data=l_seleccion[[paste0("points", i)]], formula=mref ~
Pevap + Pcond + Pevap:Pcond + I(Pcond^2) + I(Pevap^2))

  #Insertamos la columna predicha de Wcomp en el data frame
  >l_Federov[[paste0("points", i)]] <- df1
  >l_Federov[[paste0("points",
i)]]$Wcomp_corr=predict(l_Model1[[paste0("points", i)]],
newdata=df1)
```

```

    >l_Federov[[paste0("points",
i)]]$mref_corr=predict(l_Model2[[paste0("points",
newdata=df1)
}

```

#Resolución lineal trabajo del compresor con AHRI reducido

```

>l_Model1[["Li"]]=lm(data=df_tps, formula=Wcomp ~ Pevap + Pcond +
Pevap:Pcond + I(Pcond^2) + I(Pevap^2))

```

#Resolución lineal gasto másico del compresor con AHRI reducido

```

>l_Model2[["Li"]]=lm(data=df_tps, formula=mref ~ Pevap + Pcond +
Pevap:Pcond + I(Pcond^2) + I(Pevap^2))

```

```

>l_Federov[["Li"]] <- df_tps

```

```

>l_Federov[["Li"]]$Wcomp_corr=predict(l_Model1[["Li"]],
newdata=df_tps)

```

```

>l_Federov[["Li"]]$mref_corr=predict(l_Model2[["Li"]],
newdata=df_tps)

```

Para realizar un análisis de residuos debemos obtener la diferencia entre los valores predichos por el modelo y los valores originales del informe, para ellos vamos a hacer lo siguiente:

```

>for(i in c(7,9,11,13,15,17,19,21)){

```

```

> l_Federov[[paste0("points", i)]]$fitted <- l_Federov[[paste0("points", i)]]$Wcomp-
l_Federov[[paste0("points", i)]]$Wcomp_corr

```

```

> l_Federov[[paste0("points", i)]]$fitted2 <- l_Federov[[paste0("points", i)]]$mref-
l_Federov[[paste0("points", i)]]$mref_corr

```

```

}

```

Para obtener el gráfico correspondiente con el consumo y el gasto másico hemos empleado este bucle:

```

>for(i in c(7,9,11,13,15,17,19,21)){

```

```

    >RMSE1<-rmse(actual = l_Federov[[paste0("points", i)]]$Wcomp,
predicted =l_Federov[[paste0("points", i)]]$Wcomp_corr)

```

```

    >Mean_relative_error1<-
mean(100*(abs(l_Federov[[paste0("points",
l_Federov[[paste0("points",
i)]]$Wcomp)/l_Federov[[paste0("points", i)]]$Wcomp))

```

```

>Max_relative_error1<-max(100*(abs(l_Federov[[paste0("points",
i)]$Wcomp_corr-l_Federov[[paste0("points",
i)]$Wcomp)/l_Federov[[paste0("points", i)]$Wcomp))

>Sys.sleep(0.1)

>x=ggplot(data=l_Federov[[paste0("points", i)]],
aes(x=Wcomp_corr, y=.fitted)) +
  labs(x="Fitted values", y="Residuals") +
  geom_smooth(se=F) +
  geom_hline(yintercept = 0L, linetype = "dashed", size = 0.2,
colour = "#888888")+
  geom_point() +
  xlim(245,590)+
  ylim(-5,10)+
  ggtitle(paste0("Consumo del compresor con ",i," puntos"))+
  annotate(geom = 'text', x = -Inf, y = Inf, hjust = 0, vjust =
1, colour = 'red',
        label = paste0(' Max.Relative Error = ',
                        round(Max_relative_error1, 3),
                        ' (%)\n',
                        ' Mean.Relative Error = ',
                        round(Mean_relative_error1, 3),
                        ' (%)\n',
                        ' RMSE = ',
                        round(RMSE1, 3),
                        ' (KW)'
                        ))
print(x)

#Correlación gasto másico del compresor

>RMSE2<-rmse(actual = l_Federov[[paste0("points", i)]]$mref,
predicted = l_Federov[[paste0("points", i)]]$mref_corr)

>Mean_relative_error2<-
mean(100*(abs(l_Federov[[paste0("points", i)]]$mref_corr-

```

```

l_Federov[[paste0("points",
i)]]$mref)/l_Federov[[paste0("points", i)]]$mref))

  >Max_relative_error2<-max(100*(abs(l_Federov[[paste0("points",
i)]]$mref_corr-l_Federov[[paste0("points",
i)]]$mref)/l_Federov[[paste0("points", i)]]$mref))

  >Sys.sleep(0.1)

  >z=ggplot(data=l_Federov[[paste0("points", i)]],
aes(x=mref_corr, y=.fitted2)) +
  labs(x="Fitted values", y="Residuals") +
  geom_smooth(se=F) +
  geom_hline(yintercept = 0L, linetype = "dashed", size = 0.2,
colour = "#888888")+
  geom_point() +
  xlim(4.3,25)+
  ylim(-0.36,0.4)+
  ggtitle(paste0("Gasto masico del compresor con ",i,"
puntos"))+
  annotate(geom = 'text', x = -Inf, y = Inf, hjust = 0, vjust =
1, colour = 'red',
        label = paste0(' Max.Relative Error = ',
                        round(Max_relative_error2, 3),
                        ' (%)\n',
                        ' Mean.Relative Error = ',
                        round(Mean_relative_error2, 3),
                        ' (%)\n',
                        ' RMSE = ',
                        round(RMSE2, 3),
                        ' (kg/h)'
                        ))
  >print(z)
}

```

Hay que tener en cuenta que hay que establecer unos límites previos para que todos los puntos estén contenidos dentro del gráfico, pero tampoco tenga una escala tan grande que no se llegue a apreciar diferencias. Este rango se establece en `xlim()` e `ylim()`.

### 2.2.3 Predicción del compresor con condiciones de succión distintas a las del modelo

Para realizar esta predicción hay que diferenciar claramente entre consumo y gasto másico, puesto que el gasto másico requiere de un ajuste previo basado en la norma **AHRI 540**.

Como ya hemos obtenido el modelo en el apartado anterior, el cual es un modelo de nueve puntos con el funcional del polinomio de grado dos en dominio de presiones, lo único que debemos hacer en el consumo es utilizar la función `predict()`:

```
>df <- as.data.frame(read_excel(str_c("../data/Datos a
revisar/","COMPRESOR",".xlsx")))
```

```
#Seleccionamos las columnas Wcomp, Pcond y Pevap
```

```
>df1 <- df[df$id==2, c('mref','Wcomp','Pevap','Pcond')]
```

```
>df2 <- df[df$id==3, c('mref','Wcomp','Pevap','Pcond')]
```

```
#Cargamos las funciones a utilizar
```

```
>source("funciones a usar/Thin_plate_regression.R")
```

```
>source("funciones a usar/Correlation_graph.R")
```

```
#Hacemos interpolación de puntos para Wcomp
```

```
>df_tps_Wcomp<-Thin_plate_regression(df_model =
df1[,c('Pevap','Pcond','Wcomp')], npoints_side =
8)$Predicted_grid
```

```
>df_tps_mref<-Thin_plate_regression(df_model =
df1[,c('Pevap','Pcond','mref')], npoints_side = 8)$Predicted_grid
```

```
>df_tps <- cbind(mref=df_tps_mref$mref,df_tps_Wcomp)
```

```
>df_Federov<-optFederov(~Pevap + Pcond + Pevap:Pcond + I(Pevap^2)
+ I(Pcond^2),
```

```
data = df_tps,
```

```
nTrials = 9,
```

```
criterion = 'D'
```

```
)$design
```

```
#Resolución lineal trabajo del compresor con AHRI
```



```
>Model1PR=lm(data=df_Federov, formula=Wcomp ~ Pevap + Pcond +
Pevap:Pcond + I(Pcond^2) + I(Pevap^2))
```

#Insertamos la columna predicha de Wcomp en el data frame que buscamos predecir:

```
>df2$Wcomp_corr<- predict(Model1PR, newdata=df2)
```

Para ver si este modelo es válido vamos a emplear la función `Correlation_graph()` que preprogramamos anteriormente:

```
>Correlation_graph(df2$Wcomp_corr,df2$Wcomp,"Wcomp_pre","Wcomp",
"KW")
```

El caso del gasto másico es más complejo puesto que necesitamos el volumen específico de cada uno de los puntos. Para obtener el volumen específico hemos empleado la herramienta `coolprop` del programa `coolpack` y hemos añadido esa columna a nuestro excel.

```
>df <- as.data.frame(read_excel(str_c("../data/Datos a
revisar/",COMPRESOR,".xlsx")))
#Seleccionamos las columnas Wcomp, Pcond y Pevap
```

```
>df1 <- df[df$id==1, c( 'mref','Pevap','Pcond')]
```

```
>df2 <- df[df$id==2, c( 'mref','Vesp','Pevap','Pcond','Tevap')]
```

#Cargamos las funciones a utilizar

```
>source("funciones a usar/Thin_plate_regression.R")
```

```
>source("funciones a usar/Correlation_graph.R")
```

#Hacemos interpolación de puntos para Wcomp

```
>df_tps<-Thin_plate_regression(df_model =
df1[,c('Pevap','Pcond','mref')], npoints_side = 8)$Predicted_grid
```

```
>df_Federov<-optFederov(~Pevap + Pcond + Pevap:Pcond + I(Pevap^2)
+ I(Pcond^2),
```

```
data = df_tps,
```

```
nTrials = 9,
```

```
criterion = 'D'
```

```
)$design
```

#Resolución lineal trabajo del compresor con AHRI

```
>Model1PR=lm(data=df_Federov, formula=mref ~ Pevap + Pcond +
Pevap:Pcond + I(Pcond^2) + I(Pevap^2))
```

```
>df2$mref_SHprevio <- predict(Model1PR, newdata=df2)
```

```
>write.xlsx(df2, str_c("../COMPRESOR, "/Vesp.xlsx"))
```

En este nuevo Excel debemos hallar la temperatura de succión sumando el sobrecalentamiento a la temperatura de evaporación y hallamos el volumen específico de nuestra predicción. Esta nueva columna la hemos llamado Vesp\_SHprevio. A continuación, cargamos este data frame en Rstudio con el nombre df3 y utilizamos la función Correlation\_graph otra vez:

