

**DESARROLLO DE UN METAMODELO PARA LA PREDICCIÓN DE
RENDIMIENTOS DE NAFTA DE UNA UNIDAD FCC INDUSTRIAL BASADO EN
RESULTADOS DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL**

**HECTOR STEVEN DEL RIO DUARTE
CRISTIAN ORLANDO VARGAS VASQUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA, SANTANDER**

2017

**DESARROLLO DE UN METAMODELO PARA LA PREDICCIÓN DE
RENDIMIENTOS DE NAFTA DE UNA UNIDAD FCC INDUSTRIAL BASADO EN
RESULTADOS DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL**

**HECTOR STEVEN DEL RIO DUARTE
CRISTIAN ORLANDO VARGAS VASQUEZ**

Trabajo de grado presentado para optar por el título de Ingeniero Químico

**DIRECTOR:
GIOVANNI MORALES MEDINA
Doctorado en Ingeniería Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA, SANTANDER**

2017

DEDICATORIA

A Dios primeramente por haberme permitido culminar esta etapa y sueño de mi vida, por darme la fortaleza e iluminar mi camino siempre.

A mis padres Hector Mario Del Río Sánchez e Hilda María Duarte Ariza, por el apoyo incondicional y la base fundamental en todo lo que soy, por su sacrificio y esfuerzo durante estos años de camino, gracias, todo esto se lo debo a ustedes.

A mis hermanos por ser un apoyo y motivación diaria en mi vida.

A mi compañero de Tesis Cristian Vargas por su dedicación en el proyecto y por enseñarme muchas cosas en el transcurso de la carrera y en esta etapa final.

A todos aquellos familiares y amigos que han estado conmigo para dar su apoyo, enseñanzas y ayudarme en el crecimiento como persona y como ingeniero.

Gracias y mil gracias a todos.

HECTOR STEVEN DEL RIO DUARTE

A Dios por permitirme realizar mis sueños con mucha salud y energía, a pesar de tantos obstáculos que se presentan en la vida.

A mis Padres Orlando Vargas y Olga Vásquez por su apoyo incondicional y por ser mi motivación diaria.

A mis hermanas Daniela y Sara por llenar mi vida de alegría y entusiasmo en cada momento vivido.

A mi novia por brindarme su tiempo, amor y compañía en el tiempo que hemos compartido.

A mi amigo y compañero de proyecto Héctor Del Río, por su dedicación y esfuerzo para lograr este proyecto.

Y por último sin ser menos importantes a todos mis amigos y familiares por aportar cosas valiosas en mi vida permitiéndome ser mejor cada día.

GRACIAS.

CRISTIAN VARGAS V.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por formarnos como profesionales y personas íntegras con el fin de ayudar a mejorar el mundo donde vivimos.

Al profesor y director de proyecto Giovanni Morales Medina por ser una guía, por su paciencia y su gran voluntad a la hora de brindar sus conocimientos para realizar este proyecto

TABLA CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	16
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	19
1.3 OBJETIVOS.....	20
1.4 MARCO TEÓRICO	21
1.4.1 Craqueo catalítico fluidizado (FCC).....	21
1.4.2 Diseño de experimentos.....	23
1.4.3 Regresión lineal múltiple (RLM).....	24
1.4.4 Metamodelos.....	25
2. METODOLOGÍA	27
2.1 REVISIÓN TEÓRICA	27
2.2 CONFORMACIÓN, ANÁLISIS Y DEPURACIÓN DE LA BASE DE DATOS	27
2.3 ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE LA UNIDAD FCC.....	27
2.4 SELECCIÓN DE LOS FACTORES, DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y DESARROLLO DE LAS SIMULACIONES SEGÚN DISEÑOS.....	28
2.5 PROPOSICIÓN, VALIDACIÓN Y SELECCIÓN DEL MEJOR METAMODELO	28

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS	29
3.1 VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE LA UNIDAD FCC	29
3.2 SELECCIÓN DE LOS FACTORES Y SUS RANGOS.....	31
3.3 DESARROLLO DE LOS DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	32
3.4 RESULTADOS DE LOS DISEÑOS EXPERIMENTALES	32
3.5 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS.....	38
3.6 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES EN EL METAMODELO	44
4. CONCLUSIONES	48
5. RECOMENDACIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA	50
ANEXOS.....	55

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema metodológico.....	27
Figura 2. Promedios mensuales de %Nafta unidad FCC de la GRB año 2015. ...	30
Figura 3. Comparación de datos factorial fraccionado	38
Figura 4. Comparación de datos Box Behnken.....	39
Figura 5. Comparación de datos Central Compuesto	39
Figura 6. Comparación de datos Hipercubo Latino	40
Figura 7. Gráfica de respuesta de PLS para el Factorial Fraccionado.....	41
Figura 8. Gráfica de respuesta de PLS para el Box Behnken.	42
Figura 9. Gráfica de respuesta de PLS para el Central Compuesto.	42
Figura 10. Gráfica de respuesta de PLS para el Hipercubo Latino	43
Figura 11. Porcentaje de Influencia de las variables de entrada en el metamodelo seleccionado.	46
Figura 12. Gráfica de residuos para %Nafta diseño Box Behnken	86
Figura 13. Gráfica de residuos para %Nafta diseño Central Compuesto.....	86
Figura 14. Gráfica de residuos para %Nafta diseño Factorial Fraccionado	87
Figura 15. Gráfica de residuos para %Nafta diseño Hipercubo Latino.....	87

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Rangos de variables de entrada.....	31
Tabla 2. Número de experimentos de cada diseño planteado	32
Tabla 3. ANOVA diseño Factorial Fraccionado	33
Tabla 4. ANOVA diseño Box Behnken	34
Tabla 5. ANOVA diseño Central Compuesto.....	35
Tabla 6. ANOVA diseño Hipercubo Latino	36
Tabla 7. Rangos de error desarrollando las regresiones obtenidas	38
Tabla 8. Criterios de ajuste del modelo	40
Tabla 9. Valores obtenidos en la validación cruzada.....	44
Tabla 10. Corridas totales del diseño Factorial Fraccionado.....	57
Tabla 11. Corridas totales del diseño Box Behnken	61
Tabla 12. Corridas totales del diseño Central Compuesto	65
Tabla 13. Corridas totales del diseño Hipercubo Latino	70
Tabla 14. ANOVA general del diseño Factorial Fraccionado	77
Tabla 15. ANOVA general del diseño Box Behnken.....	79
Tabla 16. ANOVA general del diseño Central Compuesto	81

Tabla 17. ANOVA general del diseño Hipercubo Latino.....	83
Tabla 18. Corridas totales del diseño factorial fraccionado autoescalado	88
Tabla 19. ANOVA general del diseño factorial autoescalado	92
Tabla 20. Coeficientes del metamodelo autoescalado seleccionado	93
Tabla 21. Valor absoluto y sumatoria de los coeficientes de la regresión autoescalada.....	93

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. PRUEBA DE MEDIAS.	56
ANEXO B. EXPLICACIÓN TEORICA DEL NUMERO DE CORRIDAS PARA CADA DISEÑO Y RESULTADOS EN CADA UNO DE ESTOS.....	56
ANEXO C. ANÁLISIS ANOVA COMPLETO DE CADA DISEÑO.	77
ANEXO D. TABLAS DE PROBABILIDAD DE LOS DISEÑOS EXPERIMENTALES	86
ANEXO E. CORRIDAS TOTALES Y ANOVA DEL DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO AUTOESCALADO.	88
ANEXO F. CÁLCULOS DE INFLUENCIA DE VARIABLES PARA EL METAMODELO SELECCIONADO.	93

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DE UN METAMODELO PARA LA PREDICCIÓN DE RENDIMIENTOS DE NAFTA DE UNA UNIDAD FCC INDUSTRIAL BASADO EN RESULTADOS DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL*.

AUTORES: HECTOR STEVEN DEL RIO DUARTE
CRISTIAN ORLANDO VARGAS VASQUEZ**

PALABRAS CLAVE: FCC, HYSYS, DDE (DISEÑO DE EXPERIMENTOS), NAFTA, METAMODELO, VALIDACIÓN CRUZADA.

DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo se llevó a cabo el desarrollo de diferentes diseños experimentales, como: Factorial fraccionado, Box Behnken, Central compuesto e Hipercubo latino, con la finalidad de observar que variables de proceso son significantes a la hora de predecir el %Nafta. Estos diseños se realizaron en base a una simulación en Hysys de la unidad FCC. Antes de ejecutar los DDE, se realizó una validación de la simulación comparando sus predicciones con datos históricos, y así mismo, se realizaron pruebas estadísticas arrojando como resultado que el proceso es representado en su mayor parte por la simulación. En general, del ANOVA de los diseños ejecutados se obtuvo que la temperatura, el sodio y el hierro son factores de poca influencia estadística en el proceso. Basados en estos resultados, se desarrollaron los metamodelos para cada DDE que se conformaron por las variables significativas y algunas interacciones entre estas. Cada metamodelo fue sometido a pruebas de calidad de ajuste y validación cruzada, observando que cada uno de los modelos presentaba resultados aceptables. Teniendo en cuenta estos resultados y el Principio de Parsimonia se encontró que el metamodelo que mejor se ajusta es el Factorial Fraccionado. Posterior a esto, se realiza un autoescalado a los datos del metamodelo escogido para determinar el porcentaje de influencia que cada uno de los factores independientes tiene sobre el %Nafta en volumen, concluyendo que el flujo de carga y el vapor de despojo son variables que presentan mayor importancia para la predicción de la variable de interés.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico químicas. Escuela de Ingeniería química. Director: I.Q., Dr. Giovanni Morales Medina

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF A METAMODEL FOR THE PREDICTION OF NAFTA PERFORMANCE OF AN INDUSTRIAL FCC UNIT BASED ON COMPUTATIONAL SIMULATION RESULTS*.

AUTHORS: HECTOR STEVEN DEL RIO DUARTE
CRISTIAN ORLANDO VARGAS VÁSQUEZ**

KEYWORDS: FCC, HYSYS, DDE (DESIGN OF EXPERIMENTS), NAFTA, METAMODEL, CROSS-VALIDATION

DESCRIPTION:

In the present work the development of different experimental designs was carried out, such as: Fractional Factorial, Box Behnken, Central Compound and Latin Hypercube, in order to observe which process variables are significant to predict %NAFTA. These designs were based on a Hysys simulation of the FCC unit. Before executing the DDE, a simulation validation was performed comparing its predictions with historical data, and also, statistical tests obtained as a result that the process is represented for the most part by the simulation. In general, the ANOVA of the executed designs showed that the temperature, the sodium and the iron are factors of little statistical influence in the process. Based on these results, we developed the metamodels for each DDE that were formed by the significant variables and some interactions between them. Each metamodel was tested for fit quality and cross validation, observing that each of the models had acceptable results. Taking into account these results and the Principle of Parsimony it was found that the best fit metamodel is the Fractional Factorial. Finally, a self-scaling is performed to the data of the chosen metamodel to determine the percentage of influence that each of the independent factors has on the % NAFTA in volume, concluding that the flow rate and the stripping steam rate are variables that present higher importance for the prediction of the variable of interest.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Engineering Physicochemical School Engineering Chemical Director: Giovanni Morales Medina, Ch.E., Dr.

1. INTRODUCCIÓN

El craqueo catalítico de lecho fluidizado (*Fluid Catalytic Cracking*, FCC) es un proceso que desempeña un papel esencial en una refinería actuando en la conversión de productos pesados del petróleo a productos más ligeros y de mayor valor agregado. Para muchas refinerías, la unidad FCC es la clave para la rentabilidad, porque el funcionamiento exitoso de esta unidad determina si el refinador puede o no permanecer competitivo en el mercado ^{1,2}. Algunos de los productos principales obtenidos en este proceso son los gases licuados del petróleo del que se puede derivar propano grado refinería, las gasolinas de índice de octanaje elevado y los aceites de ciclo; también se obtiene el subproducto de fondo denominado slurry ³.

Existe gran variedad de simuladores comerciales utilizados en la industria petrolera entre los que se destacan Aspen Hysys, PRO II y DYNsim ⁴. Dichos simuladores permiten predecir los desempeños de las FCC a partir de las propiedades del alimento, las propiedades del catalizador y las condiciones de operación ⁵. Sin embargo, la ejecución de los simuladores puede ser tediosa cuando se requieren evaluar un gran número de alternativas o cuando se requieren predicciones inmediatas. Como alternativa, se cuenta con regresiones basadas en resultados de estos simuladores, con lo cual se generan los

¹ TARQUINO PUJIRO, Richard. Mecanismos de formación de aromáticos en cortes de destilados medios del FCC. Argentina: Instituto de investigaciones en Catálisis y Petroquímica, 2014.

² SADEGHBEIGI, Reza. Fluid catalytic cracking handbook: Butterworth-Heinemann, 2012. p. 1-226. ISBN 9780123869654.

³ WAUQUIER, J. P. El refino del petróleo: Ediciones Díaz de Santos, 2004. p. 378-383. ISBN 9788479786236.

⁴ MUÑOZ BATISTA, Mario J. *et al.* Aplicación de la simulación de procesos durante la práctica laboral de estudiantes de ingeniería química. En: Revista Cubana de ingeniería química. Julio-agosto, 2011, vol. 2 no. 3., p. 15-23. ISSN 22231781.

⁵ MONTESDEOCA ESPÍN, Diego Eduardo. Simulación de la unidad de reformado catalítico de la refinería estatal Esmeraldas. Madrid: Universidad politécnica de Madrid, 2013.

denominados metamodelos. Los metamodelos resultan ser efectivos al ser aplicados en simulaciones de fenómenos presentados en el proceso ⁶.

En el presente trabajo, se desarrollan metamodelos con base en simulaciones del proceso FCC utilizando Aspen HYSYS para la predicción de los rendimientos de nafta generados en el reactor. Los datos para la generación de los metamodelos son definidos con ayuda de la aplicación de diseños de experimentos de tipo factorial fraccionado, central compuesto, Box-Benhken e Hipercubo latino; con estos diseños es posible obtener una medida del efecto de los factores y sus interacciones sobre la respuesta. También, se realiza un análisis estadístico a cada metamodelo derivado de cada diseño experimental y una validación con el fin de definir cuál metamodelo se ajusta mejor para la predicción del porcentaje de nafta producida.

⁶ VILLAREAL, M.G; CABRERA, M. Un método de optimización vía simulación: aplicación a un proceso de moldeo por inyección de termoplásticos. Monterrey, 2007.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El análisis y las predicciones de los rendimientos de la unidad FCC son un tema de gran complejidad debido a la cantidad de variables que intervienen en el proceso y a la red de reacciones producidas por el catalizador. Para el estudio de las unidades industriales de FCC se cuenta con paquetes comerciales de simulación, que permiten la predicción de las condiciones operacionales y los rendimientos de estas unidades al ser sometidas a cambios de presión, temperatura, flujo de carga, entre otras variables. Sin embargo, la conexión entre los simuladores y los programas de planeación y optimización no se realiza de forma simple delimitando la aplicación de las simulaciones a casos de estudios particulares.

Una opción para describir la superficie operacional consiste en desarrollar metamodelos de regresiones lineales múltiples a partir de datos predichos por las simulaciones de las unidades industriales. Dichos metamodelos permiten un entendimiento sencillo de como la variable de respuesta es afectada por cambios en las variables de proceso, así como su aplicación en programas desarrollados en otro ambiente de simulación.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La industria petrolera obtiene beneficios al aplicar los resultados obtenidos con simulaciones, las cuales corresponden a una manera rápida y económica de predicción de desempeños, permitiendo analizar diferentes escenarios operativos que disminuyan los costos del proceso. La finalidad de este proyecto es ajustar modelos de regresión lineal múltiple que describan el panorama operacional de una unidad FCC de la GRB y que estén dirigidos a la descripción del rendimiento en volumen de nafta. Los metamodelos presentan la ventaja de una visualización y comprensión rápida de los efectos producidos en la unidad por los cambios en las condiciones operacionales. Asimismo, permiten los análisis del comportamiento de la FCC en programas de planeación y optimización de la producción, sin necesidad de recurrir al simulador.

1.3 OBJETIVOS

Objetivo General

- Proponer y validar un metamodelo de regresión lineal múltiple para la predicción del desempeño de nafta de una FCC industrial a partir de datos obtenidos con el simulador Hysys.

Objetivos específicos

- Plantear varios diseños de experimentos computacionales para guiar el proceso de obtención de datos en una simulación de unidad de craqueo catalítico.
- Ejecutar simulaciones de una unidad de craqueo catalítico industrial considerando el diseño de experimentos propuestos.
- Formular y validar una regresión lineal considerando los resultados de las simulaciones ejecutadas.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 Craqueo catalítico fluidizado (FCC) El proceso FCC es complejo. Pero para mayor claridad, la descripción del proceso se ha separado en varias etapas: El precalentamiento de la carga, la vaporización de la carga, la reacción de desintegración, la separación de los productos del catalizador y la regeneración del catalizador ^{2,7}. La carga de una unidad FCC se conforma principalmente de parafinas, naftenos y aromáticos, que provienen de los fondos de la destilación atmosférica o de los destilados y/o fondos de la torre de vacío ⁸.

Después del precalentamiento, la carga es vaporizada para fomentar las reacciones de desintegración catalítica. Esta vaporización se logra cuando el catalizador caliente que proviene del regenerador se pone en contacto directo con la carga en la base del *riser* –tubo vertical de flujo ascendente–; asimismo, el catalizador regenerado también compensa el enfriamiento interno que tiene lugar en el *riser* ². Con la carga ya vaporizada se generan las reacciones de craqueo catalítico formando gas seco (hidrógeno, metano y etano), gas ácido (H₂S), gas licuado de petróleo (propano, butanos y butenos), gasolina, aceite de ciclo ligero (ALC), aceite de ciclo pesado (APC), productos de fondos y coque ⁹.

Después del *riser*, los productos y el catalizador entran a un dispositivo llamado reactor. En la actualidad la función del reactor es servir como espacio para los

² SADEGHBEIGI. Op. cit.

⁷ HERNÁNDEZ BARAJAS, José R.; VÁZQUEZ ROMÁN, R. y FÉLIX FLORES, Ma. Guadalupe. Descripción de las corrientes en un tubo elevador a través de la distribución gamma. En : Información Tecnológica, 2008. vol. 19 no. 3, p. 33-42. ISSN 07180764.

⁸ FÉLIX FLORES, Ma. Guadalupe. Simulación del proceso FCC: Caracterización de las corrientes de alimentación y productos del riser a través de la función de distribución gamma. p. 7-11.

⁹ MEDINA MORENO, Ana Gicela y MORENO RUÍZ, Diana Marcela. Simulación del sistema reactor-regenerador de la unidad de craqueo catalítico UOP-I de la GRB utilizando Hysys. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016. p. 17-37.

separadores tipo ciclón. Estos ciclones separan del 75 al 95% del catalizador el cual es enviado a la sección de agotamiento mientras que los productos gaseosos son enviados a la torre de destilación fraccionada. En la torre de destilación fraccionada se separan los productos del reactor de acuerdo a sus puntos de ebullición. El catalizador en la sección de agotamiento es puesto en contacto con vapor de agua para separar los hidrocarburos atrapados en la superficie catalítica. El catalizador es entonces enviado al regenerador para restaurar su actividad y proporcionar el calor necesario para las reacciones endergónicas sucedidas en el *riser*⁸. Con esto la unidad FCC presenta una integración energética entre el regenerador y el *riser*.

Entre las variables de proceso y parámetros operacionales de mayor influencia en el proceso FCC se encuentran el flujo de alimentación y su naturaleza, la temperatura de carga, tipo y actividad del catalizador, vapor de despojo, entre otras; además de estas se debe tener en cuenta el gas de aspersion que es el encargado de distribuir el catalizador en la unidad de una manera uniforme² y adicional a esto conocer las impurezas presentes en la carga de alimento como los metales (Sodio, Hierro, Vanadio, Cobre y Níquel) que pueden llegar a inhibir el catalizador², por dichas razones algunas de estas variables son analizadas mediante diseños experimentales en el presente trabajo.

² SADEGHBEIGI. Op. cit.

⁸ FÉLIX FLORES. Op. cit.

1.4.2 Diseño de experimentos El diseño de experimentos se define como un conjunto de técnicas eficaces para realizar pruebas experimentales en los factores que afectan un sistema e identificar el nivel de afectación sobre las variables de respuesta ^{10,11}. Usualmente, el análisis de los resultados de la aplicación de un diseño experimental supone un nivel de significancia igual o inferior al 5% para los factores que afectan la variable de respuesta ¹².

La literatura reporta diversos diseños experimentales como los diseños factoriales fraccionados 2^{k-p} , que son diseños grandemente utilizados y permiten estimar más efectos a un menor costo ¹³. Por otro lado, el diseño central compuesto es de común uso debido a su flexibilidad, pues se construye a partir de un diseño factorial 2^k , en donde se agregan puntos sobre los ejes y en el centro denominados puntos axiales y puntos al centro respectivamente ¹³. También se cuenta con el diseño Box-Behnken, el cual se aplica cuando se tienen tres o más factores y es eficiente en cuanto al número de experimentos ¹⁰. Además de estos, se cuenta con el diseño hipercubo latino, el cual el muestreo en forma aleatoria ¹⁴ para realizar la ubicación de los puntos, con la ventaja especial de asumir variable el número de muestras a aplicar ¹⁵.

