

**DEFINICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS ESTADOS ESTACIONARIOS DE UN  
EQUIPO DE CRAQUEO CATALÍTICO INDUSTRIAL UTILIZANDO  
DATOS HISTÓRICOS DE PROCESO Y ESTADÍSTICA MULTIVARIADA**

**OSCAR MAURICIO GARRIDO GARCÍA**

**YEIFER ENRIQUE LEÓN VEGA**

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

**2017**

**DEFINICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS ESTADOS ESTACIONARIOS DE UN  
EQUIPO DE CRAQUEO CATALÍTICO INDUSTRIAL UTILIZANDO  
DATOS HISTÓRICOS DE PROCESO Y ESTADÍSTICA MULTIVARIADA**

**OSCAR MAURICIO GARRIDO GARCÍA**

**YEIFER ENRIQUE LEÓN VEGA**

**Trabajo de grado para optar al título de:**

**Ingeniero Químico**

**Director**

**GIOVANNI MORALES MEDINA**

**Doctor en Ingeniería Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BUCARAMANGA**

**2017**

## DEDICATORIA

*En primer lugar, agradecer a Dios ya que, gracias a él y a su sabiduría, este trabajo obtuvo sus frutos para poder cumplir de manera exitosa el camino trazado.*

*A mis padres y mi hermano ya que gracias al empeño, confianza, dedicación y compromiso puesto en mí este trabajo logró completarse exitosamente.*

*Al director de nuestro proyecto Ingeniero: Giovanni Morales puesto que con sus orientaciones y pautas a seguir este proyecto se concretó en forma adecuada.*

*A mi compañero Enrique León ya que mediante la comunicación y el trabajo en equipo el desarrollo del proyecto se llevó a cabo de la mejor manera posible, con esfuerzo y dedicación ardua en todo momento.*

*Oscar Garrido*

## DEDICATORIA

*A Dios, el dueño de mi vida, quien me concedió sabiduría, ciencia y fortaleza para cumplir las metas propuestas.*

*A mis padres, que los amo con el alma, Raúl Antonio León Moreno y Maura Vega Rodríguez, son mi más grande motivación, mil gracias por su gran apoyo y comprensión incondicional, esta meta es de ustedes.*

*A mis hermanos Jhon y Duvan, a mis hermanas Angie, Tatiana y Vanessa y a mi sobrina Samantha. Por confiar en mí y mis capacidades, por motivarme a dar siempre más.*

*Enrique León*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mi Dios, por las bendiciones recibidas.*

*Agradezco infinitamente a mis queridos padres, mi madre el motor de mi vida, luchadora incansable, quien con su ejemplo y sabiduría me formó y edificó el hombre que hoy soy.*

*Gracias por estos 24 años de amor y guía.*

*A mi padre, el gran orgullo de mi vida, por ser mi mayor ejemplo de vida y enseñarme que con disciplina y determinación lo puedo alcanzar todo.*

*A mis queridos hermanos y hermanas, por su amor, apoyo y compañía, que siempre estuvieron ahí para ayudarme y son una motivación más para seguir adelante.*

*A mi querida sobrina, una hermosa bendición en nuestro hogar, una inspiración más en mi vida.*

*Mis sinceros agradecimientos al profesor Giovanni Morales Medina director del proyecto por su colaboración y asesoría durante el desarrollo del trabajo de grado.*

*A todas esas fuerzas que confluyen en momento, espacio y tiempo ocasionando que el mundo gire, que el mismo tiempo siga, que la energía tenga uso y lo perceptible exista en la vida.*

*Enrique León*

## CONTENIDO

	<b>pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	16
1. OBJETIVOS.....	20
2. METODOLÓGIA .....	21
2.1. CONSECUCCIÓN DE DATOS DE PROCESO .....	21
2.2. ANÁLISIS PRELIMINAR DE DATOS DE PROCESO .....	22
2.3. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN .....	22
2.4. ANÁLISIS POR COMPONENTES PRINCIPALES .....	22
2.5. AGRUPACIÓN POR EL ALGORITMO K-MEANS.....	23
3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS .....	24
3.1. PRETRATAMIENTO DE DATOS.....	24
3.2. ANÁLISIS MULTIVARIADO .....	27
3.3. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS PCA.....	29
3.4. ANÁLISIS DE ESCENARIOS OPERATIVOS .....	31
3.5. ANÁLISIS DE PRODUCTOS Y RENDIMIENTOS .....	41
3.5.1. Análisis de gráficos: Carga fresca, nafta y rendimiento.....	41
3.5.2. Intervalos de confianza: ventanas de operación .....	43
4. CONCLUSIONES .....	45
5. RECOMENDACIONES.....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	47
ANEXOS.....	49

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Esquema de la unidad FCC.....	16
Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología desarrollada en la presente investigación. ....	21
Figura 3. Gráfica de la variable X32 versus tiempo para el año 2014.....	26
Figura 4. Gráfica de la variable X32 versus tiempo para el año 2015.....	26
Figura 5. Gráfica de la variable X32 versus tiempo para el año 2016.....	26
Figura 6. Distancia interna entre clústers.....	27
Figura 7. Dispersión de datos para el modelo k-means. (a) k=2. (b) k=3. (c) k=4. (d) k=5 grupos. ....	29
Figura 8. Gráfica de varianza explicada por PC.....	30
Figura 9. Grafica de RMSE explicada por PC.....	30
Figura 10. Gráfico de dispersión 3D de las tres primeras variables para el componente 1. ....	32
Figura 11. Gráfico de dispersión 2D para las variables (Vapores reactor, Aire salida reactor). ....	33
Figura 12. Gráfico de dispersión 2D para las variables (Pared reactor cámara, Vapores reactor). ....	34
Figura 13. Gráfico de dispersión 3D para segundo grupo de tres variables del componente 1. ....	35

Figura 14. Dispersión para las variables Salida ciclones regenerador Re-27136, carga a la unidad. ....	35
Figura 15. Dispersión para las variables Salida ciclones regenerador Re-27138, carga a la unidad. ....	37
Figura 16. Gráfico de dispersión 3D para tercer grupo variables del componente 1. ....	38
Figura 17. Dispersión para las variables (Zona vapores reactor R-27157, Vapores reactor R-27158).....	38
Figura 18. Gráfico de dispersión Carga fresca vs Nafta. ....	42
Figura 19. Gráfico de dispersión Carga fresca vs rendimiento a Gasolina. ....	43

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Variables eliminadas para cada año. ....	25
Tabla 2. Estados estacionarios para cada año. ....	26
Tabla 3. Datos obtenidos en la aplicación del modelo K-means.....	28
Tabla 4. Resultados de loadings para 4 componentes. ....	31
Tabla 5.Resultados rangos de agrupación para escenarios operativos X31 y X7. ....	33
Tabla 6. Resultados rangos de agrupación para escenarios operativos X7 y X1. ....	34
Tabla 7. Resultados rangos de agrupación para escenarios operativos X32 y X23. .....	36
Tabla 8.Resultados rangos de agrupación para escenarios operativos X5 y X6. ....	40
Tabla 9.Escenarios operativos de las principales variables .....	43
Tabla 10. Escenarios operativos de productos de la torre fraccionadora .....	43

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
ANEXO A. VARIABLES SELECCIONADAS DE LA UOP1 .....	49
ANEXO B. DIAGRAMA BOXPLOT PARA LA VARIABLE CARGA A LA UNIDAD X32 EN LOS AÑOS 2014,2015 Y 2016. ....	50
ANEXO C. COEFICIENTE DE CADA VARIABLE PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES. ....	51
ANEXO D. CONFIGURACIONES PARA OTRAS VARIABLES DE PROCESO ....	55

## RESUMEN

**TÍTULO:** DEFINICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS ESTADOS ESTACIONARIOS DE UN EQUIPO DE CRAQUEO CATALÍTICO INDUSTRIAL UTILIZANDO DATOS HISTÓRICOS DE PROCESO Y ESTADÍSTICA MULTIVARIADA\*

**AUTORES:** OSCAR MAURICIO GARRIDO GARCÍA; YEIFER ENRIQUE LEÓN VEGA \*\*

**PALABRAS CLAVE:** CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO; ANÁLISIS POR COMPONENTES PRINCIPALES; ANÁLISIS CLÚSTER K-MEANS

### DESCRIPCIÓN.

En el craqueo catalítico ocurre la conversión de hidrocarburos pesados en hidrocarburos livianos, de los cuales se obtienen un mayor valor agregado de combustibles líquidos, empleando catalizadores principalmente zeolíticos. La identificación y aplicación de escenarios operativos mostrados en el presente trabajo permiten tener parámetros detallados a seguir con el fin de aumentar el rendimiento y conversión de productos deseados. Se desarrolló un análisis de datos a la unidad UOP 1 en la sección catalítica de la torre de fraccionamiento de la unidad de craqueo catalítico de Ecopetrol.

En el desarrollo por alcanzar los objetivos propuestos, se inició con el tratamiento de datos a las secciones de reactor, regenerador y flujo de carga de alimentación a la torre con el fin de relacionar las variables propuestas, después se emplearon los métodos de análisis por componentes principales y algoritmo k-means, los cuales ayudan en la reducción de variables y la identificación de zonas de agrupamiento de datos de proceso y por último mediante el análisis de gráficas y de tablas se identificaron escenarios operativos favorables para la refinería. Los resultados muestran rangos de operación para flujos y rendimientos de los productos con un nivel de confianza de 95 %, con lo cual es posible predecir las mejores opciones y decisiones que se deben llevar a cabo en el proceso para obtener así el mejor rendimiento en este y maximizar la producción deseada.

---

\*Trabajo de Grado\*

\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina, Doctor en Ingeniería Química.

## ABSTRACT

**TITLE:** DEFINITION AND ANALYSIS OF STATIONARY STATES OF AN INDUSTRIAL CATALYTIC CRACKING EQUIPMENT USING HISTORICAL DATA PROCESS AND MULTIVARIATE STATISTICS\*

**AUTHORS:** OSCAR MAURICIO GARRIDO GARCÍA; YEIFER ENRIQUE LEÓN VEGA \*\*

**KEY WORDS:** FLUID CATALYTIC CRACKING; PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS; K-MEANS ALGORITHM \*

### DESCRIPTION.

In catalytic cracking, the conversion of heavy hydrocarbons into light hydrocarbons occurs, from which a higher added value of liquid fuels is obtained, using mainly zeolite catalysts. The identification and application of operational scenarios shown in the present work allow detailed parameters to be followed to increase performance and conversion in the desired products. A data analysis was performed on the UOP1 unit of the fractionation column of the Ecopetrol catalytic cracking unit.

In the development to reach the proposed objectives, the data processing was started to the sections of reactor, regenerator and feed load flows to the column in order to relate the proposed variables, then the methods of principal component analysis and k-means algorithm help in the reduction of variables and the identification of data grouping zones and finally through the analysis of graphs and tables, favorable operative scenarios were identified for the refinery. The results showed operations ranges for flows and products yields with a confidence level of 95%, so is possible to predict the best options and decisions that must be carried out in the process to obtain the best performance and maximize the desired production.

---

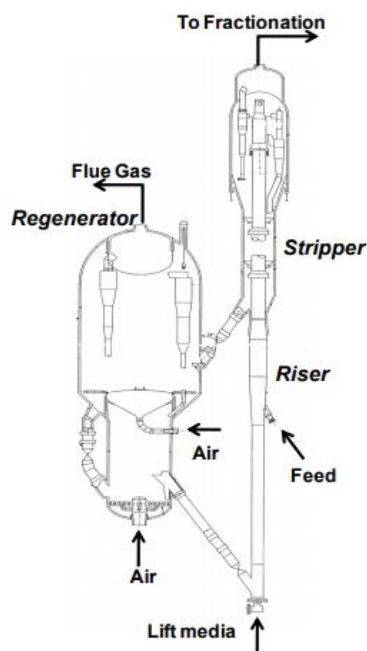
\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina, Doctor en Ingeniería Química.

## INTRODUCCIÓN

Desde su introducción en 1942 el craqueo catalítico fluido (FCC) Figura 1 ha sido el proceso más empleado para la producción de gasolina de octanaje elevado. En la mayoría de las refinerías, la capacidad de la unidad FCC ocupa el segundo lugar después de la unidad de destilación de crudo. A menudo la unidad FCC se conoce como el corazón de una refinería moderna orientada a la máxima producción de gasolina<sup>1</sup>. Usualmente una unidad FCC procesa fracciones pesadas del petróleo debido a su versatilidad y eficiencia para transformar hidrocarburos de bajo valor en productos de mayor valor agregado<sup>2</sup>.

**Figura 1.** Esquema de la unidad FCC.



Fuente: WON KIM, Sung *et al.* Fluidization Technology for Stable Startup of Commercial FCC Unit. [En línea]. Hong Kong.: Sk Energy. 2000. (Recuperado en 12 septiembre 2017.) Disponible en [http://dc.engconfintl.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1097&context=fluidization\\_xiii](http://dc.engconfintl.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1097&context=fluidization_xiii)

<sup>1</sup> SLAMA, Carol Frances. Multivariate statistical analysis of data from an industrial fluidized catalytic cracking process using PCA and PLS. Degree master in Chemical Engineering. Ontario: McMaster University. School of Graduate Studies, 1991; p. 19-22.

<sup>2</sup> DEVARD, Alejandra. Valorización de cargas residuales en refinerías. Tesis para optar al grado de doctor en química. Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral. Facultad de Ingeniería Química, 2011; p. 17.

La unidad FCC combina un reactor y un regenerador con fraccionamiento y plantas auxiliares de gas. El procedimiento básico en la FCC es la recirculación del catalizador a través del *riser* y el regenerador. En el *riser* donde la alimentación de hidrocarburos se calienta y se craquea, se puede producir coque (o carbono) que puede depositarse sobre el catalizador el cual reduce su actividad y selectividad. Cuando el catalizador se hace circular al regenerador, el coque es quemado causando la reactivación del catalizador antes de su retorno al reactor. Los productos del *riser* se separan en un fraccionador principal en corrientes de gas y corrientes líquidas que pueden ser utilizadas como una alimentación de reciclo a la unidad<sup>3</sup>.