```
>df3 <- as.data.frame(read_excel(str_c("../COMPRESOR, "/Vesp.xlsx")))
>df3 <- df3[, c('mref', 'Vesp', 'Pevap', 'Pcond', 'Vesp_SHprevio', 'mref_SHprevio')]
#Insertamos la columna predicha de mref en el data frame aplicando la corrección de Dabiri
>df3$mref_corr<-
df3$mref_SHprevio*(1+0.75*((df3$Vesp_SHprevio/df3$Vesp)-1))
>Correlation_graph(df3$mref_corr,df3$mref,"mref_pre", "mref", "kg/h")
```

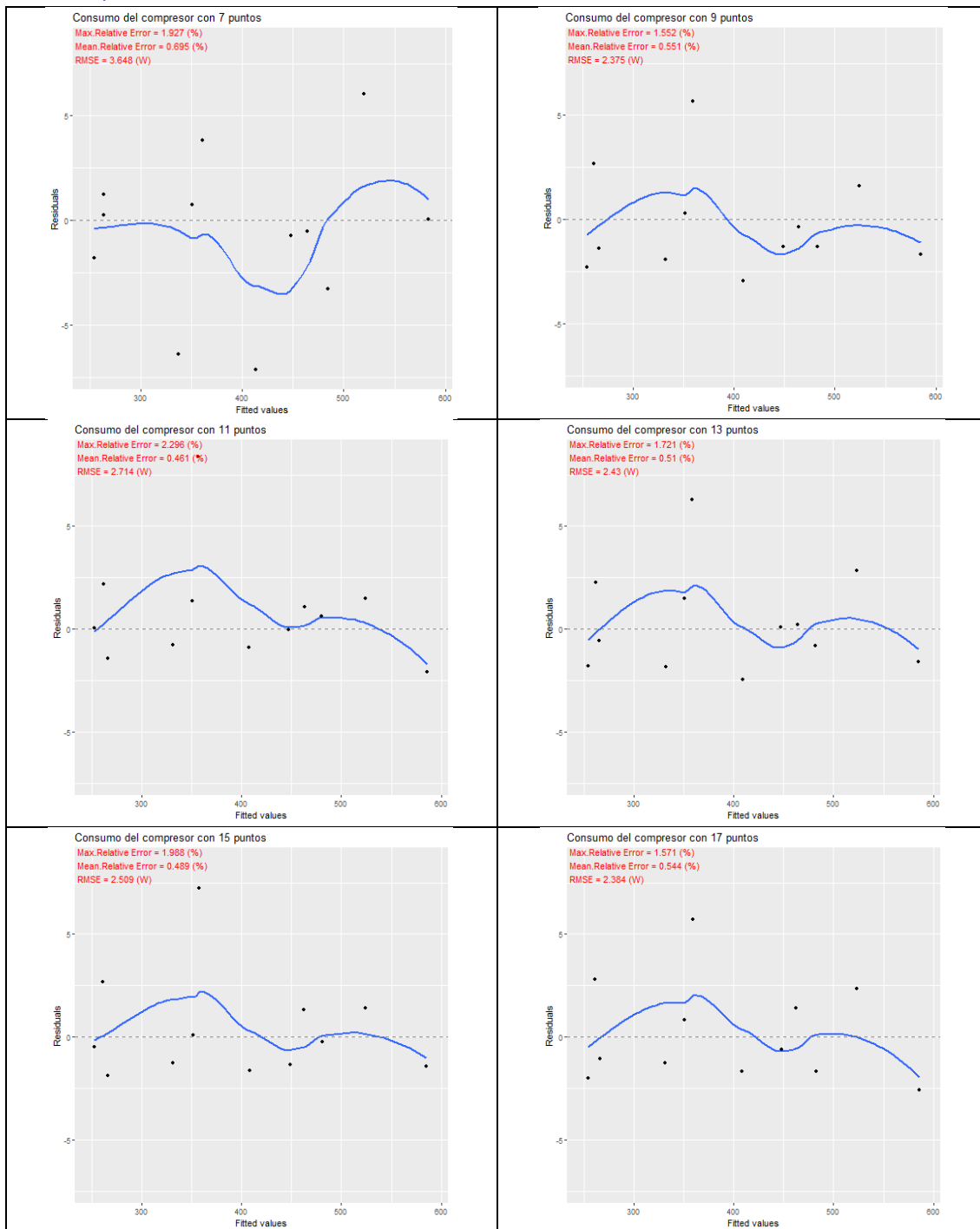
**4º Documento:**  
**ANEXOS**

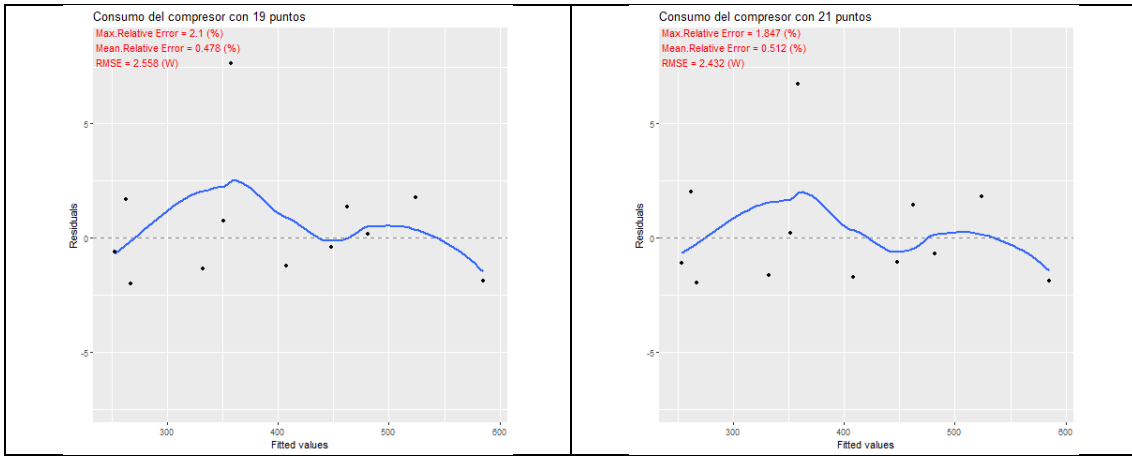
## Anexo 1. Análisis de residuos.

AHRI 28 (SH 11) .....	85
Trabajo del compresor .....	85
Gasto másico .....	87
AHRI 28 (SH 22) .....	88
Trabajo del compresor .....	88
Gasto másico .....	89
AHRI 28 (TS CONSTANTE) .....	91
Trabajo del compresor .....	91
Gasto másico .....	92
AHRI 30 (SH 11) .....	93
Trabajo del compresor .....	93
Gasto másico .....	95
AHRI 30 (SH 22) .....	96
Trabajo del compresor .....	96
Gasto másico .....	97
AHRI 30 (TS CONSTANTE) .....	99
Trabajo del compresor .....	99
Gasto másico .....	100
AHRI 51 .....	101
Trabajo del compresor .....	101