¹⁰ GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y De LA VARA SALAZAR, Roman. Análisis y diseño de experimentos. México, D.F.: McGraw-Hill, 2008. p. 4-417. ISBN 9786071503152.

¹¹ MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y análisis de experimentos. México D.F.: LIMUSA WILEY, 2004. p. 1. ISBN 9681861566.

¹² BADII, M.H., *et al.* Diseños experimentales e investigación científica. En: InnOvaciones de Negocios, 2007, vol. 4 no. 2. p. 283-330. ISSN 16659627.

¹³ CENTRO DE INGENIERIA DE LA CALIDAD. Metodología de superficies de respuesta, gran alternativa para incrementar la productividad de sus procesos. Cali, Colombia .

¹⁴ BARRÓN, Jorge H. y NUÑEZ MC LEOD, Jorge E. Técnicas estadísticas y avanzadas en el análisis de grandes modelos computacionales. Mendoza, Argentina : Intituto CEDIAC, 1999.

¹⁵ BALABANOV, Vladimir; VENTER, Gerhard y VIANA, Felipe. An algorithm for fast optimal latin hypercube design of experiments. En: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Noviembre de 2009.

El análisis de varianza (ANOVA) permite evaluar la significancia estadística del modelo de regresión en cada caso, entre menor valor P, el modelo es más representativo para el caso de estudio. La ANOVA particiona la variabilidad de la variable de respuesta en piezas separadas para cada efecto y prueba la significancia estadística de cada uno de ellos comparado con su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. Entonces los efectos con valor-P menor que 0,05 indican significancia en el modelo con un nivel de confianza del 95% ¹⁶.

La proposición de cada diseño de experimentos puede ser efectuada mediante programas computacionales como Minitab 17, JMP 13 y Statgraphics, entre otros.

1.4.3 Regresión lineal múltiple (RLM) Los modelos de regresión múltiple modelan el comportamiento de una variable de respuesta (Y) en función de varias variables de predicción o independientes (x_i), mediante la siguiente relación (E1):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (E1)$$

Donde, los β_i son los parámetros del modelo que se conocen como coeficientes de regresión ¹⁰, x_k son los factores que influyen en la variable de respuesta y puede asimismo referirse a interacciones entre variables, y ε es el error aleatorio –

¹⁰ GUTIÉRREZ PULIDO. Op. cit.

¹⁶ LOZANO MARTÍNEZ, Leyla Patricia. Aplicación de la metodología de superficie de respuesta en la optimización de la producción de biodiesel a partir de aceite de microalgas mediante transesterificación en fase homogénea. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2010. p. 26-27.

independiente, con distribución normal y varianza constante ¹⁷. Los coeficientes de regresión se obtienen mediante el algoritmo de mínimos cuadrados, según la forma matricial:

$$\beta_i = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (E2)$$

Donde β_i es el vector de coeficientes, X^T corresponde a la matriz transpuesta de X , X y Y son las matrices de los datos iniciales de las variables predictoras y la variable de respuesta, respectivamente ¹⁸. Una vez obtenidos los parámetros de la RLM se procede a realizar diferentes pruebas que permiten verificar los supuestos de la regresión y determinar el desempeño del ajuste (1)¹⁹; una de estas pruebas corresponde a la significancia de los coeficientes por medio del análisis de varianza ¹⁰.

1.4.4 Metamodelos Los metamodelos son modelos aproximados de simulaciones rigurosas. Dichos modelos poseen una rápida implementación, convergencia y ejecución, lo cual facilitan su aplicación rutinaria en problemas de ingeniería de procesos. La construcción de estos modelos, en general, consta de 5 etapas:

¹⁰ GUTIÉRREZ PULIDO. Op. cit.

¹⁷ NIÑO LIZCANO, Juan David. Aplicación de la regresión lineal múltiple y las redes neuronales artificiales en el análisis del proceso de hidrotratamiento del acpm. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2016. p. 19-20.

¹⁸ DÍAZ SERRANO, Julieth Andrea. Aplicación de la regresión lineal múltiple y las redes neuronales artificiales para la predicción del índice de cetano en el diésel utilizando propiedades macroscópicas y espectros NIR. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2015. p. 21-22.

¹⁹ RUEDA RESTREPO, Jairo Alberto y COTES TORRES, José Miguel. Evaluación de dos métodos de estabilidad fenotípica a través de validación. En: Universidad Nacional de Colombia, Facultad Nacional de Agronomía. 2009, vol. 62 no. 2, p. 5111-5123. ISSN 03042847.

1) selección de variables de entrada, 2) diseño de experimentos, 3) generación de datos, 4) parametrización de metamodelos, 5) validación del metamodelo ²⁰.

Un ejemplo de metamodelo se encuentra en la industria petrolera, donde se desarrollan metamodelos para las torres de destilación que cuentan con un gran número de variables, entre ellas los flujos volumétricos de crudo y reflujo, temperaturas y presiones de la unidad ²¹. Asimismo, los metamodelos han sido utilizados para la implantación y mejora de los procesos de gestión de proyectos ²², para el diseño de bases de datos ²³ y en la gestión ambiental (2)²⁴.

²⁰ MAECHA BOHÓRQUEZ, Cesar Augusto., *et al.* Optimización de modelo de un sistema de unidades la destilación del petróleo crudo con integración de calor y metamodelado. En: CT & F - Ciencia, Tecnología y Futuro. Marzo de 2009, vol. 3 no. 5. ISSN 0122-5383.

²¹ LÓPEZ CÁRDENAS, Diana Carolina, *et al.* Análisis jerárquico de variables de operación de una torre de destilación de crudo usando datos de planta, modelos de simulación y diseño de experimentos. En: ION. Marzo de 2009, vol. 21 no 1, p. 7-16. ISSN: 21458480.

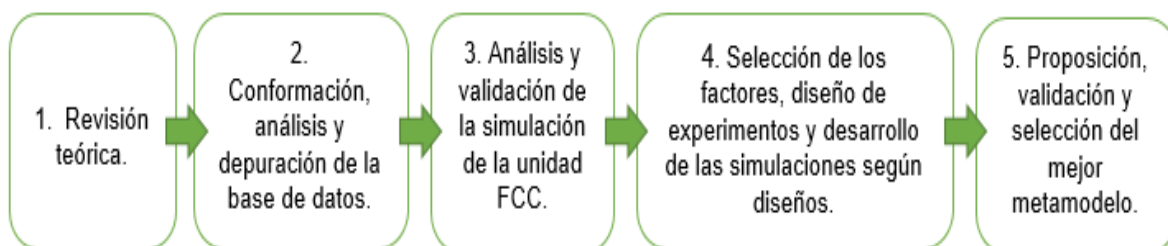
²² GARCÍA PACHECO, Ivan. Metamodelo para la definición, implantación y mejora de los procesos de gestión de proyectos. Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2013.

²³ MARCOS MARTÍNEZ, Esperanza. Propuesta de un metamodelo de objetos y su aplicación al diseño de base de datos. Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 1997.

²⁴ ORDÓÑEZ CÓRDOBA, José Armando, *et al.* Hacia un metamodelo para la gestión ambiental de los recursos hidrológicos. En: Lámpsakos. Julio-Diciembre de 2014, no. 12, p. 92-100. ISSN 21454086.

2. METODOLOGÍA

Figura 1. Esquema metodológico



2.1 REVISIÓN TEÓRICA

En esta fase se realiza una consulta bibliográfica sobre el craqueo catalítico fluidizado, diseños de experimentos, regresión lineal múltiple y metamodelos, con el fin de tener claros los conceptos requeridos para el buen desarrollo de la investigación.

2.2 CONFORMACIÓN, ANÁLISIS Y DEPURACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Se solicitaron datos históricos para el año 2015 de una unidad FCC de la GRB, con la cual efectuar la validación de las simulaciones. La base de datos fue analizada para descartar valores inconsistentes, zonas de operación en estado transitorio y datos atípicos.

2.3 ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE LA UNIDAD FCC

De la base de datos depurada se tomaron muestras al azar para ejecutar una simulación realizada en Hysys relacionada con un trabajo de grado anterior ya desarrollado en el grupo de investigación. Por medio del complemento Aspen ASW disponible en Excel, los valores de las variables de las muestras seleccionadas

fueron introducidos en Hysys para ejecutar las respectivas simulaciones; asimismo, los resultados obtenidos para la variable de respuesta fueron leídos por Excel cada vez que Hysys reportaba convergencia. Los valores de respuesta obtenidos con las simulaciones fueron comparados con los de la base de datos por medio de pruebas de medias y porcentaje de error, que permiten el análisis estadístico de los datos.

2.4 SELECCIÓN DE LOS FACTORES, DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y DESARROLLO DE LAS SIMULACIONES SEGÚN DISEÑOS

Se tomaron nueve variables de proceso con rangos específicos, con el fin de observar la influencia de cada variable de entrada sobre la respuesta, se proponen cuatro diseños de experimentos para este fin, los cuales son: factorial fraccionado 2^{k-p} , Box-Behnken, Central compuesto e Hipercubo Latino, los cuales se desarrollan en los programas estadísticos Minitab 17 y JMP 13. Con los diseños propuestos, las simulaciones de la operación de la unidad FCC fueron ejecutadas en HYSYS por medio del complemento Aspen ASW en Excel. La variable de respuesta recolectada en las simulaciones correspondió al flujo de nafta generada en el equipo.

2.5 PROPOSICIÓN, VALIDACIÓN Y SELECCIÓN DEL MEJOR METAMODELO

Después de la evaluación de los diseños, un análisis ANOVA de los resultados fue aplicado a cada método para obtener el metamodelo correspondiente. Cada metamodelo es sometido a validación cruzada y pruebas estadísticas de los ajustes para verificar los supuestos de cada regresión RLM. Basados en el principio de Parsimonia y el valor del coeficiente de determinación (R^2) para cada modelo, se escoge el metamodelo más apropiado y ajustado al proceso. Finalmente, se procede a autoescalar los datos del modelo elegido, con el propósito de inferir las variables de mayor influencia en la producción de nafta.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

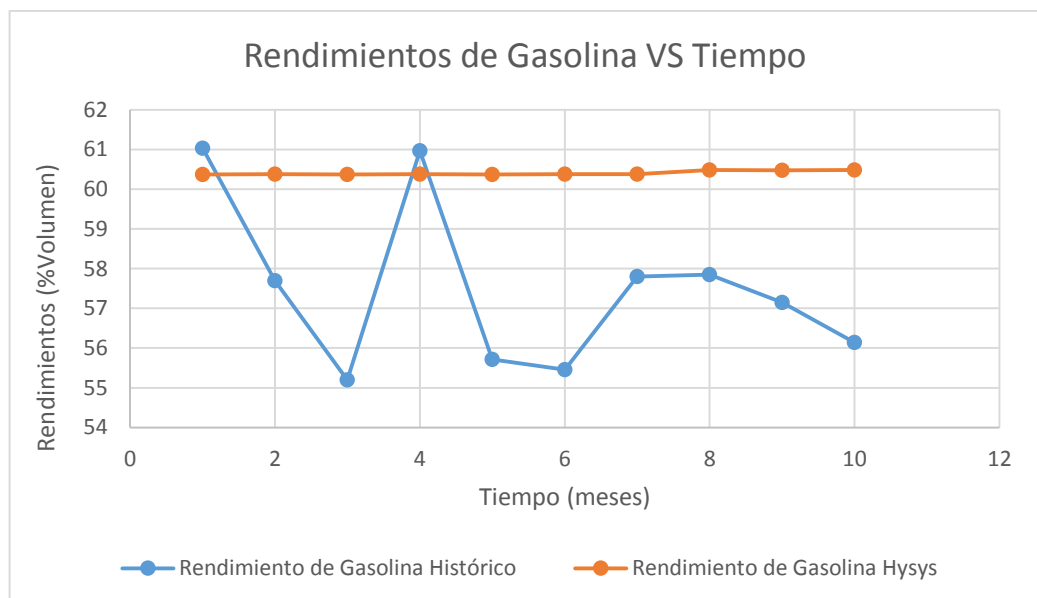
3.1 VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE LA UNIDAD FCC

La base de datos de históricos de proceso suministrada por la GRB contenía ca. 7000 muestras para la operación de una unidad FCC durante el año 2015, medidas cada hora. Después de la depuración de los datos históricos, las zonas operativas en estado pseudoestacionario fueron identificadas de forma visual y de esta forma se analizó la gráfica de dispersión de la carga alimentada a la unidad durante la ventana de operación ²⁵; la base de datos de históricos quedó reducida a 1000 muestras en estado pseudoestacionario. La base de datos reducida fue utilizada para la validación de una simulación del proceso FCC desarrollada por Medina & Rojas en 2016. Las pruebas estadísticas permiten una visualización de la variación entre los datos de planta reportados por la UOP-I de la GRB y los obtenidos por la simulación en Aspen Hysys para el año 2015; las condiciones operacionales del espacio muestral fueron especificadas en Hysys para la ejecución de la respectiva simulación. Los rendimientos de nafta obtenidos con las simulaciones reportaron un 74.6% de coincidencia con los valores de la base de datos reducida, considerando una desviación menor al 5%. Aunque el porcentaje de coincidencia parece bajo, se debe considerar que algunos datos históricos pueden corresponder a la operación dinámica del equipo y que existen errores en las mediciones de planta; la aplicación de un método de reconciliación de datos es recomendable para futuros trabajos con datos de proceso. Asimismo, en la unidad FCC de la GRB se introduce una corriente de nafta, después del producto reactor, denominada corriente externa; los datos históricos suministrados por la GRB se encontraban carentes de la contabilidad de estas corrientes externas debido a la falta de los respectivos sensores en planta.

²⁵ EVANS, Micheael y ROSENTHAL, Jeffrey. Probabilidad y estadística. Barcelona : REVERTE, 2008. p. 308-309. ISBN: 9788429150346.

Otra de las razones es que el simulador predice los desempeños en estado estable contrario a como se observa en planta. En la Figura 2 se muestra el comportamiento promedio mensual de %Nafta en la ventana de operación considerada; según esta Figura, los datos históricos presentan fluctuaciones importantes en la ventana de operación, lo cual refleja perturbaciones operacionales y posibles problemas en la estabilidad de la unidad.

Figura 2. Promedios mensuales de %Nafta unidad FCC de la GRB año 2015.



La medida de localización más importante es la media, proporcionando una localización central de los datos analizados ²⁶. Teniendo en cuenta esto, se calcula dicho estadístico para el porcentaje de error en la predicción de nafta, reportando un valor de 3,66%, el cual es suficientemente bajo considerar una adecuada

²⁶ ANDERSON, David R.; SWEENEY Dennis y WILLIAMS, Thomas. Estadística para administración y economía. México D.F. : Cengage Learning , 2008. p. 83. ISBN: 6074813191.

reproducción de los datos de planta, a partir de las simulaciones ejecutadas con Hysys.

La validación de la simulación de la unidad FCC se efectuó también por medio de una comparación estadística entre las medias por medio de la respectiva tabla ANOVA. Los valores de las medias se establecen en 59,93 y 60,52 para el %Nafta de históricos de planta y el %Nafta obtenido por simulaciones con Hysys, respectivamente. Según la tabla ANOVA (ANEXO A), la diferencia entre las medias se encuentra en el rango (-0,75 ; -0,43) con un 95% de confianza, con lo cual, los datos analizados resultan lo suficientemente similares para considerar que la simulación reproduce los desempeños de la unidad FCC de la GRB.

3.2 SELECCIÓN DE LOS FACTORES Y SUS RANGOS

Para el presente trabajo, nueve factores fueron considerados según su importancia en el proceso ^{2,27} y según su disponibilidad en los datos históricos. Estas variables con sus respectivos rangos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Rangos de variables de entrada

Abreviatura	Variable	Unidades	Menor	Mayor
X ₁	Temperatura de carga	°F	300	450
X ₂	Flujo de carga	m ³ /h	139,114	198,734
X ₃	GAO	%	30	70
X ₄	Gas de aspersión	kg/h	3629	6350
X ₅	Vapor de despojo	kg/h	2268	4990

² SADEGHBEIGI. Op. cit.

²⁷ UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL. Catedra de procesos industriales. Buenos Aires, Argentina. p. 15.

X ₆	Sodio	ppm	3000	5000
X ₇	Vanadio	ppm	3000	7000
X ₈	Hierro	ppm	3000	7000
X ₉	Níquel	ppm	1500	6000

3.3 DESARROLLO DE LOS DISEÑO DE EXPERIMENTOS

En la Tabla 2 se muestran el número de experimentos calculado por los softwares Minitab 17 y JMP 13 para los diseños experimentales seleccionados; es importante especificar que en todos los diseños se utiliza el mismo número de factores analizados, y además, no se consideran réplicas. En el ANEXO B se ilustra el procedimiento matemático para el cálculo del número de experimentos corroborando así los obtenidos por los softwares.

Tabla 2. Número de experimentos de cada diseño planteado

Diseño planteado	N° de experimentos
Factorial fraccionado (2^{k-p})	128
Box Behnken	130
Central compuesto	156
Hipercubo latino	200

3.4 RESULTADOS DE LOS DISEÑOS EXPERIMENTALES

Los resultados obtenidos con la ejecución de las simulaciones según cada diseño experimental fueron analizados utilizando la tabla ANOVA que se muestran en el anexo C. Teniendo en cuenta cada uno de estos análisis de varianza se descartan los factores que no influyen estadísticamente en el proceso y las variables de importancia son sometidas a uno nuevo análisis de varianza (Tablas 3-6). De

acuerdo a las tablas ANOVA, las simulaciones obtenidas con la aplicación de los diseños factorial fraccionado (Tabla 3), central compuesto (Tabla 5) e Hipercubo latino (Tabla 6) coinciden en tres variables no significativas para el proceso (valor- $p \geq 0,05$), las cuales son la temperatura, el sodio y el hierro. Por otra parte, el diseño Box Behnken (Tabla 4) presenta que el %GAO presenta un valor- $p=0,147$; sin embargo, el diseño muestra como variable estadísticamente significativa la interacción de %GAO*%GAO con un valor- p de 0.

Analizando los modelos, se observa que los diseños central compuesto y Box Behnken presentan el mismo número de factores con un total de 12, el factorial fraccionado presenta 10 variables significativas y el diseño Hipercubo Latino contiene 15 variables significativas. Las regresiones obtenidas con los resultados de las simulaciones según cada diseño son mostradas en E3-E6.