Cada FCC tiene su propio conjunto de restricciones de proceso que definen su ventana de operación y están sujetas a numerosas perturbaciones que pueden alterar el punto de operación requerido según la planeación de la producción. A diferencia de otros procesos industriales, la unidad FCC está sujeta a una política operativa continuamente cambiante, lo que indica que la FCC se ejecuta en numerosas regiones operativas. Dos de los cambios operacionales más típicos se deben a los cambios estacionales entre la gasolina y la producción de petróleo de ciclo ligero y los cambios en la tasa de alimentación que son funciones de la demanda del mercado<sup>4</sup>.

En la literatura se encuentran fuentes en donde se realizan análisis de la influencia de diferentes variables en los desempeños del FCC, Hernandez<sup>5</sup> presentó el estudio de la simulación en estado estacionario del regenerador de un catalizador en la unidad de desintegración catalítica fluidizada en donde se muestra la flexibilidad del método para simular tanto la regeneración en combustión parcial como la

---

<sup>3</sup> MEYERS, Robert. A. Handbook of Petroleum Refining Processes. Washington D. C.: McGraw-Hill Education, 2004. Third Edition, Chapter 3. p. 93. ISBN: 9780071391092

<sup>4</sup> LIEBERMAN, Norman. Troubleshooting Process Operations. Oklahoma: PennWell Publishing Company, 1991. Third Edition, Chapter 7. p. 159. ISBN: 0-87814-348-3

<sup>5</sup> HERNANDEZ, Roberto; SALAZAR, Daniel. Simulación del Regenerador de una unidad de desintegración catalítica fluidizada. México DF: Revista del centro de investigación. Universidad La Salle, 2004. p. 43-49.

combustión total por medio de ajustes en los parámetros cinéticos. Emerson<sup>6</sup> empleó una forma de optimización en el rendimiento del regenerador a través de una sonda de oxígeno ya que el enriquecimiento del aire utilizado en el proceso de regeneración puede aumentar la tasa de combustión del coque lo que resulta en un aumento en la eficiencia del proceso de regeneración. Tang<sup>7</sup> desarrolló un estudio en donde se planteó la forma de simulación numérica y de optimización en una industria en la regeneración del catalizador en el craqueo catalítico. Para el análisis, los autores emplearon la simulación CFD de un regenerador comercial, reportando que el enriquecimiento de oxígeno en la actividad del catalizador muestra un aumento del flujo de coque logrando mejores resultados para el proceso.

Alternativamente a la simulación, los datos históricos de proceso de las unidades pueden ser utilizados en el análisis de los diferentes estados estacionarios factibles que pueden presentar las distintas unidades FCC. Estos datos históricos contienen información heurística que refleja la experticia de los operadores y los diferentes eventos que alteraron el normal desempeño de las unidades<sup>8</sup>. Diferentes métodos de estadística multivariada como análisis por componentes principales (PCA) y el método *k-means* pueden ser aplicados para evaluar los diferentes estados estacionarios alcanzados por la operación de la planta y a su vez, relacionar estos estados estacionarios con los desempeños obtenidos en la torre fraccionadora principal<sup>9</sup>.

El presente trabajo describe una metodología para el análisis estadístico de datos históricos correspondientes a la operación de la unidad de ruptura catalítica UOP 1 de la sección catalítica para los años 2014, 2015 y 2016. El interés de esta propuesta de investigación surge debido a los reportes de los costos de mantenimiento para

---

<sup>6</sup> EMERSON PROCESS MANAGEMENT. Optimizing catalyst regeneration with an in-situ oxygen probe. Washington Dc: Rosemount Analytical Inc, 2013.p.1-3.

<sup>7</sup> TANG, Guangwu; SILAEN, Armin. Numerical simulation and optimization of an industrial fluid catalytic cracking regenerator. En: Applied Thermal Engineering. Octubre, 2016. vol. 112. p. 750-760.

<sup>8</sup> TABLAS DE CONTIGENCIA [Anónimo]. Salamanca, 2012. p. 3.

<sup>9</sup> SMITH, Lindsay. Principal Components Analysis. 2002, p. 12-20. [Citado agosto 2017]. Disponible en [http://www.iro.umontreal.ca/~pift6080/H09/documents/papers/pca\\_tutorial.pdf](http://www.iro.umontreal.ca/~pift6080/H09/documents/papers/pca_tutorial.pdf)

los equipos del proceso de craqueo catalítico fluidizado los cuales alcanzan un valor de \$10'000.000 USD<sup>10</sup>. Se justifica realizar un análisis de datos de proceso por medio de la identificación de las condiciones de operación que conducen a los mejores desempeños de la unidad.

Por lo anterior, el presente documento de grado utiliza los datos históricos de proceso de una unidad industrial FCC para la identificación de los principales estados estacionarios por medio del análisis PCA y el método de agrupamiento *k-means*. Estos estados estacionarios son relacionados con los diferentes desempeños reportados por la unidad para la generación de gases, nafta, ALC y *slurry*. Los métodos de estadística utilizados fueron implementados según los códigos del paquete comercial *The Unscrambler*<sup>®</sup> X y el programa de uso libres *R*.

*The Unscrambler*<sup>®</sup> X es un software comercial utilizado en el análisis multivariado de datos que provee herramientas para encontrar variaciones, co-variaciones y otras relaciones internas en las matrices de datos, de igual forma es posible diseñar experimentos y alcanzar los resultados óptimos para un análisis posterior, este software fue desarrollado en 1986 por Harald Martens y después por CAMO Software<sup>11</sup>. Por otra parte, *R* es un entorno de programación de uso libre que se fundamenta en el análisis estadístico y software grafico derivado del lenguaje de programación S, para la manipulación de datos; *R* fue creado en 1992 en Nueva Zelanda por el departamento de estadística de la universidad de Auckland; *R* utiliza las herramientas de análisis por componentes principales (PCA) y análisis de agrupamientos<sup>12</sup>.

---

<sup>10</sup> CHEN, Ye-Mon, Evolution of FCC: Past Present and Future and The Challenges of Operating a High Temperature CFB System in 10th International Conference on Circulating Fluidized Beds and Fluidization Technology. PSRI Ed, ECI Symposium Series, 2013. p. 2.

<sup>11</sup> ESBENSEN, Kim. An introduction to multivariate data analysis and experimental design. Oslo: Camo Process As, 2004. p.12. ISBN 82-9933302-4

<sup>12</sup> SÁEZ CASTILLO, Antonio José. Métodos estadísticos con R y R commander [En línea]. Madrid.: Universidad de Jaén Departamento de estadística e investigación operativa. 2012. (Recuperado en 20 septiembre 2017). Disponible en <http://www4.ujaen.es/~ajsaez/recursos/RRCmdrv31.pdf>

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 GENERAL**

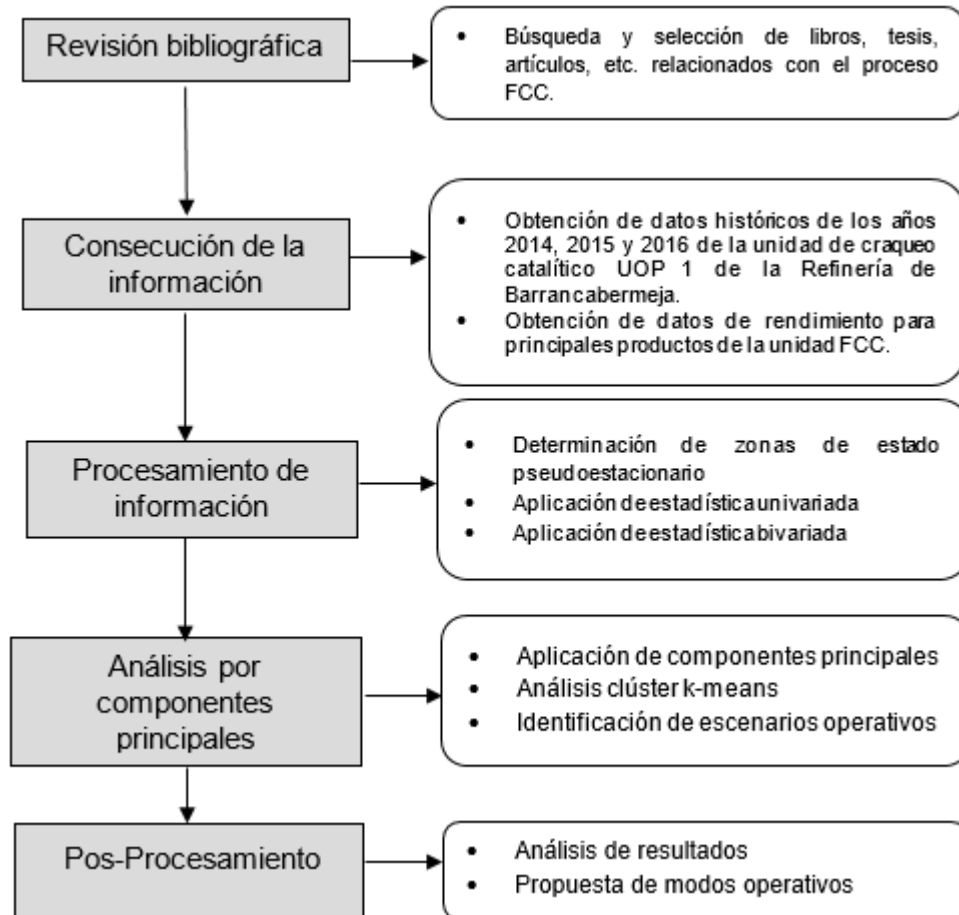
Determinar diferentes esquemas operativos en una unidad de craqueo catalítico industrial dependiendo del desempeño de la sección de regeneración mediante la aplicación del análisis de datos históricos de proceso.

### **1.2 ESPECÍFICOS**

- ✓ Analizar por medio de una estadística univariada y bivariada los datos históricos de proceso del regenerador de una unidad de craqueo catalítico industrial.
- ✓ Aplicar métodos de agrupamiento multivariado a los datos históricos de proceso para definir posibles escenarios operativos del regenerador.
- ✓ Explicar las tendencias de las variables de proceso en los diferentes esquemas operativos por medio de la aplicación del método de los componentes principales.

## 2. METODOLOGÍA

**Figura 2.** Diagrama de flujo de la metodología desarrollada en la presente investigación.



### 2.1. CONSECUCCIÓN DE DATOS DE PROCESO

En esta etapa se realizó la recolección de las distintas mediciones para cada una de las variables de operación de la sección del reactor-regenerador y productos de la unidad FCC de la GRB (Gerencia Refinería de Barrancabermeja). Los datos históricos de proceso estudiados fueron suministrados por la GRB, estos datos presentan la operación de la unidad FCC para los años 2014, 2015 y 2016; los datos reportan

registros a razón de hora para cada variable que estuvo monitoreada desde el mes de enero a diciembre para cada año.

## **2.2. ANÁLISIS PRELIMINAR DE DATOS DE PROCESO**

Los datos históricos fueron analizados para eliminar las entradas con datos vacíos y erróneos debido a intermitencias en el reporte por parte del sensor. Seguidamente se aplicó estadística univariada para descartar muestras con datos atípicos según el rango intercuartíl; estos análisis se realizaron usando el programa Excel, con sus herramientas gráficas y análisis de datos estadística descriptiva.

## **2.3. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN**

Las zonas de estado pseudo-estacionario fueron identificadas según la tendencia del flujo de alimentación; las demás zonas fueron descartadas para los procedimientos posteriores. Los datos de las zonas pseudo-estacionarias fueron sometidos al proceso de autoescalado, el cual realiza una normalización mediante la media de cada variable y su desviación estándar.

## **2.4. ANÁLISIS POR COMPONENTES PRINCIPALES**

El análisis por componentes principales (PCA) fue aplicado a los datos autoescalados de las zonas pseudo-estacionarias. Los scores y los loadings resultantes de la reducción de variables realizada según el PCA fueron analizados para detectar las tendencias de agrupación y las variables asociadas a estas

agrupaciones<sup>13</sup>. Las agrupaciones corresponden a estados estacionarios del proceso.

## 2.5. AGRUPACIÓN POR EL ALGORITMO K-MEANS

El método *k-means* fue aplicado para encontrar *k* grupos en los datos a partir de la definición de la distancia a los respectivos centroides<sup>14</sup>. Para encontrar el número de agrupaciones más adecuado para los datos, el valor de *k* fue variado desde 2 hasta 6, determinando la distancia entre grupos y la distancia interna en las agrupaciones. Las agrupaciones identificadas fueron analizadas en el espacio de los scores de los componentes principales del PCA. Asimismo, las tendencias de los desempeños en los productos de la unidad FCC fueron establecidas según cada agrupación encontrada.

Los cálculos de estadística multivariada fueron aplicados según los algoritmos codificados en el programa comercial *The Unscrambler*<sup>®</sup> *X* y el programa de uso libre denominado *R*<sup>15</sup>.

---

<sup>13</sup> SÁNCHEZ SELLERO, César. Análisis multivariante. [En línea]. Madrid.: Universidad de Santiago de Compostela. 2009. (Recuperado en 12 septiembre 2017). Disponible en [http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOSPHP/MATERIALESMATER/Mat\\_14\\_master0809multi-tema5.pdf](http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOSPHP/MATERIALESMATER/Mat_14_master0809multi-tema5.pdf).

<sup>14</sup> BENÍTEZ SÁNCHEZ, Ignacio Javier. Técnicas de Agrupamiento para el Análisis de Datos Cuantitativos y Cualitativos. [En línea]. Madrid.: Universidad Politécnica de Valencia. 2005. (Recuperado en 5 agosto 2017). Disponible en [https://www.researchgate.net/profile/Ignacio\\_Benitez/publication/239526131\\_Tecnicas\\_de\\_Agrupamiento\\_para\\_el\\_Analisis\\_de\\_Datos\\_Cuantitativos\\_y\\_Cualitativos/links/00b7d51c15cca2cb1f000000/Tecnicas-de-Agrupamiento-para-el-Analisis-de-Datos-Cuantitativos-y-Cualitativos.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ignacio_Benitez/publication/239526131_Tecnicas_de_Agrupamiento_para_el_Analisis_de_Datos_Cuantitativos_y_Cualitativos/links/00b7d51c15cca2cb1f000000/Tecnicas-de-Agrupamiento-para-el-Analisis-de-Datos-Cuantitativos-y-Cualitativos.pdf).