Gasto másico .....	103
AHRI 64a (SH 10) .....	104
Trabajo del compresor .....	104
Gasto másico .....	105
AHRI 64a (TS CONSTANTE) .....	106
Trabajo del compresor .....	106
Gasto másico .....	108
AHRI 64b (SH 10) .....	109
Trabajo del compresor .....	109
Gasto másico .....	110
AHRI 64b (TS CONSTANTE) .....	111
Trabajo del compresor .....	111
Gasto másico .....	113

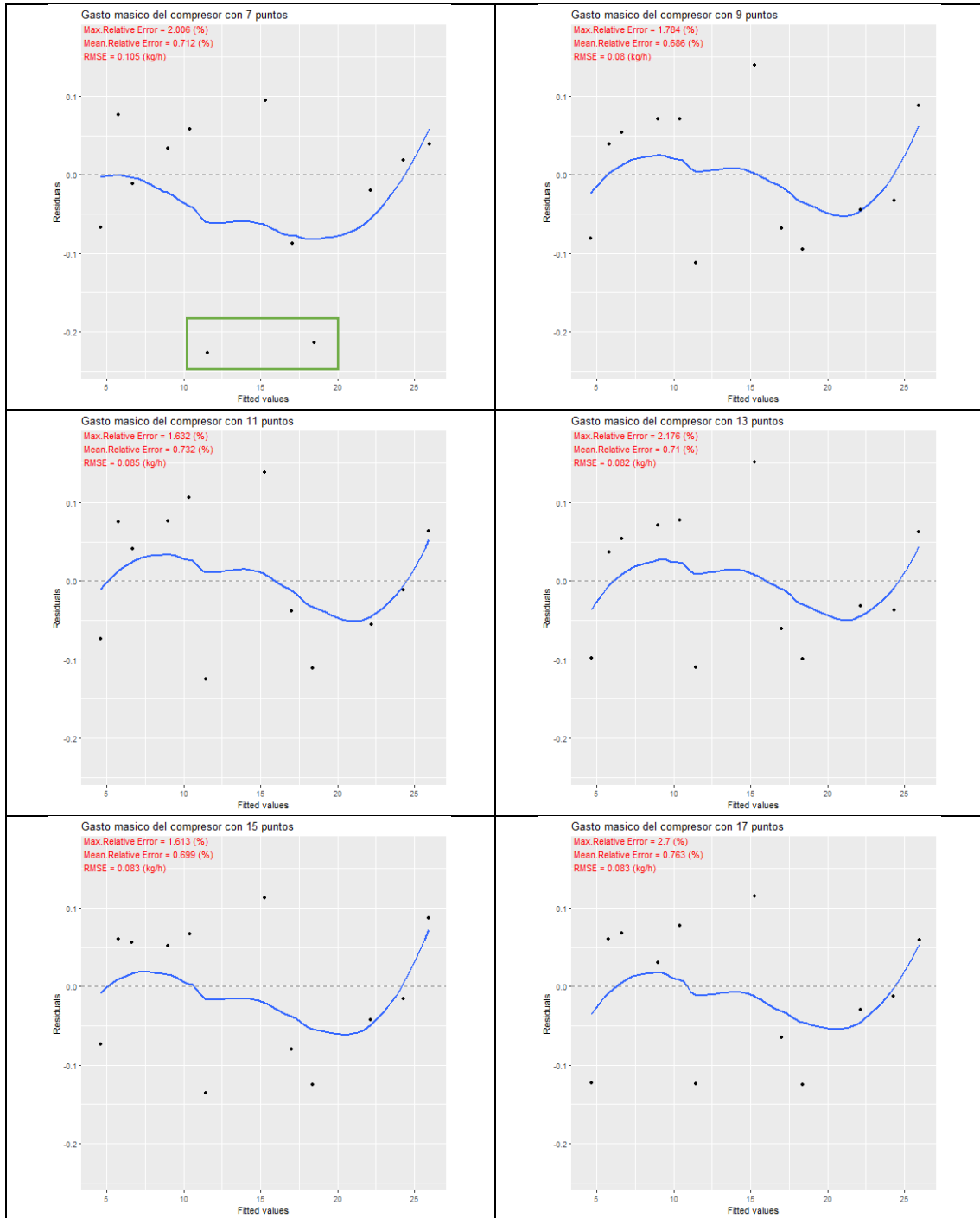
# AHRI 28 (SH 11)

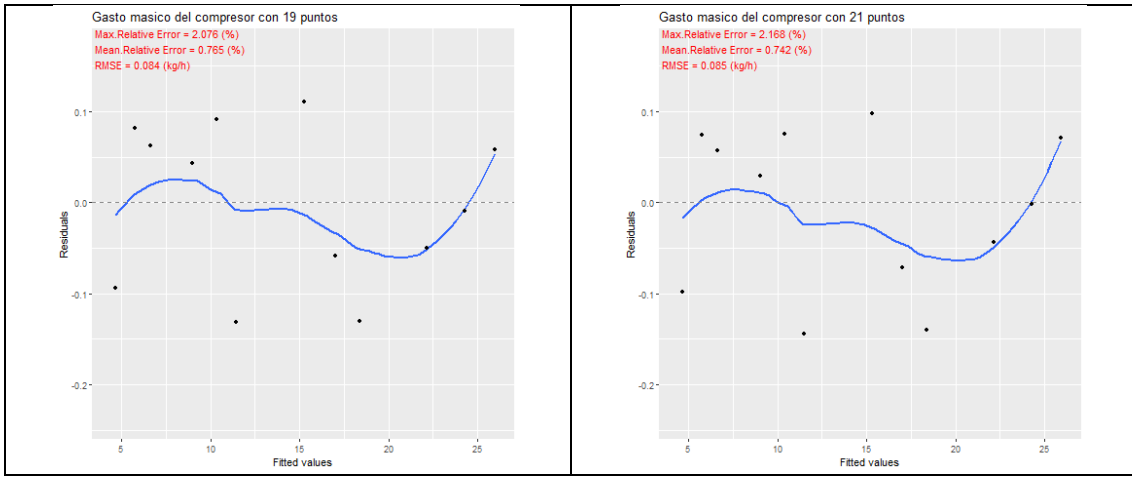
## Trabajo del compresor





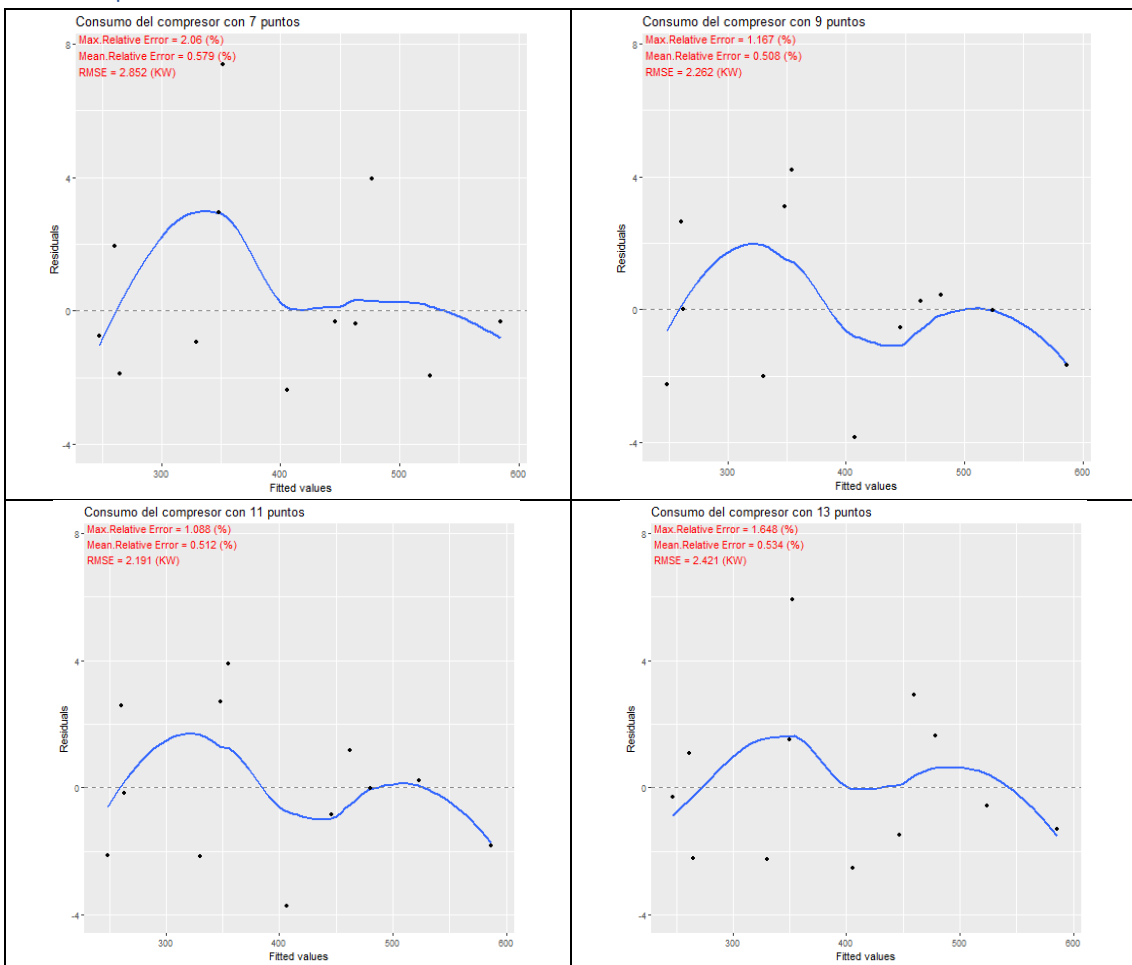
# Gasto másico



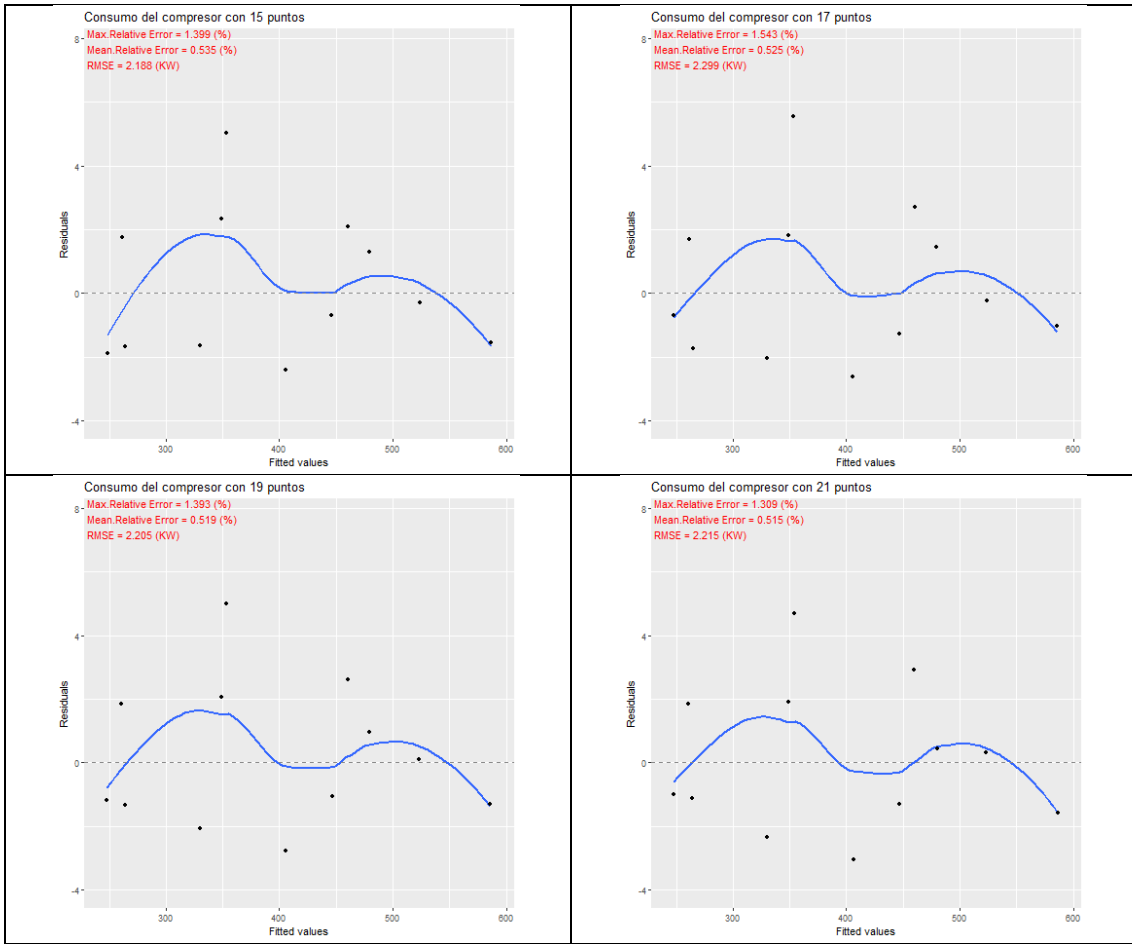


## AHRI 28 (SH 22)

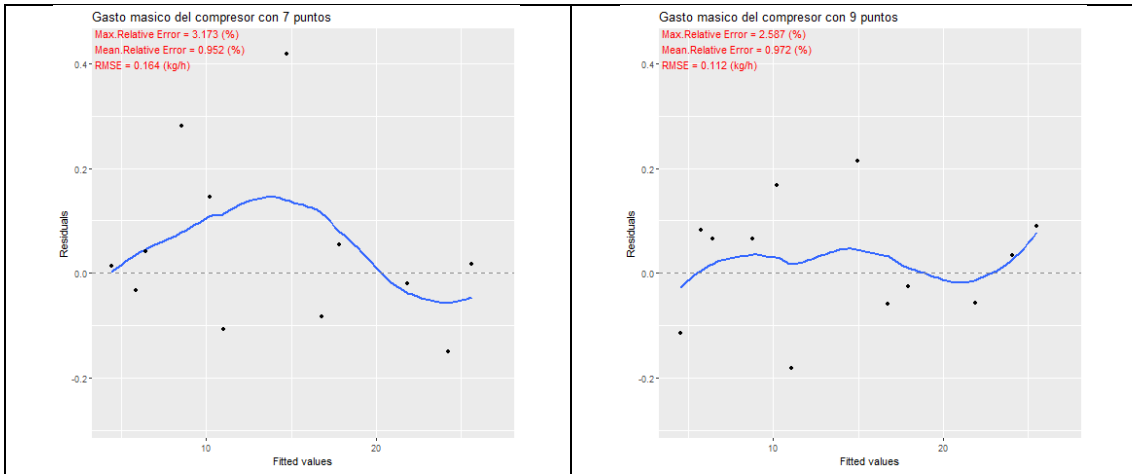
### Trabajo del compresor







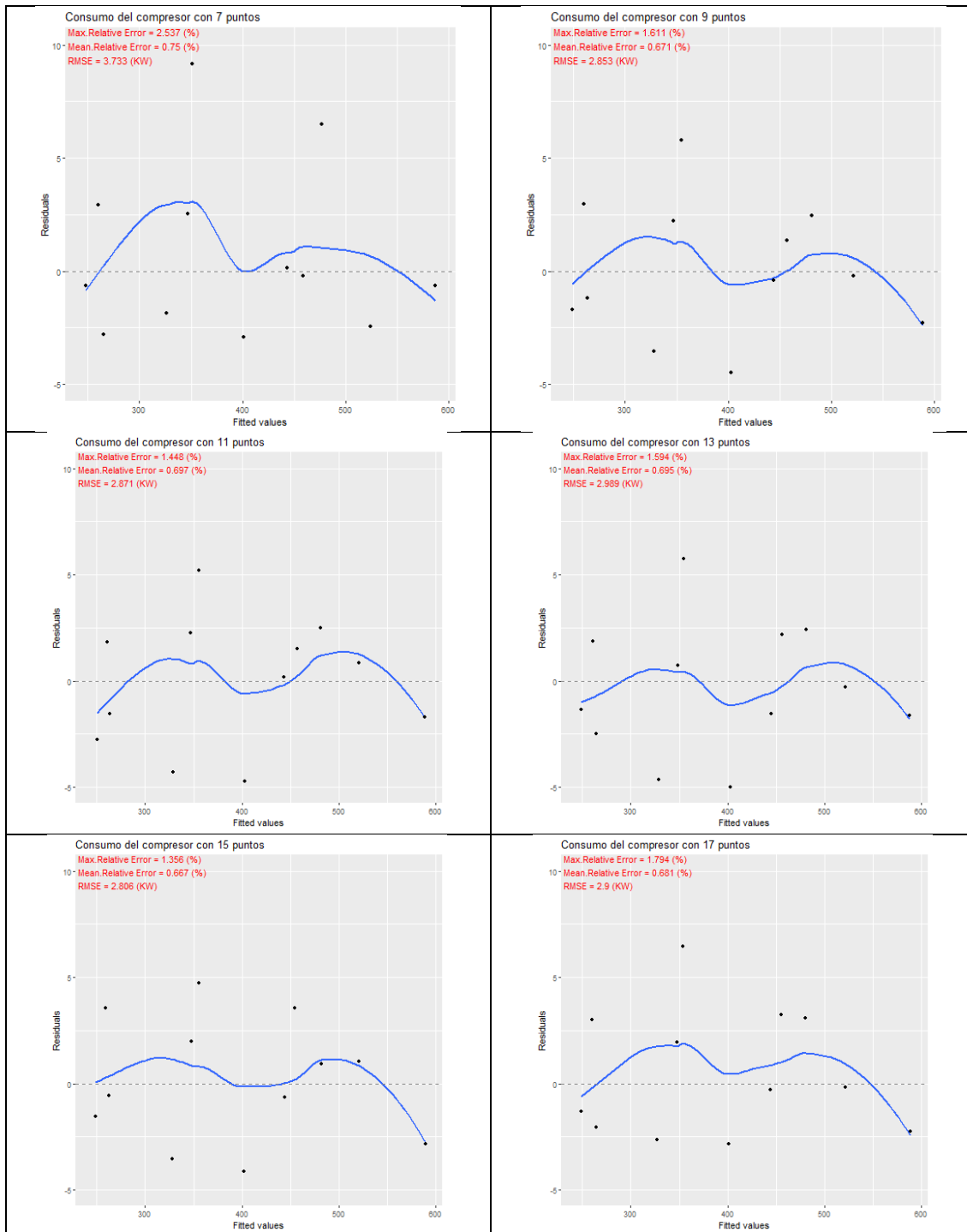
## Gasto másico

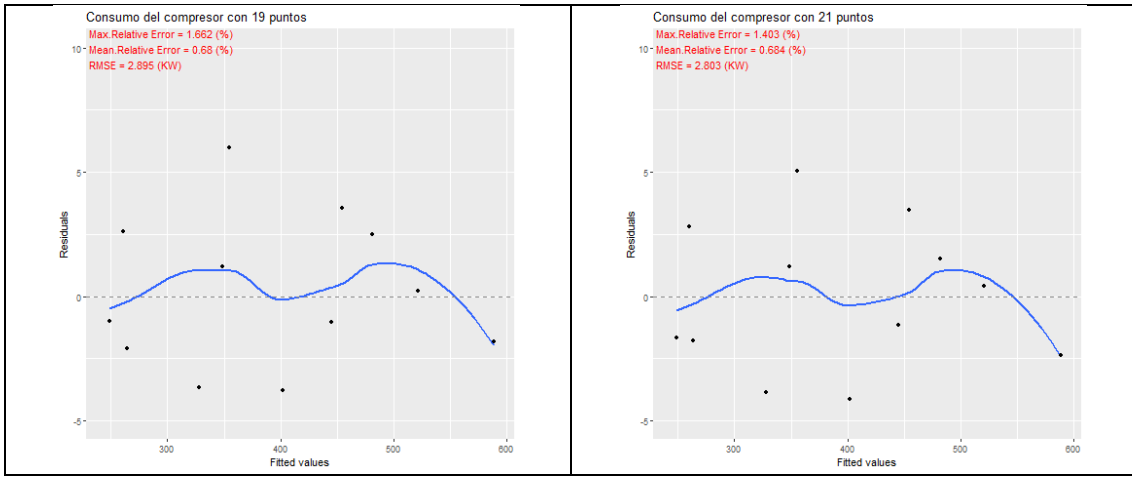




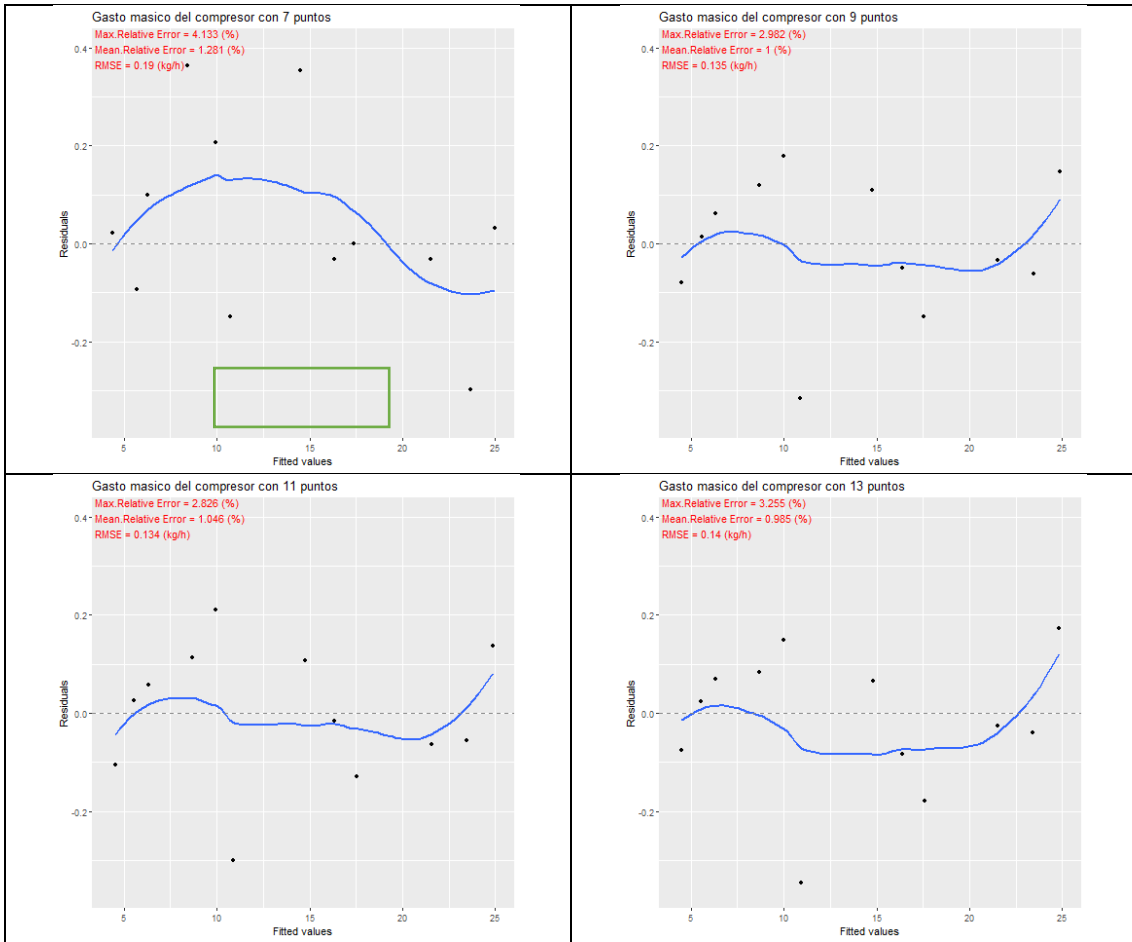
# AHRI 28 (TS CONSTANTE)

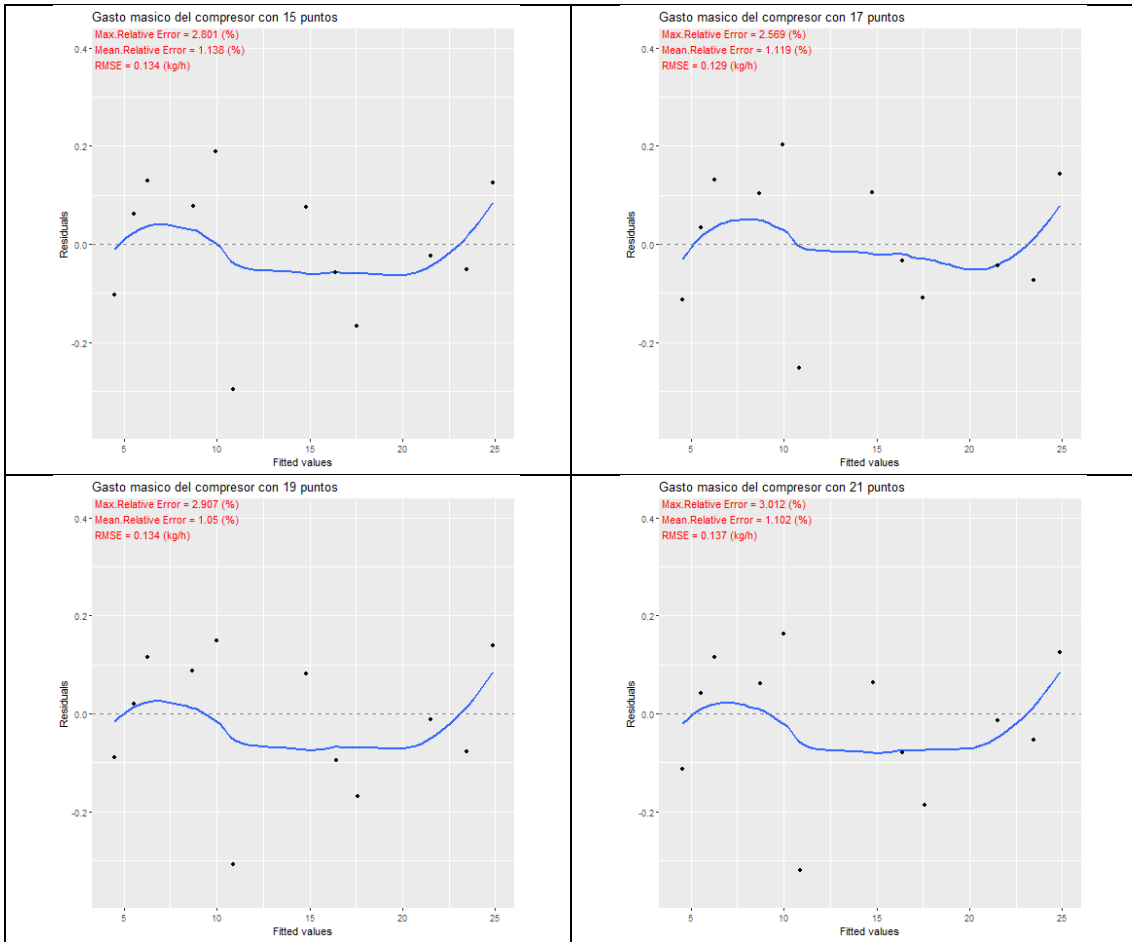
## Trabajo del compresor





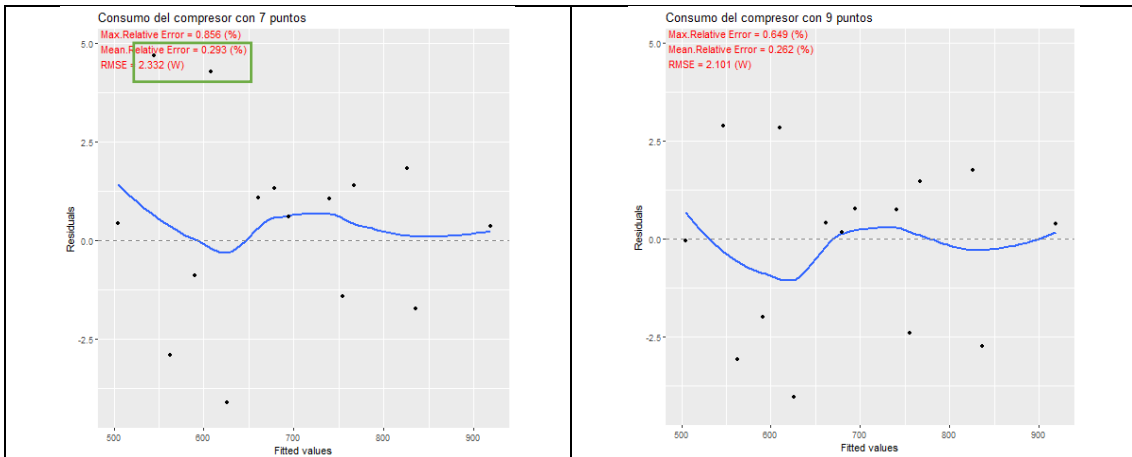
## Gasto másico

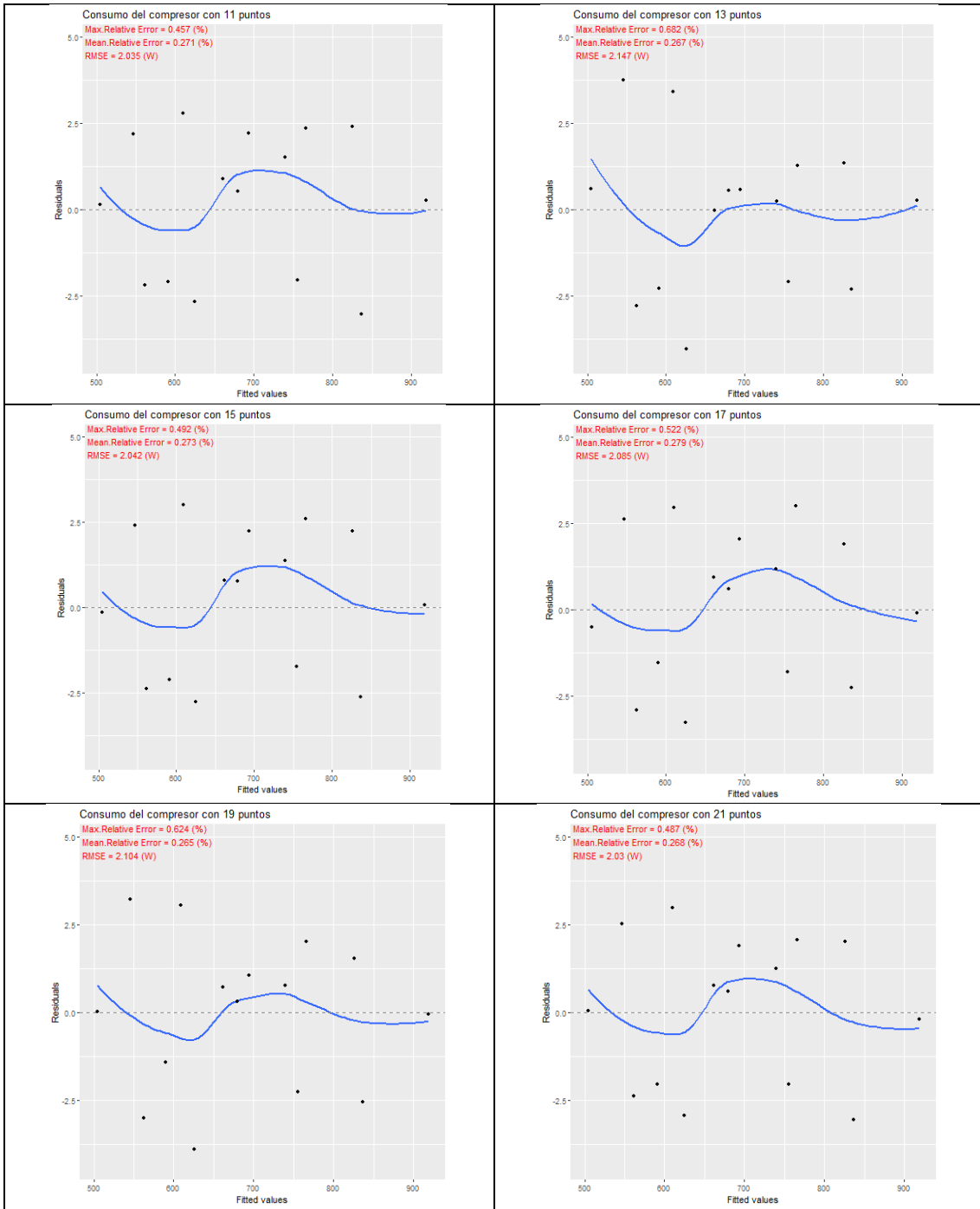




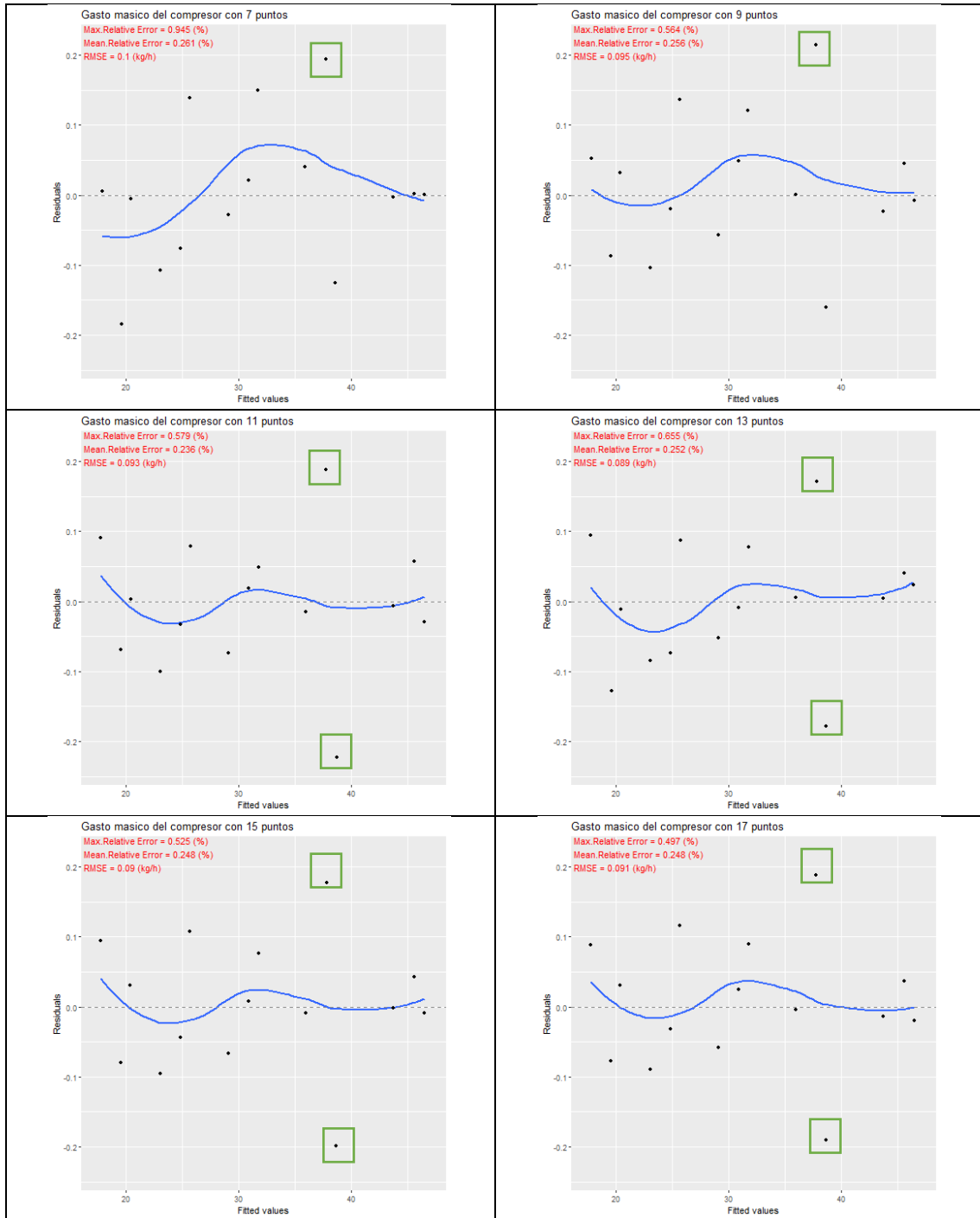