Tabla 3. ANOVA diseño Factorial Fraccionado

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor-F	Valor-P
Modelo					0,000
X2	1	44,9710	44,9710	75741,02	0,000
X3	1	0,0281	0,0281	47,36	0,000
X4	1	1,2173	1,2173	2050,16	0,000
X5	1	23,4297	23,4297	39460,80	0,000
X7	1	0,0197	0,0197	33,14	0,000
X9	1	0,3660	0,3660	616,43	0,000
X2*X3	1	1,4648	1,4648	2466,99	0,000
X2*X4	1	0,0345	0,0345	58,04	0,000

X2*X5	1	4,4129	4,4129	7432,33	0,000
X3*X4	1	0,4214	0,4214	709,75	0,000
X3*X5	1	0,2652	0,2652	446,60	0,000
X4*X5	1	0,0156	0,0156	26,31	0,000
Error	115	0,0683	0,0006		
Total	127	76,7144			

Tabla 4. ANOVA diseño Box Behnken

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo					0,000
X2	1	13,93887	13,93887	12915,7100	0,000
X4	1	0,51663	0,51663	478,7075	0,000
X5	1	6,07644	6,07644	5630,4030	0,000
X7	1	0,00561	0,00561	5,1980	0,02442
X9	1	0,11277	0,11277	104,4958	0,000
X2*X2	1	0,18184	0,18184	168,4965	0,000
X3*X3	1	0,03922	0,03922	36,3377	0,000
X5*X5	1	0,47954	0,47954	444,3374	0,000
X2*X3	1	0,08372	0,08372	77,5768	0,000
X2*X5	1	0,54243	0,54243	502,6156	0,000
X3*X4	1	0,02501	0,02501	23,1739	0,000
X3*X5	1	0,01391	0,01391	12,8900	0,00048
Error	117	0,12627	0,00108		
Total	129	22,17895			

Tabla 5. ANOVA diseño Central Compuesto

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo					0,000
X2	1	4,19515	4,19515	90982,44	0,000
X3	1	0,00424	0,00424	91,87	0,000
X4	1	0,17649	0,17649	3827,54	0,000
X5	1	1,67686	1,67686	36366,87	0,000
X7	1	0,00183	0,00183	39,66	0,000
X9	1	0,03658	0,03658	793,38	0,000
X2*X2	1	0,01181	0,01181	256,18	0,000
X3*X3	1	0,00326	0,00326	70,61	0,000
X5*X5	1	0,03077	0,03077	667,28	0,000
X2*X3	1	0,01370	0,01370	297,17	0,000
X2*X4	1	0,00039	0,00039	8,43	0,004
X2*X5	1	0,02788	0,02788	604,60	0,000
X3*X4	1	0,00305	0,00305	66,18	0,000
X3*X5	1	0,00186	0,00186	40,37	0,000
Error	141	0,0065	0,00005		
Total	155	6,1857			

Tabla 6. ANOVA diseño Hipercubo Latino

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo					0,000
X2	1	20,6231	20,6231	43228,6600	0,000
X3	1	0,0354	0,0354	74,2390	0,000
X4	1	0,6927	0,6927	1452,0280	0,000
X5	1	9,4563	9,4563	19821,6500	0,000
X7	1	0,0140	0,0140	29,4240	0,000
X9	1	0,1827	0,1827	383,1007	0,000
X2*X5	1	0,6913	0,6913	1449,0980	0,000
X5*X5	1	0,3090	0,3090	647,7772	0,000
X2*X2	1	0,1132	0,1132	237,3780	0,000
X2*X3	1	0,2033	0,2033	426,1584	0,000
X3*X3	1	0,0717	0,0717	150,4593	0,000
X3*X4	1	0,0623	0,0623	130,6919	0,000
X2*X4	1	0,0063	0,0063	13,3554	0,00034
X3*X5	1	0,0427	0,0427	89,5116	0,0000
X5*X7	1	0,0027	0,0027	5,8361	0,01668
Error	184	0,0877	0,0004		
Total	199	32,7902			

E3. Regresión del diseño Factorial Fraccionado

$$\begin{aligned} \%NAFTA = & 57,53 + 7,72E-03(X_2) + 3,55(X_3) + 2,67E-04(X_4) + 1,03E-03(X_5) \\ & - 6,0E-06(X_7) - 2,4E-05(X_9) - 1,79E-02(X_2*X_3) - 5,0E-06(X_2*X_5) \\ & - 2,11E-04(X_3*X_4) + 1,67E-04(X_3*X_5) \end{aligned}$$

E4. Regresión del diseño Box Behnken

$$\begin{aligned}\% \text{NAFTA} = & 61,71 - 2,61\text{E-}02(\text{X}_2) + 8,35\text{E-}05(\text{X}_4) + 4,51\text{E-}04(\text{X}_5) \\ & - 5,29\text{E-}06(\text{X}_7) - 2,36\text{E-}05(\text{X}_9) + 9,29\text{E-}05(\text{X}_2*\text{X}_2) + 9,62\text{E-}01(\text{X}_3*\text{X}_3) \\ & + 7,23\text{E-}08(\text{X}_5*\text{X}_5) - 1,72\text{E-}02(\text{X}_2*\text{X}_3) - 4,54\text{E-}06(\text{X}_2*\text{X}_5) - 2,06\text{E-}04(\text{X}_3*\text{X}_4) \\ & + 1,53\text{E-}04(\text{X}_3*\text{X}_5).\end{aligned}$$

E5. Regresión del diseño Central Compuesto

$$\begin{aligned}\% \text{NAFTA} = & 61,16 - 2,21\text{E-}02(\text{X}_2) + 2,79(\text{X}_3) + 2,68\text{E-}04(\text{X}_4) + 3,70\text{E-}04(\text{X}_5) \\ & - 6,0\text{E-}06(\text{X}_7) - 2,3\text{E-}05(\text{X}_9) + 9,0\text{E-}05(\text{X}_2*\text{X}_2) + 1,05(\text{X}_3*\text{X}_3) - 1,96\text{E-}02(\text{X}_2*\text{X}_3) \\ & - 4,0\text{E-}06(\text{X}_2*\text{X}_5) - 2,03\text{E-}04(\text{X}_3*\text{X}_4) + 1,58\text{E-}04(\text{X}_3*\text{X}_5)\end{aligned}$$

E6. Regresión del diseño Hipercubo Latino

$$\begin{aligned}\% \text{NAFTA} = & 61,33 - 2,24\text{E-}02(\text{X}_2) + 1,77(\text{X}_3) + 2,51\text{E-}04(\text{X}_4) + 4,52\text{E-}04(\text{X}_5) \\ & + 7,71\text{E-}06(\text{X}_7) - 2,35\text{E-}05(\text{X}_9) - 4,53\text{E-}06(\text{X}_2*\text{X}_5) + 7,32\text{E-}08(\text{X}_5*\text{X}_5) \\ & - 1,69\text{E-}02(\text{X}_2*\text{X}_3) + 9,09\text{E-}05(\text{X}_2*\text{X}_2) + 1,61(\text{X}_3*\text{X}_3) - 4,41\text{E-}07(\text{X}_2*\text{X}_4) \\ & - 4,15\text{E-}09(\text{X}_5*\text{X}_7) + 1,63\text{E-}04(\text{X}_3*\text{X}_5) - 2,01\text{E-}04(\text{X}_3*\text{X}_4)\end{aligned}$$

Además, como se observa en el anexo D, la gráfica de probabilidad para cada uno de los metamodelos obtenidos es una forma de validar la ANOVA en los distintos casos, mostrando que si los residuales se alejan mucho de la línea recta entonces no se cumple la suposición de que el error aleatorio no sigue una distribución normal. En estas gráficas se puede observar que los mejores residuos ajustados a la línea recta son los del modelo Factorial Fraccionado.

3.5 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Los porcentajes de errores mínimos y máximos reportados por cada metamodelo en la predicción del %Nafta por comparación con los históricos son mostrados en la Tabla 7. Según esta tabla el metamodelo derivado del diseño Box Behnken presenta el mayor intervalo de error. Gráficamente (Figura 3-6) se resalta que los datos obtenidos por los modelos presentan estados estacionarios cercanos, lo cual sugiere que la unidad FCC presentó novedades operacionales en una buena proporción del tiempo.

Tabla 7. Rangos de error desarrollando las regresiones obtenidas

Diseño	Rango de porcentaje de Error	
	Menor	Mayor
Factorial fraccionado	0,0190	5,0609
Box Behnken	0,1128	7,0534
Central compuesto	0,0266	4,2064
Hipercubo latino	0,0431	4,6433

Figura 3. Comparación de datos factorial fraccionado

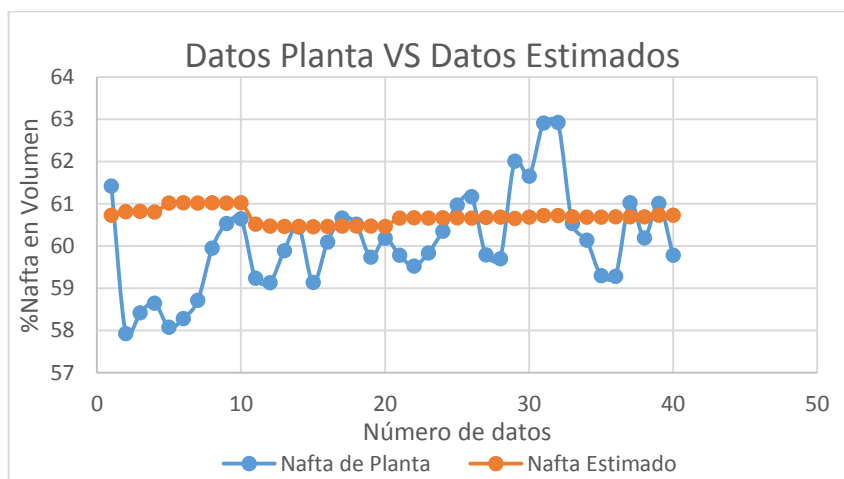


Figura 4. Comparación de datos Box Behnken

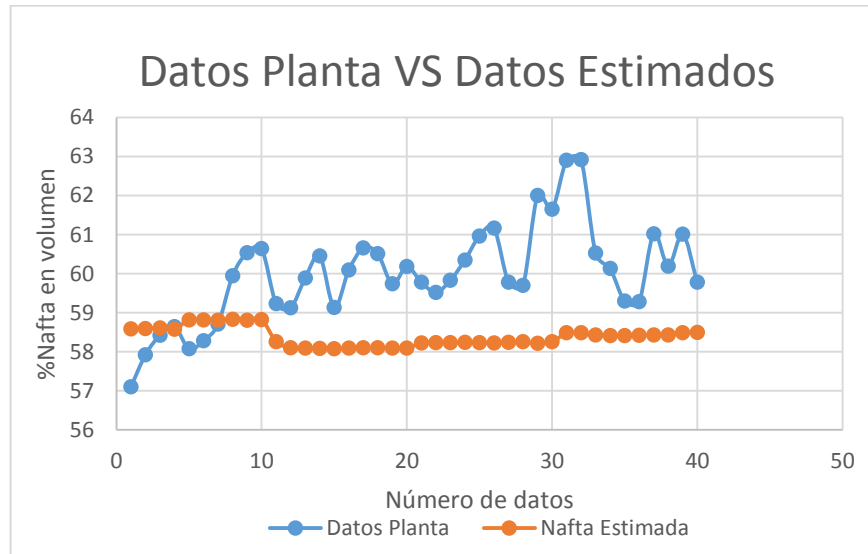


Figura 5. Comparación de datos Central Compuesto

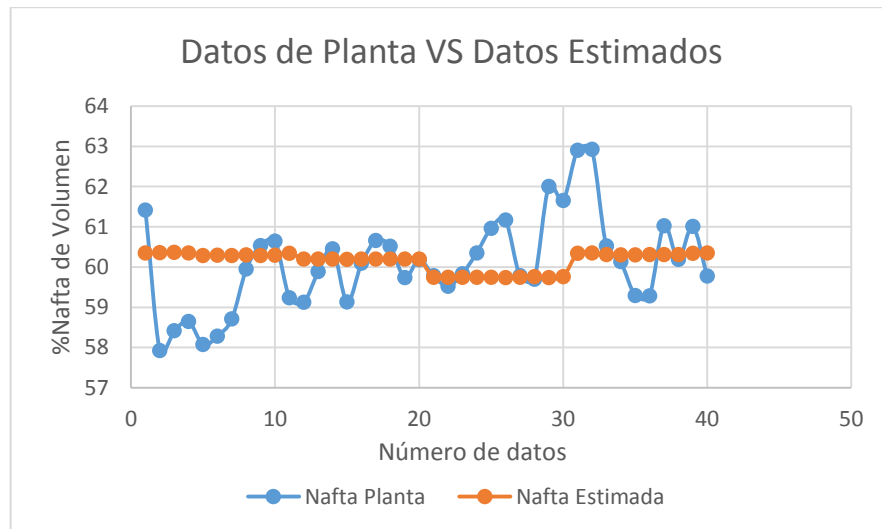
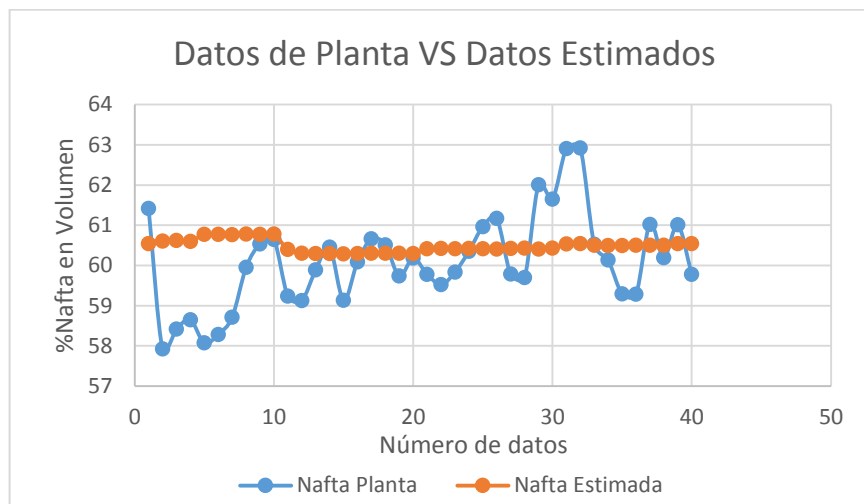


Figura 6. Comparación de datos Hipercubo Latino



Una forma de analizar cada modelo es por medio de los estadísticos de calidad observados en la Tabla 8. Según esta tabla, es posible notar por medio del R^2 que los modelos se ajustan al proceso y confirman que sólo el 0,09%, el 0,68%, el 0,11% y el 0,27% de la varianza total del factorial fraccionado, Box Behnken, central compuesto e hipercubo latino, respectivamente, no es atribuida a las variables independientes definidas en este trabajo. De acuerdo al $R^2_{ajustado}$, el metamodelo derivado del diseño factorial fraccionado reproduce mejor los datos históricos del proceso FCC. El error estándar de estimación (RMSE), al igual que el error medio (MEA) resultaron bajos para cada metamodelo (Tabla 8).

Tabla 8. Criterios de ajuste del modelo

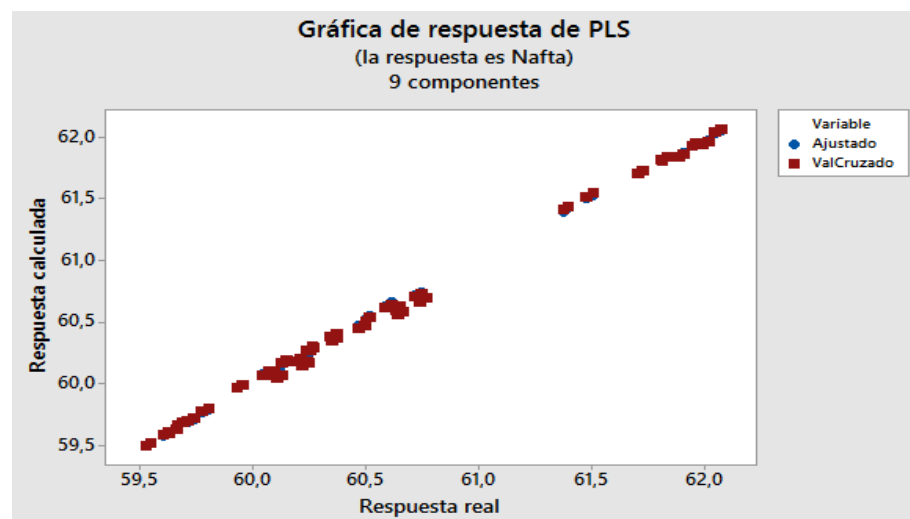
Diseño	MEA	R^2	$R^2_{ajustado}$	RMSE
Factorial Fraccionado	0,2227	99,91%	99,90%	0,0244
Box Behnken	1,2231	99,43%	99,37%	0,0329

Central Compuesto	0,4658	99,89%	99,88%	0,0068
Hipercubo Latino	0,0678	99,73%	99,71%	0,0219

La validación de los metamodelos fue efectuada por medio de los estadísticos obtenidos con los resultados del proceso de validación interna o cruzada dejando una muestra fuera a la vez (LOOCV por sus siglas en inglés *Leave-one-out cross-validation* ²⁸.

Los resultados del proceso de calibración y validación para los cuatro metamodelos son mostrados en las Figuras 7-10. Según estas figuras, los cuatro diseños se ajustan a los datos pero todos ellos con dispersión diferente; los puntos ajustados (estimados con la calibración del metamodelo, en azul) y los de validación cruzada (en rojo) se visualizan cercanos.

Figura 7. Gráfica de respuesta de PLS para el Factorial Fraccionado.



²⁸ INFANTE IZQUIERDO, Javier. Análisis del comportamiento del ctc con problemas de clases muy desbalanceadas del repositorio KEEL. Euskadi : Universidad del País Vasco , 2013. p. 28.

Figura 8. Gráfica de respuesta de PLS para el Box Behnken.

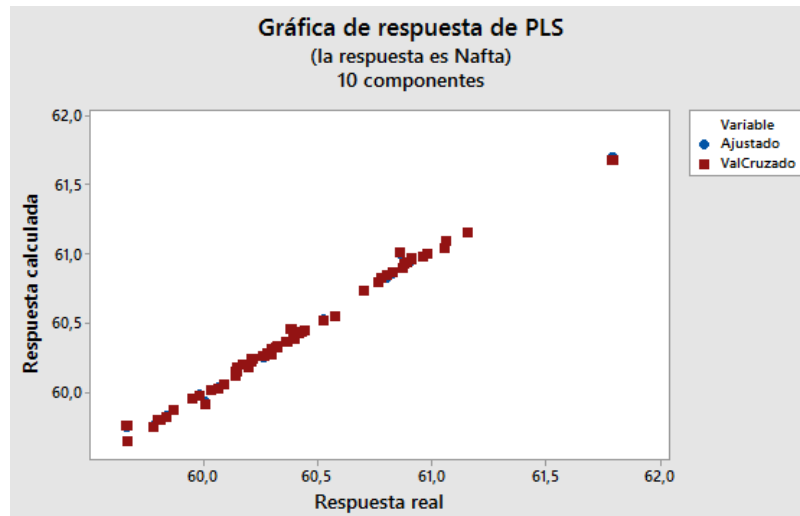


Figura 9. Gráfica de respuesta de PLS para el Central Compuesto.

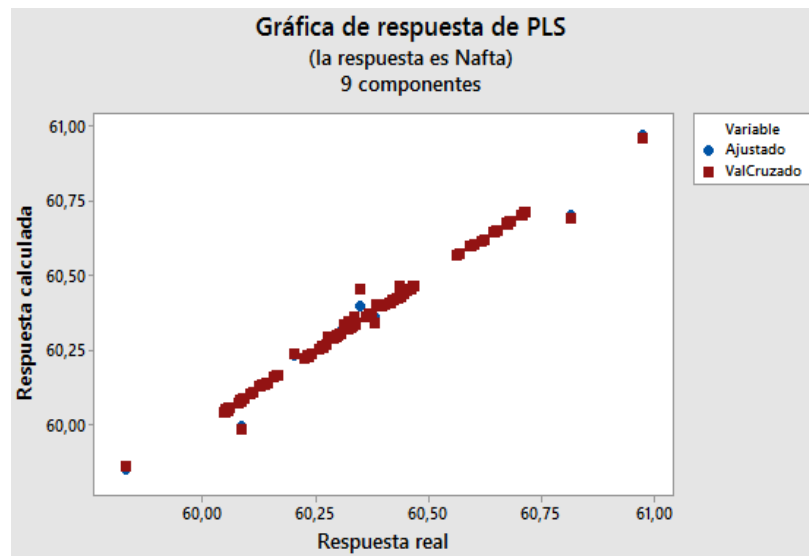
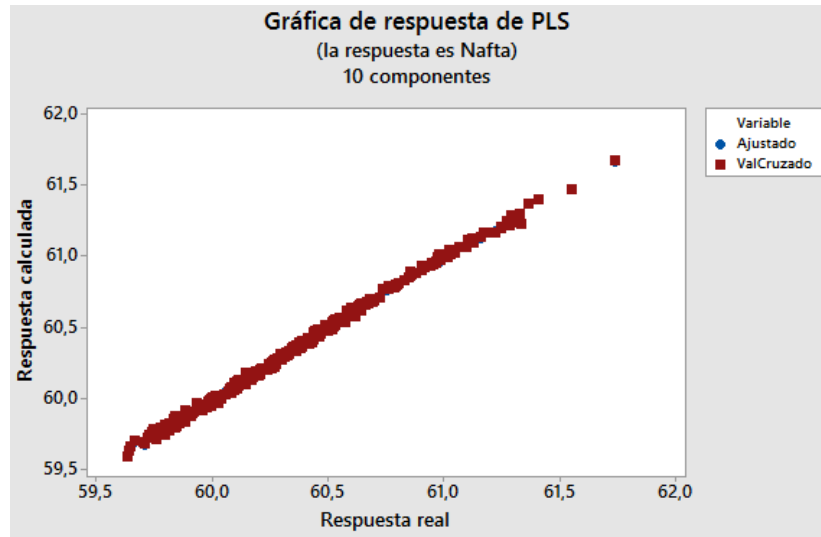


Figura 10. Gráfica de respuesta de PLS para el Hipercubo Latino



Desde el punto de vista cuantitativo, los estadísticos coeficiente de determinación (R_{val}^2) y PRESS (por sus siglas en inglés: *predicted residual error sum of squares*) fueron calculados para determinar los desempeños en la etapa de validación ²⁹ (Tabla 9). Según la Tabla 9, el R_{val}^2 obtenido para el metamodelo derivado del diseño factorial fraccionado exhibe el valor más alto (0,9985); el menor valor para este estadístico lo posee el metamodelo derivado del diseño Box Behnken (0,963).

Complementariamente, el valor de PRESS resultó menor para el diseño central compuesto (0,054), mientras que el mayor valor para este estadístico lo presenta el diseño Box Behnken (0,210). Comparando los desempeños de los metamodelos según el diseño experimental para calibración y validación (Tabla 9), los metamodelos basados en los diseños factorial fraccionado y central compuesto exhiben los mejores valores para los estadísticos calculados.

