

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE LOS HORNOS DE LA U-200 DE LA
REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA UTILIZANDO RECONCILIACIÓN DE
DATOS

ANDRÉS FELIPE CÁCERES LEÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2017

**EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE LOS HORNOS DE LA U-200 DE LA
REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA UTILIZANDO RECONCILIACIÓN DE
DATOS**

ANDRÉS FELIPE CÁCERES LEÓN

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

DIRECTOR:

GIOVANNI MORALES MEDINA

INGENIERO QUÍMICO, Dr.

CODIRECTOR:

ADRIANO PINTO MARIANO

INGENIERO QUÍMICO, Dr.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2017

DEDICATORIA

A mis padres por haberme dado la oportunidad de estudiar en una excelente institución y por todo el esfuerzo que realizaron todos estos años.

Al Doctor Giovanni Morales Medina, Director del proyecto por su apoyo constante, compañía y correcciones realizadas con el fin de permitirme ser un mejor profesional.

Al Doctor Adriano Pinto Mariano por su apoyo, acogimiento y compañía en el extranjero durante la realización de la tesis.

Al Ingeniero Ricardo por su apoyo y por ser un puente de información clave en la etapa inicial del proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. MARCO TEÓRICO	14
1.1 HORNO DE REFINERÍA	14
1.2. ERRORES DE MEDICIÓN	15
1.3. RECONCILIACIÓN DE DATOS	16
2. METODOLOGÍA	18
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	21
3.1 DATOS HISTÓRICOS	21
3.2 ESTADOS ESTACIONARIOS	21
3.3 RECONCILIACIÓN	24
4. CONCLUSIONES	34
5. RECOMENDACIONES	35
REFERENCIAS	36
BIBLIOGRAFÍA	38
ANEXOS	39

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Variables de proceso medidas	21
Tabla 2. Resultados de la identificación de estado estacionario	22
Tabla 3. Valores de las variables en el EE sin reconciliar	25
Tabla 4. Resultados de la reconciliación de datos en el EE utilizando la correlación de Watson y Nelson para crear redundancia	26
Tabla 5. Estimación del Cp como variable independiente en base a un día de operación	26
Tabla 6. Resultados de la reconciliación de datos del EE	27
Tabla 7. Valor de la función objetivo promedio en función del número de periodos de reconciliación	28
Tabla 8. Análisis de correlación de las variables de interés	32

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Instrumentación del horno H-201 de la unidad U-200	14
Figura 2. Recolección de datos en línea y sistema de acondicionamiento	16
Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología propuesta	18
Figura 4. Diagrama de flujo del criterio de identificación de estados estacionarios.	19
Figura 5. Intervalos de tiempo con operación estable del horno H-201	23
Figura 6. Estado estacionario	23
Figura 7. Datos del EE después de la aplicación del filtro	24
Figura 8. Datos reconciliados de Ts	28
Figura 9. Datos reconciliados de Fg	29
Figura 10. Datos reconciliados de Ts en 12 divisiones del EE	30
Figura 11. Datos reconciliados de Fg en 12 divisiones del EE	30
Figura 12. Datos reconciliados de Fc en 12 divisiones del EE	31
Figura 13. Datos reconciliados y calculados de <i>eficiencia</i> en 12 divisiones del EE	31
Figura 14. Eficiencia contra Fc en 12 divisiones del EE	32
Figura 15. Ts contra Fg en 12 divisiones del EE	33

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Reconciliación de datos en el estado estacionario dividido en dos intervalos.	39
Anexo B. Reconciliación de datos en el estado estacionario dividido en tres intervalos.	40
Anexo C. Reconciliación de datos en el estado estacionario dividido en cuatro intervalos.	41
Anexo D. Reconciliación de datos en el estado estacionario dividido en seis intervalos.	43
Anexo E. Reconciliación de datos en el estado estacionario dividido en doce intervalos.	46

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE LOS HORNOS DE LA U-200 DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA UTILIZANDO RECONCILIACIÓN DE DATOS*

AUTOR: ANDRÉS FELIPE CÁCERES LEÓN**

PALABRAS CLAVE: DATOS DE PROCESO, ESTADÍSTICA, HORNO, OPTIMIZACIÓN, RECONCILIACIÓN.