<sup>15</sup> SÁEZ CASTILLO, Antonio José. Métodos estadísticos con R y R commander [En línea]. Madrid.: Universidad de Jaén Departamento de estadística e investigación operativa. 2012. (Recuperado en 20 septiembre 2017). Disponible en <http://www4.ujaen.es/~ajsaez/recursos/RRCmdrv31.pdf>

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. PRETRATAMIENTO DE DATOS

Los datos históricos de proceso para la unidad FCC durante los años 2014, 2015 y 2016 fueron descargados del sistema de proceso de la GRB denominado *PI*. La ventana de operación muestreada consideró los reportes por hora desde el 01 de enero del año 2014 a las 00:00 hasta el 1 de enero del año 2017 de las 12:00 a. m, con un total de 61 variables repartidas en la sección de reactor, correderas y regenerador. Para el año 2014 se obtiene una matriz de 8761 x 34, para el año 2015 de 8761 x 34 y para el año 2016 una matriz de 8785 x 34. Luego, se eliminaron las muestras con un gran porcentaje de datos vacíos y datos erróneos, las variables eliminadas se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Variables eliminadas para cada año.

Año	DATOS BAD INPUT
2014	Salida ciclones regenerador 27139
2015	-
2016	Gases del regenerador 27135

La variable eliminada para el año 2014 que corresponde a la temperatura de salida ciclones regenerador 27139 también es eliminada para los años 2015 y 2016; de igual manera sucede para la variable Gases del regenerador ubicada en el sensor 27135 es eliminada para los años 2014 y 2015 respectivamente, se obtuvo un total de 32 variables (ver anexo A).

Posteriormente, con la reducción de datos atípicos mediante el diagrama boxplot (ver anexo B), se obtuvo una matriz de 3977x33 para el año 2014, 5191x34 para el

año 2015 y 5847x33 para el año 2016; finalmente se determinó una matriz unificada de tamaño 15012x32 para el total de años.

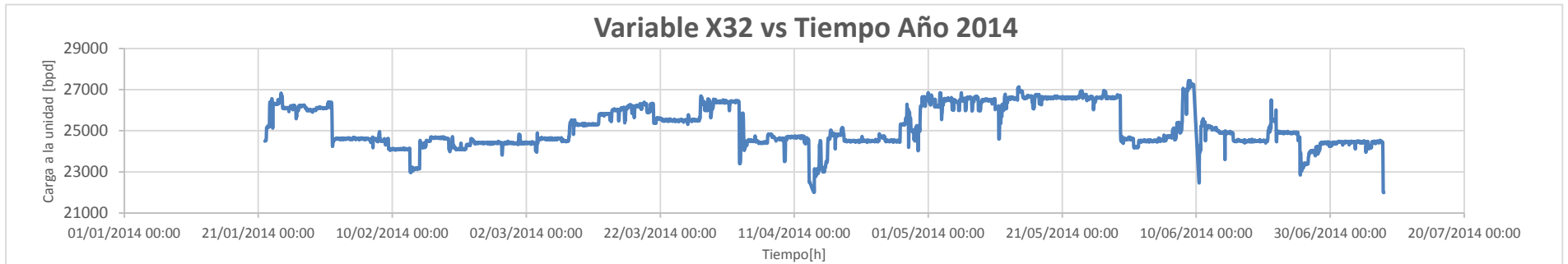
Graficando la variable carga a la unidad (X32) versus tiempo en un entorno de dispersión (Ver Figura 3, 4 y 5) se pueden definir los diferentes estados pseudo-estacionarios. Para el año 2014 se determinaron seis estados estacionarios comprendidos entre el mes de febrero y el mes de junio (Figura 3); para el año 2015 se presenta un estado estacionario comprendido entre los meses de abril y mayo (Figura 4) y para el año 2016 presenta cinco estados estacionarios comprendidos entre en el mes febrero y diciembre (Figura 5). La Tabla 2 resume los estados estacionarios en la unidad FCC de la GRB.

**Tabla 2.** Estados estacionarios para cada año.

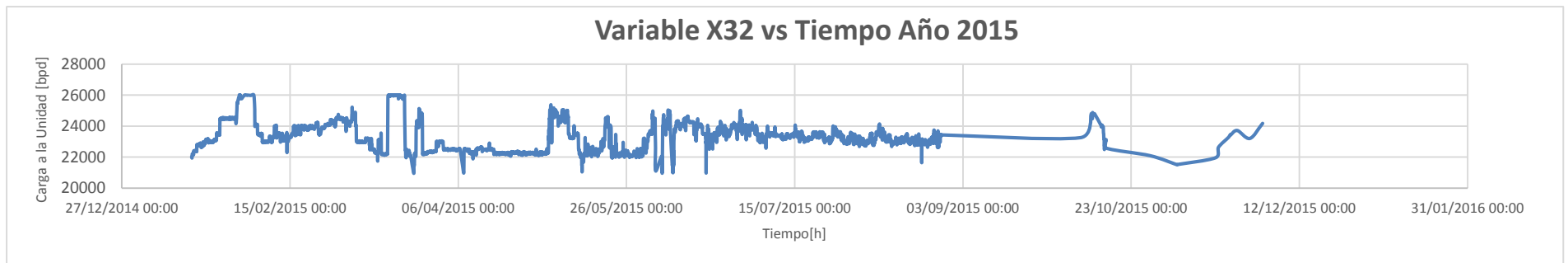
<b>AÑO</b>	<b>REGISTRO</b>
2014	02/02/2014 08:00 - 09/02/2014 03:00
	22/02/2014 14:00 - 03/03/2014 17:00
	21/03/2014 21:00 - 27/03/2014 17:00
	19/04/2014 01:00 - 26/04/2014 12:00
	30/04/2014 16:00 - 29/05/2014 01:00
	28/06/2014 21:00 - 07/07/2014 20:00
2015	03/04/2015 16:00 - 02/05/2015 07:00
2016	26/02/2016 15:00 - 21/03/2016 08:00
	15/06/2016 16:00 - 14/07/2016 22:00
	04/08/2016 14:00 - 17/09/2016 23:00
	05/10/2016 07:00 - 17/11/2016 23:00
	14/12/2016 17:00 - 01/01/2017 00:00

Visualmente se puede localizar zonas de estado pseudo-estacionario para la unidad FCC; sin embargo, no se descarta ningún punto puesto que el análisis PCA y el método de agrupación *k-means* serán los que detecten los diferentes escenarios operativos de la unidad basado en la consideración multivariable.

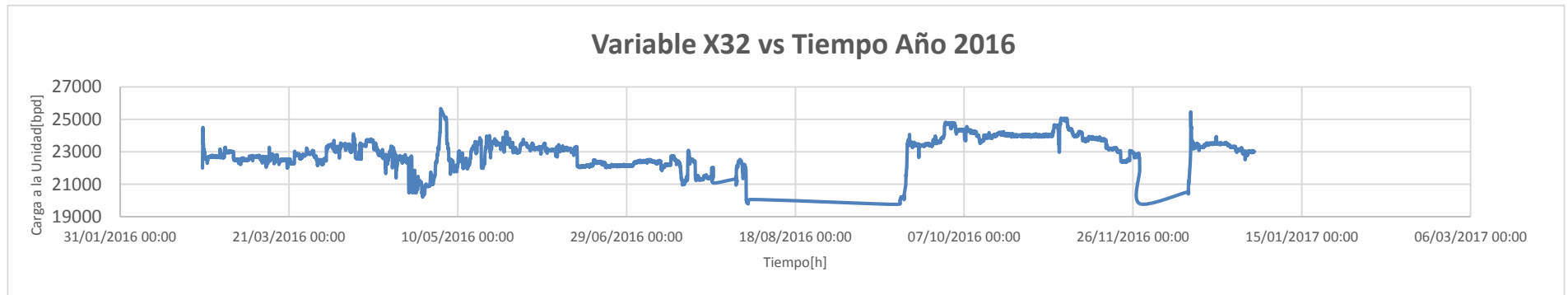
**Figura 3.** Gráfica de la variable X32 versus tiempo para el año 2014.



**Figura 4.** Gráfica de la variable X32 versus tiempo para el año 2015.



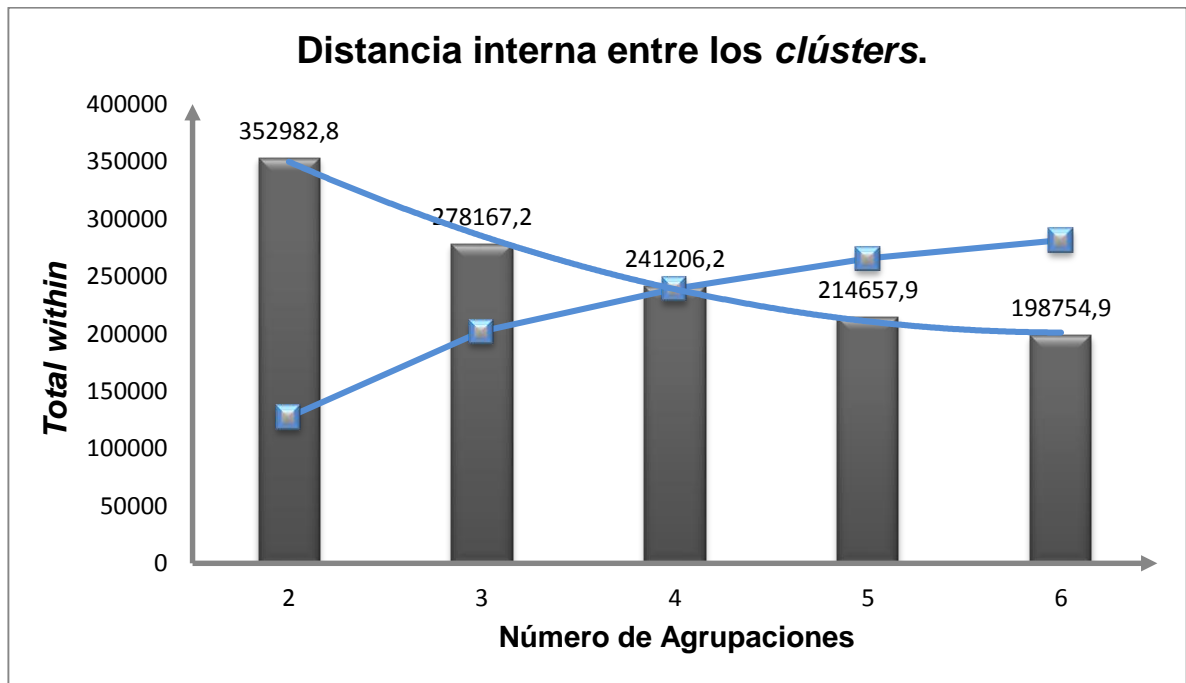
**Figura 5.** Gráfica de la variable X32 versus tiempo para el año 2016.



### 3.2. ANÁLISIS MULTIVARIADO

Previo al análisis PCA y a la aplicación del *k-means*, la matriz de datos fue autoescalada utilizando la media y desviación estándar, lo cual facilita la comparación en la unidad de medida para todas las variables consideradas. El análisis clúster *k-means* para dos, tres, cuatro y cinco agrupaciones fue ejecutado según el código del software libre *R*. La Figura 6 muestra la variación en la cohesión de los grupos y la separación entre los mismos, con el número de agrupaciones; según esta figura el número de agrupaciones adecuado corresponde a 4 (inflexión en las dos curvas). Este número de agrupaciones fue validado con la segunda derivada (mayor cambio en la segunda derivada); según el valor de la segunda derivada es posible proponer a 3 y 4 como las agrupaciones que mejor representan los datos de la unidad FCC (Tabla 3); por lo tanto, se seleccionó 4 agrupaciones debido a que muestran una mayor separación entre las mismas.

Figura 4. Distancia interna entre *clústers*.



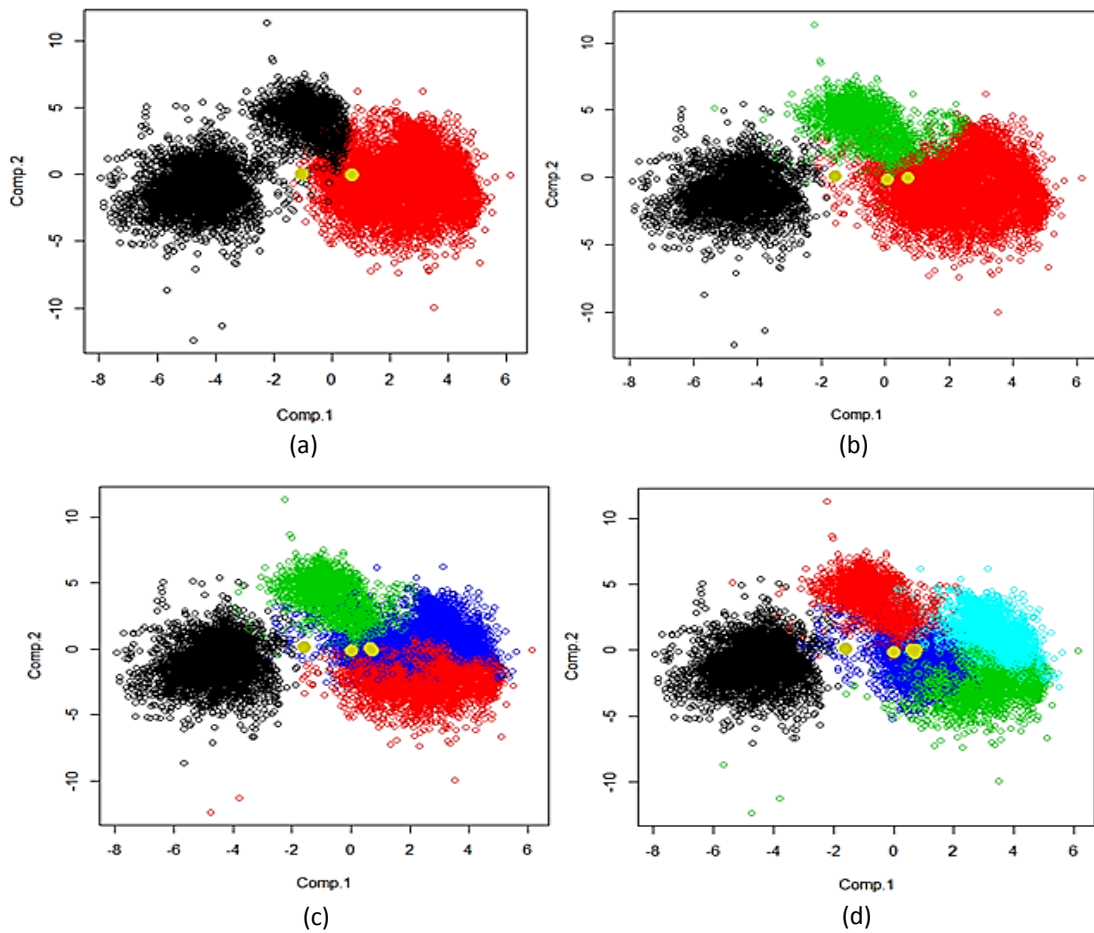
**Tabla 3.** Datos obtenidos en la aplicación del modelo *K-means*.