²⁹ QUEVEDO URIAS, Héctor y SALVADOR PÉREZ, Blanca Rosa. Estadística para ingeniería y ciencia. México: Grupo Editorial Patria, 2014, p. 399. ISBN 9786074389395.

Tabla 9. Valores obtenidos en la validación cruzada

Diseño	RMSE	R ²	PRESS	R _{val} ²
Factorial Fraccionado	0,0244	99,91%	0,1547	99,85%
Box Behnken	0,0329	99,43%	0,2101	96,31%
Central Compuesto	0,0068	99,89%	0,0541	99,39%
Hipercubo Latino	0,0219	99,73%	0,1652	99,77%

La elección del metamodelo a partir de los resultados de los diseños experimentales se efectuó por medio de la comparación de los estadísticos de calibración y validación y del principio de Parsimonia –el mejor modelo reporta la menor suma de los cuadrados de los residuales con el menor número de variables (3)³⁰–. Con lo anterior, el mejor metamodelo corresponde al derivado de la aplicación del diseño factorial fraccionado (E6).

(E6). Metamodelo seleccionado

$$\begin{aligned} \%NAFTA = & 57,53 + 7,72E-03(X_2) + 3,55(X_3) + 2,67E-04(X_4) + 1,03E-03(X_5) \\ & - 6,0E-06(X_7) - 2,4E-05(X_9) - 1,79E-02(X_2 \cdot X_3) - 5,0E-06(X_2 \cdot X_5) \\ & - 2,11E-04(X_3 \cdot X_4) + 1,67E-04(X_3 \cdot X_5) \end{aligned}$$

3.6 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES EN EL METAMODELO

La influencia de los factores en el metamodelo derivado del diseño Factorial Fraccionado, puede ser establecida por medio del autoescalado de los datos utilizados y a aplicación de una nueva regresión. La E7 expone la regresión del

³⁰ ACUÑA COLLAZOS, Julián A.; DOMÍNGUEZ CASTAÑO, Andrés H y TORO OCAMPO, Eliana M. Una comparación entre métodos estadísticos clásicos y técnicas metaheurísticas en el modelamiento estadístico. En: Scientia et Technica. Abril de 2012, no. 50, p. 68-77. ISSN 01221701.

modelo autoescalado derivado de este diseño experimental. El anexo D muestra el número de experimentos y el análisis ANOVA para este diseño, comprobando que las variables de influencia son las mismas que se presentan en los modelos autoescalado y no autoescalado.

E7. Regresión del diseño factorial fraccionado autoescalado

$$\begin{aligned} \%NAFTA = & - 7,69E-01*(X_2) + 1,92E-02*(X_3) + 1,26E-01*(X_4) + 5,55E- \\ & 01*(X_5) - 1,61E-02*(X_7) - 6,93E-02*(X_9) - 1,40E-01*(X_2*X_3) - 2,15E- \\ & 02*(X_2*X_4) - 2,43E-01*(X_2*X_5) - 7,49E-02*(X_3*X_5) - 1,44E-02*(X_4*X_5) + \\ & 5,95E-02*(X_4*X_5). \end{aligned}$$

De E7 se obtiene el peso relativo de cada factor a partir del coeficiente respectivo de cada entrada; con estos coeficientes se calcula el porcentaje de influencia sobre la variable de salida (anexo E). En la Figura 11 se muestra la influencia de cada factor en el metamodelo seleccionado; según esta figura, las variables de entrada de mayor influencia son el flujo de carga y el vapor de despojo con 36,5% y 26,3% de influencia, respectivamente. Estos resultados se evidencian con la realidad, puesto que estos dos factores presentan gran importancia en la unidad FCC (4). Cabe resaltar que a mayor flujo de carga menor será la conversión de %Nafta volumétrico ³¹. Teniendo en cuenta que el vapor de despojo cumple la función de arrastrar los hidrocarburos que se almacenan en el catalizador con el fin de limpiarlo para su posterior regeneración, de allí su importancia es reflejada en el metamodelo al igual que a nivel operacional ².

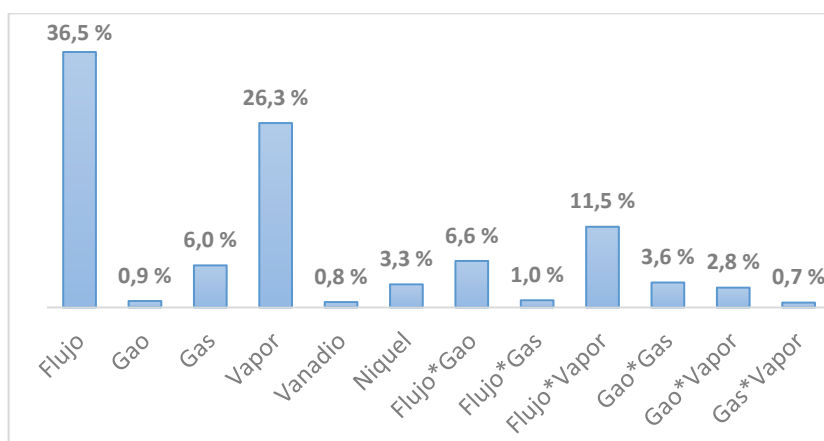
² SADEGHBEIGI. Op. Cit.

³¹ DASILA, Prabha K., *et al.* Parametric sensitivity studies in a commercial FCC unit. En: Advances in Chemical Engineering and Science. Enero de 2012, vol. 2, p. 136-149.

Por otra parte, en esta figura también se observa que el vanadio (0.8%) y el GAO (flujo de gasóleo en la carga, con un 0,9% de influencia) son las variables con menor trascendencia en el metamodelo. Aunque dichos valores reportan poca influencia, a nivel industrial, el Vanadio y el %GAO son importantes en el proceso debido a que el Vanadio es uno de los metales más peligrosos porque al depositarse en el catalizador envenan gradualmente su superficie, a mayor cantidad de Vanadio mayor será el área superficial de catalizador desactivada, además promueven la producción de coque y cambian la ruta de reacción principal ^{32,33}.

Y por otro lado, a mayor %GAO se tendrá un mejor rendimiento y calidad de Nafta porque a nivel operacional se pueden obtener mayores conversiones a productos livianos cuando las cargas son más ligeras y limpias ⁸. Por estas razones dichas variables son indispensables en el planteamiento final del metamodelo.

Figura 11. Porcentaje de Influencia de las variables de entrada en el metamodelo seleccionado.



³² U. J. Etim, B. Xu, P. Bai, Rooh Ullah, F. Subhan, Z. Yan. Role of nickel on vanadium poisoned fcc catalyst: a study of physiochemical properties. En: Journal of Energy Chemistry. 24 de Abril de 2016, vol. 25, p. 667–676. ISSN 2095-4956.

³³ CASALI, Luis Antonio, *et al.* Equilibrium fcc catalyst performance simulation based on mixtures of hydrothermal deactivated samples. En: Fluid Catalytic Cracking VII: Materials, Methods and Process Innovations. 20 de Julio de 2007, vol. 166, p. 147-162. ISSN 9780080548517.

Resumiendo lo desarrollado en el presente trabajo, es acepta la metodología de los diseños de experimentos y análisis estadístico como herramienta potencial en el cálculo de metamodelos generados a partir de datos históricos de planta. Por otro lado, se encuentra factible el planteamiento de regresiones lineales simples desarrolladas con base a una simulación comercial, optimizando el tiempo y los costos de análisis de proceso. Con el metamodelo seleccionado es posible la predicción de los rendimientos del simulador y un análisis de tipo semicuantitativo sobre los desempeños que se obtendrían en la unidad industrial; es importante resaltar que el metamodelo es válido dentro de los rangos utilizados para las variables independientes (Tabla 1).

⁸ FÉLIX FLORES. Op. cit.

4. CONCLUSIONES

- Según los resultados del presente trabajo, los metamodelos poseen buen ajuste con los resultados obtenidos por el simulador Hysys para la variable de respuesta de la FCC. Sin embargo, la aplicación de estos en la industria no es el mejor enfoque para predecir el %Nafta debido a que no se ajusta a la fase operacional reportada por los datos de planta.
- El diseño experimental factorial fraccionado reportó un valor de estadísticos de calidad (R^2 , R^2_{ajus}) levemente más alto a los otros diseños de experimentos, con esto y el principio de Parsimonia es destacado como el que mejor reporta desempeños en la predicción de los rendimientos de nafta a partir de la simulación de la unidad FCC en Hysys, aun así los otros diseños presentan buen ajuste a los datos arrojados por el simulador. El desempeño del metamodelo asegura una predicción cuantitativa de las respuestas del simulador en el rango de validez de la regresión.
- De acuerdo al autoescalado de los datos del modelo seleccionado, las variables con mayor porcentaje de influencia son el flujo, el vapor y su interacción, que afectan en gran porcentaje la predicción del rendimiento de %Nafta volumétrico de la unidad FCC.

5. RECOMENDACIONES

- Validaciones adicionales de la simulación del proceso FCC son requeridas para verificar la reproducción de los datos de planta.
- Utilizar simuladores más especializados como SHARC para verificar las variables que no presentan influencia en el proceso FCC.

BIBLIOGRAFÍA

ACUÑA COLLAZOS, Julián A.; DOMÍNGUEZ CASTAÑO, Andrés H y TORO OCAMPO, Eliana M. Una comparación entre métodos estadísticos clásicos y técnicas metaheurísticas en el modelamiento estadístico. En: Scientia et Technica. Abril de 2012, no. 50, p. 68-77. ISSN 01221701.

ANDERSON, David R.; SWEENEY Dennis y WILLIAMS, Thomas. Estadística para administración y economía. México D.F. : Cengage Learning , 2008. p. 83. ISBN: 6074813191.

BADII, M.H., *et al.* Diseños experimentales e investigación científica. En: InnOvaciOnes de NegOciOs, 2007, vol. 4 no. 2. p. 283–330. ISSN 16659627.

BALABANOV, Vladimir; VENTER, Gerhard y VIANA, Felipe. An algorithm for fast optimal latin hypercube design of experiments. En: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Noviembre de 2009.

BARRÓN, Jorge H. y NUÑEZ MC LEOD, Jorge E. Técnicas estadísticas y avanzadas en el análisis de grandes modelos computacionales. Mendoza, Argentina : Intituto CEDIAC, 1999.

CASALI, Luis Antonio, *et al.* Equilibrium fcc catalyst performance simulation based on mixtures of hydrothermal deactivated samples. En: Fluid Catalytic Cracking VII: Materials, Methods and Process Innovations. 20 de Julio de 2007, vol. 166, p. 147-162. ISSN 9780080548517.

CENTRO DE INGENIERIA DE LA CALIDAD. Metodología de superficies de respuesta, gran alternativa para incrementar la productividad de sus procesos. Cali, Colombia.

DASILA, Prabha K., *et al.* Parametric sensitivity studies in a commercial FCC unit. En: Advances in Chemical Engineering and Science. Enero de 2012, vol. 2, p. 136-149.

DÍAZ SERRANO, Julieth Andrea. Aplicación de la regresión lineal múltiple y las redes neuronales artificiales para la predicción del índice de cetano en el diésel utilizando propiedades macroscópicas y espectros NIR. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2015. p. 21-22.

EVANS, Micheael y ROSENTHAL, Jeffrey. Probabilidad y estadística. Barcelona : REVERTE, 2008. p. 308-309. ISBN: 9788429150346.

FÉLIX FLORES, Ma. Guadalupe. Simulación del proceso FCC: Caracterización de las corrientes de alimentación y productos del riser a través de la función de distribución gamma. p. 7-11.

GARCÍA PACHECO, Ivan. Metamodelo para la definición, implantación y mejora de los procesos de gestión de proyectos. Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2013.

GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y De LA VARA SALAZAR, Roman. Análisis y diseño de experimentos. México, D.F.: McGraw-Hill, 2008. p. 4-417. ISBN 9786071503152.

HERNÁNDEZ BARAJAS, José R.; VÁZQUEZ ROMÁN, R. y FÉLIX FLORES, Ma.Guadalupe. Descripción de las corrientes en un tubo elevador a través de la distribución gamma. En : Información Tecnológica, 2008. vol. 19 no. 3, p. 33-42. ISSN 07180764.

INFANTE IZQUIERDO, Javier. Análisis del comportamiento del ctc con problemas de clases muy desbalanceadas del repositorio KEEL. Euskadi : Universidad del País Vasco , 2013. p. 28.

LÓPEZ CÁRDENAS, Diana Carolina, *et al.* Análisis jerárquico de variables de operación de una torre de destilación de crudo usando datos de planta, modelos de simulación y diseño de experimentos. En: ION. Marzo de 2009, vol. 21 no 1, p. 7-16. ISSN: 21458480.

LOZANO MARTÍNEZ, Leyla Patricia. Aplicación de la metodología de superficie de respuesta en la optimización de la producción de biodiesel a partir de aceite de microalgas mediante transesterificación en fase homogénea. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2010. p. 26-27.

MAECHA BOHÓRQUEZ, Cesar Augusto.,*et al.* Optimización de modelo de un sistema de unidades la destilación del petróleo crudo con integración de calor y metamodelado. En: CT & F - Ciencia, Tecnología y Futuro. Marzo de 2009, vol. 3 no. 5. ISSN 0122-5383.

MARCOS MARTÍNEZ, Esperanza. Propuesta de un metamodelo de objetos y su aplicación al diseño de base de datos. Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 1997.

MEDINA MORENO, Ana Gicela y MORENO RUÍZ, Diana Marcela. Simulación del sistema reactor-regenerador de la unidad de craqueo catalítico UOP-I de la GRB utilizando Hysys. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016. p. 17-37.

MONTESDEOCA ESPÍN, Diego Eduardo. Simulación de la unidad de reformado catalítico de la refinería estatal Esmeraldas. Madrid: Universidad politécnica de Madrid, 2013.

MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y análisis de experimentos. México D.F.: LIMUSA WILEY, 2004. p. 1. ISBN 9681861566.

MUÑOZ BATISTA, Mario J. *et al.* Aplicación de la simulación de procesos durante la práctica laboral de estudiantes de ingeniería química. En: Revista Cubana de ingeniería química. Julio-agosto, 2011, vol. 2 no. 3., p. 15-23. ISSN 22231781.

NIÑO LIZCANO, Juan David. Aplicación de la regresión lineal múltiple y las redes neuronales artificiales en el análisis del proceso de hidrotratamiento del acpm. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2016. p. 19-20.

ORDÓÑEZ CÓRDOBA, José Armando, *et al.* Hacia un metamodelo para la gestión ambiental de los recursos hidrológicos. En: Lámpsakos. Julio-Diciembre de 2014, no. 12, p. 92-100. ISSN 21454086.

QUEVEDO URIAS, Héctor y SALVADOR PÉREZ, Blanca Rosa. Estadística para ingeniería y ciencia. México: Grupo Editorial Patria , 2014, p. 399. ISBN 9786074389395.

RUEDA RESTREPO, Jairo Alberto y COTES TORRES, José Miguel. Evaluación de dos métodos de estabilidad fenotípica a través de validación. En: Universidad Nacional de Colombia, Facultad Nacional de Agronomía. 2009, vol. 62 no. 2, p. 5111-5123. ISSN 03042847.

SADEGHBEIGI, Reza. Fluid catalytic cracking handbook: Butterworth-Heinemann, 2012. p. 1-226. ISBN 9780123869654.

TARQUINO PUJIRO, Richard. Mecanismos de formación de aromáticos en cortes de destilados medios del FCC. Argentina: Instituto de investigaciones en Catálisis y Petroquímica, 2014.

U. J. Etim, B. Xu, P. Bai, Rooh Ullah, F. Subhan, Z. Yan. Role of nickel on vanadium poisoned fcc catalyst: a study of physiochemical properties. En: Journal of Energy Chemistry. 24 de Abril de 2016, vol. 25, p. 667–676. ISSN 2095-4956.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL. Catedra de procesos industriales. Buenos Aires, Argentina. p. 15.

VILLAREAL, M.G; CABRERA, M. Un método de optimización vía simulación: aplicación a un proceso de moldeo por inyección de termoplásticos. Monterrey, 2007.

WAUQUIER, J. P. El refino del petróleo: Ediciones Díaz de Santos, 2004. p. 378-383. ISBN 9788479786236.

ANEXOS

ANEXO A. PRUEBA DE MEDIAS.

Prueba T e IC de dos muestras: RENDIMIENTO GASOLINA. RENDIMIENTO GASO-HYSYS

T de dos muestras para RENDIMIENTO GASOLINA vs. RENDIMIENTO GASO-HYSYS

	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
RENDIMIENTO GASOLINA	1000	59,93	2,53	0,080
RENDIMIENTO GASO-HYSYS	1000	60,523	0,205	0,0065

Diferencia = μ (RENDIMIENTO GASOLINA) - μ (RENDIMIENTO GASO-HYSYS)

Estimación de la diferencia: -0,5910

IC de 95% para la diferencia: (-0,7482. -0,4338)

Prueba T de diferencia = 0 (vs. $\neq$): Valor T = -7,38 Valor p = 0,000 GL = 1012

ANEXO B. EXPLICACIÓN TEORICA DEL NUMERO DE CORRIDAS PARA CADA DISEÑO Y RESULTADOS EN CADA UNO DE ESTOS.

- DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO

El diseño factorial 2^{k-p} es una fracción del diseño factorial completo y el número de corridas corresponde a $\frac{1}{4}$ del número total del diseño (5), es decir $\frac{1}{4}(2^9) = \frac{1}{4}(512) = 128$ este número de corridas corresponde a 2^{9-2} .

Tabla 10. Corridas totales del diseño Factorial Fraccionado

TEMP	FLUJO	GAO	GAS	VAPOR	SODIO	VANADIO	HIERRO	NIQUEL	%NAFTA
300	198,734	0,3	6350	2268	5000	7000	7000	6000	59,92647
300	139,114	0,7	3629	4990	3000	3000	7000	1500	62,00885
450	139,114	0,7	3629	4990	5000	7000	3000	1500	61,98618
450	139,114	0,3	3629	4990	3000	7000	3000	1500	61,47661
300	139,114	0,3	3629	2268	3000	7000	7000	6000	60,24776
450	198,734	0,7	3629	4990	3000	3000	3000	6000	60,09287
300	139,114	0,7	6350	2268	5000	7000	3000	6000	60,62873
450	139,114	0,3	3629	2268	3000	7000	3000	6000	60,25131
450	139,114	0,3	6350	2268	5000	7000	3000	1500	60,73822
450	139,114	0,7	3629	2268	5000	3000	7000	1500	60,60783
450	139,114	0,3	3629	4990	5000	3000	3000	1500	61,50646
450	139,114	0,7	3629	4990	3000	3000	3000	1500	62,01498
450	198,734	0,7	3629	4990	5000	7000	3000	6000	60,07177
300	139,114	0,3	6350	2268	3000	3000	7000	1500	60,76034
450	198,734	0,3	3629	2268	3000	7000	3000	1500	59,7751
450	198,734	0,3	3629	4990	5000	7000	7000	1500	60,21158
300	198,734	0,3	6350	2268	5000	3000	3000	1500	60,07438
300	198,734	0,7	6350	2268	3000	7000	7000	6000	59,59987
300	198,734	0,3	6350	4990	5000	3000	3000	6000	60,37453
450	198,734	0,3	3629	4990	3000	3000	7000	1500	60,24317
300	198,734	0,3	3629	2268	5000	7000	3000	6000	59,66662
300	139,114	0,7	3629	2268	3000	7000	3000	1500	60,5879
300	198,734	0,3	6350	2268	3000	3000	7000	6000	59,94901
450	198,734	0,3	3629	2268	5000	3000	3000	1500	59,80582
450	139,114	0,7	6350	2268	5000	3000	3000	1500	60,74478
300	139,114	0,3	6350	4990	3000	3000	7000	6000	61,72049
300	198,734	0,3	6350	2268	3000	7000	3000	1500	60,04255
450	198,734	0,3	6350	4990	5000	3000	7000	6000	60,36986
450	198,734	0,3	6350	2268	5000	3000	7000	1500	60,06773
300	198,734	0,7	6350	4990	5000	7000	3000	6000	60,12754