## AHRI 30 (SH 11)

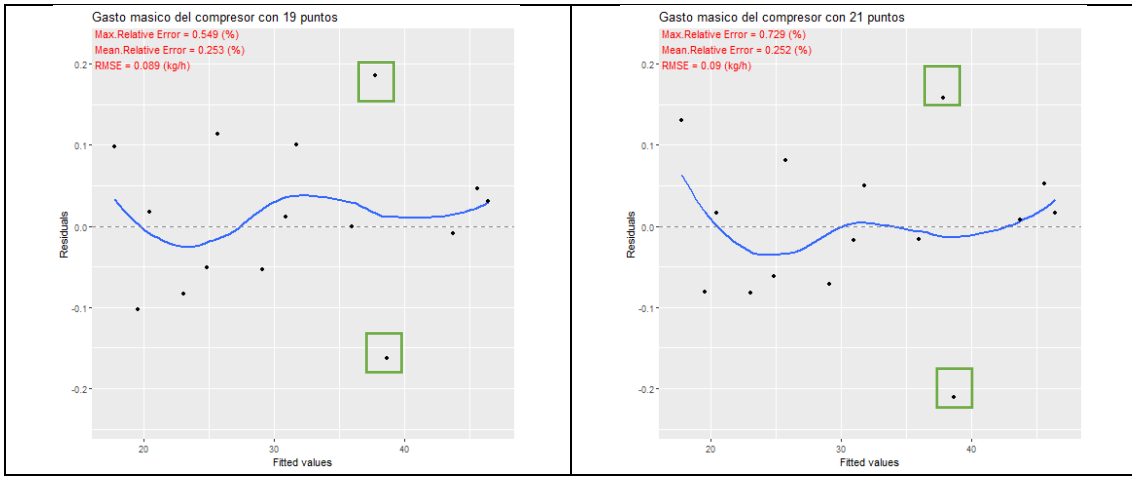
### Trabajo del compresor





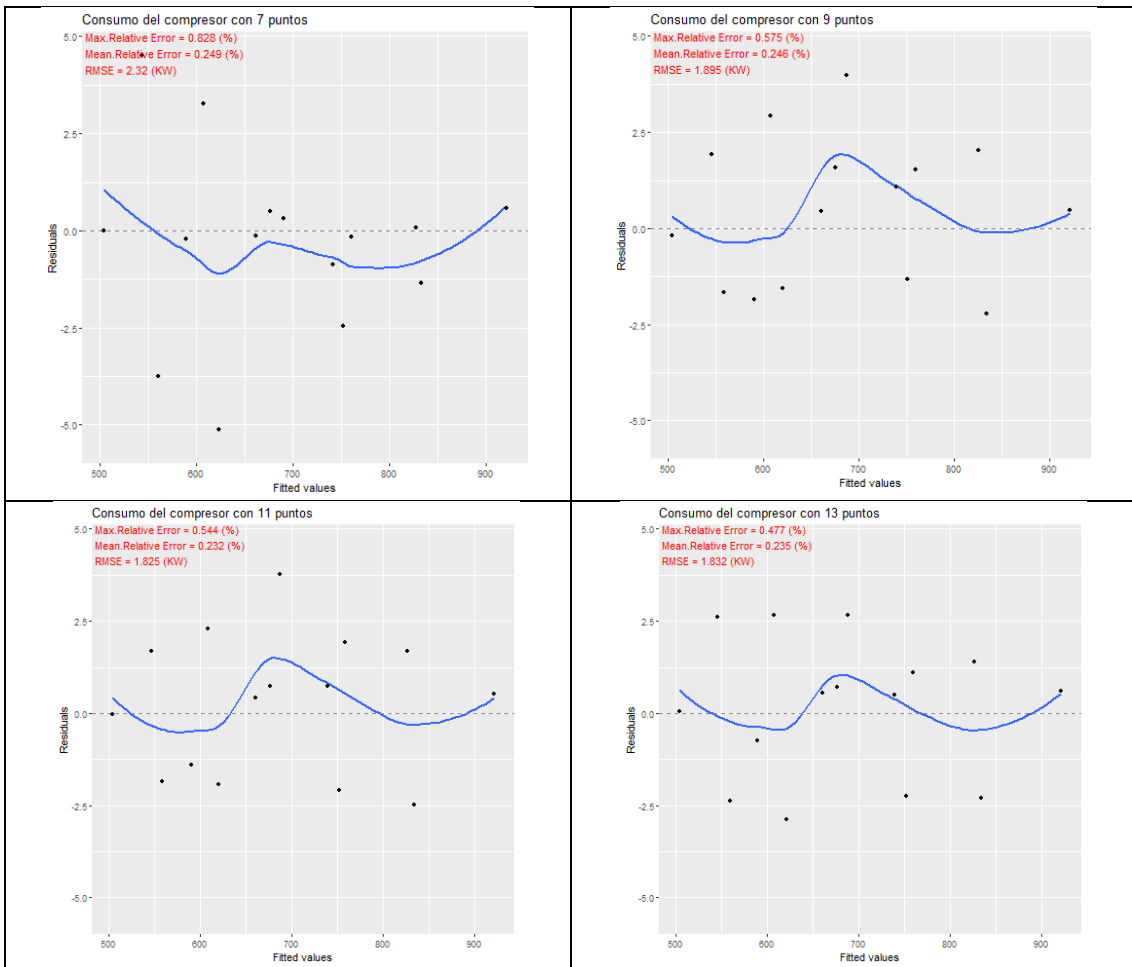
# Gasto másico



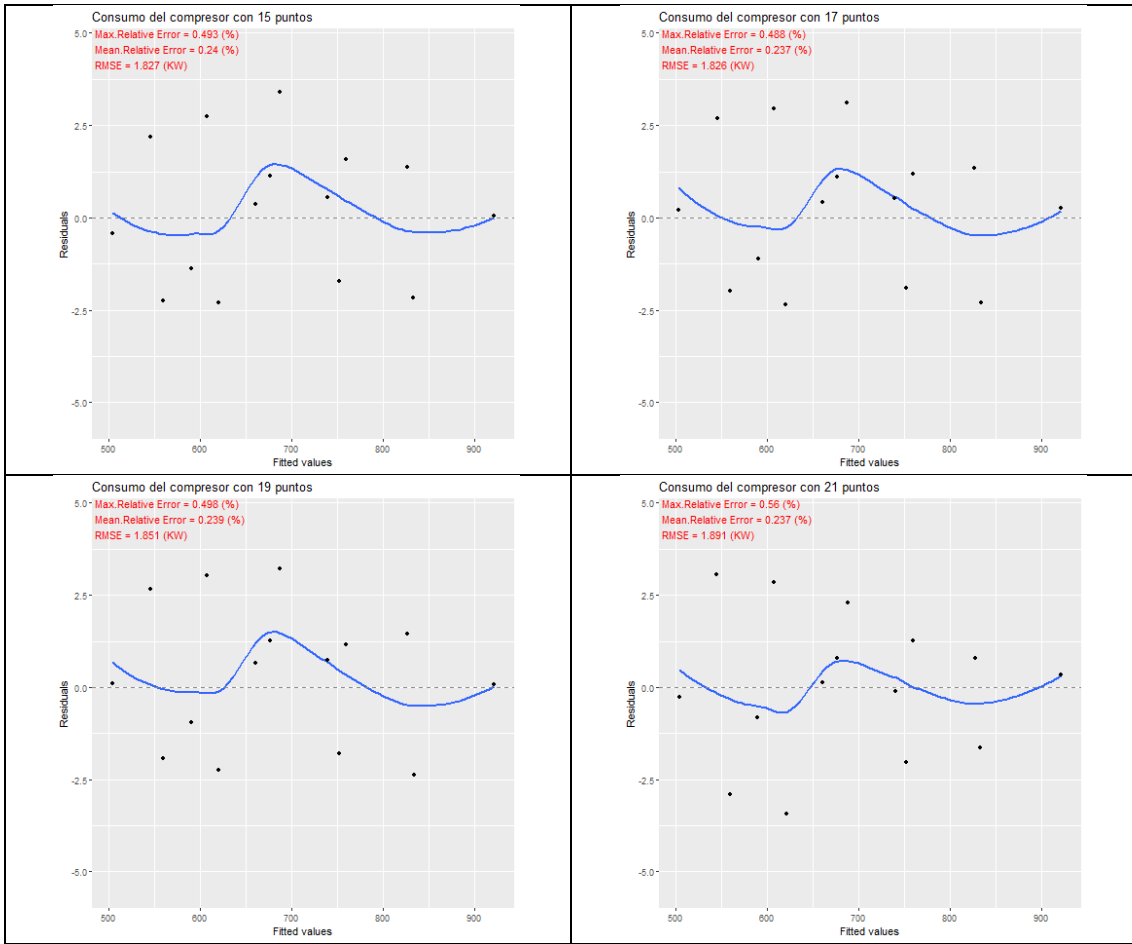


## AHRI 30 (SH 22)

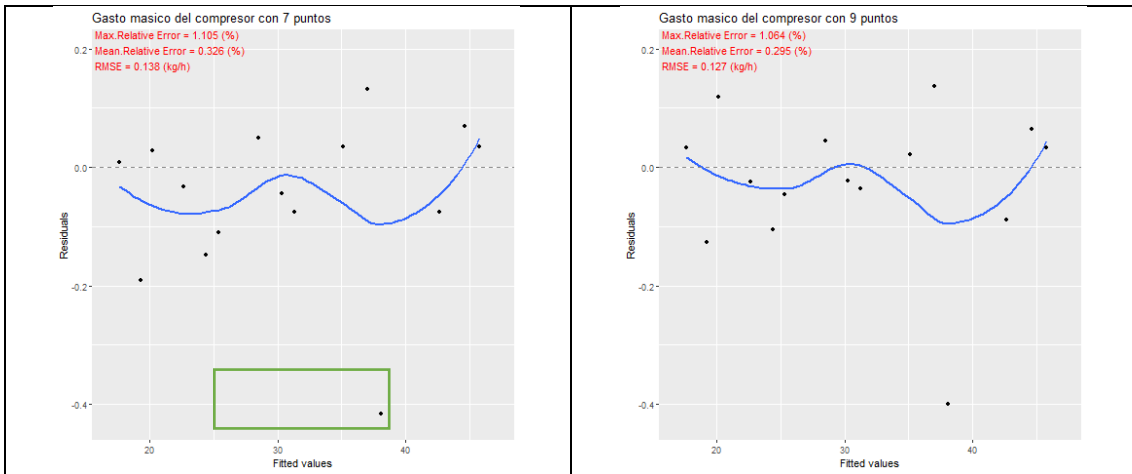
### Trabajo del compresor

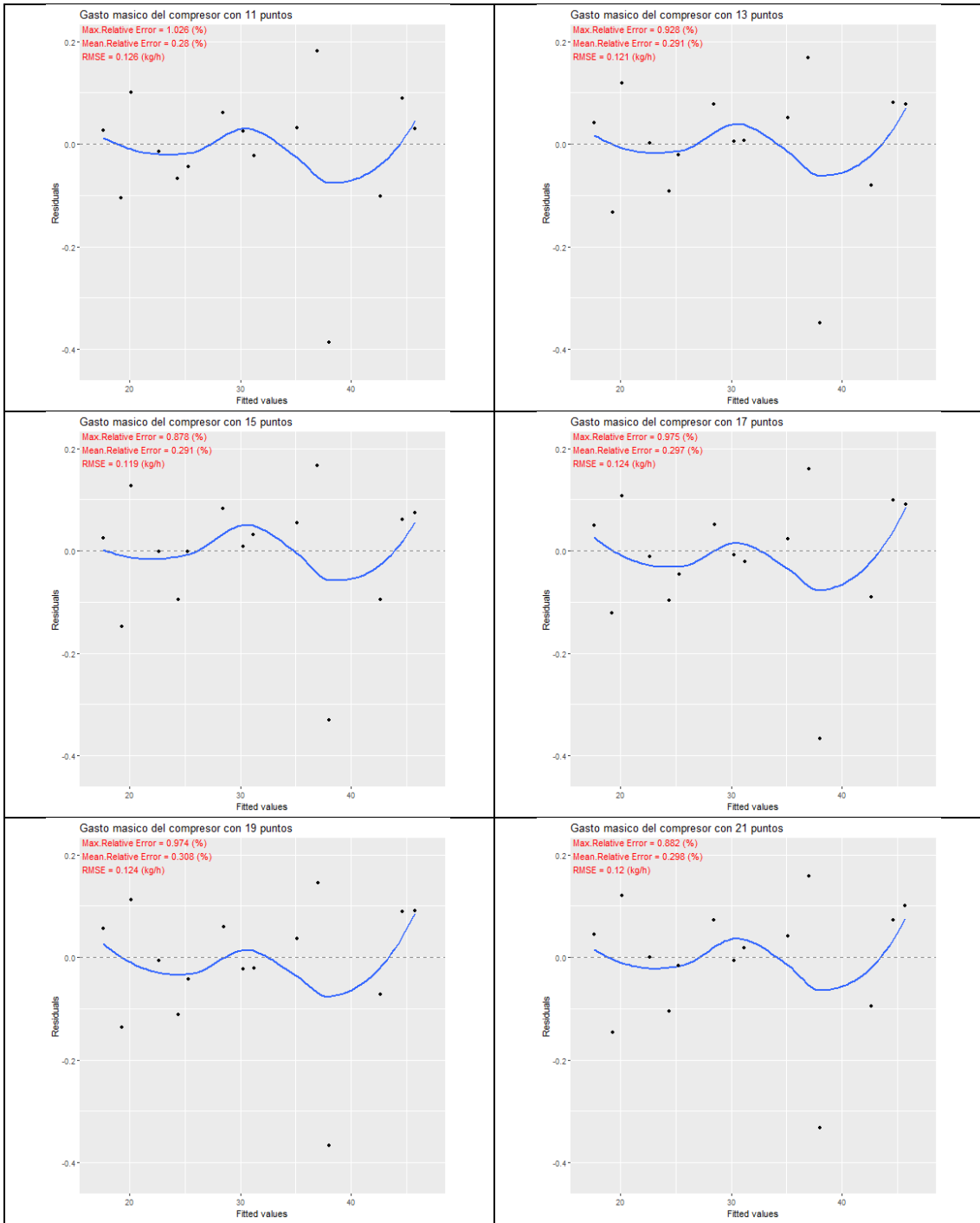






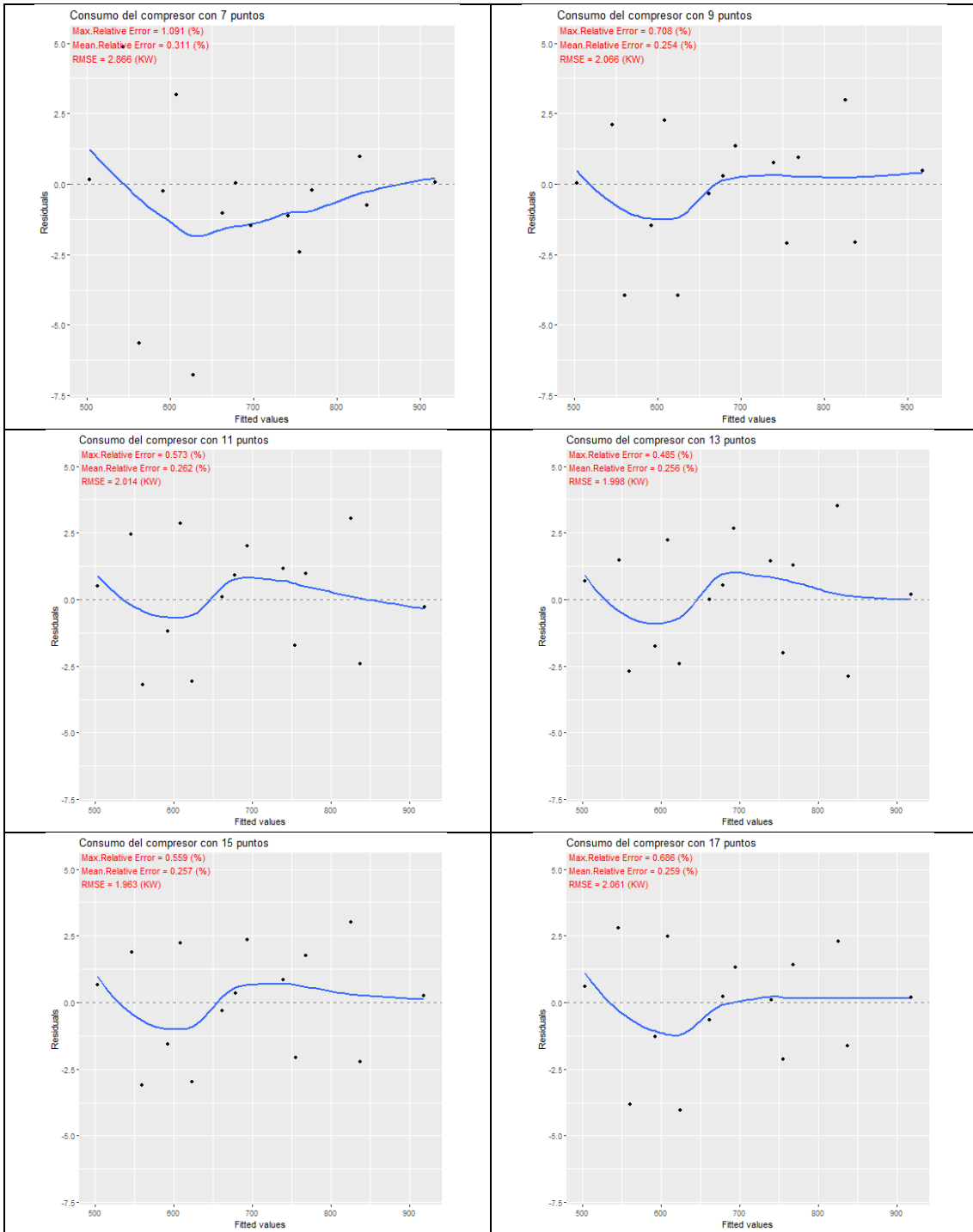
## Gasto másico

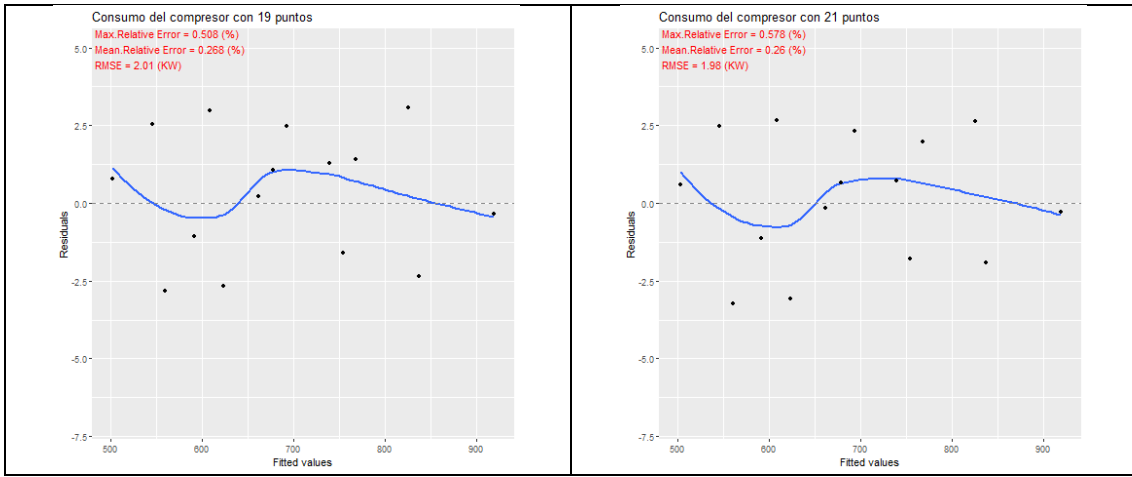




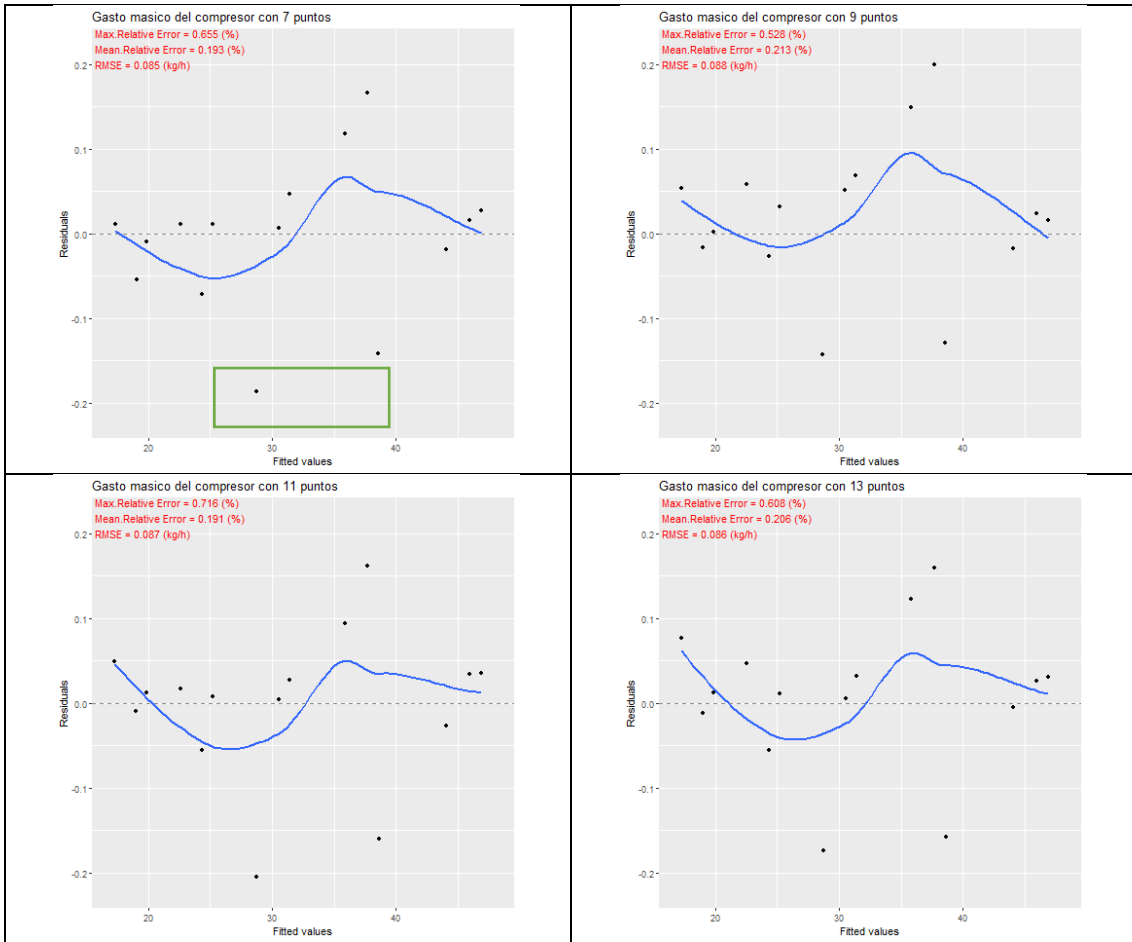
# AHRI 30 (TS CONSTANTE)

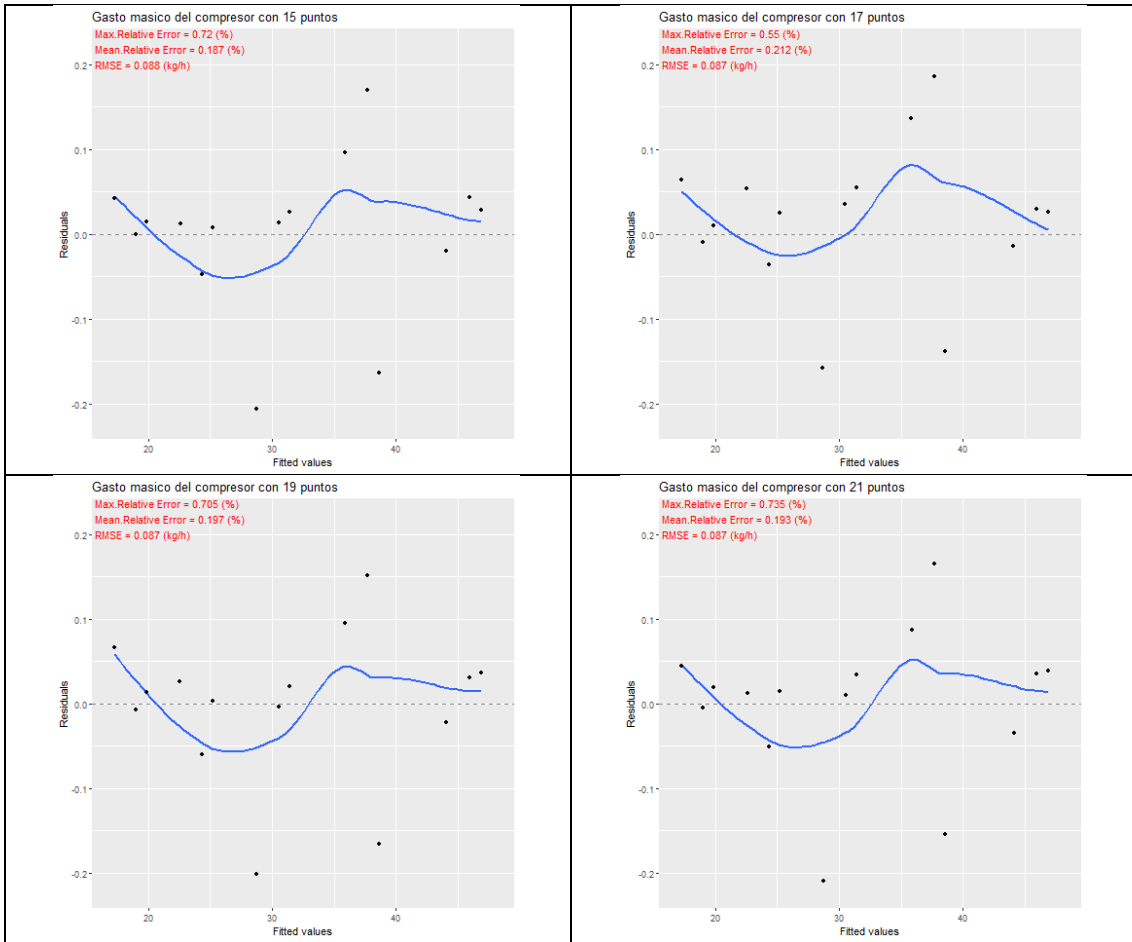
## Trabajo del compresor





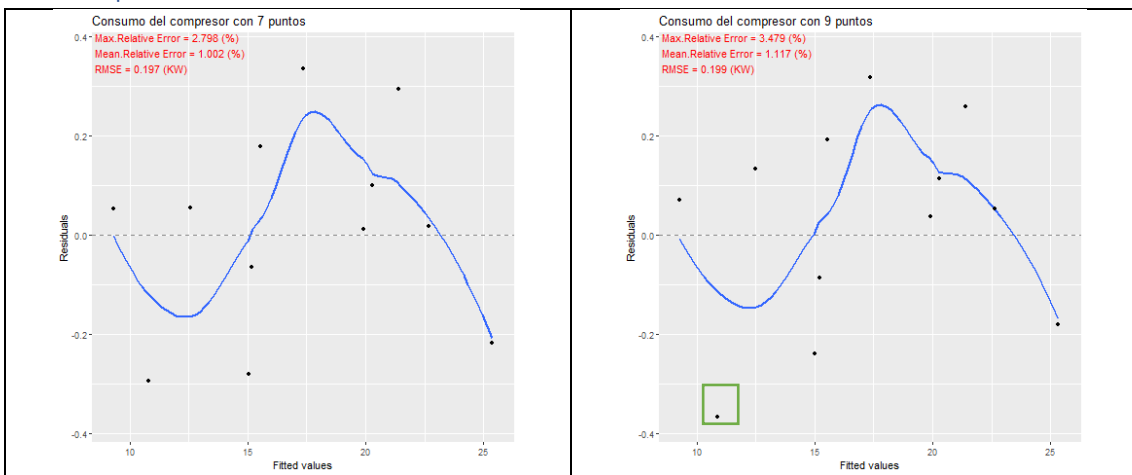
## Gasto másico

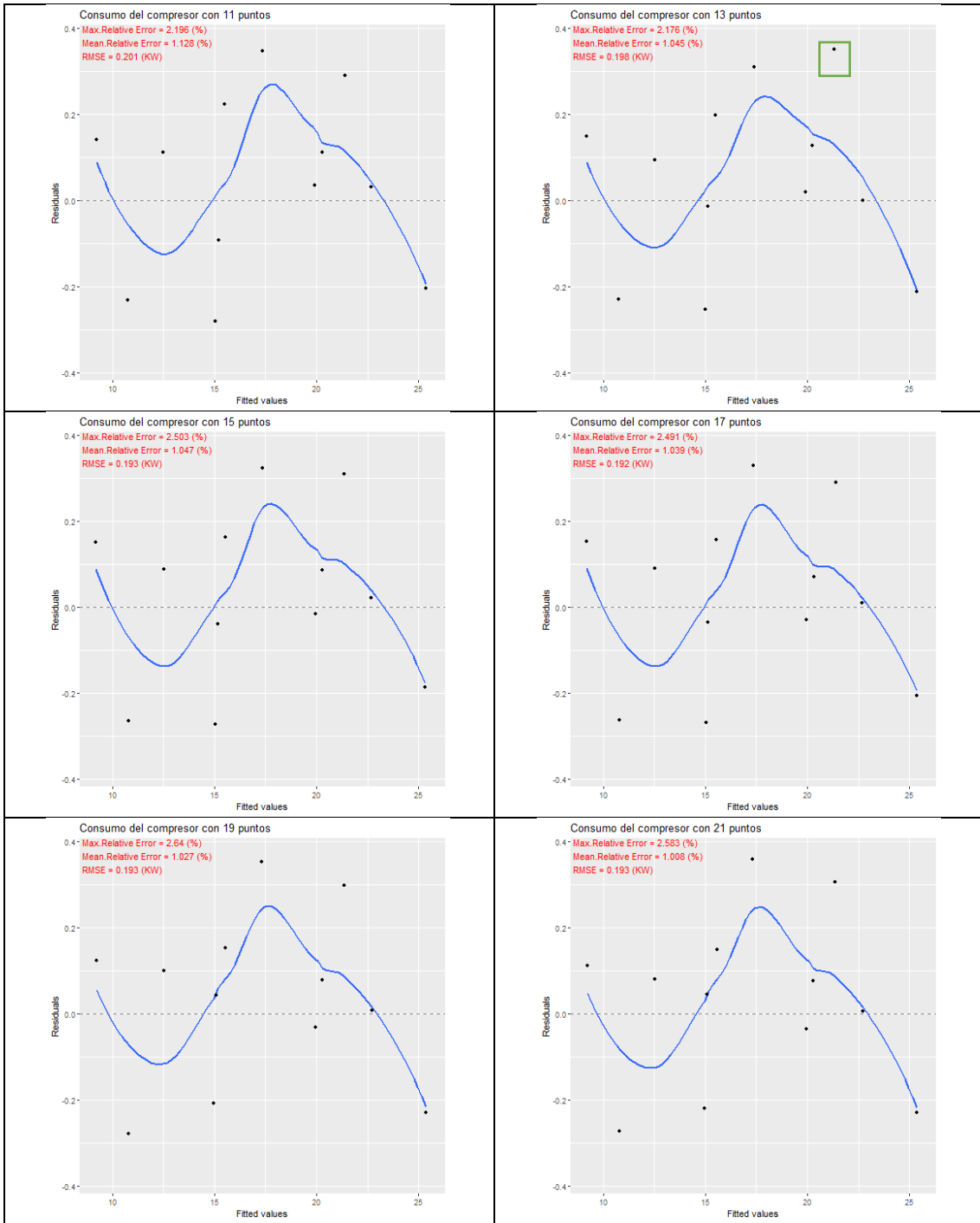




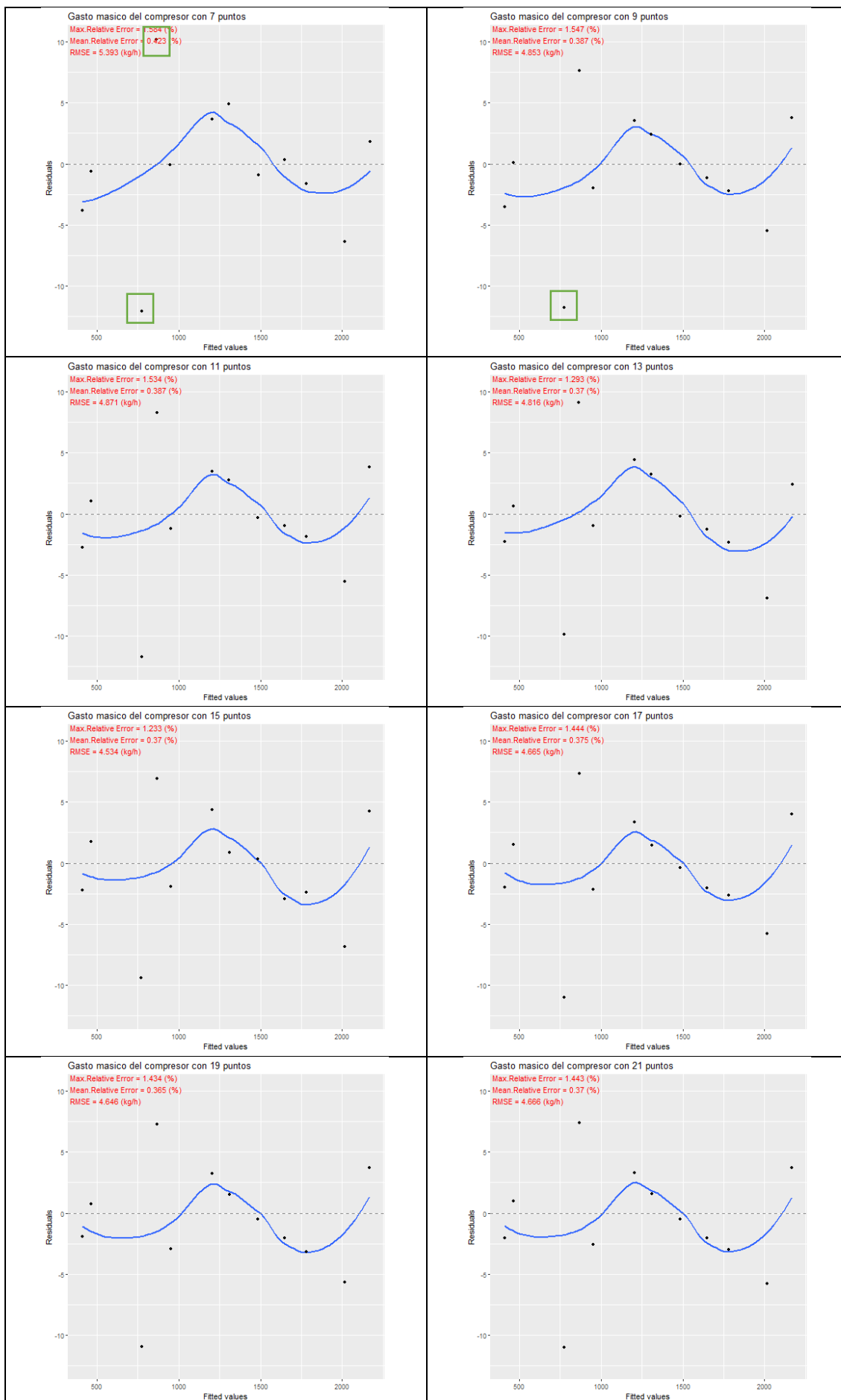
## AHRI 51

### Trabajo del compresor



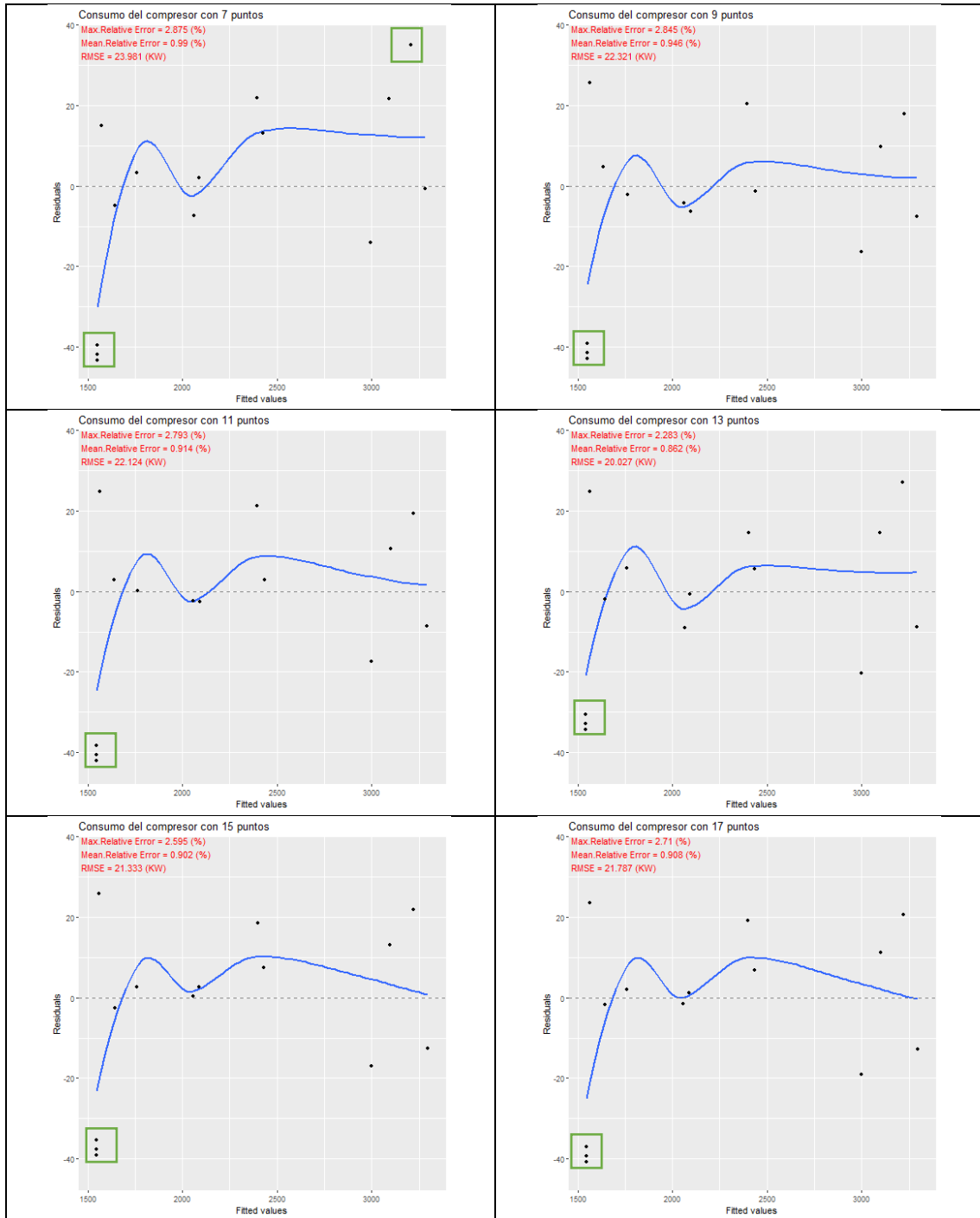


# Gasto másico

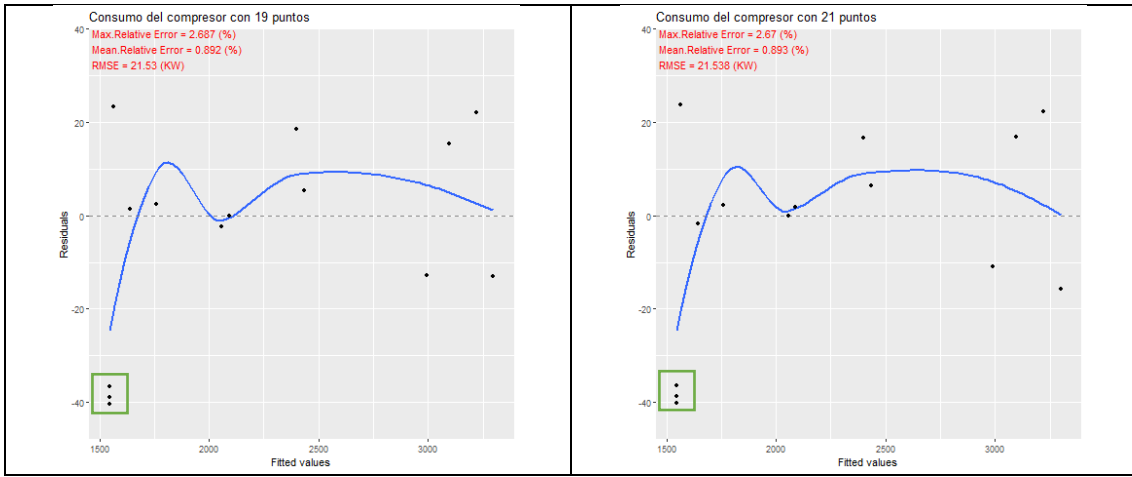


# AHRI 64a (SH 10)

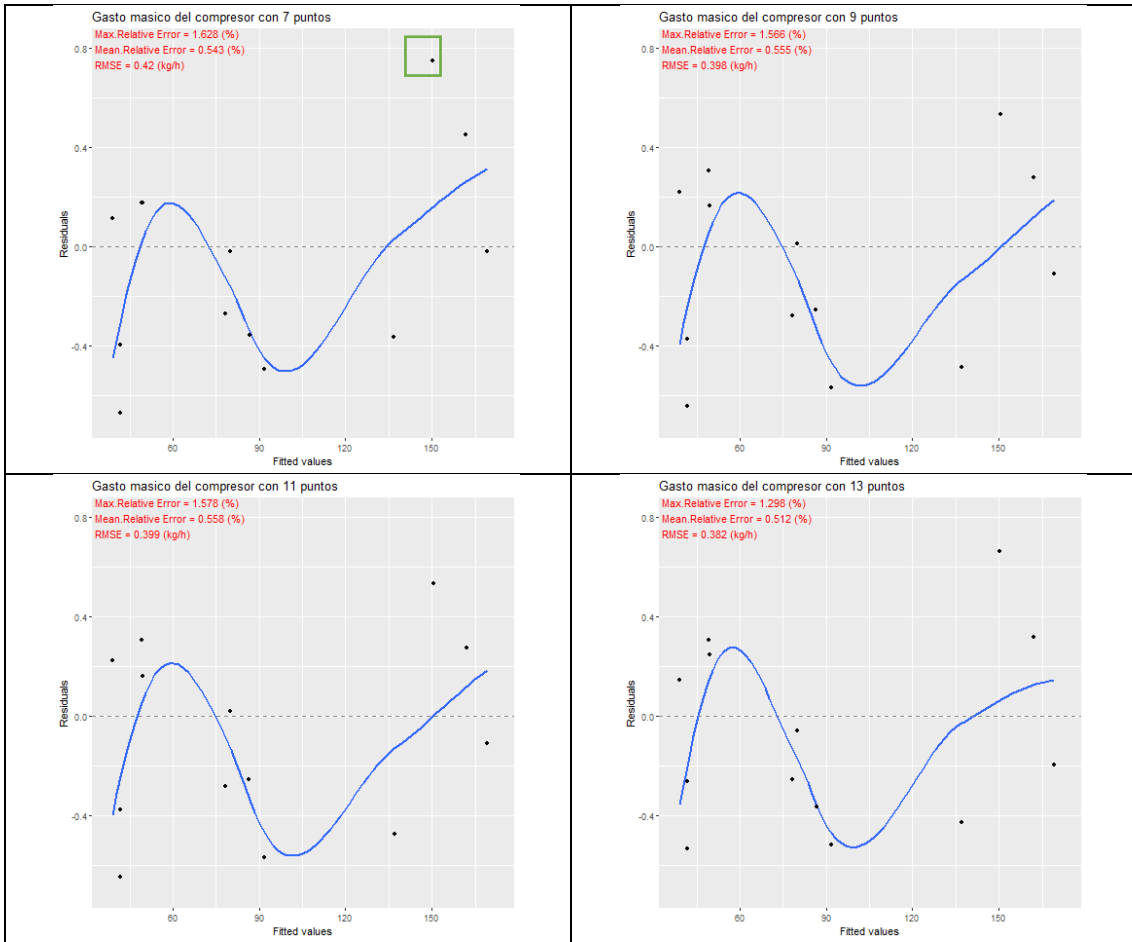
## Trabajo del compresor

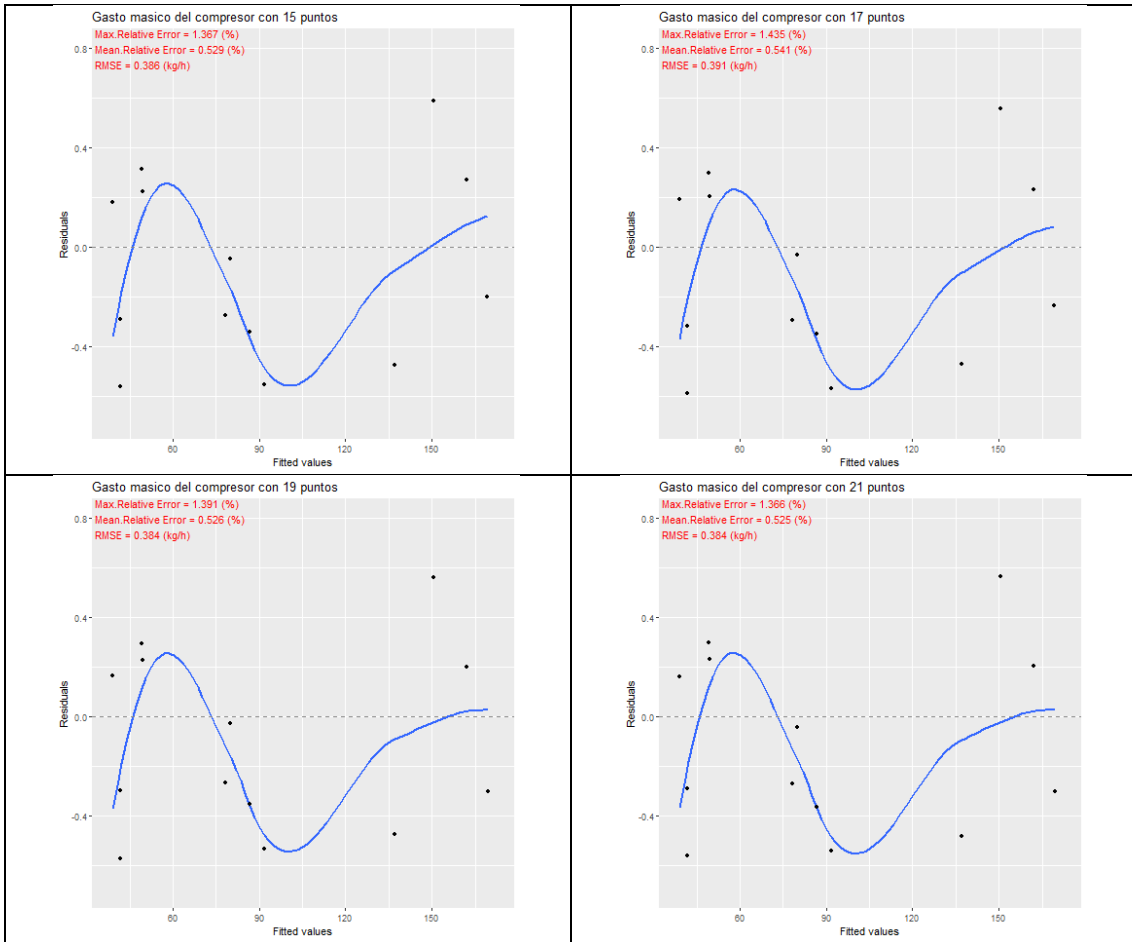






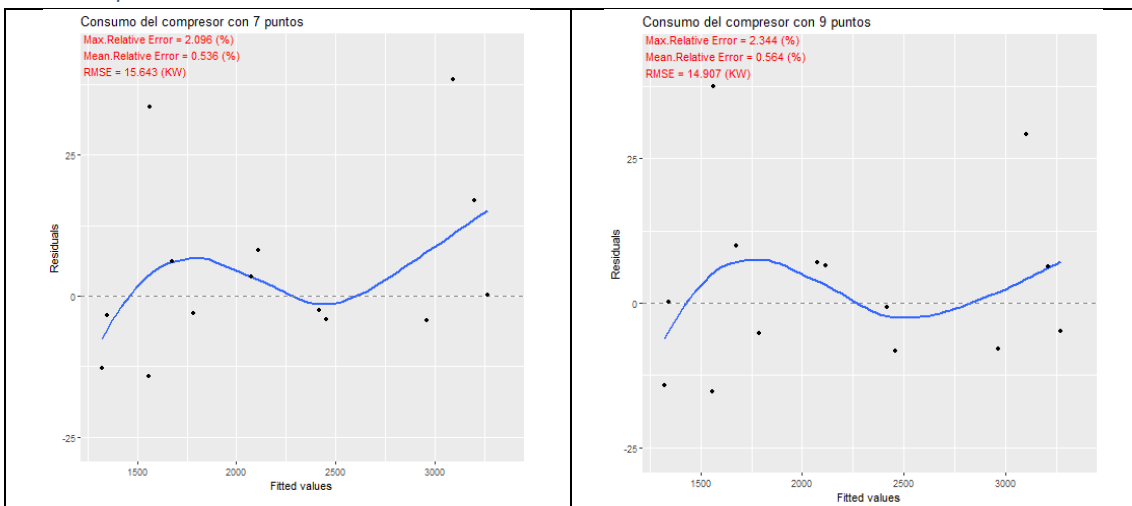
## Gasto másico

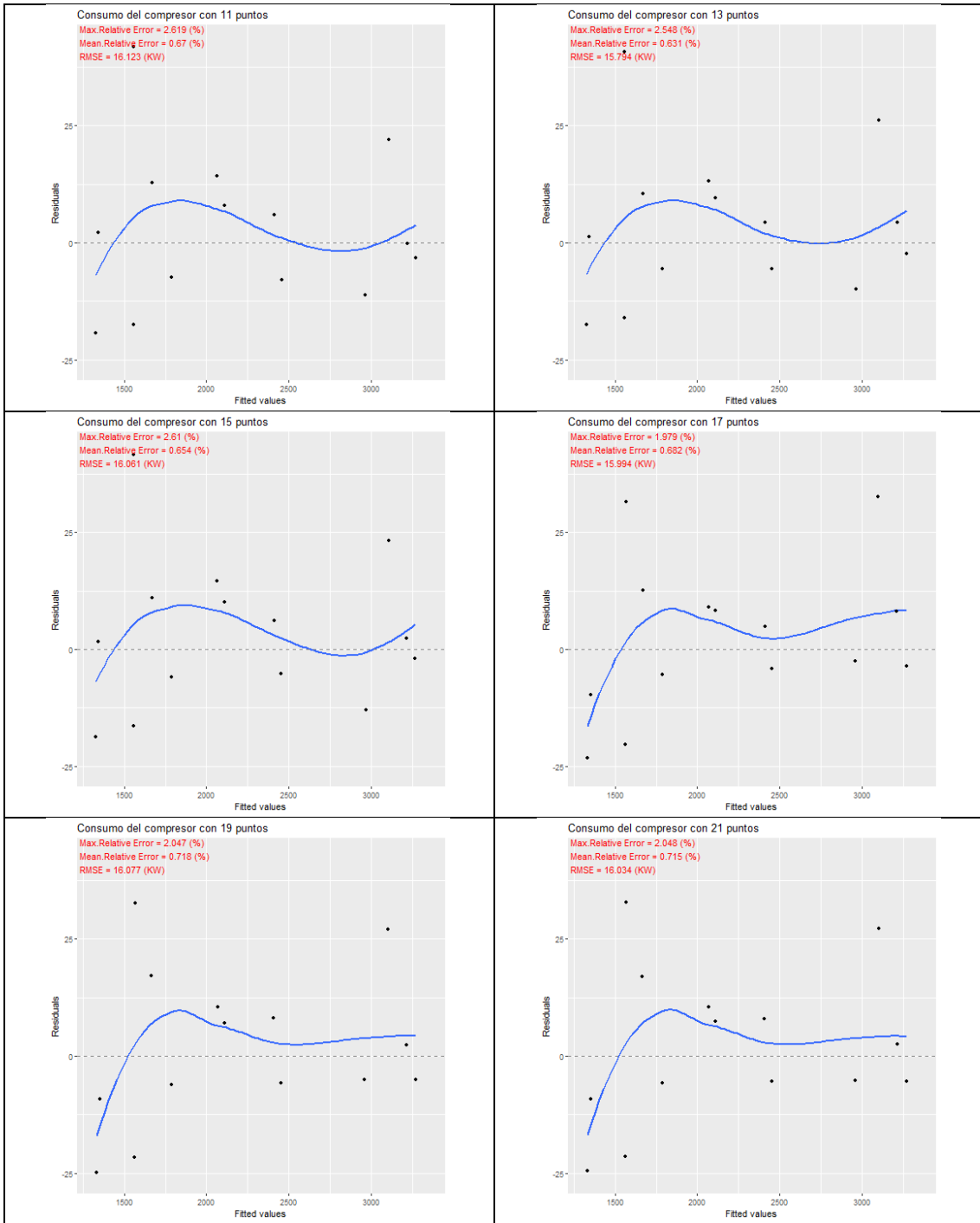