# CLUSTER	2	3	4	5	6	
<b>WITHIN CLUSTER</b>	53281,3	36989,2	27634,8	63020,5	25615,1	
	299701,5	187850,4	52079,9	26222,8	30120,7	
			53327,6	82808,7	44119,9	51098,8
				78682,8	30145,4	25641,7
					51149,3	28257
				38021,7		
<b>TOTAL WITHIN</b>	352982,8	278167,2	241206,2	214657,9	198754,9	
<b>BETWEEN CLUSTER</b>	127369,2	202184,8	239145,8	265694,1	281597,1	
$\frac{d^2 ss(Co)}{dc}$	37854,6	10412,7	10645,3	-	-	
<b>SIZE CLUSTER</b>	8846	2417	4435	2322	2146	
	6166		3997	4313	3347	2549
			8598	2290	3971	3971
				3974	2173	3070
					3199	349
				2927		

Donde: La distancia interna entre los puntos del clúster es ***within clúster***, la suma de la distancia interna de los puntos del clúster es ***total within***, la distancia existente entre los diferentes clústeres es representada por ***between clúster***, la segunda derivada respecto al ***total within*** es  $\frac{d^2 ss(Co)}{dc}$ , y el número de datos agrupados en cada clúster es ***size clúster***.

La Figura 7 describe gráficamente la distribución conjunta de las variables en cada una de las agrupaciones; en estas graficas es posible observar que la unidad FCC presenta diferentes escenarios operativos, en donde las variables toman distintos valores según ciertas condiciones de la unidad; la dispersión de datos es difusa debido a que pueden existir datos en estado dinámico.

**Figura 5.** Dispersión de datos para el modelo *k-means*. (a)  $k=2$ . (b)  $k=3$ . (c)  $k=4$ . (d)  $k=5$  grupos.

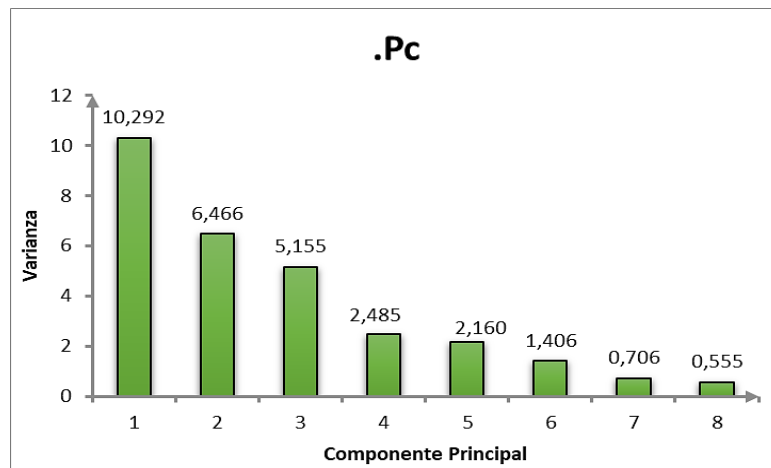


### 3.3. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS PCA

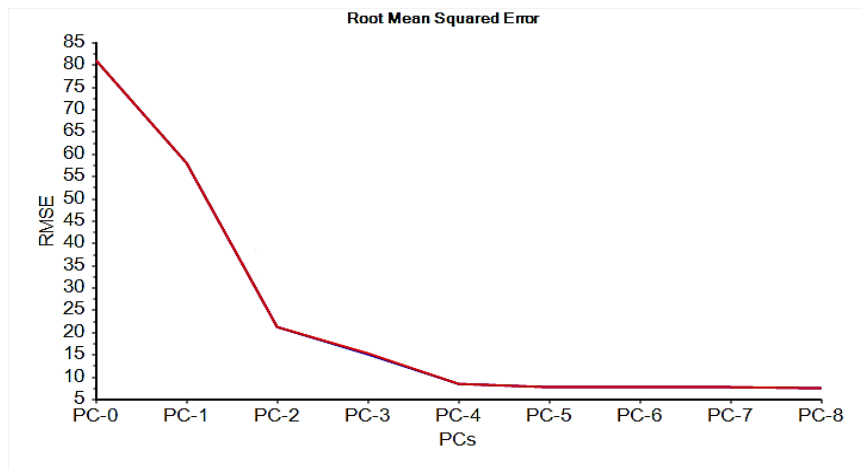
El análisis PCA fue aplicado a la matriz autoescalada; se desarrolló un análisis para 8 componentes debido que el valor de varianza disminuye progresivamente y no es considerable; cabe destacar que valores significativos de varianza conservan la mayor información posible de los datos para 4 componentes principales según la Figura 8. Se realizó el estudio RMSE (*Root Mean Square Deviation*) para comprobar el número de componentes principales adecuados; el RMSE corresponde al valor esperado de la pérdida del error al cuadrado o pérdida cuadrática que permite conocer en qué punto el error se mantiene constante y de esta forma indicar el

número de componentes adecuados. La Figura 9 presenta la variación del RMSE respecto al número de componentes principales; según esta figura, a partir del componente 4 el error presenta una tendencia constante, con lo cual el número de componentes principales adecuados para describir la varianza de los datos en la unidad FCC corresponde a 4.

**Figura 6.** Gráfica de varianza explicada por PC.



**Figura 7.** Grafica de RMSE explicada por PC.



Aunque no es la principal característica del PCA, este análisis puede ser utilizado para la identificación de patrones de agrupación y por lo tanto para la determinación de los modos operativos del proceso. Como resultado de las combinaciones lineales

y reducción de datos el procedimiento generó los factores *loadings* que representan las correlaciones de los coeficientes entre las variables y estos factores.

**Tabla 4.** Resultados de *loadings* para 4 componentes.

Componente 1		Componente 2		Componente 3		Componente 4	
Variable	Loading	Variable	Loading	Variable	Loading	Variable	Loading
X1	0,276	X13	0,3	X18	0,354	X27	0,366
X31	0,265	X12	0,282	X21	0,345	X8	0,354
X7	0,265	X4	0,276	X19	0,334	X26	0,311

En la Tabla 4 se presentan los componentes con sus respectivas variables de mayor influencia; la lista de las otras variables y componentes puede ser analizada en el anexo C. En la Tabla 4, X1 corresponde a la variable Pared reactor cámara R-27153, X31 a la variable Aire salida Re-27125 y X7 es la variable Vapores reactor R-27159 (ver anexo A).

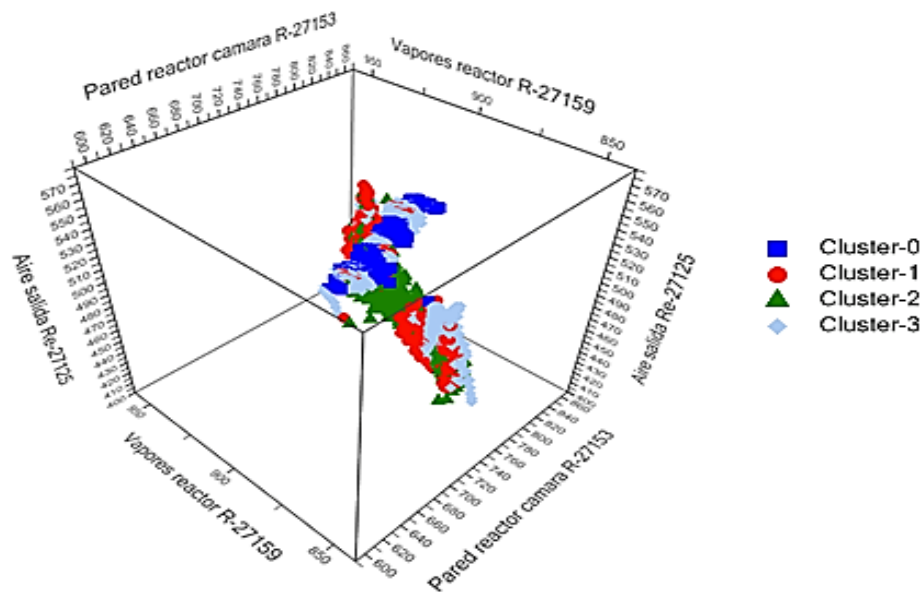
### 3.4. ANÁLISIS DE ESCENARIOS OPERATIVOS

Para el análisis de las variables en los estados estacionarios se hace necesario identificar zonas de agrupamiento, las cuales representan la distribución de los datos. Para esto, grupos de tres variables fueron analizadas respecto a los estados estacionarios o modos operativos identificados anteriormente; el análisis se basó en las respectivas gráficas en 3D y 2D.

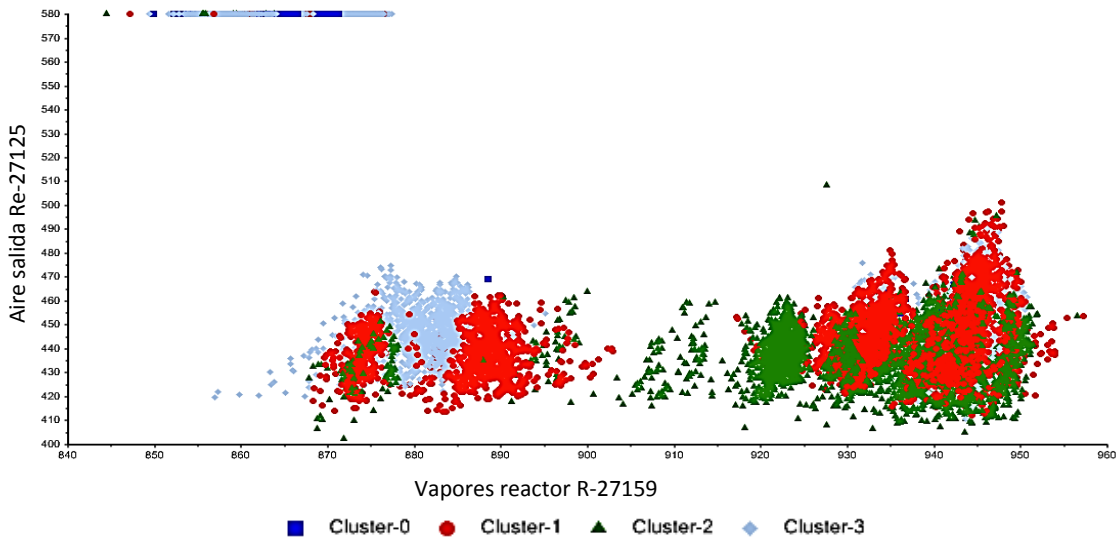
- Primera Configuración

Las tres variables con mayor coeficiente PC1 son X1, X31 y X7 que corresponden a la temperatura del reactor R-27153, aire salida del regenerador Re-27125 y la temperatura de salida del reactor (vapores reactor R-27159) respectivamente. La Figura 10 presenta los estados estacionarios identificados en las coordenadas de las anteriores variables, mientras que la Figura 11 muestra la dispersión en 2D.

**Figura 8.** Gráfico de dispersión 3D de las tres primeras variables para el componente 1.



**Figura 9.** Gráfico de dispersión 2D para las variables (Vapores reactor, Aire salida reactor).

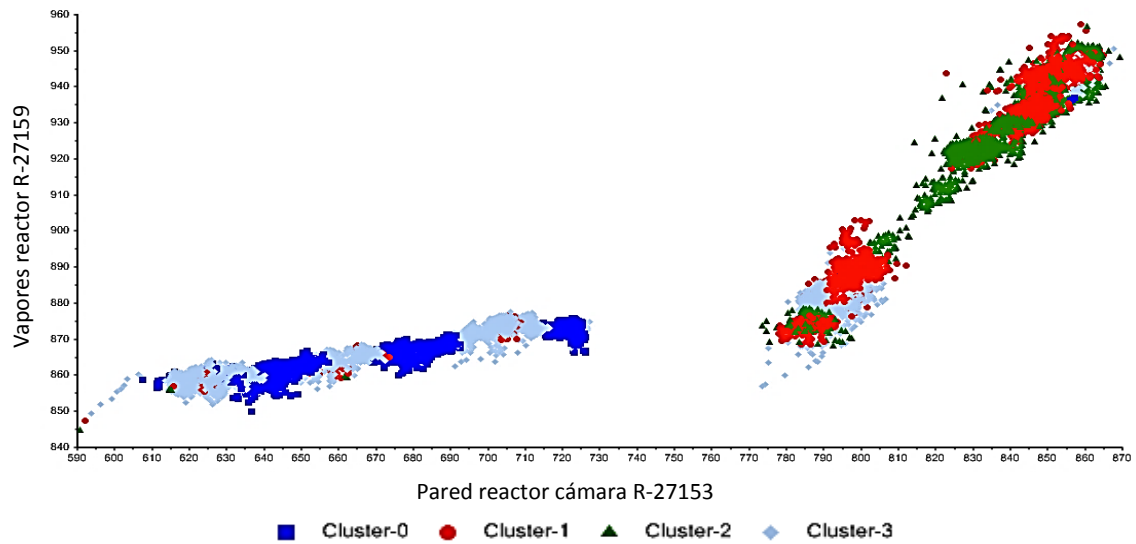


Según la Figura 10 y 11, la variable Aire salida muestra un rango de operación común de temperatura entre 410 - 470 °F en la formación del clúster 1, 2 y 3; esto nos permite concluir que esta variable es decisiva en la formación del escenario operativo y debe mantener una relación en este rango de temperatura. La Tabla 5 presenta los rangos de agrupación para la formación de los diferentes escenarios operativos.