300	139,114	0,7	3629	2268	3000	3000	7000	6000	60,51315
300	198,734	0,7	3629	4990	3000	7000	3000	1500	60,1806
450	139,114	0,3	6350	4990	3000	3000	3000	6000	61,72471
300	139,114	0,3	3629	4990	3000	3000	3000	6000	61,39422
450	139,114	0,3	6350	2268	3000	3000	3000	1500	60,7661
450	198,734	0,7	6350	2268	3000	3000	7000	1500	59,73327
450	139,114	0,7	3629	4990	5000	3000	7000	6000	61,90141
300	139,114	0,7	6350	2268	3000	7000	7000	1500	60,71419
450	198,734	0,7	6350	4990	5000	7000	7000	6000	60,12334
450	139,114	0,7	3629	2268	3000	7000	7000	1500	60,58322
300	198,734	0,3	6350	4990	3000	7000	3000	6000	60,35126
450	198,734	0,3	6350	2268	3000	7000	7000	1500	60,03671
300	139,114	0,3	6350	4990	5000	3000	3000	1500	61,83911
450	139,114	0,3	6350	4990	5000	3000	7000	1500	61,83274
300	198,734	0,3	3629	2268	3000	7000	7000	1500	59,76947
450	198,734	0,7	6350	4990	3000	7000	3000	1500	60,23699
300	198,734	0,7	3629	4990	5000	3000	3000	1500	60,21154
300	139,114	0,7	3629	2268	5000	3000	3000	1500	60,61321
300	139,114	0,7	6350	2268	5000	3000	7000	1500	60,73927
450	139,114	0,3	3629	2268	3000	3000	7000	1500	60,36436
300	139,114	0,3	3629	4990	5000	7000	3000	6000	61,37295
450	198,734	0,7	3629	2268	3000	7000	7000	6000	59,52208
300	139,114	0,7	6350	4990	5000	7000	3000	1500	62,04247
450	139,114	0,3	3629	4990	5000	7000	7000	6000	61,36899
450	139,114	0,3	3629	2268	5000	3000	3000	6000	60,27007
300	139,114	0,7	6350	4990	3000	7000	7000	6000	61,93839
450	139,114	0,3	3629	4990	3000	3000	7000	6000	61,39005
300	139,114	0,3	6350	4990	3000	7000	3000	1500	61,80865
300	139,114	0,7	6350	2268	3000	3000	3000	6000	60,64607
300	139,114	0,3	6350	2268	5000	3000	3000	6000	60,66201
450	139,114	0,3	3629	2268	5000	7000	7000	1500	60,33831
450	139,114	0,7	3629	2268	5000	7000	3000	6000	60,4994
450	198,734	0,7	6350	2268	3000	7000	3000	6000	59,60393

300	139,114	0,3	6350	2268	5000	7000	7000	1500	60,73319
300	198,734	0,7	3629	2268	3000	3000	7000	1500	59,65392
300	198,734	0,3	6350	4990	5000	7000	7000	1500	60,46069
450	139,114	0,7	6350	4990	3000	7000	3000	6000	61,9422
450	139,114	0,7	6350	4990	3000	3000	7000	1500	62,06489
300	139,114	0,3	3629	2268	5000	3000	7000	6000	60,26635
450	139,114	0,7	6350	4990	5000	3000	3000	6000	61,96158
300	198,734	0,7	3629	2268	5000	7000	7000	1500	59,62523
300	198,734	0,7	6350	2268	5000	3000	7000	6000	59,62016
300	139,114	0,3	6350	2268	3000	7000	3000	6000	60,64269
300	198,734	0,3	3629	2268	5000	3000	7000	1500	59,79942
300	198,734	0,7	6350	4990	3000	7000	7000	1500	60,23118
300	198,734	0,7	3629	4990	5000	7000	7000	6000	60,06759
300	139,114	0,7	3629	4990	3000	7000	3000	6000	61,88582
300	198,734	0,3	3629	2268	3000	3000	3000	6000	59,68894
450	198,734	0,3	6350	4990	5000	7000	3000	1500	60,46675
300	198,734	0,7	6350	4990	5000	3000	7000	1500	60,26143
300	198,734	0,7	3629	4990	3000	3000	7000	6000	60,08847
300	139,114	0,3	3629	4990	5000	3000	7000	1500	61,50024
450	198,734	0,3	3629	2268	5000	7000	7000	6000	59,66243
300	198,734	0,3	3629	4990	3000	3000	3000	1500	60,24987
300	139,114	0,3	3629	4990	3000	7000	7000	1500	61,47117
300	139,114	0,7	6350	4990	3000	3000	3000	1500	62,07104
450	139,114	0,7	6350	2268	3000	7000	3000	1500	60,71899
450	139,114	0,3	6350	4990	3000	7000	7000	1500	61,8031
300	139,114	0,7	6350	4990	5000	3000	7000	6000	61,95756
300	198,734	0,7	6350	4990	3000	3000	3000	6000	60,14848
450	139,114	0,3	6350	4990	5000	7000	3000	6000	61,70331
300	198,734	0,7	6350	2268	5000	7000	3000	1500	59,70995
300	139,114	0,7	3629	4990	5000	7000	7000	1500	61,98085
450	198,734	0,7	3629	4990	3000	7000	7000	1500	60,17484
450	139,114	0,7	6350	2268	5000	7000	7000	6000	60,62528
450	198,734	0,3	3629	4990	5000	3000	3000	6000	60,1276

450	198,734	0,7	3629	4990	5000	3000	7000	1500	60,20494
450	198,734	0,7	3629	2268	5000	7000	3000	1500	59,63075
450	139,114	0,3	6350	2268	3000	7000	7000	6000	60,63903
300	139,114	0,3	3629	2268	5000	7000	3000	1500	60,34311
450	198,734	0,7	6350	4990	5000	3000	3000	1500	60,26809
450	139,114	0,3	6350	2268	5000	3000	7000	6000	60,65816
450	139,114	0,7	3629	2268	3000	3000	3000	6000	60,51672
300	198,734	0,3	3629	4990	3000	7000	7000	6000	60,10034
450	139,114	0,7	6350	4990	5000	7000	7000	1500	62,03713
450	198,734	0,3	6350	4990	3000	3000	3000	1500	60,50003
450	198,734	0,7	6350	4990	3000	3000	7000	6000	60,14406
300	198,734	0,3	3629	4990	5000	3000	7000	6000	60,12303
300	139,114	0,3	3629	2268	3000	3000	3000	1500	60,36984
450	198,734	0,3	6350	2268	5000	7000	3000	6000	59,93077
450	198,734	0,7	3629	2268	5000	3000	7000	6000	59,54231
300	139,114	0,7	3629	2268	5000	7000	7000	6000	60,49601
450	198,734	0,3	6350	2268	3000	3000	3000	6000	59,95352
450	198,734	0,3	3629	4990	3000	7000	3000	6000	60,10471
300	198,734	0,7	3629	2268	5000	3000	3000	6000	59,54653
450	198,734	0,7	6350	2268	5000	3000	3000	6000	59,62443
300	198,734	0,7	3629	2268	3000	7000	3000	6000	59,5261
450	198,734	0,3	3629	2268	3000	3000	7000	6000	59,68454
450	139,114	0,7	3629	4990	3000	7000	7000	6000	61,88201
300	198,734	0,3	6350	4990	3000	3000	7000	1500	60,49311
300	198,734	0,3	3629	4990	5000	7000	3000	1500	60,21746
300	139,114	0,7	3629	4990	5000	3000	3000	6000	61,90544
450	139,114	0,7	6350	2268	3000	3000	7000	6000	60,64243
450	198,734	0,3	6350	4990	3000	7000	7000	6000	60,34681
300	139,114	0,3	6350	4990	5000	7000	7000	6000	61,6993
450	198,734	0,7	3629	2268	3000	3000	3000	1500	59,66023
300	198,734	0,7	6350	2268	3000	3000	3000	1500	59,73969
450	198,734	0,7	6350	2268	5000	7000	7000	1500	59,70435

- **DISEÑO BOX BEHNKEN**

El diseño Box Behnken es un diseño de tres niveles que no incluye los vértices de la región experimental, sólo toma los extremos y la mitad de cada uno de los rangos de prueba; su algoritmo de generación consiste en plantear diseños factoriales completos a dos niveles (nivel alto y bajo) entre parejas de variables, manteniendo el resto de variables en su valor intermedio (5).

Tabla 11. Corridas totales del diseño Box Behnken

TEMP	FLUJO	GAO	GAS	VAPOR	SODIO	VANADIO	HIERRO	NIQUEL	%NAFTA
300	139,114	0,7	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	61,06319
375	198,734	0,5	4989,5	3629	5000	7000	5000	3750	59,81669
375	168,924	0,3	4989,5	3629	3000	5000	5000	6000	60,33034
300	168,924	0,5	3629	3629	4000	3000	5000	3750	60,21328
300	168,924	0,5	4989,5	3629	3000	5000	3000	3750	60,32703
375	139,114	0,5	4989,5	3629	3000	3000	5000	3750	60,98575
375	198,734	0,5	4989,5	2268	4000	5000	3000	3750	59,6696
375	198,734	0,5	4989,5	4990	4000	5000	3000	3750	60,1487
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,32467
375	139,114	0,5	4989,5	2268	4000	5000	7000	3750	60,57811
450	168,924	0,5	4989,5	3629	3000	5000	7000	3750	60,32238
375	168,924	0,5	6350	2268	3000	5000	5000	3750	60,2028
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,32467
375	198,734	0,5	4989,5	3629	3000	3000	5000	3750	59,84207
300	168,924	0,5	4989,5	3629	5000	5000	3000	3750	60,32698
450	139,114	0,3	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,86037
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	7000	3000	1500	60,37118
375	168,924	0,7	4989,5	3629	5000	5000	5000	6000	60,30191
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	7000	7000	1500	60,36573

375	139,114	0,5	4989,5	4990	4000	5000	3000	3750	61,79801
450	168,924	0,5	4989,5	2268	4000	5000	5000	1500	60,14199
375	198,734	0,5	4989,5	4990	4000	5000	7000	3750	60,14353
375	168,924	0,5	3629	4990	5000	5000	5000	3750	60,70582
300	198,734	0,3	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,01249
450	168,924	0,5	4989,5	3629	3000	5000	3000	3750	60,32703
375	168,924	0,3	4989,5	2268	4000	7000	5000	3750	60,15042
450	168,924	0,5	6350	3629	4000	3000	5000	3750	60,44844
300	168,924	0,5	6350	3629	4000	3000	5000	3750	60,44844
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	7000	7000	6000	60,26389
375	168,924	0,7	4989,5	3629	3000	5000	5000	1500	60,40406
300	168,924	0,5	6350	3629	4000	3000	5000	3750	60,44844
375	168,924	0,3	4989,5	3629	5000	5000	5000	1500	60,43687
375	139,114	0,5	4989,5	3629	5000	7000	5000	3750	60,96373
300	168,924	0,5	6350	3629	4000	7000	5000	3750	60,42491
375	168,924	0,3	4989,5	4990	4000	3000	5000	3750	60,83071
375	168,924	0,3	3629	3629	4000	5000	7000	3750	60,21666
450	168,924	0,5	4989,5	3629	5000	5000	3000	3750	60,32698
375	168,924	0,3	4989,5	3629	3000	5000	5000	6000	60,33034
375	139,114	0,5	4989,5	2268	4000	5000	3000	3750	60,58229
375	168,924	0,3	4989,5	3629	3000	5000	5000	1500	60,43701
375	168,924	0,3	3629	3629	4000	5000	3000	3750	60,22123
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,32467
375	139,114	0,5	4989,5	4990	4000	5000	3000	3750	61,79801
375	168,924	0,3	4989,5	3629	3000	5000	5000	1500	60,43701
300	168,924	0,5	4989,5	2268	4000	5000	5000	6000	60,03767
375	168,924	0,7	4989,5	3629	5000	5000	5000	1500	60,40414
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,32467
375	198,734	0,5	4989,5	2268	4000	5000	3000	3750	59,6696
375	168,924	0,5	6350	4990	5000	5000	5000	3750	60,91663
375	198,734	0,5	6350	3629	4000	5000	5000	1500	59,98693
300	168,924	0,5	3629	3629	4000	3000	5000	3750	60,21328
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	3000	7000	6000	60,28424

450	168,924	0,5	6350	3629	4000	3000	5000	3750	60,44844
450	168,924	0,5	3629	3629	4000	3000	5000	3750	60,21328
300	168,924	0,5	6350	3629	4000	7000	5000	3750	60,42491
450	168,924	0,5	4989,5	3629	5000	5000	7000	3750	60,32234
450	168,924	0,5	6350	3629	4000	7000	5000	3750	60,42491
375	168,924	0,7	4989,5	3629	3000	5000	5000	6000	60,30182
375	168,924	0,7	4989,5	3629	5000	5000	5000	1500	60,40414
375	168,924	0,3	6350	3629	4000	5000	7000	3750	60,52669
450	168,924	0,5	4989,5	4990	4000	5000	5000	6000	60,76607
450	168,924	0,5	3629	3629	4000	3000	5000	3750	60,21328
375	168,924	0,7	4989,5	3629	3000	5000	5000	6000	60,30182
375	198,734	0,5	4989,5	2268	4000	5000	7000	3750	59,66463
375	198,734	0,5	6350	3629	4000	5000	5000	6000	59,8705
375	168,924	0,3	4989,5	3629	5000	5000	5000	6000	60,33019
375	139,114	0,5	4989,5	2268	4000	5000	7000	3750	60,57811
300	168,924	0,5	3629	3629	4000	7000	5000	3750	60,19001
375	168,924	0,7	4989,5	3629	3000	5000	5000	1500	60,40406
375	168,924	0,5	3629	4990	3000	5000	5000	3750	60,70587
375	198,734	0,5	4989,5	4990	4000	5000	3000	3750	60,1487
375	168,924	0,3	4989,5	4990	4000	7000	5000	3750	60,80597
375	168,924	0,5	6350	2268	5000	5000	5000	3750	60,20278
375	168,924	0,7	6350	3629	4000	5000	3000	3750	60,38863
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	3000	3000	6000	60,2884
375	168,924	0,5	3629	2268	3000	5000	5000	3750	59,95626
375	139,114	0,5	3629	3629	4000	5000	5000	1500	60,88103
375	168,924	0,7	4989,5	4990	4000	3000	5000	3750	60,91625
375	198,734	0,5	4989,5	2268	4000	5000	7000	3750	59,66463
375	139,114	0,5	6350	3629	4000	5000	5000	6000	61,06191
375	168,924	0,7	4989,5	2268	4000	3000	5000	3750	60,09244
375	168,924	0,5	3629	2268	5000	5000	5000	3750	59,9562
375	139,114	0,5	4989,5	4990	4000	5000	7000	3750	61,79335
300	168,924	0,5	4989,5	3629	3000	5000	7000	3750	60,32238
375	139,114	0,5	3629	3629	4000	5000	5000	6000	60,7826

375	198,734	0,5	3629	3629	4000	5000	5000	1500	59,78733
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	3000	3000	1500	60,40079
375	168,924	0,3	4989,5	3629	5000	5000	5000	6000	60,33019
375	168,924	0,7	4989,5	3629	5000	5000	5000	6000	60,30191
375	139,114	0,5	4989,5	2268	4000	5000	3000	3750	60,58229
450	168,924	0,5	4989,5	4990	4000	5000	5000	1500	60,87694
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,32467
375	139,114	0,5	4989,5	3629	5000	3000	5000	3750	60,9857
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	3000	7000	1500	60,39455
375	198,734	0,5	4989,5	3629	5000	3000	5000	3750	59,84205
300	168,924	0,5	4989,5	4990	4000	5000	5000	6000	60,76607
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,32467
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	7000	3000	6000	60,26785
450	198,734	0,3	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,01249
375	198,734	0,5	3629	3629	4000	5000	5000	6000	59,67261
375	198,734	0,5	4989,5	3629	3000	7000	5000	3750	59,81672
450	168,924	0,5	6350	3629	4000	7000	5000	3750	60,42491
300	198,734	0,7	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	59,80606
375	168,924	0,3	4989,5	2268	4000	3000	5000	3750	60,17374
375	139,114	0,5	4989,5	3629	3000	7000	5000	3750	60,96381
375	168,924	0,7	6350	3629	4000	5000	7000	3750	60,38414
375	168,924	0,5	6350	4990	3000	5000	5000	3750	60,91665
375	168,924	0,7	4989,5	4990	4000	7000	5000	3750	60,89333
300	168,924	0,5	4989,5	4990	4000	5000	5000	1500	60,87694
375	139,114	0,5	6350	3629	4000	5000	5000	1500	61,16228
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,32467
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,32467
375	168,924	0,7	3629	3629	4000	5000	3000	3750	60,30213
300	168,924	0,5	4989,5	2268	4000	5000	5000	1500	60,14199
450	198,734	0,7	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	59,80606
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,32467
450	168,924	0,5	4989,5	2268	4000	5000	5000	6000	60,03767
300	168,924	0,5	3629	3629	4000	7000	5000	3750	60,19001

375	198,734	0,5	4989,5	4990	4000	5000	7000	3750	60,14353
375	168,924	0,7	4989,5	2268	4000	7000	5000	3750	60,07091
375	139,114	0,5	4989,5	4990	4000	5000	7000	3750	61,79335
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,32467
375	168,924	0,3	6350	3629	4000	5000	3000	3750	60,53141
450	168,924	0,5	3629	3629	4000	7000	5000	3750	60,19001
450	139,114	0,7	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	61,06319
300	168,924	0,5	4989,5	3629	5000	5000	7000	3750	60,32234
375	168,924	0,3	4989,5	3629	5000	5000	5000	1500	60,43687
300	139,114	0,3	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,86037
375	168,924	0,7	3629	3629	4000	5000	7000	3750	60,2977
450	168,924	0,5	3629	3629	4000	7000	5000	3750	60,19001

• DISEÑO CENTRAL COMPUESTO

Por otro lado, el diseño central compuesto (DCC) es desarrollado a partir de diseños factoriales 2^k . EL número total de corridas en el DCC está dada por la ecuación $N = 2^k + 2k + n_o$, en donde 2^k es el diseño factorial o fraccionado según sea el caso y n_o son puntos o repeticiones al centro del diseño (5). Entonces, $N = 2^{9-2} + 2(9) + 10 = 128 + 18 + 10 = 156$ corridas totales.

Tabla 12. Corridas totales del diseño Central Compuesto

TEMP	FLUJO	GAO	GAS	VAPOR	SODIO	VANADIO	HIERRO	NIQUEL	%NAFTA
352,702	160,061	0,44054	4585,02	4033,63	4297,3	4405,4	5594,6	3081,07	60,6
397,298	177,787	0,44054	5393,98	4033,63	3702,7	5594,6	5594,6	4418,93	60,2975
397,298	160,061	0,44054	5393,98	4033,63	3702,7	4405,4	4405,4	4418,93	60,6503
397,298	160,061	0,44054	5393,98	3224,37	4297,3	4405,4	5594,6	4418,93	60,4204
397,298	160,061	0,55946	4585,02	3224,37	3702,7	5594,6	5594,6	3081,07	60,3961
397,298	160,061	0,55946	4585,02	4033,63	4297,3	5594,6	4405,4	3081,07	60,6479
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,3247

352,702	160,061	0,44054	4585,02	3224,37	3702,7	5594,6	5594,6	4418,93	60,3302
397,298	177,787	0,55946	4585,02	4033,63	4297,3	5594,6	4405,4	4418,93	60,2358
397,298	177,787	0,55946	5393,98	3224,37	3702,7	5594,6	4405,4	4418,93	60,1047
352,702	160,061	0,55946	5393,98	3224,37	3702,7	4405,4	4405,4	4418,93	60,4376
352,702	177,787	0,44054	5393,98	4033,63	4297,3	5594,6	5594,6	3081,07	60,3295
352,702	160,061	0,44054	4585,02	4033,63	4297,3	5594,6	4405,4	4418,93	60,5634
397,298	177,787	0,44054	5393,98	3224,37	4297,3	4405,4	5594,6	3081,07	60,1641
397,298	177,787	0,44054	5393,98	4033,63	4297,3	5594,6	4405,4	3081,07	60,331
352,702	160,061	0,44054	5393,98	3224,37	4297,3	5594,6	5594,6	3081,07	60,444
375	198,734	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	59,8292
352,702	177,787	0,44054	5393,98	3224,37	3702,7	5594,6	4405,4	3081,07	60,1581
352,702	160,061	0,55946	4585,02	3224,37	4297,3	5594,6	5594,6	4418,93	60,3668
397,298	160,061	0,55946	4585,02	3224,37	4297,3	4405,4	5594,6	3081,07	60,403
352,702	160,061	0,55946	5393,98	3224,37	4297,3	5594,6	4405,4	4418,93	60,4313
397,298	177,787	0,55946	4585,02	4033,63	3702,7	5594,6	5594,6	3081,07	60,2656
352,702	160,061	0,44054	5393,98	4033,63	4297,3	5594,6	5594,6	4418,93	60,6422
397,298	177,787	0,44054	4585,02	3224,37	4297,3	4405,4	4405,4	3081,07	60,0904
397,298	160,061	0,44054	5393,98	3224,37	3702,7	4405,4	4405,4	3081,07	60,4526
397,298	177,787	0,55946	5393,98	3224,37	4297,3	4405,4	4405,4	4418,93	60,1113
375	168,924	0,5	4989,5	3629	3000	5000	5000	3750	60,3247
352,702	177,787	0,44054	5393,98	4033,63	3702,7	5594,6	4405,4	4418,93	60,2989
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	3000	3750	60,327
397,298	160,061	0,44054	5393,98	3224,37	4297,3	5594,6	4405,4	3081,07	60,4454
352,702	177,787	0,44054	4585,02	3224,37	3702,7	5594,6	5594,6	3081,07	60,0814
352,702	177,787	0,55946	5393,98	4033,63	4297,3	4405,4	5594,6	3081,07	60,3272
352,702	160,061	0,55946	4585,02	3224,37	3702,7	4405,4	5594,6	4418,93	60,3731
352,702	177,787	0,55946	4585,02	3224,37	4297,3	4405,4	4405,4	4418,93	60,0545
397,298	177,787	0,44054	5393,98	4033,63	4297,3	4405,4	5594,6	4418,93	60,3044
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	7000	3750	60,3224
397,298	160,061	0,44054	4585,02	3224,37	3702,7	4405,4	5594,6	3081,07	60,3673
352,702	177,787	0,44054	4585,02	4033,63	3702,7	5594,6	5594,6	4418,93	60,2249
375	168,924	0,5	4989,5	2268	4000	5000	5000	3750	60,0854
375	168,924	0,5	4989,5	4990	4000	5000	5000	3750	60,8167