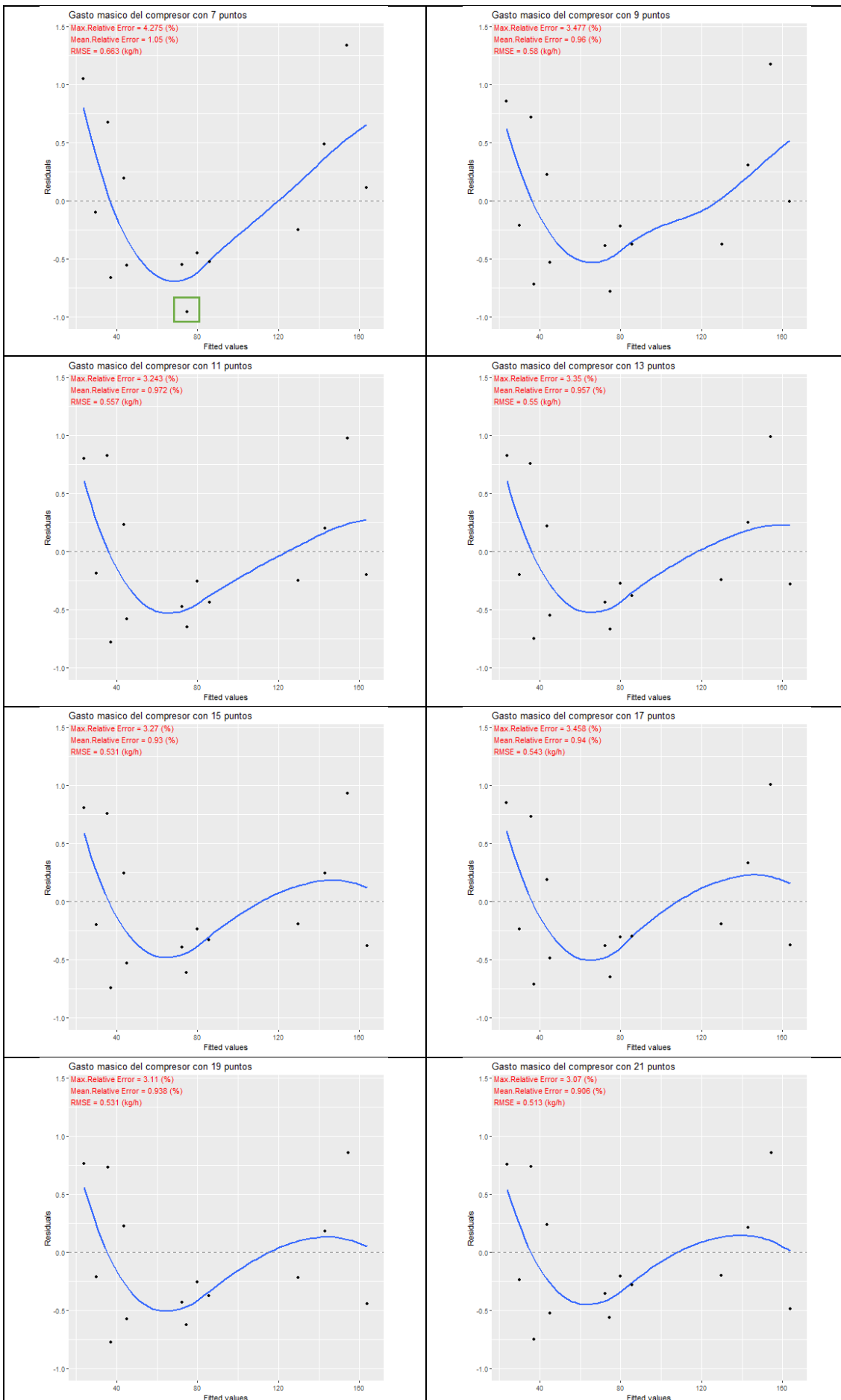
## AHRI 64a (TS CONSTANTE)

### Trabajo del compresor



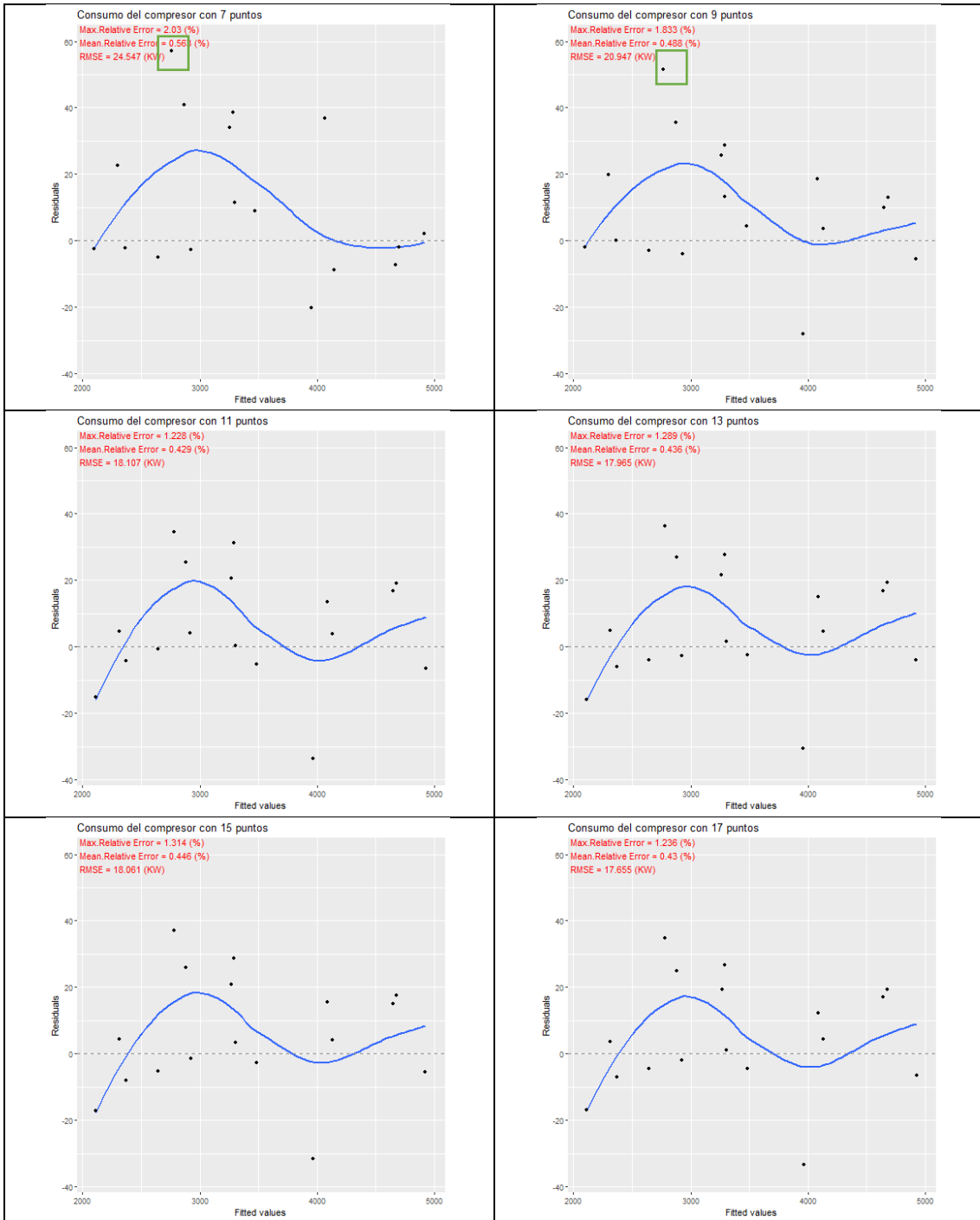


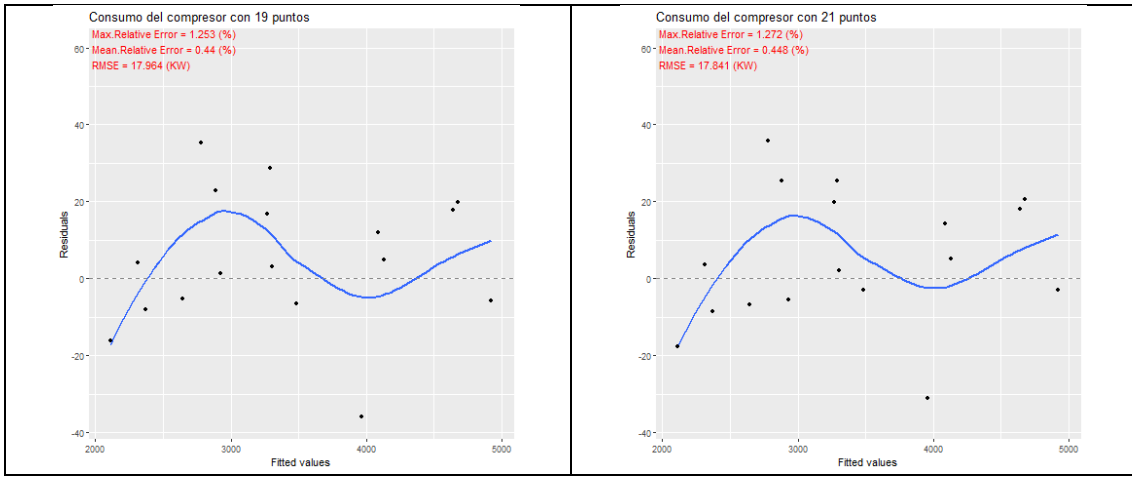
# Gasto másico



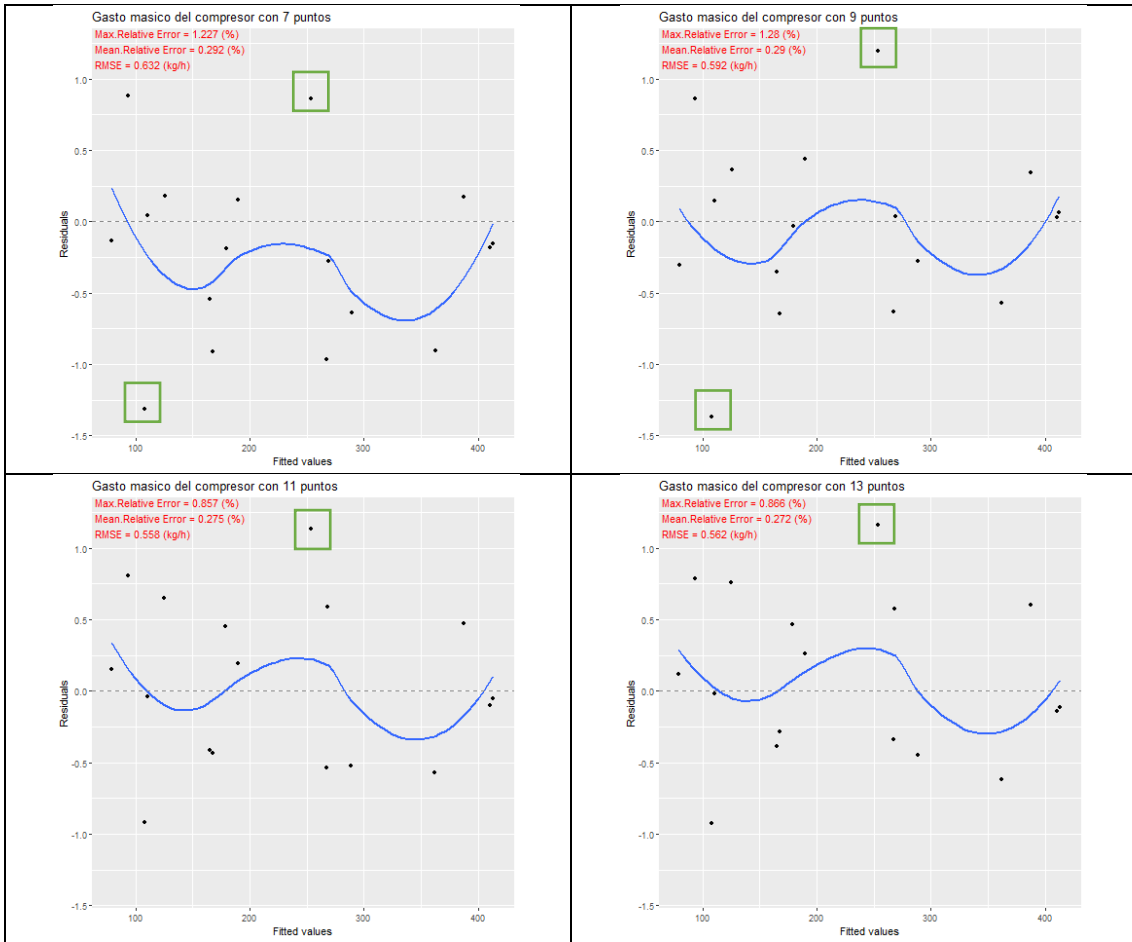
# AHRI 64b (SH 10)

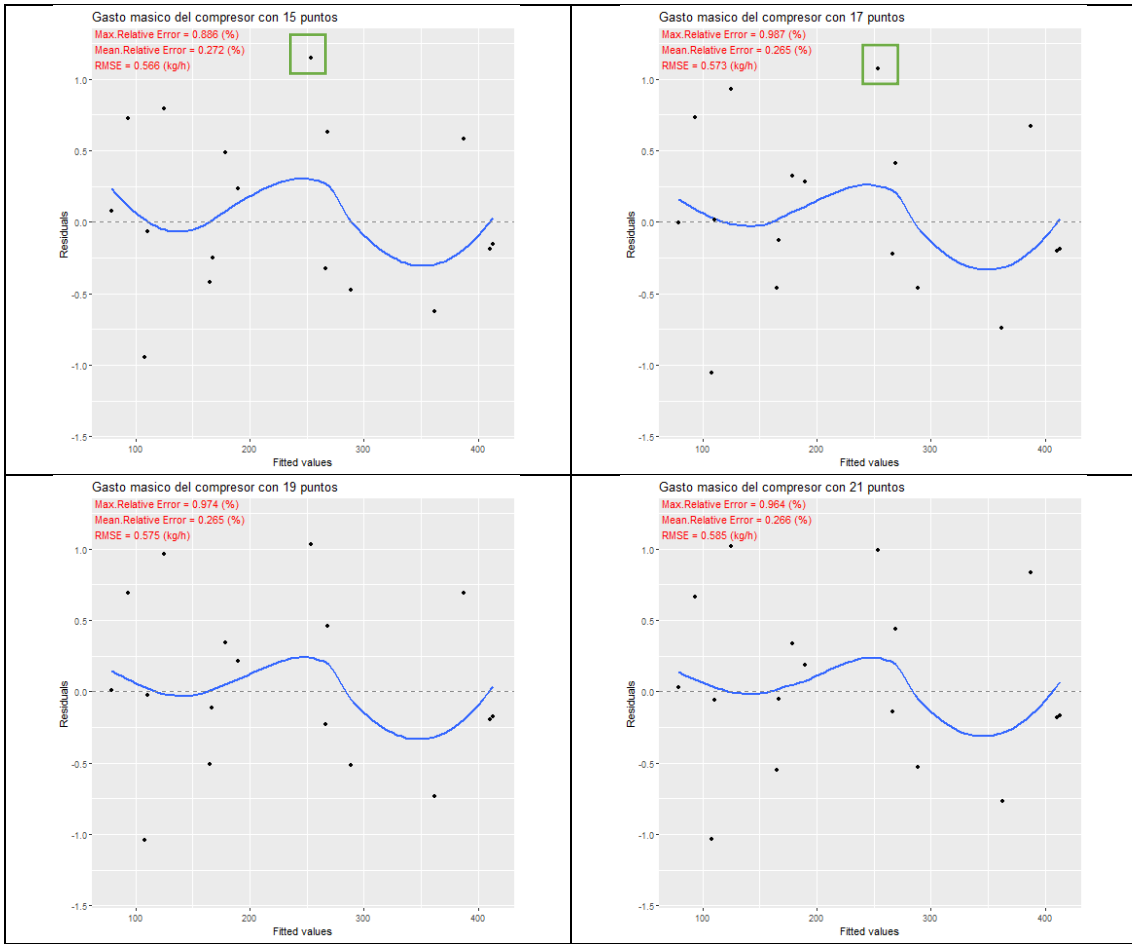
## Trabajo del compresor





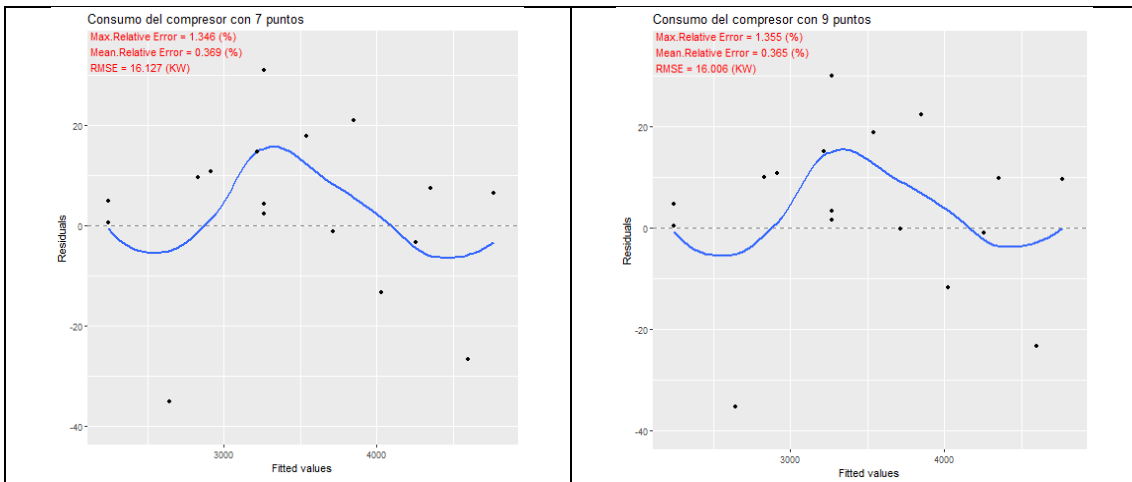
## Gasto másico

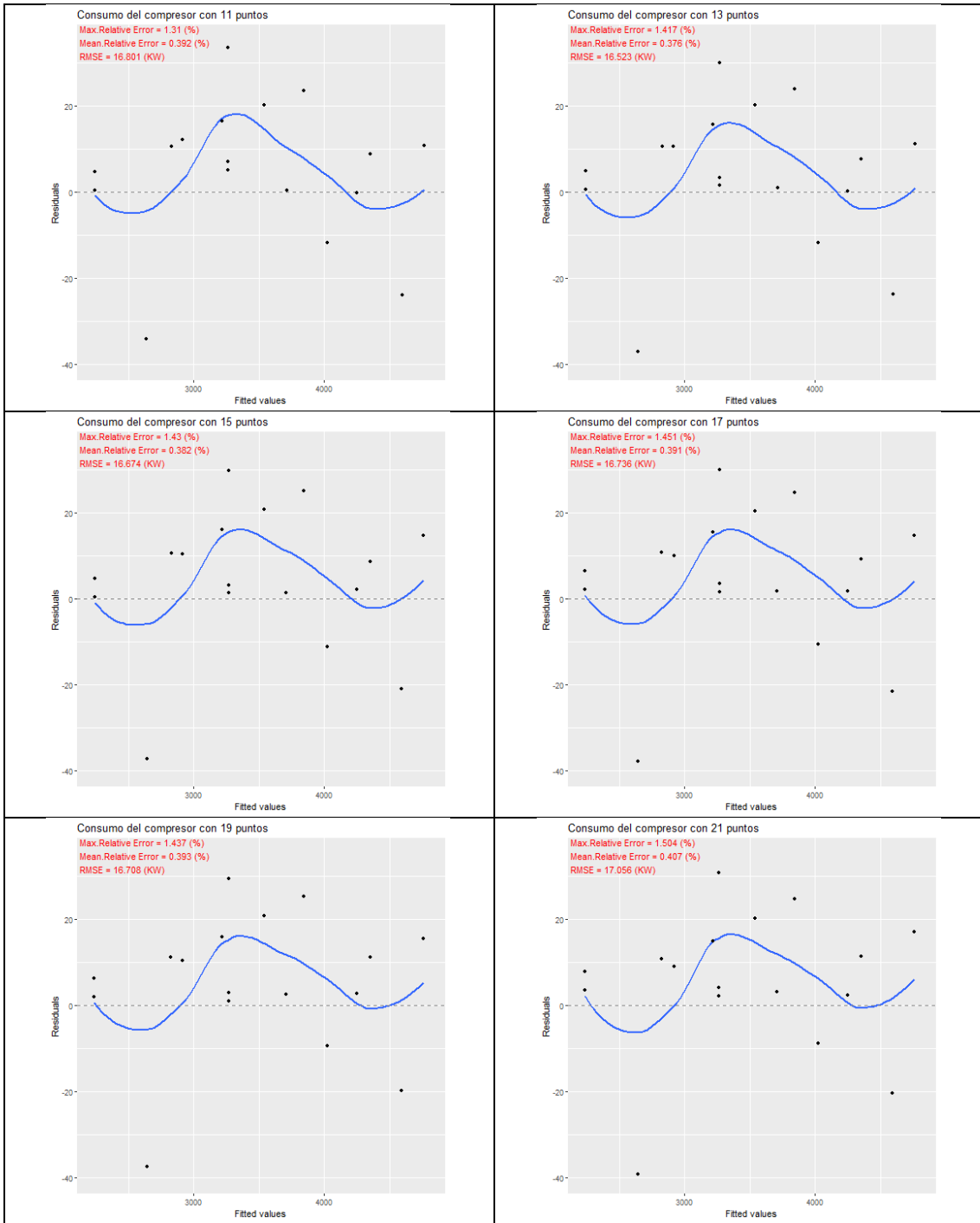




## AHRI 64b (TS CONSTANTE)

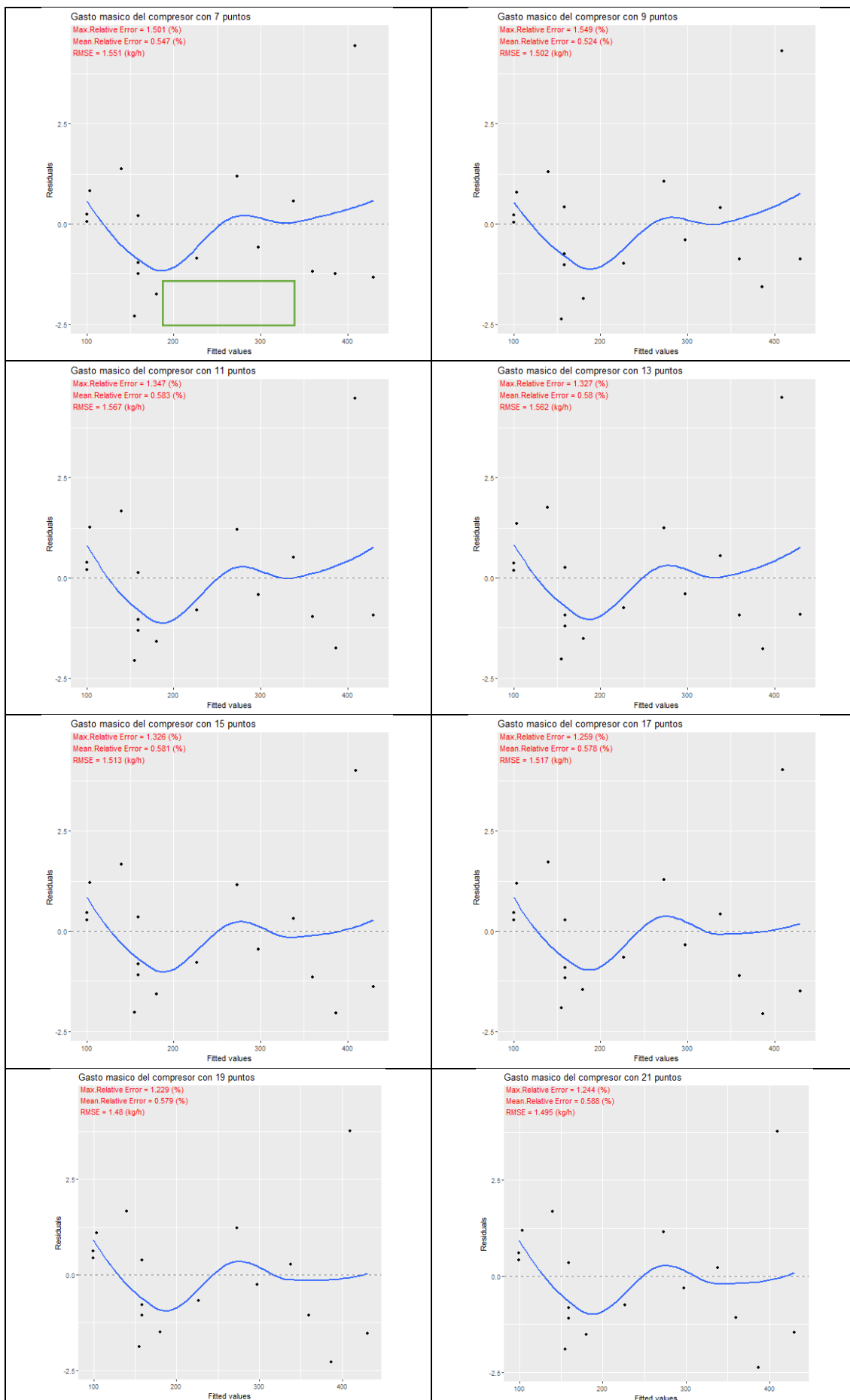
### Trabajo del compresor





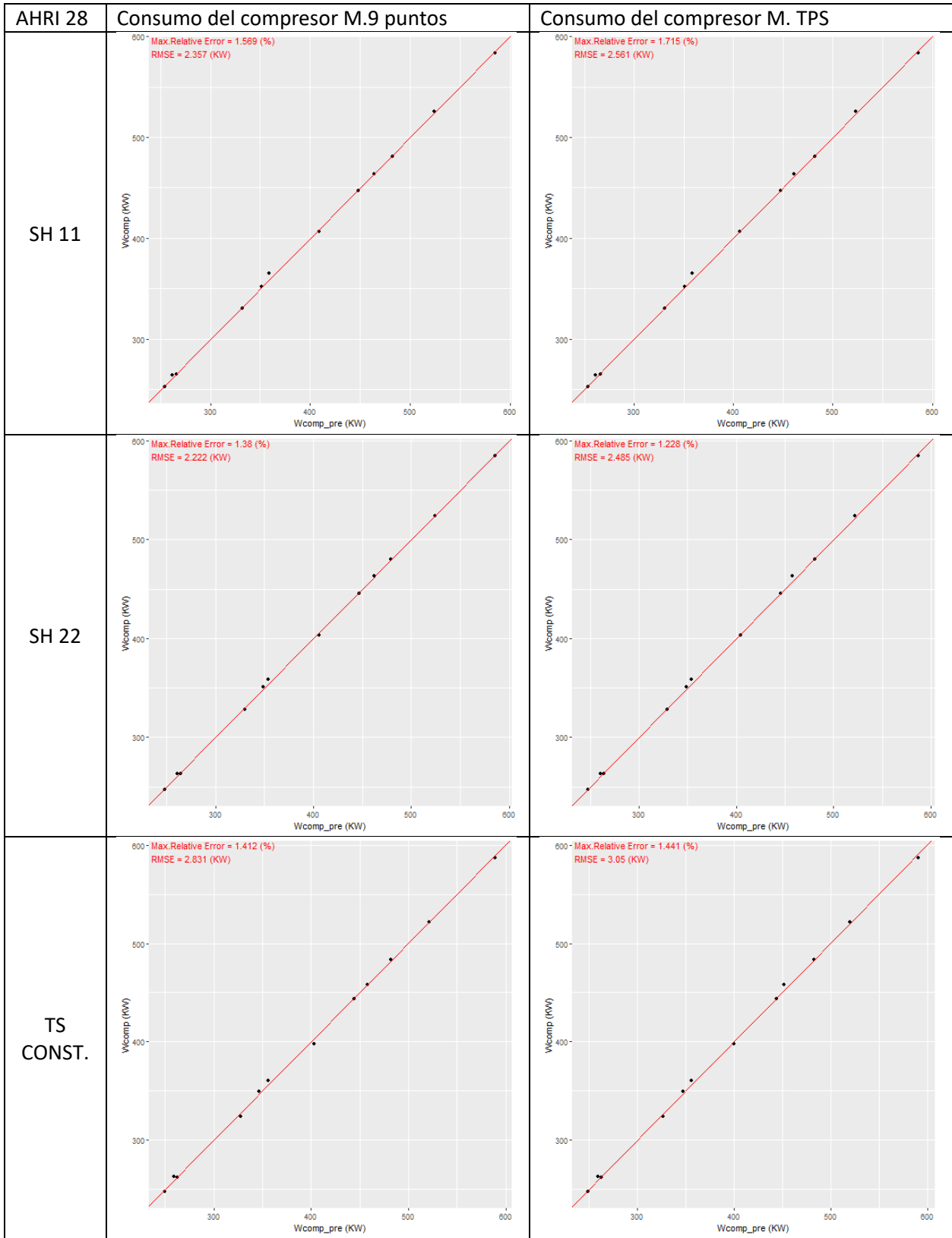


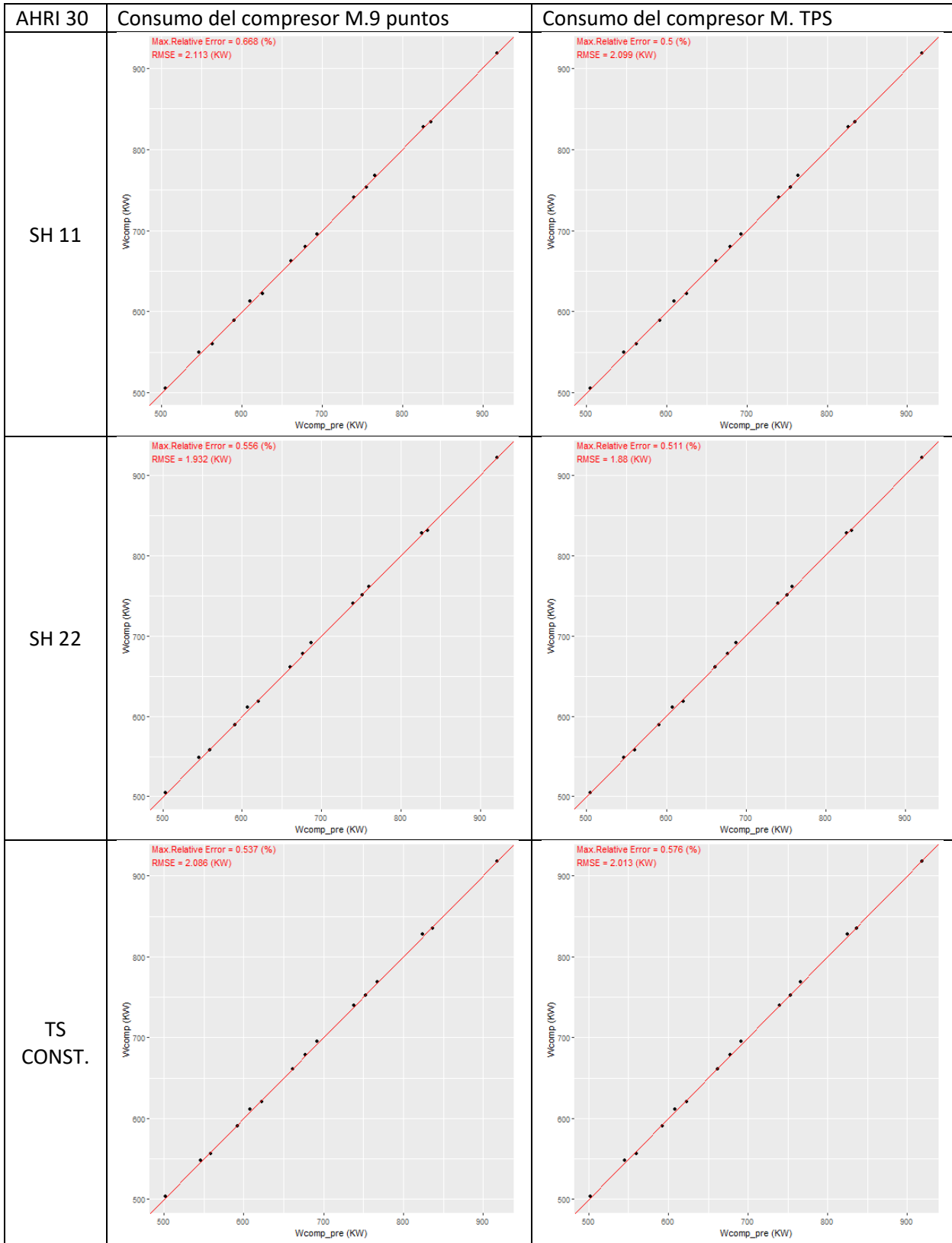
# Gasto másico

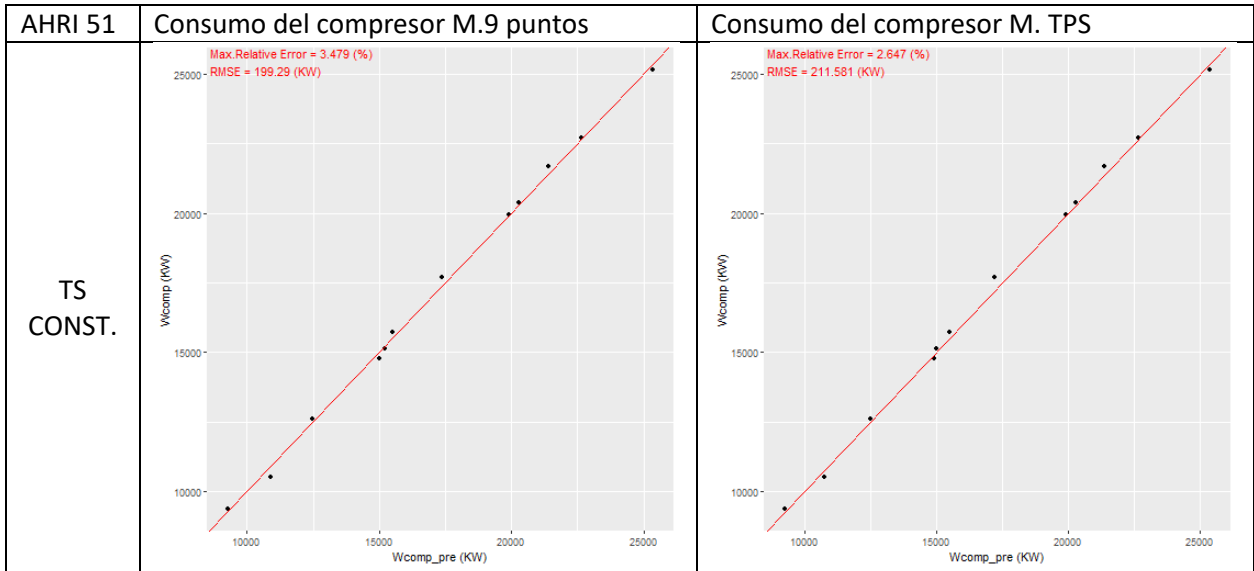


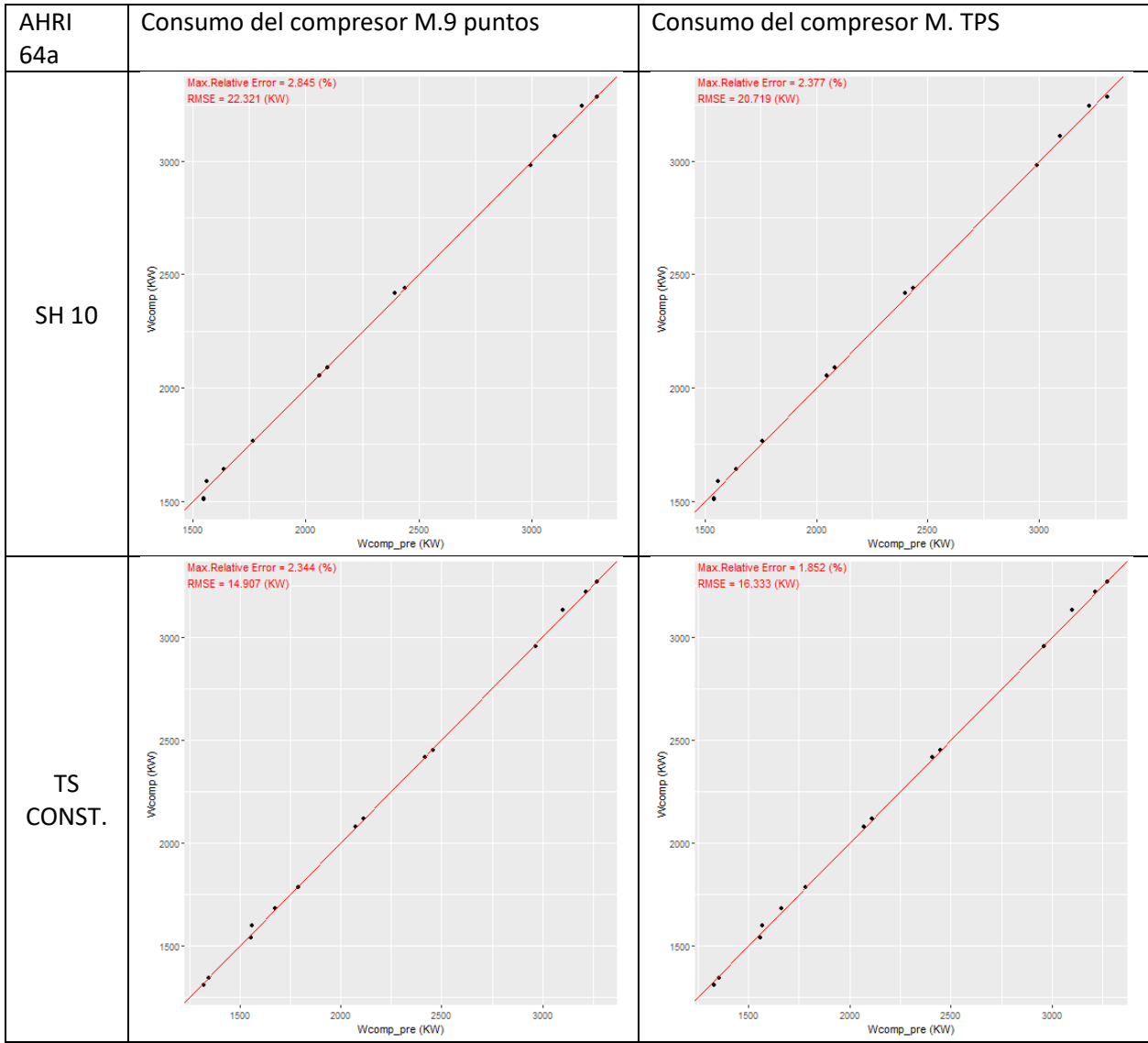
## Anexo 2. Resultado de los modelos.

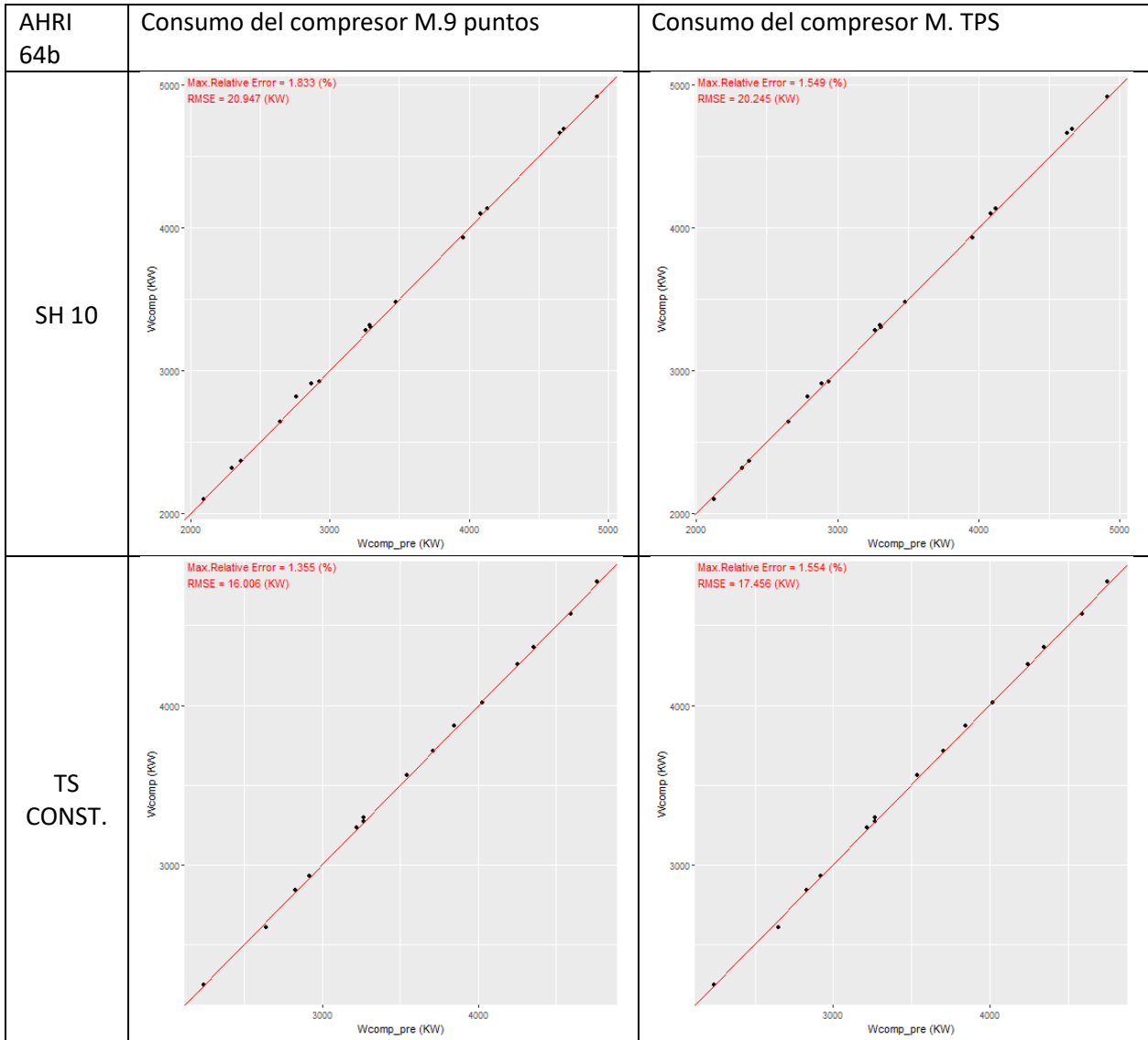
Consumo AHRI 28.....	115
Consumo AHRI 30.....	116
Consumo AHRI 51.....	117
Consumo AHRI 64a.....	118
Consumo AHRI 64b.....	119
Gasto másico AHRI 28 .....	120
Gasto másico AHRI 30 .....	121
Gasto másico AHRI 51 .....	122
Gasto másico AHRI 64a .....	123
Gasto másico AHRI 64b .....	124