**Tabla 5.** Resultados rangos de agrupación para escenarios operativos X31 y X7.

#Cluster	C - 0	C - 1	C - 2	C - 3
Aire salida	Zona 1: Temp. es constante, T=580 °F	Se presentan 4 zonas con un rango común de 410 a 500°F.	Se presentan 2 zonas con un rango común de 410 a 480°F.	Zona 1: 410-470 °F
Vapores reactor	Zona 1: 860-872 °F	Zona 1: 870-877 °F Zona 2: 880-894 °F Zona 3: 930-938 °F Zona 4: 940-950 °F	Zona 1: 918-925 °F Zona 2: 928-951 °F	Zona 1: 850-878 °F Zona 2: 878-887 °F

**Figura 10.** Gráfico de dispersión 2D para las variables (Pared reactor cámara, Vapores reactor).



**Tabla 6.** Resultados rangos de agrupación para escenarios operativos X7 y X1.

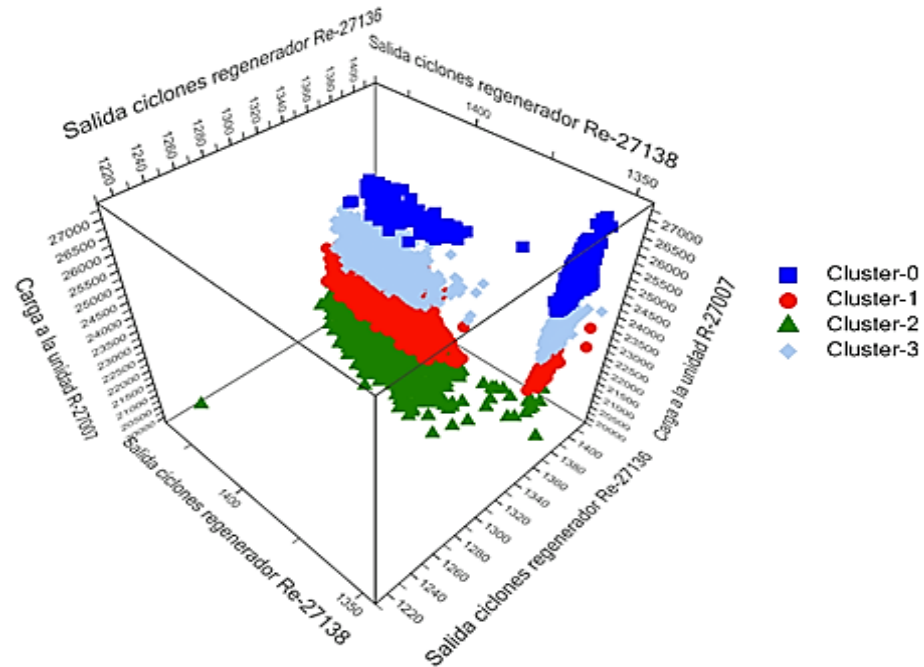
#Cluster	C - 0	C - 1	C - 2	C - 3
Vapores reactor	Zona 1: 852-866 °F Zona 2: 863-871 °F Zona 3: 871-876 °F	Zona 1: 871-877 °F Zona 2: 883-895 °F Zona 3: 930-950 °F	Zona 1: 918-925 °F Zona 2: 928-951 °F	Zona 1: 858-863 °F Zona 2: 862-868 °F Zona 3: 869-877 °F Zona 4: 879-886 °F
Pared reactor	Zona 1: 631-657 °F Zona 2: 670-692 °F Zona 3: 715-727 °F	Zona 1: 778-793 °F Zona 2: 793-805 °F Zona 3: 838-863 °F	Zona 1: 822-836 °F Zona 2: 837-864 °F	Zona 1: 613-640 °F Zona 2: 656-672 °F Zona 3: 692-717 °F Zona 4: 780-805 °F

- Segunda configuración

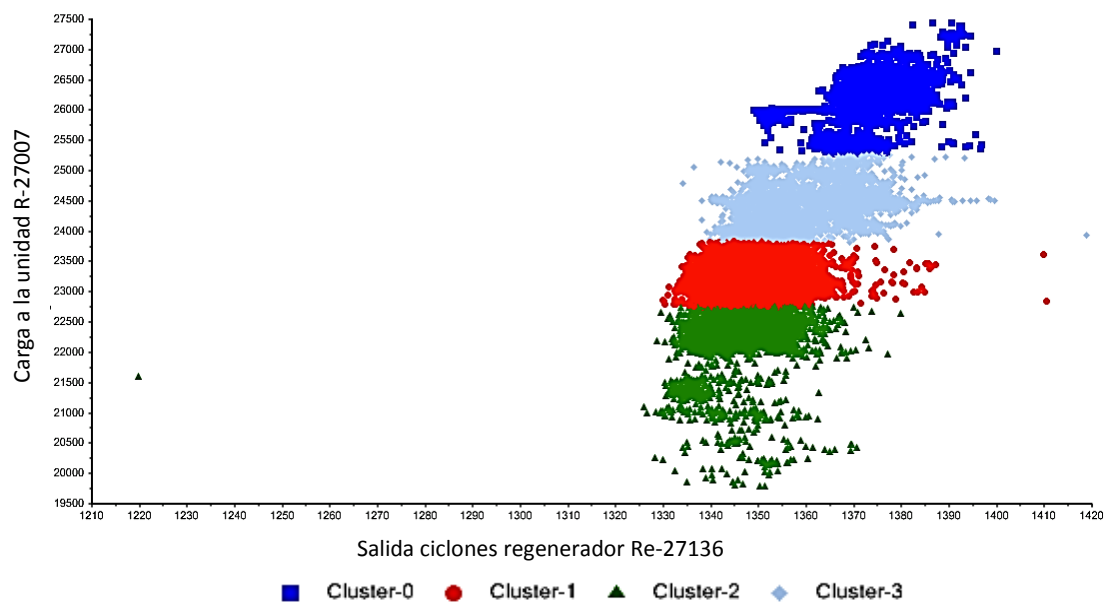
El segundo grupo de tres variables del PC1 son X32, X25 y X23 que corresponden al flujo de carga fresca hacia el *riser* (Carga a la unidad R-27007), la temperatura de salida de los ciclones del regenerador Re-27138 y la temperatura de salida de los ciclones regenerador Re-27136 respectivamente; por ello, el primer componente

se encuentra influido por una variable de entrada y dos variables de salida de la sección catalítica (reactor-regenerador).

**Figura 11.** Gráfico de dispersión 3D para segundo grupo de tres variables del componente 1.



**Figura 12.** Dispersión para las variables Salida ciclones regenerador Re-27136, carga a la unidad.



La relación entre los escenarios operativos y las variables puede ser analizada en la Figura 13 y 14. En estas figuras se visualizan 4 regiones con rangos definidos de operación para cada clúster, donde la variable Carga muestra el flujo alimentado a la unidad FCC. Esta variable determina la aparición del respectivo estado estacionario (Figura 14). La Tabla 7 presenta los valores para las variables que definen los estados estacionarios.

**Tabla 7.** Resultados rangos de agrupación para escenarios operativos X32 y X23.

#Cluster	C-0	C-1	C-2	C-3
Carga a la unidad	Zona 1: 25300-27500 bpd	Zona 1: 22725-23841 bpd	Zona 1: 20000-22724,9 bpd	Zona 1: 23842-25299,6 bpd
Salida ciclones Re-27136	Zona 1: 1345-1495 °F	Zona 1: 1330-1370 °F	Zona 1: 1332-1365 °F	Zona 1: 1335-1390 °F

Es evidente como la variable Carga a la unidad muestra la mejor agrupación de rangos operativos para los clústers. Una de las perturbaciones más comunes que afecta las operaciones de la FCCU es la calidad de alimentación, siendo también la más difícil de vigilar y controlar; la alimentación típica de craqueo catalítico viene no de una sino de varias unidades de procesamiento aguas arriba en una refinería. La calidad de la alimentación juega un papel importante en la definición de la ventana de operación, puesto que los componentes o restos pesados presentes en la alimentación requieren más energía para romper y depositar más coque en el catalizador Slama<sup>16</sup>.

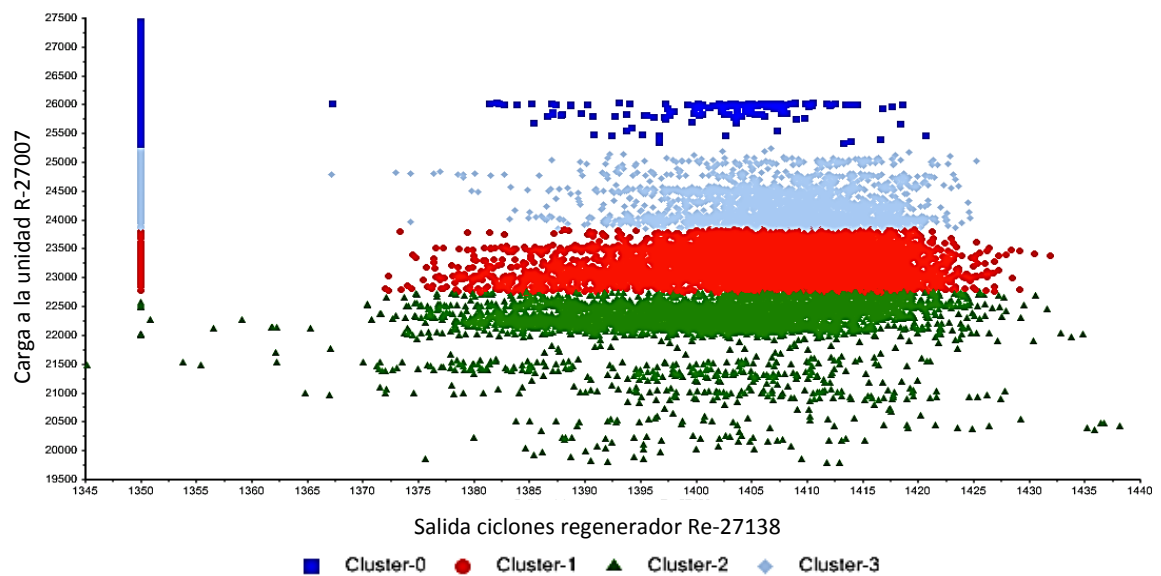
Por otro lado, la variable Salida ciclones regenerador Re-27136 muestra un rango de operación común para los 4 clústers estudiados (T=1330 - 1495 °F). De acuerdo con el planteamiento de Lieberman<sup>17</sup>, típicamente los ciclones del regenerador

<sup>16</sup> SLAMA, Carol Frances. Multivariate statistical analysis of data from and industrial fluidized catalytic cracking process using PCA and PLS. Degree master in Chemical Engineering. Ontario: McMaster University. School of Graduate Studies, 1991; p. 90-110.

<sup>17</sup> LIEBERMAN, Norman. Troubleshooting Process Operations. Oklahoma: PennWell Publishing Company, 1991. Third Edition, Chapter 7. p. 210. ISBN: 0-87814-348-3

deben manejar el gas de combustión de 1250 a 1500 °F. Por lo tanto, al estar los valores en el rango de temperatura adecuado garantiza un desempeño adecuado de la unidad en las diferentes agrupaciones (Figura 15) ya que la conversión del proceso se mantendrá alta y el rendimiento en la producción de combustibles líquidos será el esperado.

**Figura 13.** Dispersión para las variables Salida ciclones regenerador Re-27138, carga a la unidad.



- Tercera configuración

El tercer grupo de tres variables del PC1 son X3, X6 y X5 que corresponden a la temperatura pared reactor cámara R-27155, la temperatura de salida del reactor (vapores reactor R-27158) y la temperatura zona vapores reactor R-27157. Las respectivas dispersiones se pueden analizar en la Figura 16 y 17. En estas figuras se pueden visualizar ciertas zonas de agrupación para las variables a estudiar:

Figura 14. Gráfico de dispersión 3D para el tercer grupo de variables del componente 1.