352,702	160,061	0,55946	5393,98	4033,63	4297,3	5594,6	4405,4	3081,07	60,7074
397,298	177,787	0,55946	5393,98	4033,63	3702,7	4405,4	5594,6	4418,93	60,2952
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,3247
352,702	177,787	0,55946	5393,98	4033,63	4297,3	5594,6	4405,4	4418,93	60,2899
397,298	177,787	0,44054	4585,02	3224,37	4297,3	5594,6	5594,6	4418,93	60,05
397,298	177,787	0,55946	4585,02	4033,63	4297,3	4405,4	5594,6	3081,07	60,273
397,298	160,061	0,44054	4585,02	4033,63	4297,3	4405,4	4405,4	3081,07	60,6014
352,702	160,061	0,44054	5393,98	4033,63	3702,7	4405,4	5594,6	4418,93	60,6489
352,702	177,787	0,44054	5393,98	4033,63	4297,3	4405,4	4405,4	4418,93	60,3058
397,298	177,787	0,44054	5393,98	3224,37	3702,7	5594,6	5594,6	3081,07	60,1566
352,702	160,061	0,44054	4585,02	3224,37	3702,7	4405,4	4405,4	3081,07	60,3687
352,702	160,061	0,44054	4585,02	4033,63	3702,7	5594,6	5594,6	3081,07	60,5927
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,3247
352,702	177,787	0,44054	5393,98	4033,63	3702,7	4405,4	5594,6	3081,07	60,3372
397,298	177,787	0,44054	4585,02	4033,63	4297,3	5594,6	5594,6	3081,07	60,2567
352,702	177,787	0,55946	5393,98	3224,37	3702,7	5594,6	5594,6	4418,93	60,1033
352,702	160,061	0,55946	5393,98	3224,37	3702,7	5594,6	5594,6	3081,07	60,4595
397,298	160,061	0,55946	5393,98	4033,63	4297,3	4405,4	4405,4	4418,93	60,6837
397,298	177,787	0,44054	4585,02	4033,63	4297,3	4405,4	4405,4	4418,93	60,2331
375	168,924	0,5	6350	3629	4000	5000	5000	3750	60,4365
352,702	160,061	0,55946	4585,02	3224,37	3702,7	5594,6	4405,4	3081,07	60,3975
352,702	177,787	0,55946	4585,02	4033,63	4297,3	5594,6	5594,6	4418,93	60,2344
397,298	160,061	0,55946	4585,02	4033,63	3702,7	5594,6	5594,6	4418,93	60,6166
352,702	177,787	0,55946	5393,98	3224,37	3702,7	4405,4	4405,4	3081,07	60,1429
352,702	177,787	0,55946	4585,02	3224,37	3702,7	5594,6	4405,4	4418,93	60,0479
375	168,924	0,3	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,3792
352,702	160,061	0,55946	4585,02	4033,63	3702,7	5594,6	4405,4	4418,93	60,6179
397,298	160,061	0,44054	4585,02	3224,37	3702,7	5594,6	4405,4	4418,93	60,3315
397,298	177,787	0,44054	5393,98	3224,37	3702,7	4405,4	4405,4	4418,93	60,1333
375	139,114	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,9746
397,298	160,061	0,55946	4585,02	3224,37	3702,7	4405,4	4405,4	4418,93	60,3744
352,702	160,061	0,44054	5393,98	4033,63	4297,3	4405,4	4405,4	3081,07	60,6818
352,702	177,787	0,55946	5393,98	3224,37	4297,3	4405,4	5594,6	4418,93	60,1099

352,702	160,061	0,44054	5393,98	3224,37	3702,7	5594,6	4405,4	4418,93	60,4151
397,298	177,787	0,55946	4585,02	3224,37	4297,3	4405,4	5594,6	4418,93	60,0532
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,3247
397,298	160,061	0,55946	5393,98	3224,37	3702,7	4405,4	5594,6	4418,93	60,4364
397,298	160,061	0,55946	5393,98	4033,63	3702,7	5594,6	4405,4	4418,93	60,6773
352,702	177,787	0,44054	4585,02	3224,37	3702,7	4405,4	4405,4	4418,93	60,0582
352,702	177,787	0,44054	4585,02	4033,63	4297,3	5594,6	4405,4	3081,07	60,2582
397,298	177,787	0,44054	4585,02	4033,63	3702,7	4405,4	5594,6	3081,07	60,2643
397,298	160,061	0,55946	5393,98	3224,37	4297,3	4405,4	4405,4	3081,07	60,4678
397,298	177,787	0,55946	5393,98	4033,63	4297,3	4405,4	4405,4	3081,07	60,3287
375	168,924	0,7	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,3485
397,298	160,061	0,44054	5393,98	4033,63	4297,3	4405,4	5594,6	3081,07	60,6803
352,702	177,787	0,44054	4585,02	4033,63	3702,7	4405,4	4405,4	3081,07	60,2659
352,702	160,061	0,44054	5393,98	3224,37	4297,3	4405,4	4405,4	4418,93	60,4217
352,702	160,061	0,55946	5393,98	4033,63	4297,3	4405,4	5594,6	4418,93	60,6824
352,702	177,787	0,55946	4585,02	4033,63	4297,3	4405,4	4405,4	3081,07	60,2745
397,298	177,787	0,55946	4585,02	3224,37	3702,7	5594,6	5594,6	4418,93	60,0466
397,298	160,061	0,44054	4585,02	3224,37	4297,3	4405,4	4405,4	4418,93	60,338
352,702	177,787	0,44054	5393,98	3224,37	3702,7	4405,4	5594,6	4418,93	60,1319
352,702	160,061	0,55946	5393,98	4033,63	3702,7	5594,6	5594,6	4418,93	60,676
352,702	160,061	0,44054	5393,98	3224,37	3702,7	4405,4	5594,6	3081,07	60,4512
352,702	177,787	0,55946	4585,02	4033,63	3702,7	5594,6	4405,4	3081,07	60,2671
300	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,3247
352,702	160,061	0,44054	4585,02	4033,63	3702,7	4405,4	4405,4	4418,93	60,5701
352,702	177,787	0,55946	5393,98	4033,63	3702,7	5594,6	5594,6	3081,07	60,3198
397,298	160,061	0,44054	4585,02	4033,63	3702,7	5594,6	4405,4	3081,07	60,5941
397,298	160,061	0,55946	4585,02	4033,63	3702,7	4405,4	4405,4	3081,07	60,655
397,298	177,787	0,55946	5393,98	3224,37	4297,3	5594,6	5594,6	3081,07	60,1342
397,298	160,061	0,44054	5393,98	4033,63	3702,7	5594,6	5594,6	3081,07	60,673
352,702	177,787	0,44054	4585,02	3224,37	4297,3	5594,6	4405,4	4418,93	60,0513
352,702	177,787	0,44054	5393,98	3224,37	4297,3	4405,4	4405,4	3081,07	60,1657
397,298	177,787	0,55946	5393,98	3224,37	3702,7	4405,4	5594,6	3081,07	60,1415
397,298	160,061	0,44054	4585,02	3224,37	4297,3	5594,6	5594,6	3081,07	60,3601

397,298	160,061	0,55946	5393,98	3224,37	3702,7	5594,6	4405,4	3081,07	60,4608
397,298	177,787	0,55946	5393,98	4033,63	4297,3	5594,6	5594,6	4418,93	60,2885
352,702	177,787	0,44054	4585,02	3224,37	4297,3	4405,4	5594,6	3081,07	60,0889
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,3247
397,298	160,061	0,55946	4585,02	3224,37	4297,3	5594,6	4405,4	4418,93	60,3681
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,3247
352,702	177,787	0,44054	4585,02	4033,63	4297,3	4405,4	5594,6	4418,93	60,2318
397,298	177,787	0,55946	5393,98	4033,63	3702,7	5594,6	4405,4	3081,07	60,3213
352,702	177,787	0,55946	4585,02	3224,37	4297,3	5594,6	5594,6	3081,07	60,0773
397,298	177,787	0,55946	4585,02	4033,63	3702,7	4405,4	4405,4	4418,93	60,2425
397,298	177,787	0,55946	4585,02	3224,37	3702,7	4405,4	4405,4	3081,07	60,0861
397,298	160,061	0,55946	4585,02	4033,63	4297,3	4405,4	5594,6	4418,93	60,623
450	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,3247
397,298	177,787	0,55946	4585,02	3224,37	4297,3	5594,6	4405,4	3081,07	60,0787
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	1500	60,3826
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,3247
397,298	177,787	0,44054	4585,02	4033,63	3702,7	5594,6	4405,4	4418,93	60,2262
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,3247
375	168,924	0,5	3629	3629	4000	5000	5000	3750	60,2015
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,3247
352,702	177,787	0,55946	5393,98	3224,37	4297,3	5594,6	4405,4	3081,07	60,1356
397,298	160,061	0,55946	5393,98	3224,37	4297,3	5594,6	5594,6	4418,93	60,4301
352,702	160,061	0,55946	4585,02	4033,63	4297,3	5594,6	5594,6	3081,07	60,6465
397,298	177,787	0,44054	4585,02	3224,37	3702,7	4405,4	5594,6	4418,93	60,0568
352,702	177,787	0,55946	4585,02	3224,37	3702,7	4405,4	5594,6	3081,07	60,0846
397,298	160,061	0,55946	5393,98	4033,63	3702,7	4405,4	5594,6	3081,07	60,7131
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	6000	60,276
352,702	177,787	0,44054	5393,98	3224,37	4297,3	5594,6	5594,6	4418,93	60,125
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	5000	5000	3750	60,3247
397,298	160,061	0,44054	5393,98	4033,63	4297,3	5594,6	4405,4	4418,93	60,6435
397,298	160,061	0,44054	4585,02	4033,63	3702,7	4405,4	5594,6	4418,93	60,5688
352,702	177,787	0,55946	5393,98	4033,63	3702,7	4405,4	4405,4	4418,93	60,2966
397,298	177,787	0,44054	5393,98	3224,37	4297,3	5594,6	4405,4	4418,93	60,1264

352,702	160,061	0,44054	4585,02	3224,37	4297,3	4405,4	5594,6	4418,93	60,3367
352,702	177,787	0,55946	4585,02	4033,63	3702,7	4405,4	5594,6	4418,93	60,2411
352,702	160,061	0,55946	5393,98	4033,63	3702,7	4405,4	4405,4	3081,07	60,7145
352,702	160,061	0,55946	4585,02	3224,37	4297,3	4405,4	4405,4	3081,07	60,4044
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	7000	5000	3750	60,3132
352,702	160,061	0,44054	5393,98	4033,63	3702,7	5594,6	4405,4	3081,07	60,6744
375	168,924	0,5	4989,5	3629	5000	5000	5000	3750	60,3247
397,298	177,787	0,44054	4585,02	3224,37	3702,7	5594,6	4405,4	3081,07	60,0829
397,298	177,787	0,44054	5393,98	4033,63	3702,7	4405,4	4405,4	3081,07	60,3387
397,298	160,061	0,44054	4585,02	4033,63	4297,3	5594,6	5594,6	4418,93	60,5621
397,298	160,061	0,44054	5393,98	3224,37	3702,7	5594,6	5594,6	4418,93	60,4139
375	168,924	0,5	4989,5	3629	4000	3000	5000	3750	60,3366
352,702	160,061	0,55946	4585,02	4033,63	4297,3	4405,4	4405,4	4418,93	60,6243
397,298	160,061	0,55946	5393,98	4033,63	4297,3	5594,6	5594,6	3081,07	60,706
352,702	160,061	0,55946	5393,98	3224,37	4297,3	4405,4	5594,6	3081,07	60,4664
352,702	160,061	0,55946	4585,02	4033,63	3702,7	4405,4	5594,6	3081,07	60,6536
352,702	160,061	0,44054	4585,02	3224,37	4297,3	5594,6	4405,4	3081,07	60,3615

• DISEÑO HIPERCUBO LATINO

Finalmente, el diseño de hipercubo latino permite flexibilidad en el número de corridas, es decir, se escoge un número fijo acorde al estudio y se divide cada distribución de factores entre este número, con el fin de obtener igual espaciamiento entre los valores de las distribuciones observadas para cada variable. Se tomó un total de 200 corridas.

Tabla 13. Corridas totales del diseño Hipercubo Latino

TEMP	FLUJO	GAO	GAS	VAPOR	SODIO	VANADIO	HIERRO	NIQUEL	%NAFTA
309,05	175,96	0,35	5051,03	2979,28	4005,03	3643,22	6075,38	3241,21	60,15
419,10	171,47	0,45	5461,23	4018,83	3231,16	3321,61	5110,55	1522,61	60,46
330,90	162,48	0,57	5392,86	2774,10	4507,54	6879,40	6316,58	2042,71	60,26
440,95	145,11	0,39	5625,31	3430,66	3110,55	3000,00	4809,05	5728,64	60,72

384,42	139,41	0,44	4066,55	3088,70	4125,63	3482,41	4909,55	5389,45	60,55
371,61	149,00	0,37	5420,21	3116,06	3874,37	4386,93	3884,42	5005,03	60,55
334,67	141,81	0,53	5912,45	3594,80	3321,61	4547,74	6959,80	5638,19	60,87
444,72	172,07	0,53	3738,39	2650,99	3783,92	6678,39	3964,82	4530,15	59,91
337,69	184,35	0,55	5748,37	4100,90	4608,04	3603,02	5733,67	5660,80	60,12
429,65	197,84	0,52	5885,11	2897,21	4055,28	5010,05	5552,76	5615,58	59,71
406,28	154,99	0,43	4216,95	3184,45	3221,11	4105,53	4346,73	2178,39	60,39
308,29	187,65	0,32	6199,59	4524,93	4336,68	5874,37	3824,12	4552,76	60,39
307,54	168,18	0,39	3847,77	3252,84	4778,89	6859,30	5532,66	4439,70	60,11
306,78	149,30	0,62	5174,09	3321,24	3190,95	5954,77	5432,16	4507,54	60,59
327,89	155,59	0,41	5980,82	3977,80	4557,79	4085,43	6256,28	3693,47	60,76
342,96	195,14	0,42	5488,58	3581,13	3140,70	4527,64	6216,08	1952,26	60,00
450,00	173,57	0,65	4189,61	2350,07	4216,08	5753,77	4989,95	2336,68	59,96
352,01	195,44	0,40	5146,74	4005,16	3944,72	5110,55	4768,84	5072,86	59,99
304,52	161,28	0,33	4107,57	3307,56	3462,31	4507,54	3020,10	3128,14	60,30
435,68	177,76	0,62	4791,24	4730,11	3361,81	5190,95	5773,87	4982,41	60,43
417,59	198,13	0,57	4654,50	4593,33	3291,46	3944,72	3663,32	4801,51	59,96
333,17	150,20	0,56	4750,22	4866,89	4829,15	3221,11	4527,64	4914,57	61,25
362,56	182,26	0,60	3656,35	2555,25	3120,60	6296,48	5351,76	2879,40	59,79
383,67	166,38	0,58	3629,00	3895,73	3954,77	4909,55	6417,09	5140,70	60,29
321,86	165,18	0,61	3916,14	3362,27	3934,67	3201,01	5452,26	4258,79	60,22
446,98	190,35	0,36	4463,08	4073,55	4316,58	4206,03	6276,38	2653,27	60,11
356,53	180,46	0,32	5433,88	2486,85	4748,74	5211,06	5713,57	2020,10	60,12
388,94	158,29	0,56	3970,83	3143,42	4869,35	3140,70	4045,23	3806,53	60,29
394,97	156,19	0,55	4722,87	3334,91	4195,98	5512,56	5331,66	3670,85	60,42
437,19	190,94	0,31	4093,89	4771,15	3974,87	4467,34	6055,28	5525,13	60,20
315,08	140,91	0,37	4271,65	3950,44	3532,66	5532,66	5633,17	4937,19	60,85
354,27	162,18	0,65	4804,91	4251,37	4145,73	4869,35	3321,61	3060,30	60,67
318,09	196,94	0,43	4968,99	3170,77	4819,10	4849,25	3502,51	3286,43	59,83
324,87	178,36	0,62	4285,32	2377,43	3020,10	4145,73	6356,78	4371,86	59,85

416,08	194,54	0,49	4695,52	3198,13	3663,32	4567,84	4969,85	1703,52	59,82
448,49	159,49	0,49	4668,18	4716,43	3773,87	6015,08	6879,40	2947,24	60,85
418,34	145,71	0,39	4203,28	3375,95	4417,09	5793,97	6095,48	1726,13	60,60
330,15	160,98	0,36	4326,34	2842,49	4326,63	3743,72	4165,83	1590,45	60,28
414,57	160,09	0,40	4572,46	2445,82	4628,14	4005,03	7000,00	4846,73	60,16
378,39	197,24	0,36	5215,11	2664,67	3271,36	4346,73	6919,60	4756,28	59,83
431,91	169,67	0,65	3957,16	3841,02	3391,96	5633,17	3623,12	5502,51	60,25
314,32	151,40	0,47	4449,40	4689,08	3371,86	3341,71	3924,62	3376,88	61,03
443,97	141,21	0,57	4244,30	4798,50	4105,53	4487,44	4306,53	5208,54	61,49
357,29	174,17	0,43	6240,61	2733,07	3844,22	3402,01	4427,14	4032,66	60,17
326,38	185,85	0,54	6076,53	4347,12	4065,33	6698,49	5150,75	4869,35	60,18
385,93	153,20	0,63	3683,69	3717,91	3311,56	6356,78	3301,51	3422,11	60,58
391,21	149,90	0,69	4175,93	2760,42	3643,22	5130,65	5693,47	1658,29	60,47
430,40	143,91	0,40	4586,14	3608,48	3060,30	5854,27	5030,15	4620,60	60,70
422,86	191,54	0,64	6267,96	4128,26	4185,93	3361,81	4185,93	2924,62	60,07
415,33	178,96	0,53	4039,20	2883,53	4919,60	6457,29	4608,04	5864,32	59,84
333,92	143,31	0,40	5351,84	4429,19	3834,17	6316,58	3804,02	5027,64	61,16
306,03	161,58	0,46	4312,67	3786,30	4658,29	4809,05	6497,49	3263,82	60,39
339,95	145,41	0,58	5324,50	2404,78	3894,47	4427,14	3522,61	3218,59	60,48
376,13	140,31	0,67	5310,82	2951,92	3070,35	5271,36	3763,82	5683,42	60,68
408,54	148,40	0,38	4121,24	3622,16	3582,91	6135,68	3060,30	3783,92	60,57
446,23	155,89	0,68	4340,02	3649,52	4045,23	5974,87	6195,98	5819,10	60,52
300,75	175,37	0,60	5584,29	2719,39	3884,42	4608,04	6296,48	5592,96	59,98
427,39	141,51	0,68	4394,71	2924,56	4025,13	4587,94	3100,50	4304,02	60,63
316,58	184,65	0,49	4517,77	3512,73	4457,29	5472,36	6577,89	5773,87	59,89
434,92	170,87	0,70	6295,31	3991,48	3432,16	6638,19	4125,63	3874,37	60,40
403,27	166,98	0,48	6254,29	2418,46	3904,52	5170,85	6678,39	2969,85	60,19
425,88	192,74	0,51	6350,00	3499,06	4427,14	6758,79	6236,18	2540,20	59,96
313,57	193,34	0,59	6213,27	3225,49	3542,71	3060,30	5592,96	4213,57	59,84
399,50	161,88	0,47	4627,16	4237,69	3713,57	3180,90	5492,46	5434,67	60,53