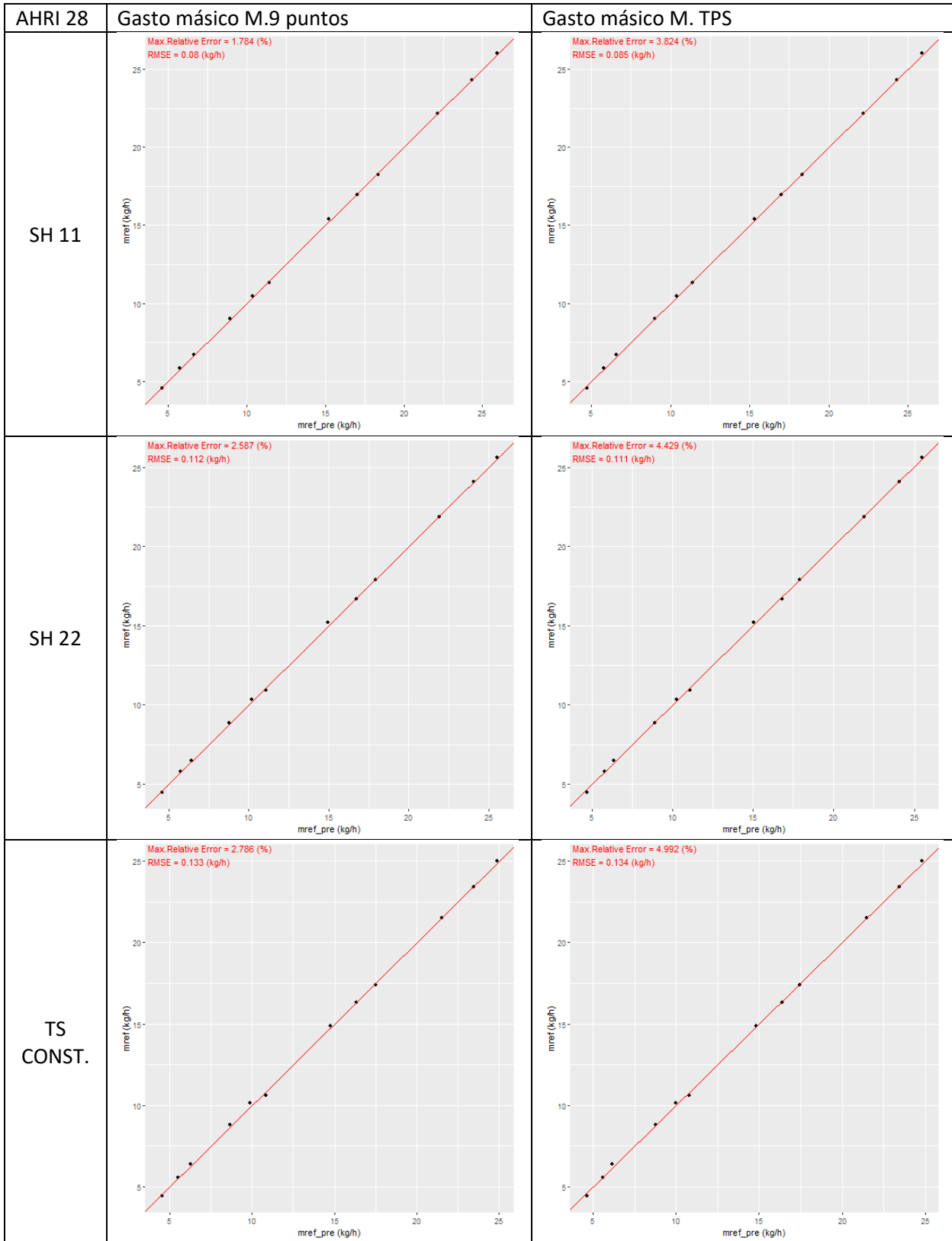




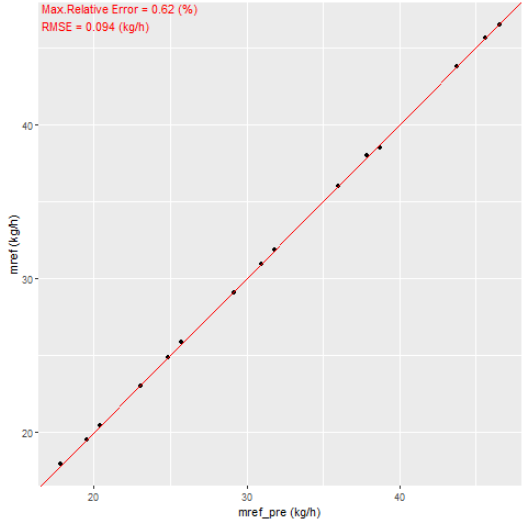
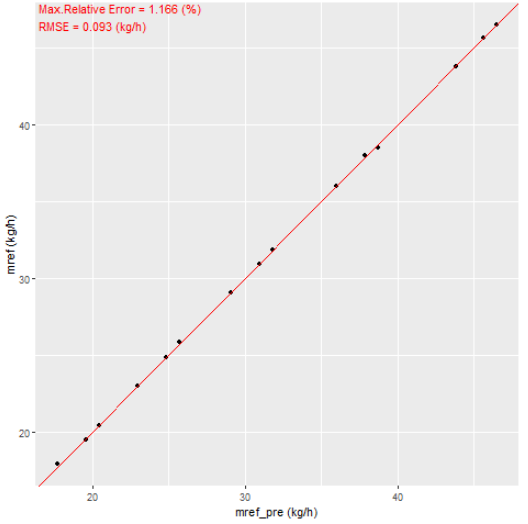
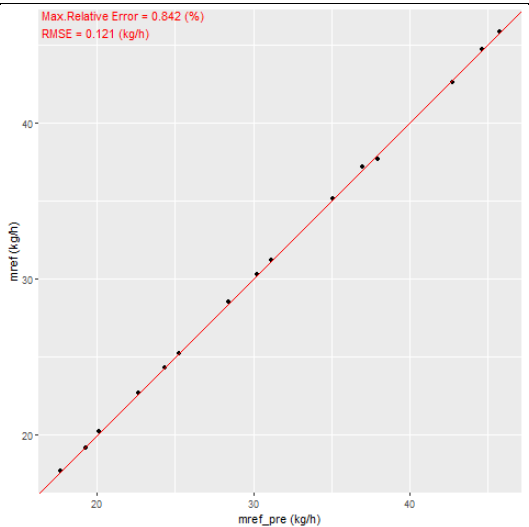
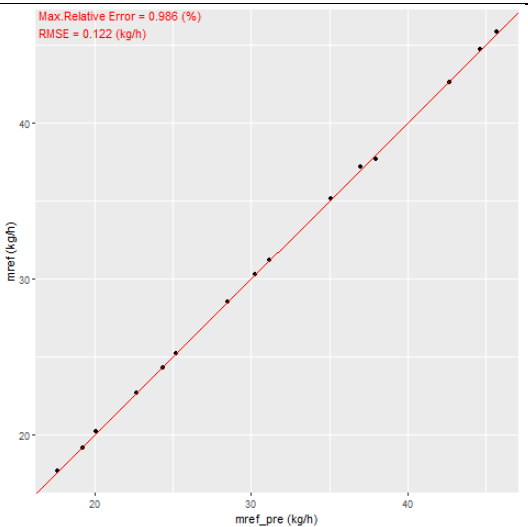
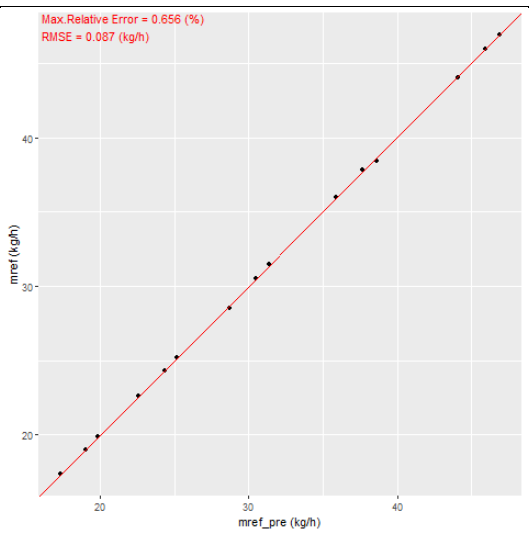
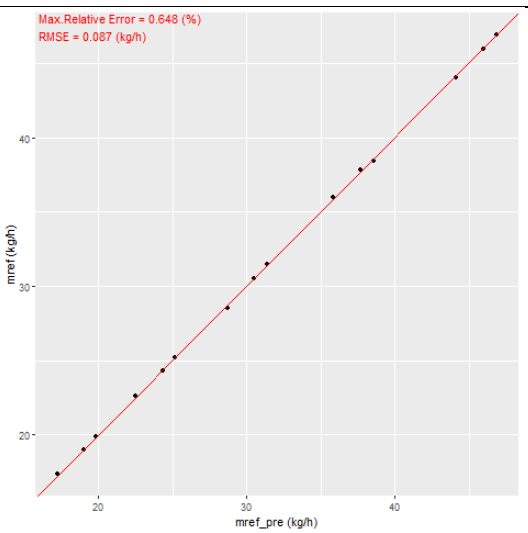


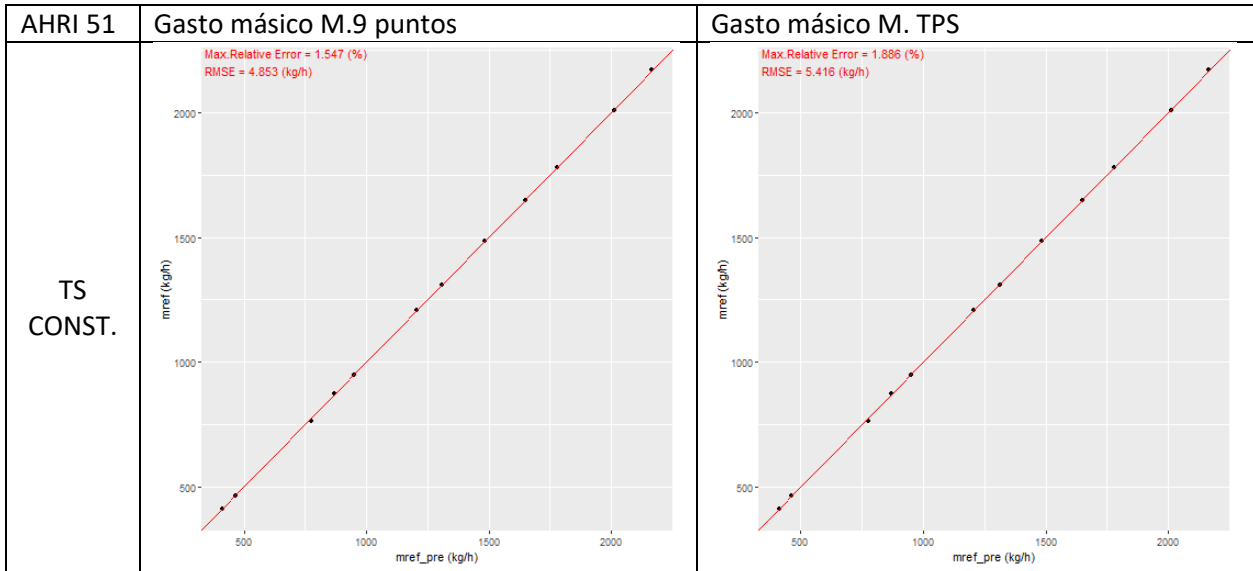


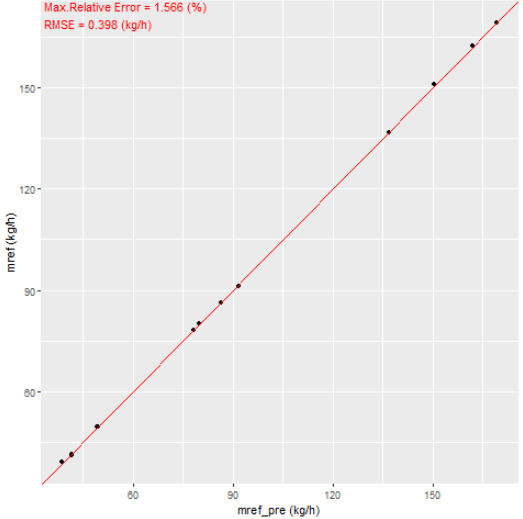
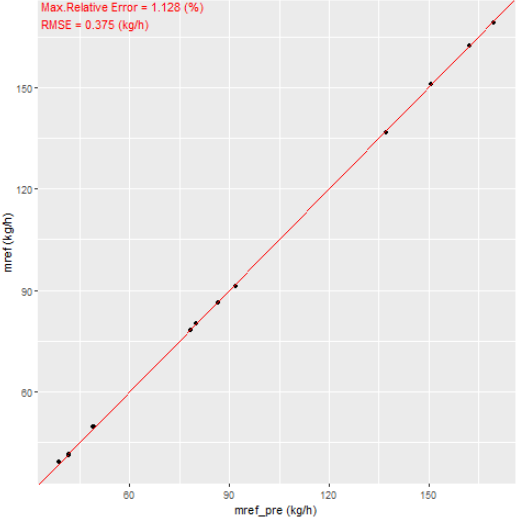
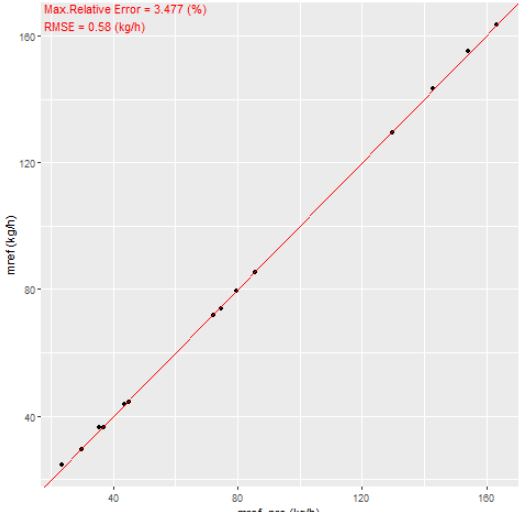
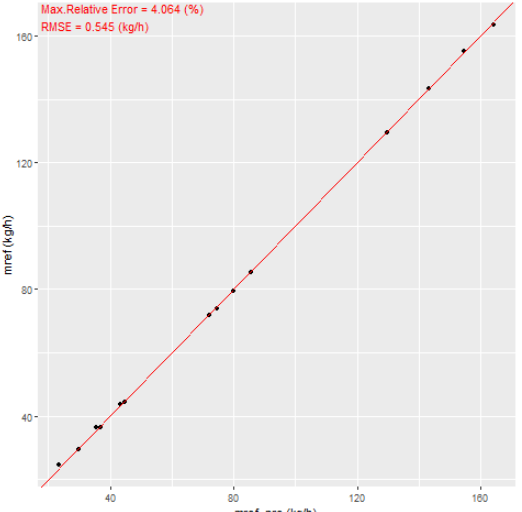


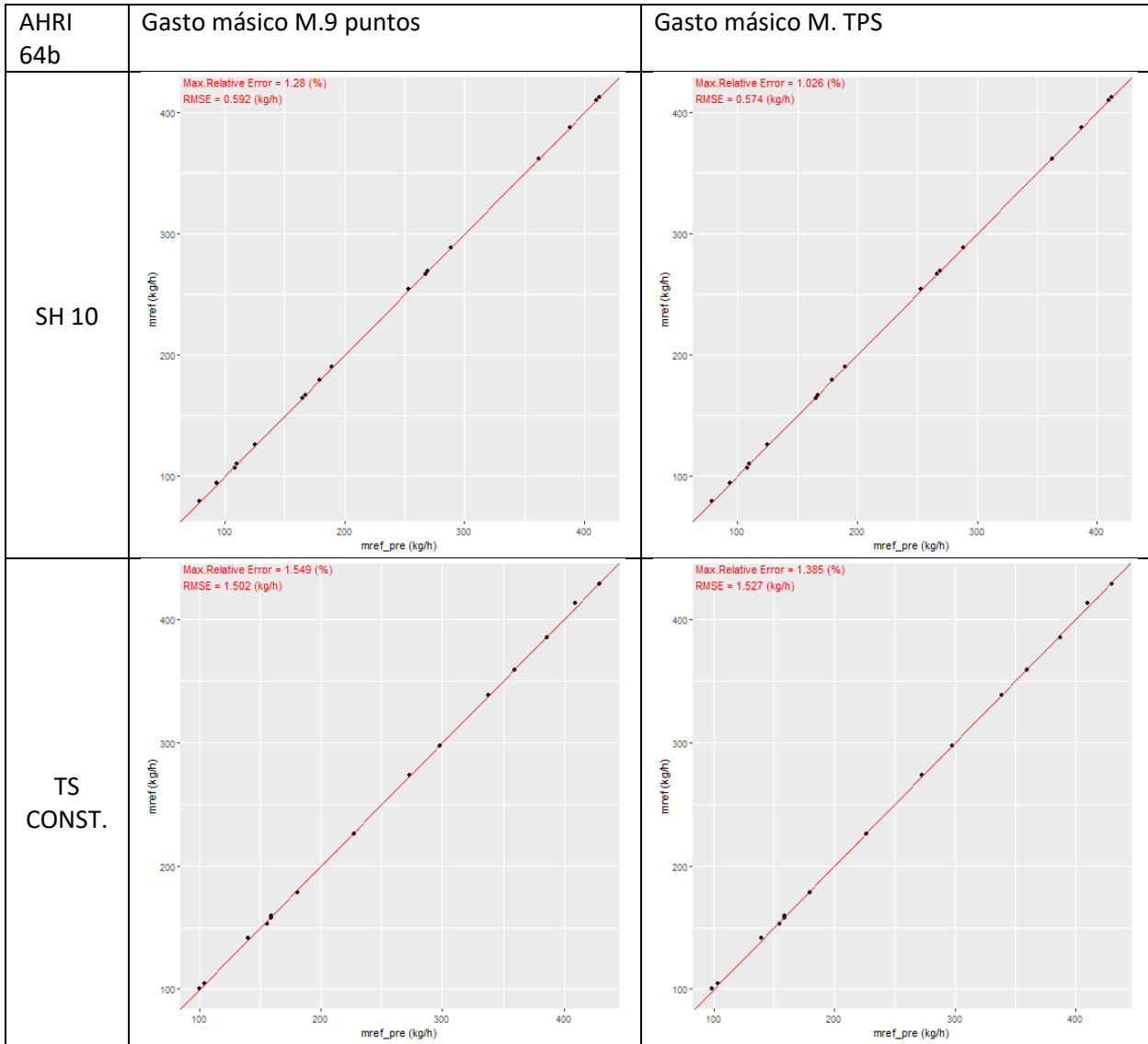




AHRI 30	Gasto máxico M.9 puntos	Gasto máxico M. TPS
SH 11	<p>Max. Relative Error = 0.62 (%) RMSE = 0.094 (kg/h)</p> 	<p>Max. Relative Error = 1.166 (%) RMSE = 0.093 (kg/h)</p> 
SH 22	<p>Max. Relative Error = 0.842 (%) RMSE = 0.121 (kg/h)</p> 	<p>Max. Relative Error = 0.986 (%) RMSE = 0.122 (kg/h)</p> 
TS CONST.	<p>Max. Relative Error = 0.656 (%) RMSE = 0.087 (kg/h)</p> 	<p>Max. Relative Error = 0.648 (%) RMSE = 0.087 (kg/h)</p> 

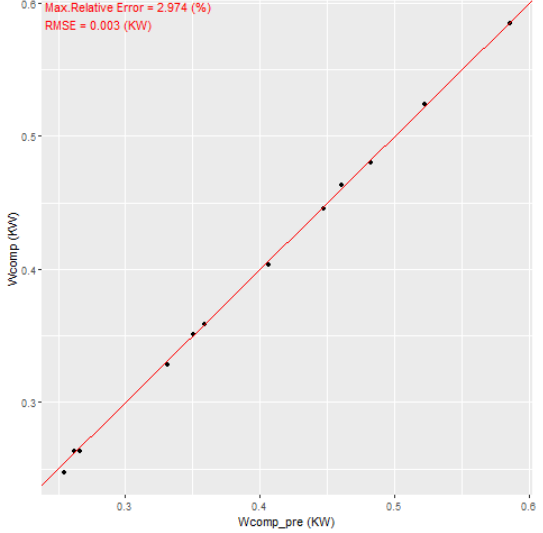
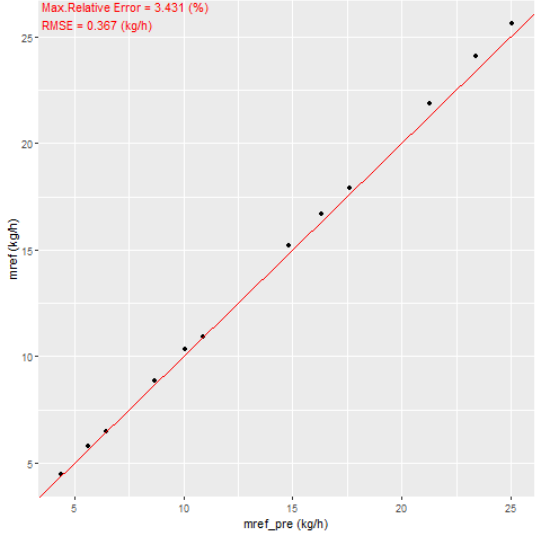