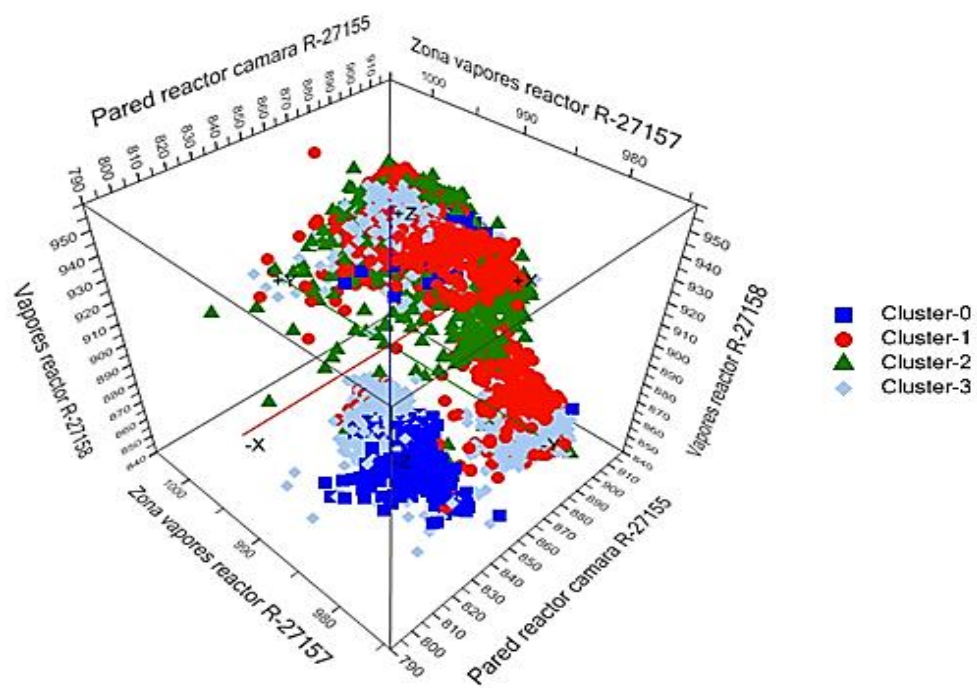
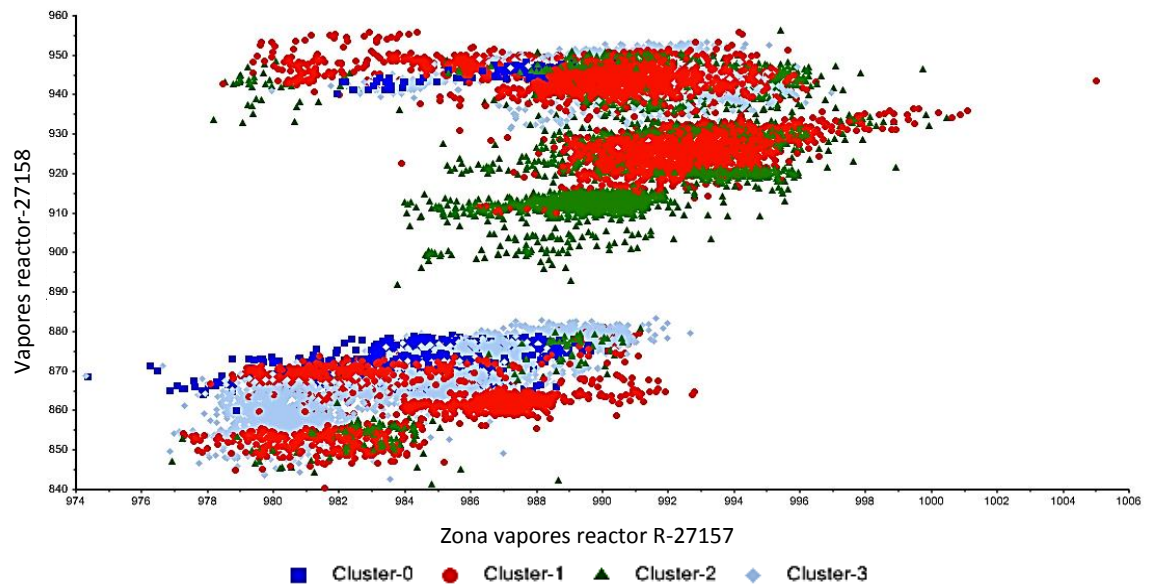


Figura 15. Dispersión para las variables (Zona vapores reactor R-27157, Vapores reactor R-27158).



Clúster 0: La variable Zona vapores reactor R-27157 muestra un rango de operación de temperatura entre ( $T= 970 - 1000$  °F) de igual forma sucede para los clústers 1, 2 y 3; al observar la variable Vapores reactor 27158 no presenta zonas de agrupación en este clúster.

La temperatura de salida en el *riser* denominada como Zona vapores reactor es la variable clave utilizada para controlar la conversión, por tanto, tiene restricciones superiores e inferiores. Para una operación de proceso típica, esta temperatura es de aproximadamente 975 °F, considerando los límites extremos de operación sugeridos por Sadeghbeigi<sup>18</sup>. Si la temperatura es demasiado alta ( $Temp. > 1050$  °F) se produce un craqueo excesivo que provoca un aumento de la producción de gas ligero y podría provocar una inundación de la unidad de fraccionamiento aguas arriba en el proceso; de igual forma una alta temperatura se ve reflejada en una disminución en la producción de gasolina; por el contrario, una temperatura demasiado baja ( $Temp. < 850$  °F) disminuye la conversión a gasolina debido a una circulación baja del catalizador y un aumento en la producción de destilados intermedios.

Clúster 1: En la variable Vapores reactor R-27158 se visualizan 2 zonas de operación: Zona 1:  $T=915 - 930$  °F y Zona 2:  $T=935 - 950$  °F. Clúster 2: La variable Vapores reactor no presenta ninguna zona de agrupamiento definida. Clúster 3: La variable Vapores reactor R-27158 visualiza un rango de operación: ( $T=855 - 880$  °F). La Tabla 8 resume las tendencias encontradas en este apartado.

---

<sup>18</sup> SADEGHBEIGI, Reza. Fluid Catalytic Cracking Handbook: Design, operation and troubleshooting of FCC facilities. Washington D. C.: Gulf publishing company Second edition, 2000. p.125. 186. ISBN 0-88415-289-8

**Tabla 8.** Resultados rangos de agrupación para escenarios operativos X5 y X6.

#cluster	C - 0	C - 1	C - 2	C - 3
Vapores reactor	No presenta zonas de agrupación	Zona 1: 845-880 °F Zona 2: 920-930 °F Zona 3: 940-950 °F	No presenta zonas de agrupación	Zona 1: 860-885 °F
Pared reactor R-27155	No presenta zonas de agrupación	Zona 1: 920-935 °F Zona 2: 940-950 °F	No presenta zonas de agrupación	Zona 1: 820-850 °F Zona 2: 880-900 °F

- Cuarta configuración

El cuarto grupo de tres variables del PC1 son X22, X28 y X29 que corresponden a la temperatura fase densa regenerador Re-27151, la temperatura de salida de ciclones regenerador Re-27142 y la temperatura de salida ciclones regenerador Re-27143; estos sensores están ubicados en diferentes zonas de los ciclones.

Las Figuras D1 y D2 del anexo presentan las dispersiones respectivas a estas variables. La agrupación de los datos en estas figuras permite inferir que la variable Fase densa regenerador opera en un rango común de temperatura de 1240 a 1350°F, en las cuales se encuentran todas las zonas de agrupamiento cluster 0, 1, 2 y 3. Con esto, la regeneración del catalizador en la unidad FCC de la GRB corresponde a la de tipo intermedia y alta (Figura D3, anexo), coincidiendo con operaciones estables según Sadeghbeigi<sup>19</sup>.

Por otro lado, el regenerador tiene dos lechos: denso y diluido. En el lecho denso el catalizador se regenera casi completamente que luego es transportado al reactor, en él se encuentra una cantidad significativa de catalizador con elevado tiempo de residencia. Esto implica que el lecho denso afectará a la dinámica del sistema; por tanto, un rango adecuado de temperatura de la fase densa del regenerador permitirá

---

<sup>19</sup> *Ibíd.*, p. 140.

una operación estable en la unidad. Consideraciones sobre valores de variables adicionales pueden ser consultadas el Anexo D.

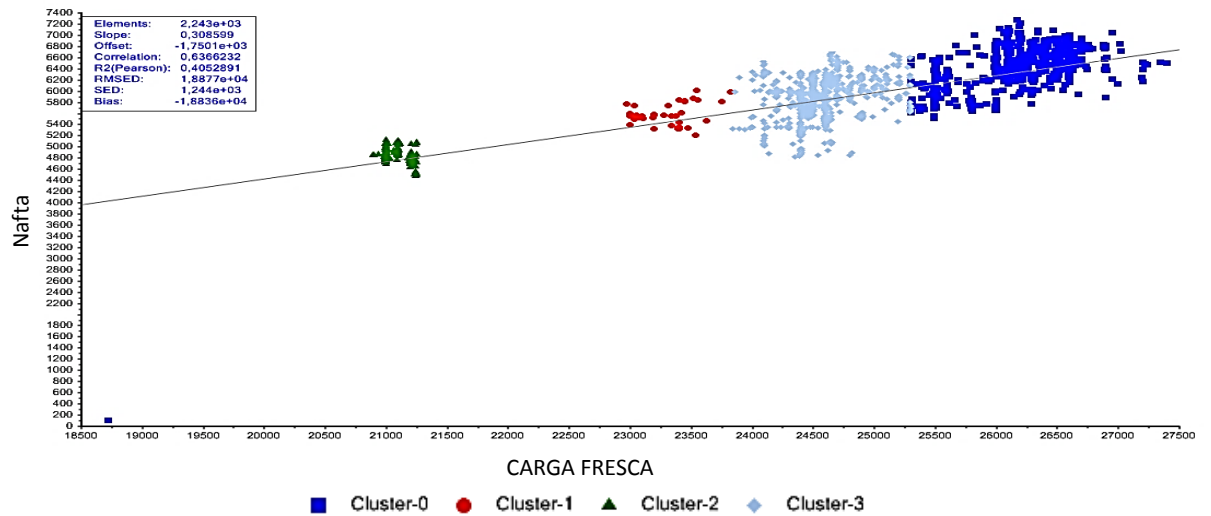
### **3.5. ANÁLISIS DE PRODUCTOS Y RENDIMIENTOS**

Al realizar el estudio de los modos operativos se requirió observar el comportamiento del flujo en cada uno de los productos de la torre fraccionadora respecto a la variable manipulada: carga fresca, de igual forma se realizó el análisis para el rendimiento de cada uno de estos productos.

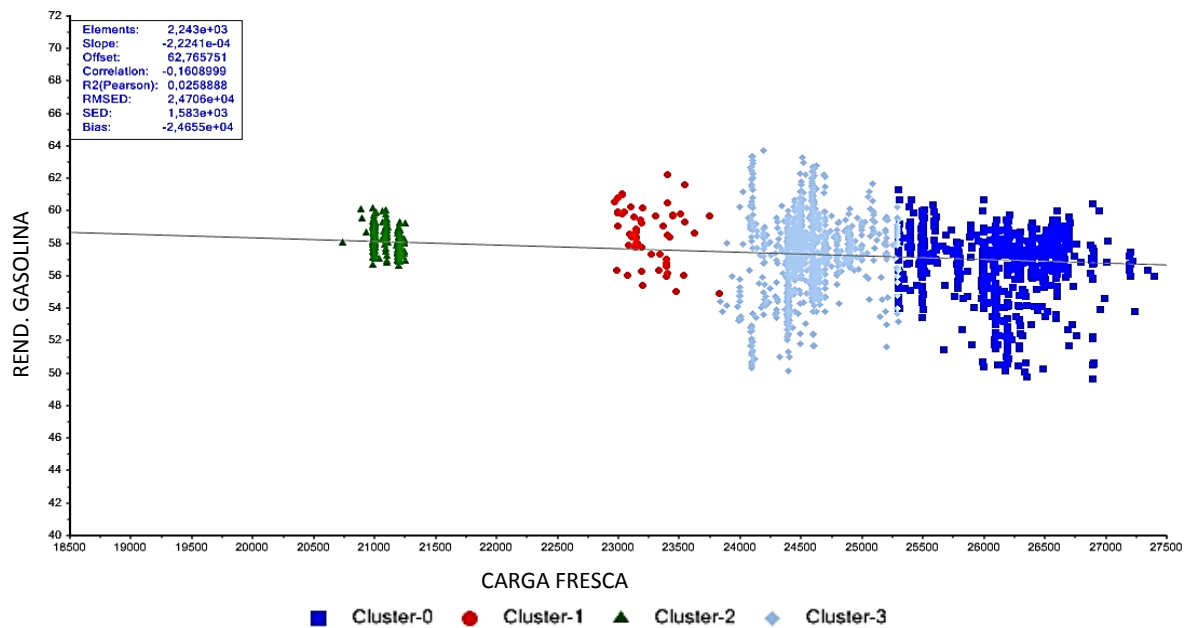
**3.5.1. Análisis de gráficos: Carga fresca, nafta y rendimiento.** En la Figura 18 se muestra que la tendencia es creciente, lo cual es lo más adecuado en este proceso ya que el objetivo principal del FCC es generar combustibles líquidos como nafta (gasolina); por lo cual, la operación reflejada por la unidad corresponde a procesar altos valores de carga para producir más nafta. Asimismo, se observa en la Figura 19 que la tendencia en la conversión es constante con el aumento en la carga procesada.

Por tanto, la operación con flujos de carga altos ajusta las variables de proceso para que el catalizador cumpla la función indicada de generar combustibles líquidos (gasolina y ALC) de mayor valor agregado.

**Figura 16.** Gráfico de dispersión Carga fresca vs Nafta.



**Figura 17.** Gráfico de dispersión Carga fresca vs rendimiento a Gasolina; en azul clúster cero, en rojo clúster uno, en verde clúster dos, en cian clúster tres.



**3.5.2. Intervalos de confianza: ventanas de operación.** A continuación, se presenta el intervalo de confianza al 95% para las variables mostradas con el fin de identificar las fronteras de cada zona de agrupamiento o estado estacionario identificado para la unidad FCC de la GRB en la ventana de operación.

**Tabla 9.** Escenarios operativos de las principales variables.

# Clúster	0		1		2		3	
	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Lim. Sup.
<b>Gasolina (bpd)</b>	5065,50	7573,47	2741,69	8285,72	3781,50	5775,15	4785,25	6882,81
<b>ALC (bpd)</b>	5476,95	6702,38	4433,06	6505,23	4238,86	4971,66	4975,41	6383,98
<b>Slurry (bpd)</b>	2091,13	3959,64	1683,59	3277,82	1680,42	2582,99	1749,49	3659,42
<b>Gases Cima (bpd)</b>	246,81	264,82	241,25	272,29	251,64	262,55	243,05	268,12
<b>% Rend. Gasolina</b>	52,82	60,75	50,20	65,16	55,31	60,76	52,91	61,94
<b>% Rend. GLP</b>	14,09	24,18	14,80	22,90	15,60	22,34	15,42	23,14
<b>% Rend. ALC</b>	20,98	24,93	19,06	27,37	20,68	23,70	20,16	25,74
<b>% Rend. Slurry</b>	7,90	14,93	7,12	13,91	8,36	12,16	7,03	14,83

**Tabla 10.** Escenarios operativos de productos de la torre fraccionadora.

# Clúster	0		1		2		3	
	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Lim. Sup.
<b>Carga fresca (bpd)</b>	25296,97	27103,99	22850,59	23660,53	20735,29	21472,07	24033,03	25076,05
<b>S. ciclones 27138 °F</b>	1309,60	1415,12	1308,93	1422,42	1308,67	1431,46	1308,89	1422,75
<b>Aire salida regenerador °F</b>	429,75	1876,23	297,44	1899,14	170,43	1900,04	293,09	1899,64
<b>S. ciclones 27136 °F</b>	1359,49	1382,31	1351,72	1383,85	1352,89	1375,23	1351,45	1383,94
<b>Pared R. Cámara °F</b>	609,25	723,67	593,75	725,57	697,06	760,55	595,69	732,74
<b>Vapores Reactor °F</b>	854,55	874,15	850,82	877,20	868,011	880,06	852,69	878,17

Esto con el fin de identificar patrones de operación y determinar rangos en los cuales las variables operan, los diferentes estados estacionarios se identifican por:

- Clúster 0: se presenta la mayor producción de ALC y *slurry* alcanzando un límite de 6702,38 bpd y 3959,64 bpd respectivamente, manejando un flujo de alimentación en el rango de 25296,97 a 27103,99 bpd.