377,64	176,56	0,37	4162,26	4702,75	4597,99	3281,41	6638,19	3444,72	60,46
407,79	179,86	0,48	6021,84	4620,68	3592,96	4688,44	6839,20	1748,74	60,48
359,55	187,05	0,44	5857,76	2295,36	3603,02	5814,07	5271,36	3942,21	59,89
438,69	172,37	0,54	5898,78	3485,38	3201,01	6819,10	6155,78	3851,76	60,23
404,02	154,09	0,69	5939,80	3540,09	3552,76	6396,98	5211,06	5796,48	60,58
303,77	152,00	0,51	5064,70	4224,01	4708,54	6899,50	4567,84	3603,02	60,84
311,31	193,64	0,35	4353,69	3745,27	4407,04	3763,82	3281,41	5570,35	59,94
347,49	192,44	0,62	5994,49	2568,92	4246,23	6959,80	4145,73	2562,81	59,77
390,45	160,39	0,36	5597,96	3731,59	3562,81	6336,68	4748,74	3648,24	60,56
421,36	147,80	0,33	3861,45	4114,58	4095,48	6919,60	6035,18	4281,41	60,71
370,10	167,88	0,65	5502,25	3033,99	4798,99	4246,23	3341,71	5298,99	60,16
332,41	196,64	0,44	6322,65	3266,52	4366,83	3904,52	6396,98	1929,65	59,97
426,63	196,34	0,41	3943,49	4456,54	4276,38	6417,09	4386,93	4417,09	59,97
367,09	188,55	0,54	3820,43	3211,81	3994,97	6738,69	3080,40	3580,40	59,78
372,36	196,04	0,64	3888,79	2500,53	4758,79	3160,80	5894,47	4597,99	59,59
428,89	153,79	0,49	5515,92	4948,96	3522,61	5331,66	4849,25	1861,81	61,25
329,40	155,29	0,39	4996,34	4579,65	4889,45	4648,24	3723,62	2494,97	60,96
352,76	189,75	0,69	4736,54	4059,87	3964,82	3924,62	3984,92	4711,06	60,00
364,82	152,30	0,35	5078,38	3389,63	4477,39	6537,69	6175,88	3535,18	60,55
428,14	158,89	0,63	6172,25	4155,62	3211,06	4045,23	6517,59	4778,89	60,72
389,70	181,06	0,63	5556,94	2432,14	3040,20	5452,26	4246,23	2856,78	59,91
360,30	146,60	0,44	4982,66	3909,41	3150,75	6216,08	6738,69	2834,17	60,83
355,78	148,70	0,31	4873,28	4648,04	3381,91	5653,27	3603,02	2721,11	61,10
432,66	184,95	0,57	5762,05	3758,94	4879,40	5894,47	3221,11	4688,44	60,03
388,19	176,86	0,33	3697,37	4292,40	4989,95	5070,35	5673,37	1907,04	60,31
336,18	142,71	0,66	4845,93	4634,36	3130,65	3663,32	4949,75	5977,39	61,42
358,04	146,00	0,68	5707,35	4401,83	4075,38	4306,53	5934,67	4462,31	61,23
440,20	144,21	0,52	5680,01	3102,38	4547,74	6577,89	6557,79	2992,46	60,67
392,71	198,73	0,44	4298,99	3293,88	4226,13	3442,21	5190,95	4575,38	59,73
343,72	144,81	0,50	4613,48	2828,81	3170,85	5613,07	3201,01	1567,84	60,52

442,46	192,14	0,51	5789,39	2514,21	3854,27	4989,95	3462,31	2608,04	59,82
431,16	156,49	0,67	6185,92	3006,63	4135,68	5090,45	5130,65	1635,68	60,48
345,98	142,11	0,56	5721,03	3280,20	4728,64	6195,98	6015,08	4891,96	60,75
339,20	183,15	0,46	4531,44	4976,32	4497,49	6778,89	5090,45	5276,38	60,33
405,53	178,06	0,33	6281,63	4442,86	4467,34	5693,47	4326,63	2291,46	60,58
434,17	184,05	0,46	6117,55	4087,23	4859,30	4165,83	6618,09	4145,73	60,20
349,75	176,26	0,56	4422,06	3471,70	4899,50	4628,14	4869,35	2087,94	60,11
397,99	157,09	0,45	5447,56	2692,03	4165,83	6658,29	4266,33	4959,80	60,29
402,51	163,98	0,54	4230,63	3676,87	3100,50	3824,12	6698,49	3105,53	60,35
381,41	186,45	0,54	5775,72	3526,41	3090,45	3683,42	4085,43	3173,37	60,02
365,58	173,87	0,49	4504,10	4169,30	3733,67	4748,74	5994,97	1500,00	60,35
409,30	163,68	0,59	5543,27	3075,03	5000,00	6979,90	4366,83	3082,91	60,28
335,43	174,47	0,34	5638,98	4907,93	3623,12	3020,10	5914,57	5118,09	60,69
413,82	187,95	0,30	6090,21	3458,02	3703,52	3241,21	6477,39	3037,69	60,22
410,05	174,77	0,45	5379,19	2815,14	4738,69	3783,92	3864,32	3399,50	60,08
336,93	182,56	0,65	5406,54	4333,44	3914,57	3723,62	6597,99	3331,66	60,26
320,35	153,49	0,66	3642,67	3704,23	3180,90	4969,85	4587,94	1997,49	60,63
348,24	172,97	0,64	4052,87	4853,22	4517,59	3562,81	6718,59	4665,83	60,60
353,52	191,24	0,67	4832,26	2459,50	4969,85	5432,16	4005,03	3512,56	59,71
375,38	191,84	0,30	5201,44	2309,04	3814,07	3542,71	3120,60	5321,61	59,90
439,45	180,16	0,45	4681,85	4210,33	4768,84	4708,54	4668,34	5954,77	60,16
411,56	157,39	0,59	3765,73	4470,22	3472,36	3040,20	4105,53	3195,98	60,81
410,80	140,01	0,55	5844,09	2609,96	3482,41	5371,86	5412,06	4190,95	60,63
370,85	172,67	0,37	6144,90	4757,47	4839,20	4929,65	5070,35	5050,25	60,69
312,06	189,15	0,36	6103,88	3348,59	4296,48	6276,38	6798,99	4349,25	60,09
331,66	147,50	0,34	4080,22	4675,40	4386,93	3703,52	6376,88	5185,93	61,02
376,88	189,45	0,70	5092,05	2527,89	4788,94	5050,25	6859,30	2110,55	59,80
436,43	171,77	0,55	3929,81	2856,17	3693,47	6075,38	6537,69	4077,89	59,97
301,51	177,16	0,59	5611,64	3061,35	3412,06	4668,34	3140,70	4484,92	60,03
396,48	198,43	0,38	4900,62	2705,71	4035,18	6175,88	3482,41	4733,67	59,77

323,37	144,51	0,32	5967,15	2965,60	3613,07	3522,61	4829,15	2743,72	60,71
351,26	183,75	0,48	4367,36	4825,86	4206,03	5914,57	3442,21	2811,56	60,31
412,31	154,39	0,32	6158,57	2623,64	3442,21	4125,63	5653,27	4100,50	60,49
407,04	159,19	0,55	5734,70	3553,77	3261,31	5311,56	3683,42	3896,98	60,49
394,22	167,58	0,46	4709,20	2596,28	4236,18	4185,93	6899,50	1974,87	60,12
425,13	159,79	0,67	5529,60	4483,90	4396,98	4286,43	3000,00	4236,18	60,85
328,64	193,04	0,63	5652,66	3964,12	4959,80	6718,59	6135,68	1884,42	59,99
413,07	165,78	0,64	6226,94	3827,34	4537,69	5231,16	5291,46	4824,12	60,44
380,65	175,66	0,35	4941,64	4196,65	4698,49	6055,28	6939,70	5479,90	60,33
315,83	181,66	0,34	5338,17	4046,19	4648,24	6618,09	4788,94	2155,78	60,32
324,12	139,71	0,61	6035,51	3239,17	4979,90	4447,24	4889,45	2449,75	60,88
382,91	195,74	0,50	4476,75	4278,72	4678,39	3261,31	3381,91	2517,59	59,98
321,11	182,86	0,51	3834,10	4565,97	3301,51	5592,96	4025,13	5412,06	60,16
338,44	193,94	0,31	3902,47	3772,62	3763,82	4829,15	4447,24	2133,17	60,00
319,60	151,10	0,50	5160,42	3690,55	3683,42	4025,13	6979,90	2404,52	60,69
387,44	194,84	0,41	4914,30	4032,51	3864,32	6497,49	5512,56	2201,01	60,03
317,34	188,25	0,51	3984,51	4607,01	3633,17	5552,76	6336,68	3467,34	60,12
364,07	165,48	0,41	6336,33	2322,71	4668,34	3381,91	6115,58	2766,33	60,31
344,47	168,47	0,69	4640,83	3882,05	3673,37	6376,88	5251,26	2223,62	60,41
305,28	178,66	0,58	5228,78	2801,46	4376,88	3301,51	4648,24	3150,75	59,99
363,32	168,77	0,33	4148,59	3868,37	4487,44	4326,63	4407,04	4010,05	60,32
445,48	150,50	0,52	5105,72	3129,74	4447,24	3422,11	5472,36	3716,08	60,51
348,99	188,85	0,34	5365,52	4552,29	4909,55	4407,04	5954,77	2630,65	60,35
355,03	160,69	0,61	6008,17	4935,29	3422,11	6256,28	5311,56	3738,69	61,05
437,94	185,25	0,31	6062,86	3936,76	4115,58	4266,33	4708,54	5366,83	60,27
400,25	170,57	0,58	6049,19	4360,79	3251,26	6236,18	3261,31	1816,58	60,58
302,26	187,35	0,68	5010,01	4538,61	4688,44	5733,67	3361,81	6000,00	60,15
393,47	146,30	0,50	3875,12	4921,61	4809,05	3804,02	5391,96	3015,08	61,34
424,37	146,90	0,39	4558,79	4784,82	4256,28	3582,91	3844,22	1793,97	61,27
374,62	157,99	0,46	4011,85	4388,15	3502,51	6939,70	4728,64	5344,22	60,61

367,84	169,37	0,34	5023,68	4962,64	4085,43	5492,46	5170,85	3987,44	60,77
386,68	151,70	0,69	5570,62	2678,35	3924,62	3120,60	5974,87	2585,43	60,47
447,74	169,97	0,41	6131,23	4182,97	3653,27	3984,92	3241,21	3489,95	60,56
416,83	181,96	0,32	4859,60	3567,45	3281,41	4065,33	3743,72	3964,82	60,15
361,06	170,27	0,47	5816,74	3854,69	4175,88	5572,86	3160,80	3625,63	60,36
300,00	186,75	0,48	4490,42	4839,54	4618,09	3080,40	5834,17	2381,91	60,30
369,35	143,61	0,60	3793,08	4306,08	4587,94	6095,48	3422,11	4326,63	61,09
401,76	139,11	0,61	4955,32	3403,31	3452,26	5934,67	4286,43	2359,30	60,88
373,12	185,55	0,66	5871,43	3813,66	3793,97	4949,75	5371,86	1613,07	60,11
423,62	164,28	0,31	4381,04	3444,34	3743,72	4226,13	5874,37	4055,28	60,30
322,61	154,69	0,58	5474,90	4374,47	3160,80	5834,17	3904,52	1545,23	60,96
345,23	197,54	0,60	4777,56	4880,57	3492,46	3462,31	3783,92	2427,14	60,13
385,18	194,24	0,45	4435,73	2910,88	4527,64	5773,87	6658,29	3557,79	59,74
312,81	183,45	0,42	3779,41	3157,10	3010,05	4728,64	5753,77	5886,93	59,84
420,60	169,07	0,30	4599,81	2787,78	4567,84	5673,37	4487,44	2788,94	60,17
443,22	179,26	0,61	3998,18	3923,09	4306,53	3502,51	5814,07	2268,84	60,16
310,55	148,10	0,40	5693,68	4812,18	3030,15	6035,18	6457,29	5909,55	61,26
318,84	167,28	0,42	5803,07	2363,75	3000,00	6597,99	3703,52	4123,12	60,18
379,90	164,88	0,47	5666,33	4319,76	3753,77	6155,78	6758,79	5095,48	60,57
397,24	164,58	0,62	5119,40	2336,39	3723,62	5291,46	6819,10	5253,77	60,08
379,15	140,61	0,57	5926,13	4894,25	4356,78	5150,75	5010,05	2472,36	61,74
391,96	147,20	0,42	4408,38	2746,74	4939,70	6437,19	5572,86	5457,29	60,35
342,21	156,79	0,64	4134,91	3635,84	3512,56	5994,97	3562,81	5932,16	60,45
382,16	142,41	0,53	6308,98	3663,20	3824,12	3623,12	4467,34	2246,23	61,00
441,71	157,69	0,47	5269,80	4511,26	4346,73	5391,96	3402,01	2902,01	60,85
419,85	158,59	0,38	5297,15	2473,18	3351,76	6798,99	3542,71	2675,88	60,31
404,77	179,56	0,60	5037,36	2582,60	3804,02	3884,42	4929,65	3919,60	59,91
358,79	163,38	0,70	3806,75	2938,24	4718,59	5412,06	5050,25	5706,03	60,16
395,73	190,64	0,66	4763,89	3020,31	3984,92	7000,00	6437,19	5163,32	59,74
346,73	149,60	0,68	5830,41	2268,00	3341,71	6517,59	5613,07	2314,07	60,42

401,01	181,36	0,63	5187,76	4415,51	4286,43	6477,39	6778,89	3761,31	60,27
350,50	150,80	0,43	4927,97	2637,32	4849,25	5351,76	3643,22	3829,15	60,37
368,59	186,15	0,59	3724,71	2992,95	3241,21	3964,82	4226,13	4643,22	59,77
366,33	173,27	0,35	5256,13	4265,05	4155,78	3864,32	4547,74	1680,90	60,54
327,14	190,05	0,43	4545,12	2869,85	3331,66	3100,50	4206,03	3309,05	59,85
309,80	163,08	0,56	4257,97	3047,67	4437,19	4366,83	3582,91	5841,71	60,15
433,42	177,46	0,52	3711,04	3799,98	4577,89	5251,26	3040,20	3354,27	60,08
341,46	162,78	0,38	5953,47	4990,00	3080,40	5030,15	4507,54	4168,34	61,02
373,87	166,68	0,67	5283,48	2281,68	4638,19	3844,22	3944,72	2065,33	60,13
340,70	143,01	0,48	3752,06	2391,11	3402,01	5713,57	5231,16	4394,47	60,29
361,81	152,90	0,52	3670,02	4141,94	4266,33	6115,58	4688,44	1839,20	60,72
398,74	180,76	0,66	5242,46	4661,72	4929,65	4889,45	4065,33	2698,49	60,42
422,11	152,60	0,38	4818,58	4497,58	4949,75	6839,20	4628,14	1771,36	60,97
325,63	166,08	0,53	4886,95	4743,79	4015,08	4768,84	5854,27	5547,74	60,69
303,02	171,17	0,37	4025,53	2541,57	3572,86	6557,79	3180,90	5231,16	59,97
449,25	175,07	0,42	5133,07	3416,98	3050,25	4788,94	5793,97	5751,26	60,14

ANEXO C. ANÁLISIS ANOVA COMPLETO DE CADA DISEÑO.

• DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO

Para este diseño es importante resaltar que los softwares estadísticos trabajados no arrojan las interacciones cuadráticas de las variables, por esta razón no son mostradas en la ANOVA general.

Tabla 14. ANOVA general del diseño Factorial Fraccionado

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	45	76,6497	1,7033	2158,55	0,000
Lineal	9	70,0325	7,7814	9860,99	0,000
TEMP	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
FLUJO	1	44,9710	44,9710	56989,59	0,000

GAO	1	0,0281	0,0281	35,64	0,000
GAS	1	1,2173	1,2173	1542,60	0,000
VAPOR	1	23,4297	23,4297	29691,37	0,000
SODIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,994
VANADIO	1	0,0197	0,0197	24,94	0,000
HIERRO	1	0,0008	0,0008	0,99	0,322
NIQUEL	1	0,3660	0,3660	463,82	0,000
Interacciones de 2 términos	36	6,6171	0,1838	232,93	0,000
TEMP*FLUJO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,999
TEMP*GAO	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
TEMP*GAS	1	0,0000	0,0000	0,00	0,997
TEMP*VAPOR	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
TEMP*SODIO	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
TEMP*VANADIO	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
TEMP*HIERRO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,972
TEMP*NIQUEL	1	0,0000	0,0000	0,00	0,999
FLUJO*GAO	1	1,4648	1,4648	1856,23	0,000
FLUJO*GAS	1	0,0345	0,0345	43,67	0,000
FLUJO*VAPOR	1	4,4129	4,4129	5592,29	0,000
FLUJO*SODIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,997
FLUJO*VANADIO	1	0,0001	0,0001	0,08	0,775
FLUJO*HIERRO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,952
FLUJO*NIQUEL	1	0,0014	0,0014	1,72	0,193
GAO*GAS	1	0,4214	0,4214	534,04	0,000
GAO*VAPOR	1	0,2652	0,2652	336,04	0,000
GAO*SODIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,996
GAO*VANADIO	1	0,0000	0,0000	0,03	0,857
GAO*HIERRO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,985
GAO*NIQUEL	1	0,0002	0,0002	0,20	0,655
GAS*VAPOR	1	0,0156	0,0156	19,80	0,000
GAS*SODIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,997
GAS*VANADIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,973
GAS*HIERRO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,992
GAS*NIQUEL	1	0,0000	0,0000	0,04	0,837
VAPOR*SODIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,997
VAPOR*VANADIO	1	0,0000	0,0000	0,03	0,857
VAPOR*HIERRO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,971
VAPOR*NIQUEL	1	0,0005	0,0005	0,61	0,438
SODIO*VANADIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,989
SODIO*HIERRO	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000

SODIO*NIQUEL	1	0,0000	0,0000	0,00	0,997
VANADIO*HIERRO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,960
VANADIO*NIQUEL	1	0,0006	0,0006	0,77	0,382
HIERRO*NIQUEL	1	0,0000	0,0000	0,03	0,859
Error	82	0,0647	0,0008		
Total	127	76,7144			

- **DISEÑO BOX BEHNKEN**

Tabla 15. ANOVA general del diseño Box Behnken

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	54	22,0634	0,4086	265,49	0,000
Lineal	9	20,6538	2,2949	1491,14	0,000
TEMP	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
FLUJO	1	13,9388	13,9388	9057,04	0,000
GAO	1	0,0033	0,0033	2,15	0,147
GAS	1	0,5167	0,5167	335,72	0,000
VAPOR	1	6,0764	6,0764	3948,30	0,000
SODIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,998
VANADIO	1	0,0056	0,0056	3,64	0,060
HIERRO	1	0,0002	0,0002	0,15	0,704
NIQUEL	1	0,1128	0,1128	73,27	0,000
Cuadrado	9	0,7404	0,0823	53,45	0,000
TEMP*TEMP	1	0,0002	0,0002	0,11	0,740
FLUJO*FLUJO	1	0,1467	0,1467	95,30	0,000
GAO*GAO	1	0,0307	0,0307	19,94	0,000
GAS*GAS	1	0,0010	0,0010	0,62	0,433
VAPOR*VAPOR	1	0,3935	0,3935	255,69	0,000
SODIO*SODIO	1	0,0000	0,0000	0,01	0,907
VANADIO*VANADIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,975
HIERRO*HIERRO	1	0,0007	0,0007	0,46	0,500
NIQUEL*NIQUEL	1	0,0003	0,0003	0,19	0,662
Interacción de 2 factores	36	0,6693	0,0186	12,08	0,000
TEMP*FLUJO	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
TEMP*GAO	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
TEMP*GAS	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
TEMP*VAPOR	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000

TEMP*SODIO	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
TEMP*VANADIO	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
TEMP*HIERRO	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
TEMP*NIQUEL	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
FLUJO*GAO	1	0,0837	0,0837	54,42	0,000
FLUJO*GAS	1	0,0033	0,0033	2,16	0,146
FLUJO*VAPOR	1	0,5424	0,5424	352,44	0,000
FLUJO*SODIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,999
FLUJO*VANADIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,951
FLUJO*HIERRO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,987
FLUJO*NIQUEL	1	0,0001	0,0001	0,08	0,772
GAO*GAS	1	0,0250	0,0250	16,25	0,000
GAO*VAPOR	1	0,0139	0,0139	9,05	0,004
GAO*SODIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,996
GAO*VANADIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,974
GAO*HIERRO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,997
GAO*NIQUEL	1	0,0000	0,0000	0,01	0,910
GAS*VAPOR	1	0,0006	0,0006	0,42	0,521
GAS*SODIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,999
GAS*VANADIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,995
GAS*HIERRO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,999
GAS*NIQUEL	1	0,0000	0,0000	0,00	0,974
VAPOR*SODIO	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
VAPOR*VANADIO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,980
VAPOR*HIERRO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,993
VAPOR*NIQUEL	1	0,0000	0,0000	0,01	0,906
SODIO*VANADIO	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
SODIO*HIERRO	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
SODIO*NIQUEL	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
VANADIO*HIERRO	1	0,0000	0,0000	0,00	0,993
VANADIO*NIQUEL	1	0,0000	0,0000	0,02	0,875
HIERRO*NIQUEL	1	0,0000	0,0000	0,00	0,974
Error	75	0,1154	0,0015		
Falta de ajuste	42	0,1154	0,0027	3,57367E+24	0,000
Error puro	33	0,0000	0,0000		
Total	129	22,1789			