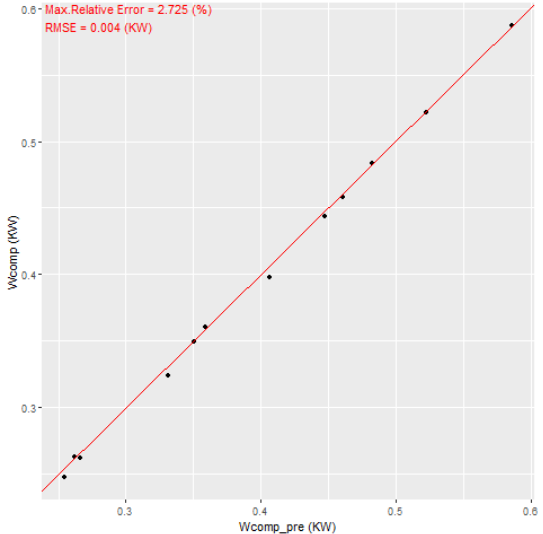
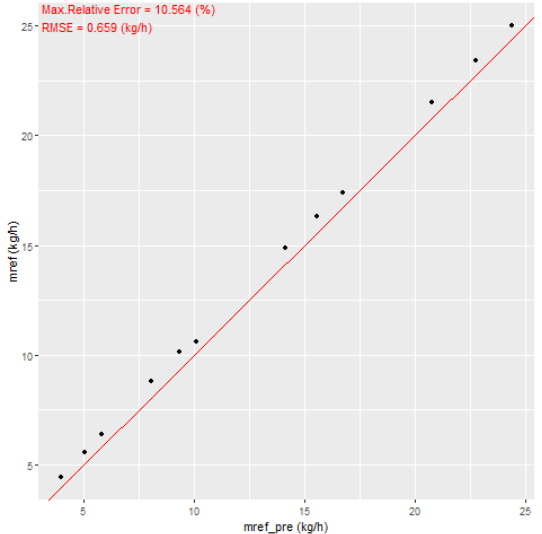
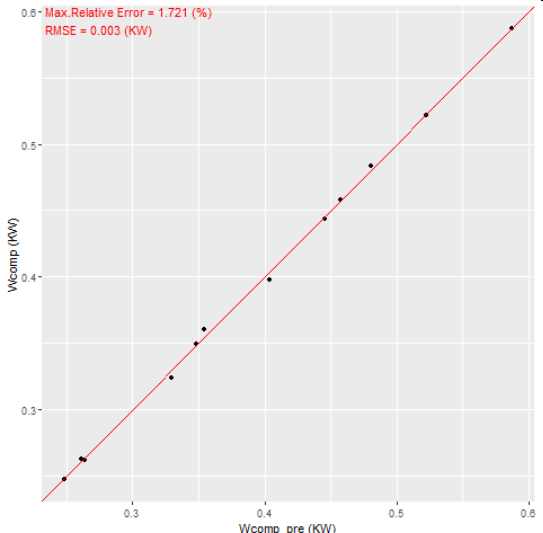
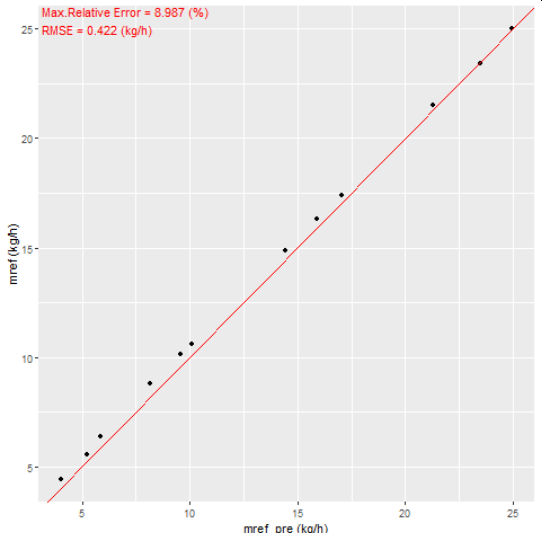


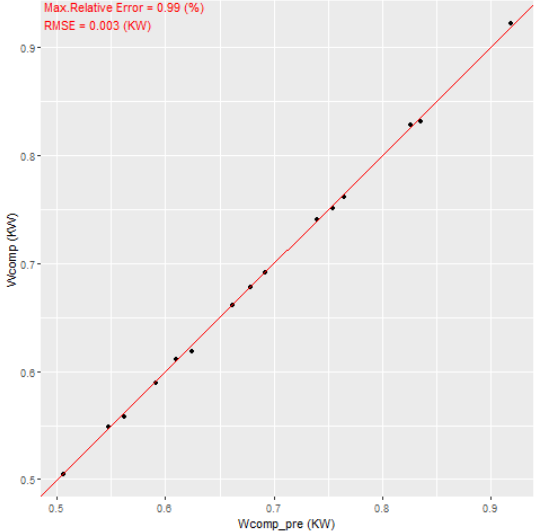
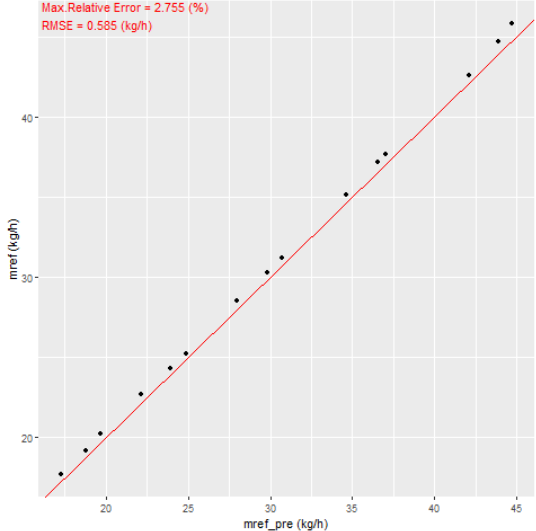
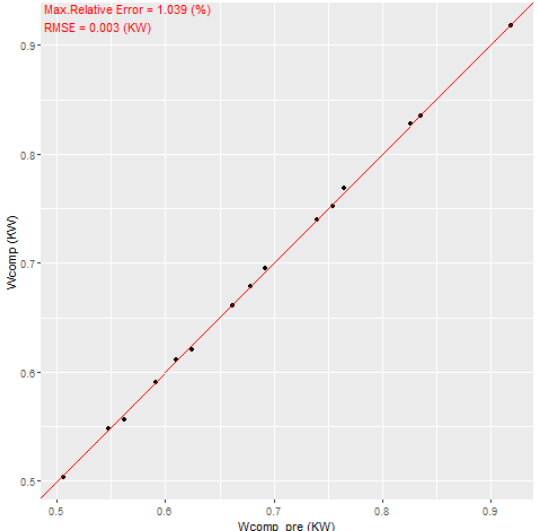
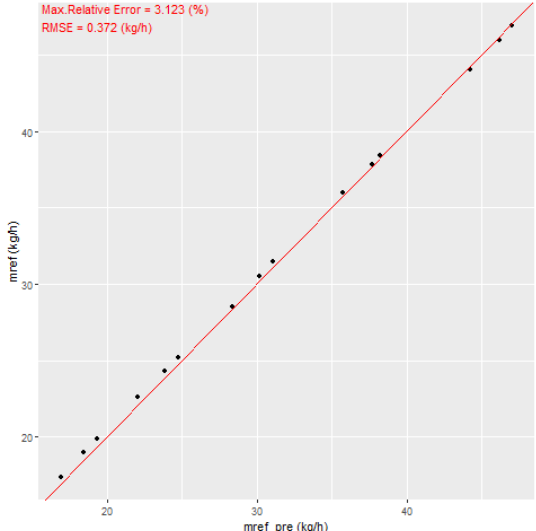
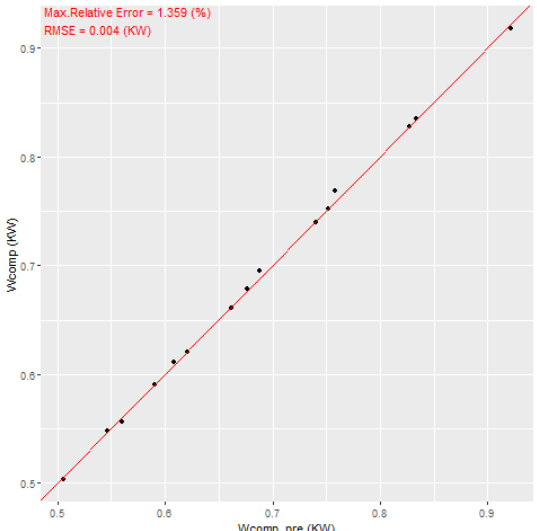
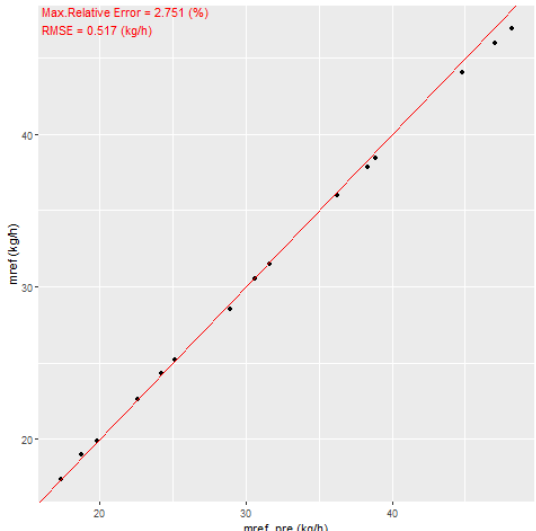
AHRI 64a	Gasto másico M.9 puntos	Gasto másico M. TPS
SH 10	<p>Max. Relative Error = 1.566 (%) RMSE = 0.398 (kg/h)</p> 	<p>Max. Relative Error = 1.128 (%) RMSE = 0.375 (kg/h)</p> 
TS CONST.	<p>Max. Relative Error = 3.477 (%) RMSE = 0.58 (kg/h)</p> 	<p>Max. Relative Error = 4.064 (%) RMSE = 0.545 (kg/h)</p> 

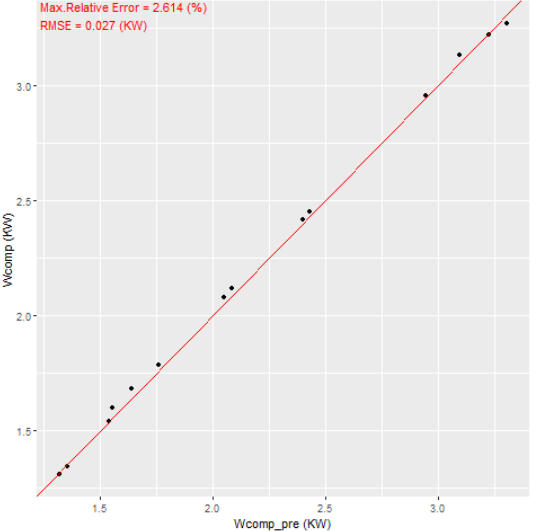
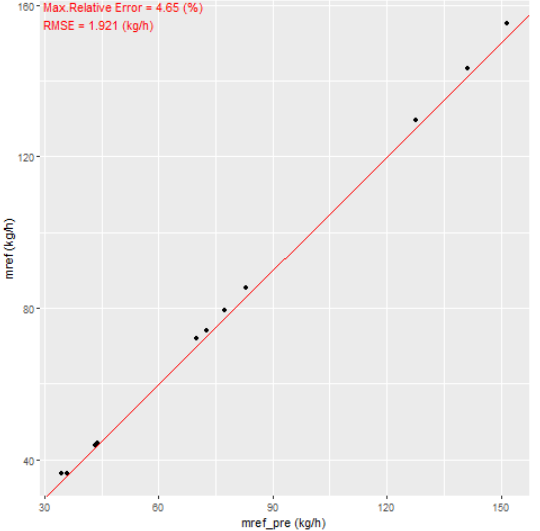
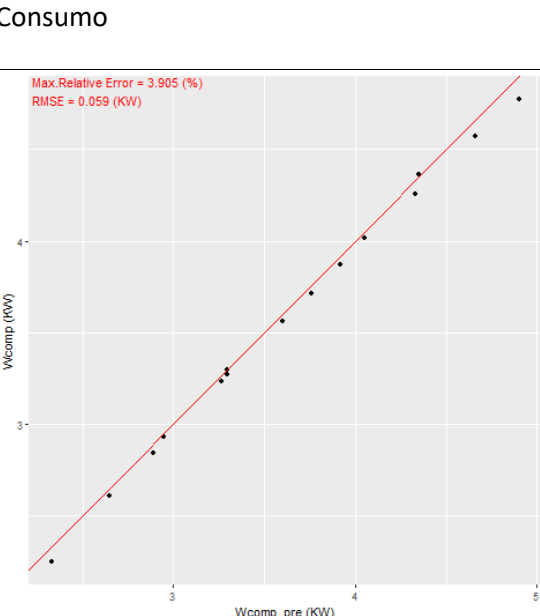
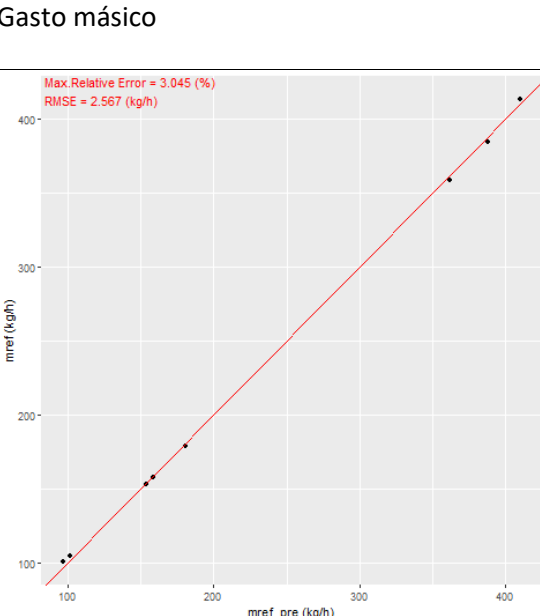


### Anexo 3. Modelo para distintos sobrecalentamientos.

AHRI 28.....	126
AHRI 30.....	127
AHRI 64a.....	128
AHRI 64b.....	128

AHRI 28	Consumo	Gasto másico