- Clúster 1: se presenta la mayor producción de gasolina alcanzando un límite de 8285,72 bpd, con un flujo de alimentación en el rango de 22850,59 a 23660,53 bpd.
- Clúster 2: presenta la menor producción de ALC alcanzada con 4238,86 bpd y con el menor flujo de alimentación inyectado en el rango de 20735,29 a 21472,07 bpd.
- Clúster 3: presenta valores altos y bajos de las distintas variables alcanzando producciones de 4785,25 a 6882,81 bpd de nafta, 4975,41 a 6383,98 de ALC con un flujo de alimentación de 24033,03 a 25076,05 bpd.

Las anteriores características de los estados estacionarios identificados en el presente trabajo para la unidad FCC de la GRB, puede permitir a los operarios un acercamiento a los valores de las variables de operación según las políticas de producción establecidas en la refinería.

#### **4. CONCLUSIONES**

Los resultados del presente proyecto muestran que la operación de la FCC de la GRB entre los periodos comprendidos 2014, 2015 y 2016 puede agruparse en cuatro esquemas operativos caracterizados por cinco variables de temperatura y el flujo de carga a la unidad que identifica el estado estacionario correspondiente.

Cada uno de los esquemas operativos muestra diferente flujo de productos, pero el rendimiento se mantiene. Las diferentes agrupaciones reflejan las condiciones de operación que deben realizar los operadores en la sala de control de la unidad con el fin de mantener la unidad de acuerdo con los requerimientos de producción exigidos para la misma.

Según los resultados, el mejor escenario operativo es identificado como el clúster 1 ya que presenta la mayor producción de gasolina alcanzando un límite de 8285,72 bpd, caracterizado con un flujo de alimentación en el rango de 22850,59 a 23660,53 bpd; por lo tanto, esta agrupación es fundamental para el desempeño de la unidad.

## **5. RECOMENDACIONES**

Utilizar los diferentes estados operativos para aplicar regresiones con el objetivo de predecir la cantidad de productos de la torre fraccionadora.

Considerar cargas externas de la nafta para determinar su influencia en el rendimiento de nafta en la unidad.

## BIBLIOGRAFÍA

ECOPETROL S.A. Manual de Descripción del Proceso de la Unidad de ruptura catalítica UOP 1. Barrancabermeja: ECOPETROL S.A. 2007

JIMENEZ, Julián Francisco. Análisis de datos de proceso de la unidad de llenado de PGR de la GRB utilizando PCA. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016. 19 p.

GARY, James. H; HANDWERK, Glenn E. Petroleum refining: Technology and economics. Washington D. C.: Marcel Dekker, Inc., 2001. P.93-135. ISBN 0-8247-0482-7

HERNANDEZ BARAJAS, Roberto José; VAZQUEZ ROMAN, Richard; SALAZAR SOTELO, Daniel. Multiplicity of steady states in FCC units: effect of operating conditions. En: ELSEVIER CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH AND DESIGN. 2006. p. 849-859.

HERNANDEZ BARAJAS, Roberto José; VAZQUEZ ROMAN, Richard; Condiciones extremas de operación en unidades de desintegración catalítica y multiplicidad de estados estacionarios. Información tecnológica. 2007. vol. 38., p. 31-39.

MEYERS, Robert. A. Handbook of Petroleum Refining Processes. Washington D. C.: McGraw-Hill Education, 2004. p. Third Edition, Chapter 3. ISBN: 9780071391092

OCELLI, Mario. Advances in fluid catalytic cracking: testing, characterization and environmental regulations. Washington D. C.: Taylor & Francis Group, 2010. p.12. ISBN 978-1-4200-6254-0

RUIZ GARCÍA, Edison Andrés. Predicción de los desempeños de gasolina de una torre de fraccionamiento en una unidad de ruptura catalítica utilizando análisis

estadístico multivariable. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2017. 12 p.

SADEGHBEIGI, Reza. Fluid Catalytic Cracking Handbook: Design, operation and troubleshooting of FCC facilities. Washington D. C.: Gulf publishing company Second edition, 2000.p. 186. ISBN 0-88415-289-8

SLAMA, Carol Frances. Multivariate statistical analysis of data from and industrial fluidized catalytic cracking process using PCA and PLS. Degree master in Chemical Engineering. Ontario: McMaster University. School of Graduate Studies, 1991, 19p.

VIAN, Angel. Introducción a la química industrial. Barcelona, España: Editorial Reverté S.A, 1994. ISBN 978-84-291-7933-0.

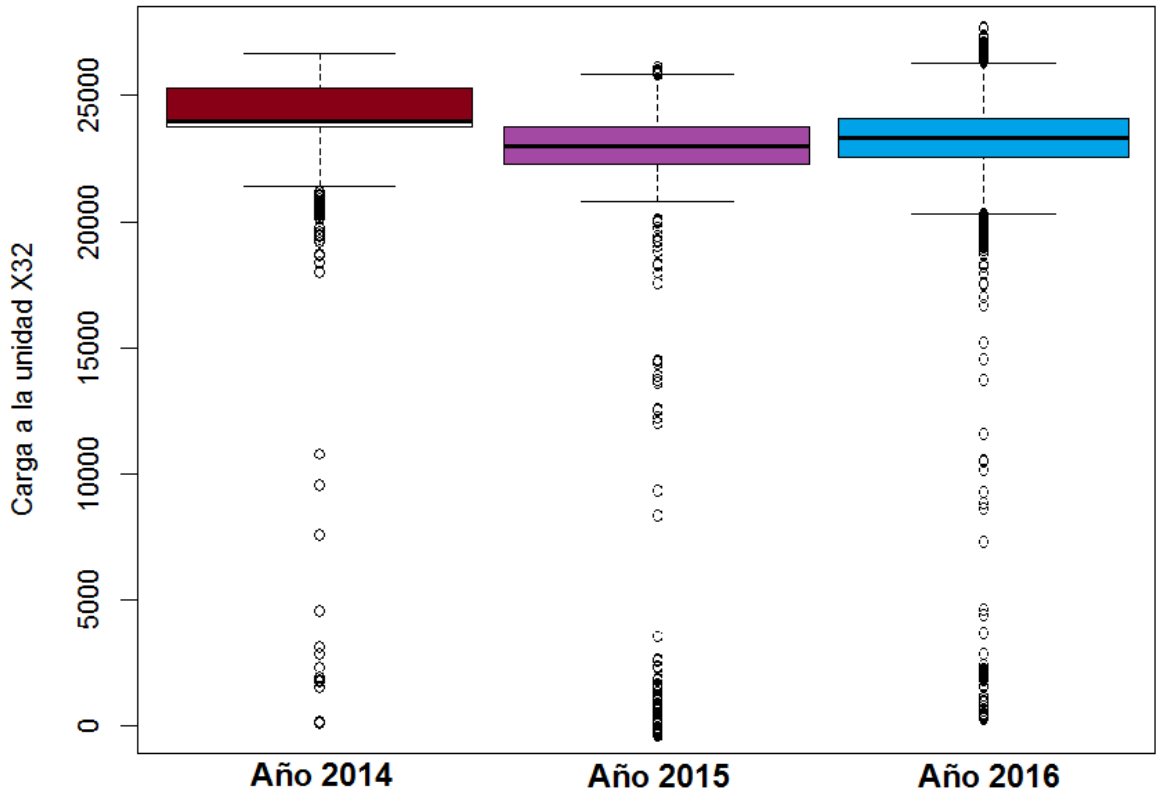
## ANEXOS

### ANEXO A. VARIABLES SELECCIONADAS DE LA UOP1

SECCIÓN	NOMBRE DE LA VARIABLE	ASIGNACIÓN
<b>CARGA</b>	Carga a la unidad R-27007	<b>X32</b>
R E A C T O R 2 7 0 1	Pared reactor cámara R*-27153	<b>X1</b>
	Cámara plena reactor R-27154	<b>X2</b>
	Pared reactor cámara R-27155	<b>X3</b>
	Cámara plena reactor R-27156	<b>X4</b>
	Zona vapores reactor R-27157	<b>X5</b>
	Vapores reactor R-27158	<b>X6</b>
	Vapores reactor R-27159	<b>X7</b>
	Pared reactor R-27160	<b>X8</b>
	Pared despojador catalizador R-27161	<b>X9</b>
	Zona inf. despojado r. catal R-27162	<b>X10</b>
	Zona inf despojado r. catal R-27163	<b>X11</b>
	Vapores del reactor R-27164	<b>X12</b>
	Zona ciclones reactor R-27165	<b>X13</b>
	Zona ciclones reactor R-27166	<b>X14</b>
	Zona ciclones reactor R-27167	<b>X15</b>
R E G E N E R A D O R 2 7 0 2	Fase diluida regenerador Re**-27144	<b>X16</b>
	Fase diluida regenerador Re-27145	<b>X17</b>
	Fase diluida regenerador Re-27146	<b>X18</b>
	Fase densa regenerador Re-27147	<b>X19</b>
	Fase densa regenerador Re-27148	<b>X20</b>
	Fase densa regenerador Re-27149	<b>X21</b>
	Fase densa regenerador Re-27151	<b>X22</b>
	Salida ciclones regenerador Re-27136	<b>X23</b>
	Salida ciclones regenerador Re-27137	<b>X24</b>
	Salida ciclones regenerador Re-27138	<b>X25</b>
	Salida ciclones regenerador Re-27140	<b>X26</b>
	Salida ciclones regenerador Re-27141	<b>X27</b>
	Salida ciclones regenerador Re-27142	<b>X28</b>
	Salida ciclones regenerador Re-27143	<b>X29</b>
	Pared línea catal. Gastado Re-27152	<b>X30</b>
Aire salida Re-27125	<b>X31</b>	

(\*) R: reactor, (\*\*) Re: regenerador

**ANEXO B. DIAGRAMA BOXPLOT PARA LA VARIABLE CARGA A LA UNIDAD X32 EN LOS AÑOS 2014,2015 Y 2016.**



El diagrama boxplot es una forma de presentación estadística destinada a resaltar aspectos de la distribución de las observaciones en una o más serie de datos cuantitativos, identificando el límite inferior como superior que son las fronteras para la posterior eliminación de datos atípicos.

Límite Inferior	$Ls = Q_3 + 1,5 * (Q_3 - Q_1)$
Limite Superior	$Li = Q_1 - 1,5 * (Q_3 - Q_1)$

**ANEXO C. COEFICIENTE PARA CADA VARIABLE PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES.**

<b>Componente 1</b>		
<b>Asignación</b>	<b>Valor Varianza</b>	<b>Nombre de la variable</b>
X1	0,276786443	Pared reactor cámara R-27153
X31	0,265713322	Aire salida Re-27125
X7	0,265298023	Vapores reactor R-27159
X32	0,254235	Carga a la unidad R-27007
X25	0,25239451	Salida ciclones regenerador Re-27138
X23	0,24543674	Salida ciclones regenerador Re-27136
X3	0,23600874	Pared reactor cámara R-27155
X6	0,22221112	Vapores reactor R-27158
X5	0,21356817	Zona vapores reactor R-27157
X22	0,21104996	Fase densa regenerador Re-27151
X28	0,20051834	Salida ciclones regenerador Re-27142
X29	0,193453749	Salida ciclones regenerador Re-27143
X9	0,1924035	Pared despojador catalizador R-27161
X10	0,18338515	Zona inf. despojado r. catal R-27162
X15	0,17216281	Zona ciclones reactor R-27167
X24	0,16994289	Salida ciclones regenerador Re-27137
X11	0,167714772	Zona inf despojado r. catal R-27163
X26	0,163101038	Salida ciclones regenerador Re-27140
X4	0,149431368	Cámara plena reactor R-27156
X19	0,14367983	Fase densa regenerador Re-27147
X27	0,1426529	Salida ciclones regenerador Re-27141
X21	0,140212957	Fase densa regenerador Re-27149
X12	0,139697234	Vapores del reactor R-27164
X13	0,110010805	Zona ciclones reactor R-27165
X30	0,106348842	Pared línea catal. Gastado Re-27152
X8	0,090462441	Pared reactor R-27160
X16	0,031507759	Fase diluida regenerador Re-27144
X14	0,031396331	Zona ciclones reactor R-27166
X2	0,022071184	Cámara plena reactor R-27154
X20	0,015489417	Fase densa regenerador Re-27148
X17	0,014188912	Fase diluida regenerador Re-27145
X18	0,007775989	Fase diluida regenerador Re-27146