- **DISEÑO CENTRAL COMPUESTO**

Tabla 16. ANOVA general del diseño Central Compuesto

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	54	6,17964	0,11444	1916,14	0,000
Lineal	9	6,09121	0,67680	11332,30	0,000
TEMP	1	0,00000	0,00000	0,00	1,000
FLUJO	1	4,19515	4,19515	70243,20	0,000
GAO	1	0,00424	0,00424	70,93	0,000
GAS	1	0,17649	0,17649	2955,06	0,000
VAPOR	1	1,67686	1,67686	28077,13	0,000
SODIO	1	0,00000	0,00000	0,00	0,993
VANADIO	1	0,00183	0,00183	30,62	0,000
HIERRO	1	0,00007	0,00007	1,21	0,274
NIQUEL	1	0,03658	0,03658	612,53	0,000
Cuadrado	9	0,04145	0,00461	77,11	0,000
TEMP*TEMP	1	0,00006	0,00006	0,95	0,332
FLUJO*FLUJO	1	0,01170	0,01170	195,99	0,000
GAO*GAO	1	0,00343	0,00343	57,48	0,000
GAS*GAS	1	0,00000	0,00000	0,00	0,992
VAPOR*VAPOR	1	0,02969	0,02969	497,05	0,000
SODIO*SODIO	1	0,00006	0,00006	0,95	0,332
VANADIO*VANADIO	1	0,00006	0,00006	1,02	0,315
HIERRO*HIERRO	1	0,00006	0,00006	0,95	0,331
NIQUEL*NIQUEL	1	0,00018	0,00018	3,06	0,083
Interacción de 2 factores	36	0,04699	0,00131	21,85	0,000
TEMP*FLUJO	1	0,00000	0,00000	0,00	1,000
TEMP*GAO	1	0,00000	0,00000	0,00	1,000
TEMP*GAS	1	0,00000	0,00000	0,00	1,000
TEMP*VAPOR	1	0,00000	0,00000	0,00	1,000
TEMP*SODIO	1	0,00000	0,00000	0,00	1,000
TEMP*VANADIO	1	0,00000	0,00000	0,00	1,000
TEMP*HIERRO	1	0,00000	0,00000	0,00	0,999
TEMP*NIQUEL	1	0,00000	0,00000	0,00	1,000
FLUJO*GAO	1	0,01370	0,01370	229,43	0,000
FLUJO*GAS	1	0,00039	0,00039	6,51	0,012
FLUJO*VAPOR	1	0,02788	0,02788	466,78	0,000

FLUJO*SODIO	1	0,00000	0,00000	0,00	0,999
FLUJO*VANADIO	1	0,00000	0,00000	0,01	0,913
FLUJO*HIERRO	1	0,00000	0,00000	0,00	0,982
FLUJO*NIQUEL	1	0,00002	0,00002	0,26	0,611
GAO*GAS	1	0,00305	0,00305	51,09	0,000
GAO*VAPOR	1	0,00186	0,00186	31,17	0,000
GAO*SODIO	1	0,00000	0,00000	0,00	0,994
GAO*VANADIO	1	0,00000	0,00000	0,01	0,933
GAO*HIERRO	1	0,00000	0,00000	0,00	0,991
GAO*NIQUEL	1	0,00000	0,00000	0,07	0,798
GAS*VAPOR	1	0,00008	0,00008	1,30	0,256
GAS*SODIO	1	0,00000	0,00000	0,00	0,999
GAS*VANADIO	1	0,00000	0,00000	0,00	0,993
GAS*HIERRO	1	0,00000	0,00000	0,00	0,998
GAS*NIQUEL	1	0,00000	0,00000	0,00	0,952
VAPOR*SODIO	1	0,00000	0,00000	0,00	1,000
VAPOR*VANADIO	1	0,00000	0,00000	0,00	0,965
VAPOR*HIERRO	1	0,00000	0,00000	0,00	0,993
VAPOR*NIQUEL	1	0,00000	0,00000	0,04	0,843
SODIO*VANADIO	1	0,00000	0,00000	0,00	0,999
SODIO*HIERRO	1	0,00000	0,00000	0,00	1,000
SODIO*NIQUEL	1	0,00000	0,00000	0,00	1,000
VANADIO*HIERRO	1	0,00000	0,00000	0,00	0,991
VANADIO*NIQUEL	1	0,00000	0,00000	0,06	0,802
HIERRO*NIQUEL	1	0,00000	0,00000	0,00	0,960
Error	101	0,00603	0,00006		
Falta de ajuste	92	0,00603	0,00007	6,36993E+22	0,000
Error puro	9	0,00000	0,00000		
Total	155	6,18567			

- **DISEÑO HIPERCUBO LATINO**

Tabla 17. ANOVA general del diseño Hipercubo Latino

Fuente	N parámetros	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F	Valor P
Temperatura de alimento	1	1	0,000065	6,4532e-5	0,1347	0,71414
Flujo de alimento	1	1	18,866313	18,86631	39382,06	0,000
% GAO	1	1	0,034218	0,03422	71,4268	0,000
Gas de aspersión	1	1	0,653301	0,65330	1363,719	0,000
Vapor de despojo	1	1	8,673839	8,67384	18106,01	0,000
Sodio	1	1	0,001266	0,00127	2,6423	0,10622
Vanadio	1	1	0,012417	0,01242	25,9206	0,000
Hierro	1	1	0,000753	0,00075	1,5715	0,21201
Níquel	1	1	0,163225	0,16322	340,7195	0,000
Temperatura de alimento*Temperatura de alimento	1	1	0,001271	0,00127	2,6540	0,10546
Temperatura de alimento*Flujo de alimento	1	1	0,000517	0,00052	1,0802	0,30039
Temperatura de alimento*% GAO	1	1	0,000199	0,00020	0,4148	0,52057
Temperatura de alimento*Gas de aspersión	1	1	0,000987	0,00099	2,0593	0,15343
Temperatura de alimento*Vapor de despojo	1	1	0,001290	0,00129	2,6918	0,10303
Temperatura de alimento*Sodio	1	1	0,000207	0,00021	0,4316	0,51224
Temperatura de alimento*Vanadio	1	1	0,000016	1,6387e-5	0,0342	0,85353
Temperatura de alimento*Hierro	1	1	0,000407	0,00041	0,8503	0,35801

Fuente	N parámetros	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F	Valor P
Temperatura de alimento*Níquel	1	1	0,000274	0,00027	0,5715	0,45088
Flujo de alimento*Flujo de alimento	1	1	0,090921	0,09092	189,7919	0,000
Flujo de alimento*% GAO	1	1	0,159627	0,15963	333,2108	0,000
Flujo de alimento*Gas de aspersión	1	1	0,007150	0,00715	14,9256	0,00017
Flujo de alimento*Vapor de despojo	1	1	0,598866	0,59887	1250,088	0,000
Flujo de alimento*Sodio	1	1	0,001187	0,00119	2,4771	0,11770
Flujo de alimento*Vanadio	1	1	0,000699	0,00070	1,4582	0,22919
Flujo de alimento*Hierro	1	1	0,000409	0,00041	0,8531	0,35721
Flujo de alimento*Níquel	1	1	0,001779	0,00178	3,7127	0,05595
% GAO*% GAO	1	1	0,063687	0,06369	132,9414	0,000
% GAO*Gas de aspersión	1	1	0,054909	0,05491	114,6189	0,000
% GAO*Vapor de despojo	1	1	0,039714	0,03971	82,9007	0,000
% GAO*Sodio	1	1	0,000000	1,1831e-7	0,0002	0,98748
% GAO*Vanadio	1	1	0,000241	0,00024	0,5034	0,47915
% GAO*Hierro	1	1	0,000000	4,0037e-7	0,0008	0,97698
% GAO*Níquel	1	1	0,000018	0,0000182	0,0380	0,84576
Gas de aspersión*Gas de aspersión	1	1	0,000151	0,00015	0,3146	0,57574
Gas de aspersión*Vapor de despojo	1	1	0,000001	9,0272e-7	0,0019	0,96543
Gas de aspersión*Sodio	1	1	0,000435	0,00044	0,9088	0,34201
Gas de aspersión*Vanadio	1	1	0,000036	3,628e-5	0,0757	0,78356
Gas de aspersión*Hierro	1	1	0,000508	0,00051	1,0598	0,30499
Gas de aspersión*Níquel	1	1	0,000214	0,00021	0,4465	0,50507
Vapor de despojo*Vapor de despojo	1	1	0,244097	0,24410	509,5352	0,000

Fuente	N parámetros	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F	Valor P
Vapor de despojo*Sodio	1	1	0,000205	0,00020	0,4272	0,51441
Vapor de despojo*Vanadio	1	1	0,002917	0,00292	6,0886	0,01477
Vapor de despojo*Hierro	1	1	0,001102	0,00110	2,3014	0,13144
Vapor de despojo*Níquel	1	1	0,000697	0,00070	1,4557	0,22958
Sodio*Sodio	1	1	0,000471	0,00047	0,9822	0,32330
Sodio*Vanadio	1	1	0,000126	0,00013	0,2638	0,60828
Sodio*Hierro	1	1	0,000007	7,3484e-6	0,0153	0,90160
Sodio*Níquel	1	1	0,000007	6,7216e-6	0,0140	0,90587
Vanadio*Vanadio	1	1	0,000014	1,433e-5	0,0299	0,86293
Vanadio*Hierro	1	1	0,000290	0,00029	0,6058	0,43763
Vanadio*Níquel	1	1	0,000007	7,2152e-6	0,0151	0,90250
Hierro*Hierro	1	1	0,001227	0,00123	2,5608	0,11172
Hierro*Níquel	1	1	0,000005	4,6303e-6	0,0097	0,92182
Níquel*Níquel	1	1	0,000329	0,00033	0,6867	0,40864

ANEXO D. TABLAS DE PROBABILIDAD DE LOS DISEÑOS EXPERIMENTALES

Figura 12. Gráfica de residuos para %Nafta diseño Box Behnken

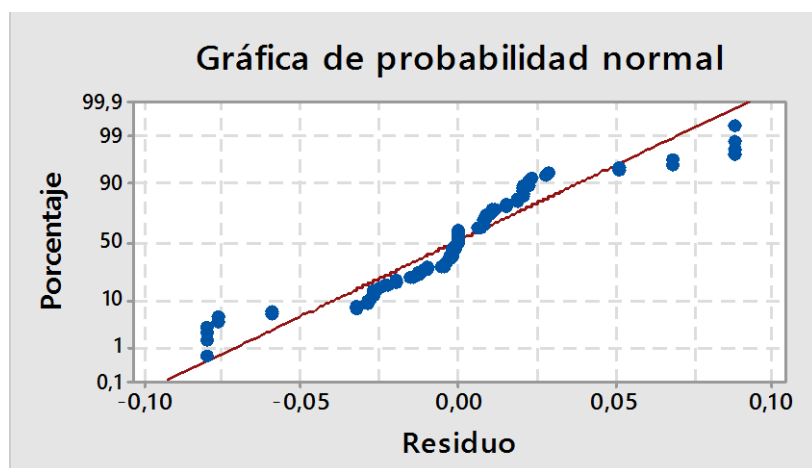


Figura 13. Gráfica de residuos para %Nafta diseño Central Compuesto

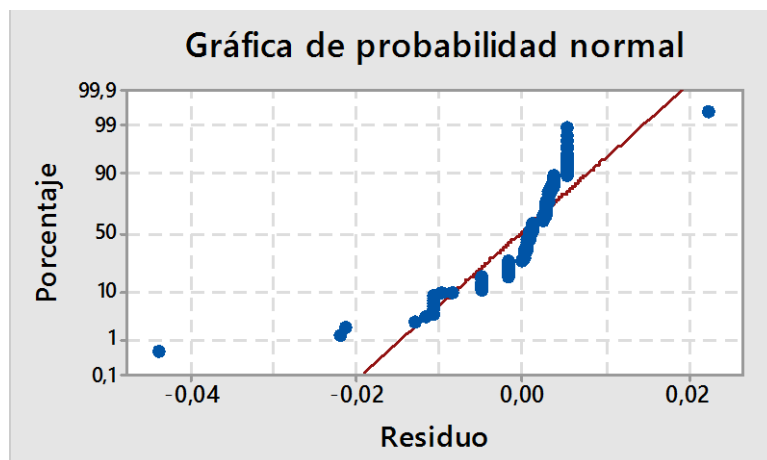


Figura 14. Gráfica de residuos para %Nafta diseño Factorial Fraccionado

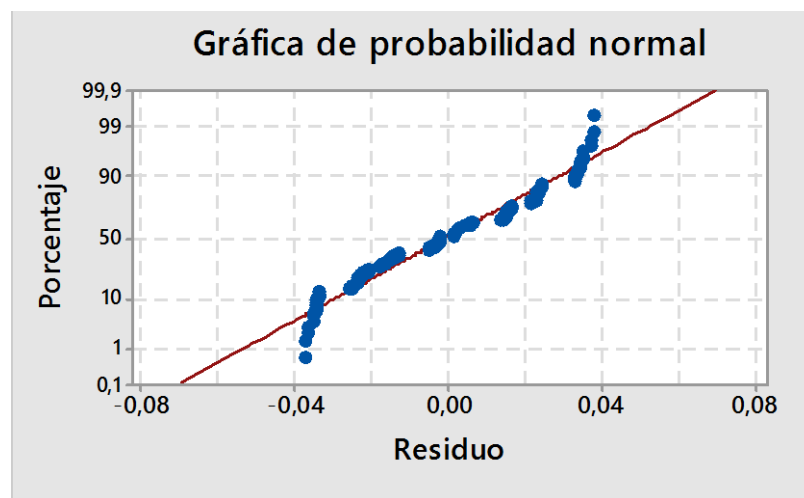
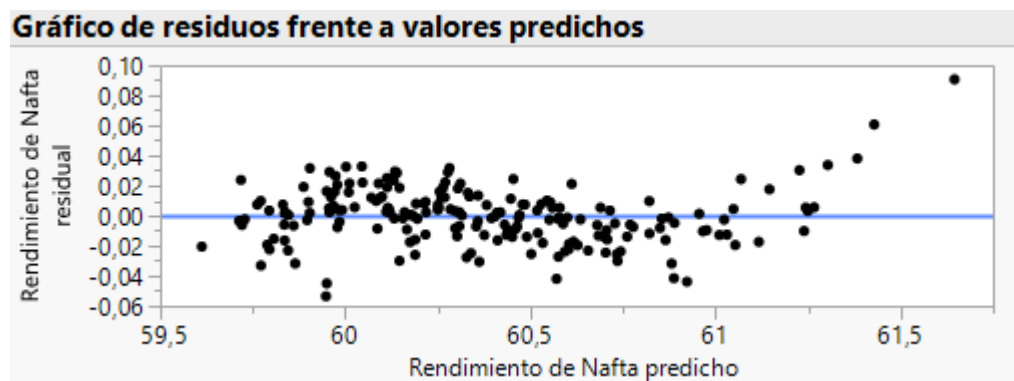


Figura 15. Gráfica de residuos para %Nafta diseño Hipercubo Latino.



ANEXO E. CORRIDAS TOTALES Y ANOVA DEL DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO AUTOESCALADO.

Tabla 18. Corridas totales del diseño factorial fraccionado autoescalado

TEMP	FLUJO	GAO	GAS	VAPOR	SODIO	VANADIO	HIERRO	NIQUEL	%NAFTA
-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,8422
-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	1,83711
0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	1,80796
0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	1,15231
-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,4288
0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,6281
-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,06137
0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,4242
0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,20225
0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,03449
0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	1,19072
0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	1,845
0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,6552
-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,23072
0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-1,037
0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,4754
-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,6519
-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-1,2624
-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,2657
0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,4347
-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-1,1765
-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,00884
-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,8132
0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9974
0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,21069
-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	1,46609

-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,6928
0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,2717
0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,6604
-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,5835
-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,0873
-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,5152
0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	1,47153
-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	1,0463
0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,23813
0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-1,0908
0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	1,69888
-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,17133
0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,5889
0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,00281
-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,2956
0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,7004
-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	1,61872
0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	1,61053
-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-1,0442
0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,4427
-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,4754
-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,0414
-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,2036
0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,2788
-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	1,01894
0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-1,3625
-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	1,88038
0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	1,01384
0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,4001
-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	1,74647
0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	1,04094
-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	1,57953
-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,08368

-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,10419
0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,3123
0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,105
0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-1,2572
-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,19578
-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-1,1929
-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,1548
0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	1,75137
0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	1,90923
-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,4049
0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	1,7763
-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-1,2298
-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-1,2363
-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,07934
-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-1,0057
-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,4501
-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,6606
-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	1,67883
-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-1,1478
0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,147
-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,4112
-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,6338
-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	1,18271
0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-1,1819
-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,4261
-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	1,14531
-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	1,91713
0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,17751
0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	1,57239
-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	1,77113
-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,5565
0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	1,444
-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-1,1208

-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	1,80109
0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,5226
0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,05694
0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,5834
0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,4839
0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-1,2227
0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,07462
-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,3061
0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,4026
0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,09924
0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,0827
-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,6185
0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	1,87351
0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,1042
0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,5622
-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,5893
-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,2717
0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,8367
0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-1,3365
-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,1094
0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,8074
0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,6129
-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-1,331
0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-1,2308
-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-1,3573
0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	-1,1535
0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	1,67391
-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,1131
-0,9961	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,4678
-0,9961	-0,9961	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	0,99609	1,70406
0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,07901
0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,3014
-0,9961	-0,9961	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	1,43884

0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-1,1847
-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-0,9961	-1,0825
0,99609	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	0,99609	0,99609	0,99609	-0,9961	-1,128

Tabla 19. ANOVA general del diseño factorial autoescalado

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	12	126,887	10,5739	10757,41	0,000
Lineal	6	115,937	19,3228	19658,15	0,000
FLUJO	1	74,449	74,4490	75741,02	0,000
GAO	1	0,047	0,0466	47,36	0,000
GAS	1	2,015	2,0152	2050,16	0,000
VAPOR	1	38,788	38,7877	39460,80	0,000
VANADIO	1	0,033	0,0326	33,14	0,000
NIQUEL	1	0,606	0,6059	616,43	0,000
Interacciones de 2 términos	6	10,950	1,8250	1856,67	0,000
FLUJO*GAO	1	2,425	2,4249	2466,99	0,000
FLUJO*GAS	1	0,057	0,0571	58,04	0,000
FLUJO*VAPOR	1	7,306	7,3055	7432,33	0,000
GAO*GAS	1	0,698	0,6976	709,75	0,000
GAO*VAPOR	1	0,439	0,4390	446,60	0,000
GAS*VAPOR	1	0,026	0,0259	26,31	0,000
Error	115	0,113	0,0010		
Total	127	127,000			

ANEXO F. CÁLCULOS DE INFLUENCIA DE VARIABLES PARA EL METAMODELO SELECCIONADO.

Tabla 20. Coeficientes del metamodelo autoescalado seleccionado

VARIABLES	COEFICIENTES
Flujo	-0,76865
%Gao	0,01922
Gas	0,12646
Vapor	0,55484
Vanadio	-0,01608
Níquel	-0,06934
Flujo*%Gao	-0,13982
Flujo*Gas	-0,02145
Flujo*Vapor	-0,24268
%Gao*Gas	-0,0749
%Gao*Vapor	0,05949
Gas*Vapor	-0,01444

Tabla 21. Valor absoluto y sumatoria de los coeficientes de la regresión
autoescalada

VARIABLES	VALOR ABSOLUTO DE LOS COEFICIENTES
Flujo	0,76865
%Gao	0,01922
Gas	0,12646
Vapor	0,55484
Vanadio	0,01608
Níquel	0,06934
Flujo*%Gao	0,13982
Flujo*Gas	0,02145

Flujo*Vapor	0,24268
%Gao*Gas	0,0749
%Gao*Vapor	0,05949
Gas*Vapor	0,01444
SUMATORIA DE LOS COEFICIENTES	2,10737

Con los valores obtenidos en las tablas anteriores se calculan los porcentajes de influencia que posee cada variable sobre la respuesta.

- Flujo: $\frac{0,76865}{2,10737} * 100 = 36,474\%$
- GAO: $\frac{0,01922}{2,10737} * 100 = 0,912\%$
- Gas: $\frac{0,12646}{2,10737} * 100 = 6,0008\%$
- Vapor: $\frac{0,55484}{2,10737} * 100 = 26,329\%$
- Vanadio: $\frac{0,01608}{2,10737} * 100 = 0,76304\%$
- Níquel: $\frac{0,06934}{2,10737} * 100 = 3,2904\%$
- Flujo*GAO: $\frac{0,13982}{2,10737} * 100 = 6,6348\%$
- Flujo*Gas: $\frac{0,02145}{2,10737} * 100 = 1,0179\%$
- Flujo*Vapor: $\frac{0,24268}{2,10737} * 100 = 11,516\%$
- GAO*Gas: $\frac{0,0749}{2,10737} * 100 = 3,5542\%$
- GAO*Vapor: $\frac{0,05949}{2,10737} * 100 = 2,8229\%$
- Gas*Vapor: $\frac{0,01444}{2,10737} * 100 = 0,6852\%$