SH 11 Para SH 22	 <p>Max Relative Error = 2.974 (%) RMSE = 0.003 (KW)</p>	 <p>Max Relative Error = 3.431 (%) RMSE = 0.367 (kg/h)</p>
SH 11 para TS CONST.	 <p>Max Relative Error = 2.725 (%) RMSE = 0.004 (KW)</p>	 <p>Max Relative Error = 10.564 (%) RMSE = 0.659 (kg/h)</p>
SH 22 para TS CONST.	 <p>Max Relative Error = 1.721 (%) RMSE = 0.003 (KW)</p>	 <p>Max Relative Error = 8.987 (%) RMSE = 0.422 (kg/h)</p>

AHRI 30	Consumo	Gasto másico
SH 11 Para SH 22	 <p>Max. Relative Error = 0.99 (%) RMSE = 0.003 (KW)</p>	 <p>Max. Relative Error = 2.755 (%) RMSE = 0.585 (kg/h)</p>
SH 11 para TS CONST.	 <p>Max. Relative Error = 1.039 (%) RMSE = 0.003 (KW)</p>	 <p>Max. Relative Error = 3.123 (%) RMSE = 0.372 (kg/h)</p>
SH 22 para TS CONST.	 <p>Max. Relative Error = 1.359 (%) RMSE = 0.004 (KW)</p>	 <p>Max. Relative Error = 2.751 (%) RMSE = 0.517 (kg/h)</p>

AHRI 64a	Consumo	Gasto másico
SH 10 para TS CONST.	 <p>Max. Relative Error = 2.614 (%) RMSE = 0.027 (KW)</p>	 <p>Max. Relative Error = 4.65 (%) RMSE = 1.921 (kg/h)</p>
AHRI 64b	 <p>Max. Relative Error = 3.905 (%) RMSE = 0.059 (KW)</p>	 <p>Max. Relative Error = 3.045 (%) RMSE = 2.567 (kg/h)</p>