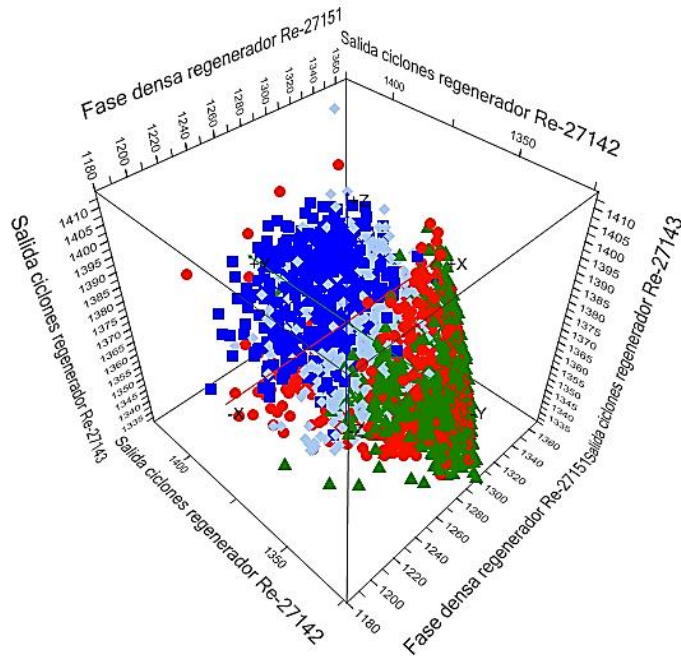
<b>Componente 2</b>		
<b>Asignación</b>	<b>Valor Varianza</b>	<b>Nombre de la variable</b>
X13	0,30031136	Zona ciclones reactor R-27165
X12	0,28220836	Vapores del reactor R-27164
X4	0,2768097	Cámara plena reactor R-27156
X24	0,27138667	Salida ciclones regenerador Re-27137
X29	0,26415352	Salida ciclones regenerador Re-27143
X11	0,25678217	Zona inf despojado r. catal R-27163
X10	0,24643034	Zona inf. despojado r. catal R-27162
X5	0,22596212	Zona vapores reactor R-27157
X26	0,22316047	Salida ciclones regenerador Re-27140
X27	0,21575404	Salida ciclones regenerador Re-27141
X23	0,21068758	Salida ciclones regenerador Re-27136
X18	0,19610315	Fase diluida regenerador Re-27146
X28	0,19269789	Salida ciclones regenerador Re-27142
X16	0,18712268	Fase diluida regenerador Re-27144
X17	0,17217946	Fase diluida regenerador Re-27145
X30	0,16690885	Pared línea catal. Gastado Re-27152
X6	0,15094841	Vapores reactor R-27158
X3	0,14714678	Pared reactor cámara R-27155
X19	0,13330599	Fase densa regenerador Re-27147
X31	0,11540583	Aire salida Re-27125
X9	0,10288012	Pared despojador catalizador R-27161
X22	0,08737157	Fase densa regenerador Re-27151
X7	0,0844851	Vapores reactor R-27159
X25	0,07598979	Salida ciclones regenerador Re-27138
X32	0,06999308	Carga a la unidad R-27007
X21	0,05729934	Fase densa regenerador Re-27149
X14	0,05696998	Zona ciclones reactor R-27166
X20	0,05128439	Fase densa regenerador Re-27148
X8	0,03598056	Pared reactor R-27160
X15	0,02660526	Zona ciclones reactor R-27167
X1	0,02215347	Pared reactor cámara R-27153
X2	0,0184508	Cámara plena reactor R-27154

<b>Componente 3</b>		
<b>Asignación</b>	<b>Valor Varianza</b>	<b>Nombre de la variable</b>
X18	0,35422776	Fase diluida regenerador Re-27146
X21	0,34564985	Fase densa regenerador Re-27149
X19	0,33415891	Fase densa regenerador Re-27147
X30	0,33388817	Pared línea catal. Gastado Re-27152
X16	0,31976087	Fase diluida regenerador Re-27144
X17	0,30045936	Fase diluida regenerador Re-27145
X11	0,19919482	Zona inf despojado r. catal R-27163
X12	0,1906046	Vapores del reactor R-27164
X4	0,18778665	Cámara plena reactor R-27156
X13	0,1858961	Zona ciclones reactor R-27165
X10	0,1680132	Zona inf. despojado r. catal R-27162
X22	0,16743591	Fase densa regenerador Re-27151
X6	0,15975236	Vapores reactor R-27158
X5	0,14896578	Zona vapores reactor R-27157
X3	0,12279521	Pared reactor cámara R-27155
X14	0,11917051	Zona ciclones reactor R-27166
X15	0,10883563	Zona ciclones reactor R-27167
X7	0,10421388	Vapores reactor R-27159
X25	0,09290549	Salida ciclones regenerador Re-27138
X23	0,07330877	Salida ciclones regenerador Re-27136
X29	0,0732235	Salida ciclones regenerador Re-27143
X28	0,06701269	Salida ciclones regenerador Re-27142
X2	0,0667386	Cámara plena reactor R-27154
X27	0,0629685	Salida ciclones regenerador Re-27141
X1	0,0381731	Pared reactor cámara R-27153
X8	0,03382221	Pared reactor R-27160
X26	0,03257317	Salida ciclones regenerador Re-27140
X24	0,02620446	Salida ciclones regenerador Re-27137
X32	0,02221199	Carga a la unidad R-27007
X31	0,01693746	Aire salida Re-27125
X20	0,01115554	Fase densa regenerador Re-27148
X9	0,0078274	Pared despojado catalizador R-27161

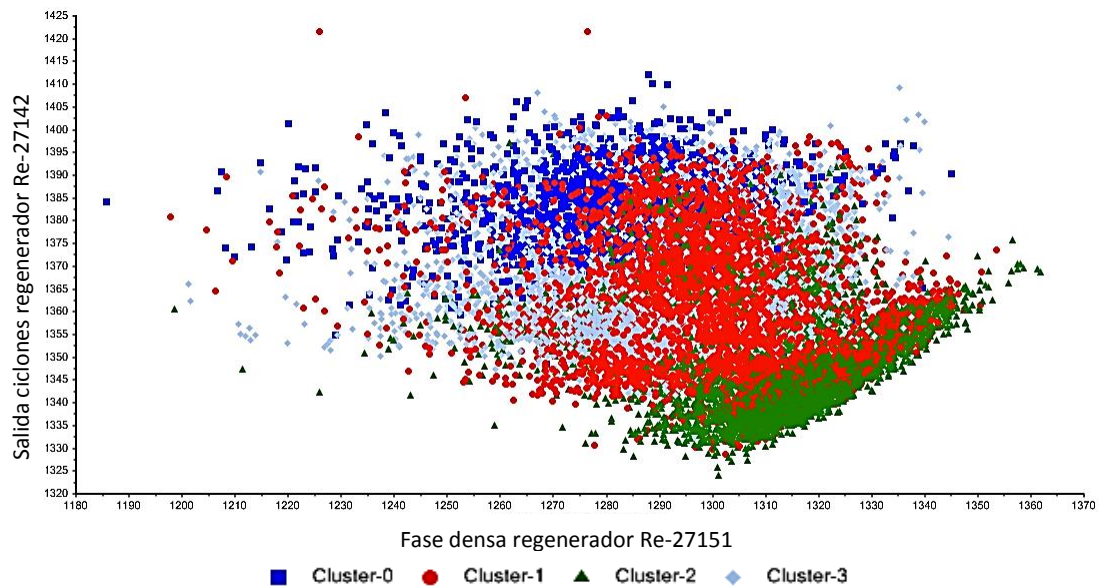
<b>Componente 4</b>		
<b>Asignación</b>	<b>Valor Varianza</b>	<b>Nombre de la variable</b>
X27	0,3665492	Salida ciclones regenerador Re-27141
X8	0,35470588	Pared reactor R-27160
X26	0,31195549	Salida ciclones regenerador Re-27140
X28	0,28248316	Salida ciclones regenerador Re-27142
X25	0,23988457	Salida ciclones regenerador Re-27138
X1	0,23083247	Pared reactor cámara R-27153
X7	0,20940354	Vapores reactor R-27159
X9	0,20417806	Pared despojador catalizador R-27161
X6	0,20226464	Vapores reactor R-27158
X31	0,20057514	Aire salida Re-27125
X15	0,19063102	Zona ciclones reactor R-27167
X21	0,18976055	Fase densa regenerador Re-27149
X14	0,171995	Zona ciclones reactor R-27166
X10	0,163912	Zona inf. despojado r. catal R-27162
X12	0,14201496	Vapores del reactor R-27164
X30	0,14130939	Pared línea catal. Gastado Re-27152
X4	0,12638886	Cámara plena reactor R-27156
X29	0,12414319	Salida ciclones regenerador Re-27143
X13	0,12034624	Zona ciclones reactor R-27165
X16	0,1175481	Fase diluida regenerador Re-27144
X19	0,10943847	Fase densa regenerador Re-27147
X11	0,10621523	Zona inf despojado r. catal R-27163
X5	0,09810291	Zona vapores reactor R-27157
X24	0,086624	Salida ciclones regenerador Re-27137
X17	0,08117562	Fase diluida regenerador Re-27145
X2	0,06987332	Cámara plena reactor R-27154
X32	0,06395041	Carga a la unidad R-27007
X20	0,01669544	Fase densa regenerador Re-27148
X3	0,01249899	Pared reactor cámara R-27155
X18	0,012145	Fase diluida regenerador Re-27146
X22	0,00672702	Fase densa regenerador Re-27151
X23	0,00267068	Salida ciclones regenerador Re-27136

**ANEXO D. CONFIGURACIONES PARA OTRAS VARIABLES DE PROCESO.**

**Figura D1.** Gráfico de dispersión 3D para el cuarto grupo variables del componente 1; en azul clúster cero, en rojo clúster uno, en verde clúster dos, en cian clúster tres



**Figura D2.** Gráfico de dispersión 2D para las variables (Fase densa regenerador Re-27151, Salida de ciclones regenerador Re-27142).



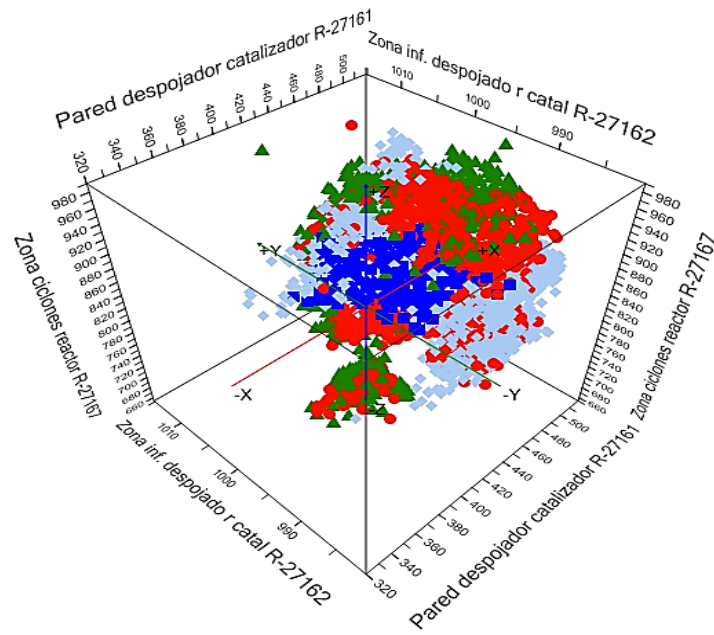
**Figura D3.** Regiones operativas normales para la variable Fase densa regenerador.

Operating Region Regenerator Combustion	Partial Combustion Mode	Full Combustion Mode
Low temperature (nominally 1,190°F/640°C)	Stable (small afterburning) O <sub>2</sub> , CO, and CO <sub>2</sub> in the flue gas	Not achievable
Intermediate temperature (nominally 1,275°F/690°C)	Stable (with combustion promoter); tends to have high carbon on regenerated catalyst	Stable with combustion promoter
High temperature (nominally 1,350°F/730°C)	Stable operation	Stable operation

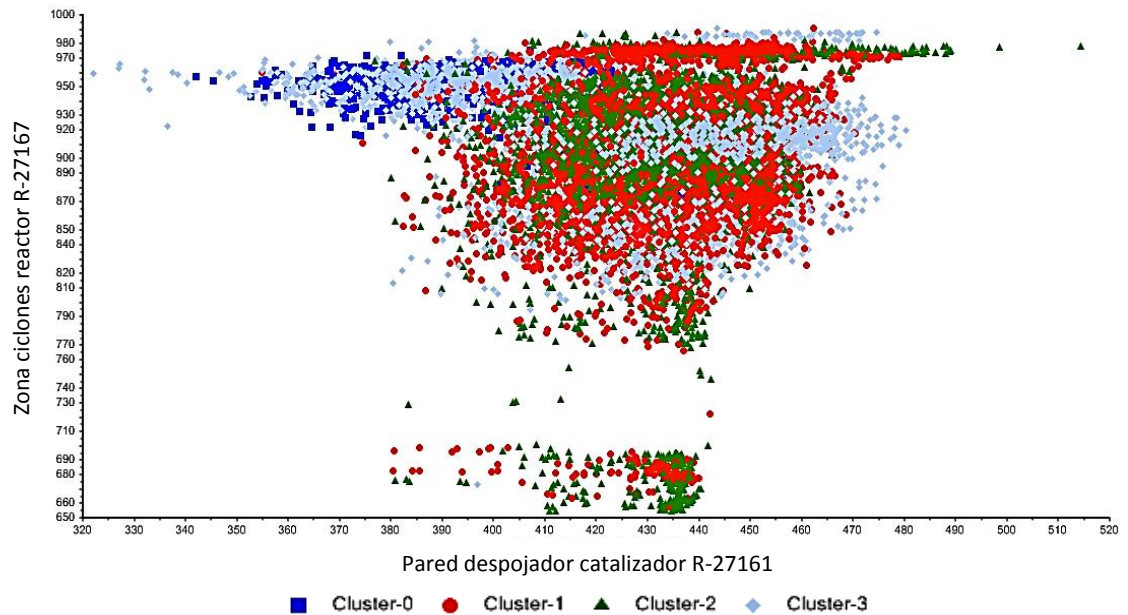
#### Quinta Configuración

El quinto grupo de tres variables del PC1 son X9, X10 y X15 que corresponden a la temperatura pared despojador catalizador densa R-27161, la temperatura de zona inf. Despojo r catalizador R-27162 y la temperatura zona ciclones reactor R-27167.

**Figura D4.** Gráfico de dispersión 3D para el quinto grupo variables del componente 1; en azul clúster cero, en rojo clúster uno, en verde clúster dos, en cian clúster tres.



**Figura D5.** Gráfico de dispersión 2D para las variables (Pared despojador catalizador R-27161, Zona inf. Despojo catalizador R-27162).



Al analizar la gráfica en 2D para las variables indicadas no se definen zonas de agrupamiento debido a la dispersión de los datos, no es posible observar los límites que definen estas zonas por tanto estas variables no son decisivas en la formación del clúster.