DESCRIPCIÓN:

En el presente documento se desarrolla una metodología para el ajuste de las mediciones reportadas por los sensores, que tienen errores de medición o están fuera de línea, del horno H-201 de la unidad U-201 de la Refinería de Barrancabermeja (GRB), mediante la aplicación de un procedimiento de reconciliación de datos que busca reducir al mínimo los errores entre las variables de proceso medidas y los valores estimados, considerando las restricciones derivadas de los balances de energía, así como las restricciones operacionales correspondientes, permitiendo obtener una base de datos confiable de los datos de proceso. Para tal fin, se realizó un análisis energético de los modos de operación del equipo iniciando con la recopilación de los datos de operación, clasificación de variables, identificación y eliminación de errores y valores atípicos, y detección de la operación en estado estacionario del equipo. El procedimiento de reconciliación condujo a la identificación de dos modos de operación de la unidad U-200 en los estados estacionarios, los cuales correspondieron a, modo de operación Crudo y modo Viscosreductora, diferenciados por el valor de la temperatura del flujo de salida del horno. Además, los resultados reflejaron, para el rango de operación, la relación inversa entre la carga del horno y su eficiencia y una relación entre el flujo de gas combustible y la temperatura de salida del crudo. Finalmente, existe un potencial para el aumento de la eficiencia del horno el cual representaría un ahorro de ca. 30.000 \$USD/año reduciendo el flujo de crudo.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina, Ingeniero Químico, Dr. Codirector: Adriano Pinto Mariano, Ingeniero Químico, Dr.

ABSTRACT

TITLE: ENERGY EVALUATION OF UNITY U-200 FURNACES OF REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA USING DATA RECONCILIATION*

AUTHOR: ANDRÉS FELIPE CÁCERES LEÓN**

KEYWORDS: PROCESS DATA, FURNACE, OPTIMIZATION, STATISTICS, RECONCILIATION

DESCRIPTION:

Here in, we present a methodology for correcting reported values by sensors, that have measurement errors or are out of line, in the furnace H-201 of U-200 of Refinería de Barrancabermeja (GRB), by the use of a reconciliation data process that is applied to find the minimal error within measured process variables and estimated values, fulfilling constraints of heat balance and operational conditions, allowing to obtain a reliable database of the process data. For this, process data were collected and analyzed to generate a database without incomplete or erroneous data. Statistical techniques were applied to identification and elimination of outliers and error, identify operational modes and stationary state operation in the furnace. Reconciliation procedure yields to values for the variables that could be used to identify two operational modes, one in crude operational mode and the other in viscorreduced operational mode. These modes showed different temperature values for the out furnace crude flow. Besides, results showed, for the operating range, an inverse relationship between the crude flow and furnace efficiency, as well as, fuel flow and out furnace flow temperature. Finally, there existed an economic potential of about \$30.000 USD/year for improving furnace efficiency by reducing the flow of crude oil.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina, Ingeniero Químico, Dr. Codirector: Adriano pinto mariano, Ingeniero Químico, Dr.

INTRODUCCIÓN

El mercado mundial de la industria se ha caracterizado por ser altamente competitivo, en cuanto a calidad de los productos, su precio, y más recientemente por cumplir adecuadamente con todas las regulaciones ambientales y de seguridad industrial emergentes. Estas regulaciones conducen a mejorar el rendimiento de los procesos para reducir gastos de operación adicionales y alcanzar los requerimientos de calidad. Una mejora en el rendimiento de los procesos puede estar basada en el análisis de sus datos históricos, los cuales son recolectados por el sistema de medición disponible [1]. Las mediciones realizadas pueden presentar errores de variadas fuentes [2], [3]. La reconciliación de datos es una herramienta que utiliza procedimientos estadísticos para mejorar la calidad y confiabilidad de los datos obtenidos de instrumentos de medición, reduciendo el efecto de ruidos y garantizando el cumplimiento de restricciones atribuidas al sistema estudiado.

Por otra parte, según el *Energy Outlook 2017*, las tendencias de demanda de petróleo crudo, para 2035, son crecientes con un aumento entre 11% y 18%. Esta tendencia se encuentra basada en proyecciones del crecimiento del PIB y población mundial, mejoras en eficiencia de vehículos y otros factores macroeconómicos, dándole de gran importancia a la mejora continua en la eficiencia en los procesos de industriales. Este aumento en el consumo es debido principalmente al crecimiento de la población mundial, la demanda por parte del sector transporte y procesos de transformación de materias primas [4], [5], [6].

En Colombia, el consumo de energía de la industria del petróleo representó el 11% del consumo de energía final para el año 2009. Gran parte de ese consumo de energía en las refinerías se ve reflejado en la operación de los hornos en las unidades de destilación. La Refinería de

Barrancabermeja (GRB) reporta que la U-200 demanda un consumo energético anual de 3 millones de BTU, equivalentes a 9.430.000 \$USD/año, del cual más del 80% se debe a la operación de los hornos [7], [8]. De esta forma, la mejora en la operación de los hornos presenta un gran potencial de ahorro energético; las mejoras pueden estar basadas en el análisis de los datos históricos de operación. Como se argumentó arriba, las mediciones en los procesos presentan errores por diferentes fuentes [4], generando discrepancias en los balances de energía y de masa. La reconciliación de datos hace posible realizar un ajuste a los valores reportados por los sensores de los hornos industriales, permitiendo la estimación adecuada de sus futuros desempeños [7].

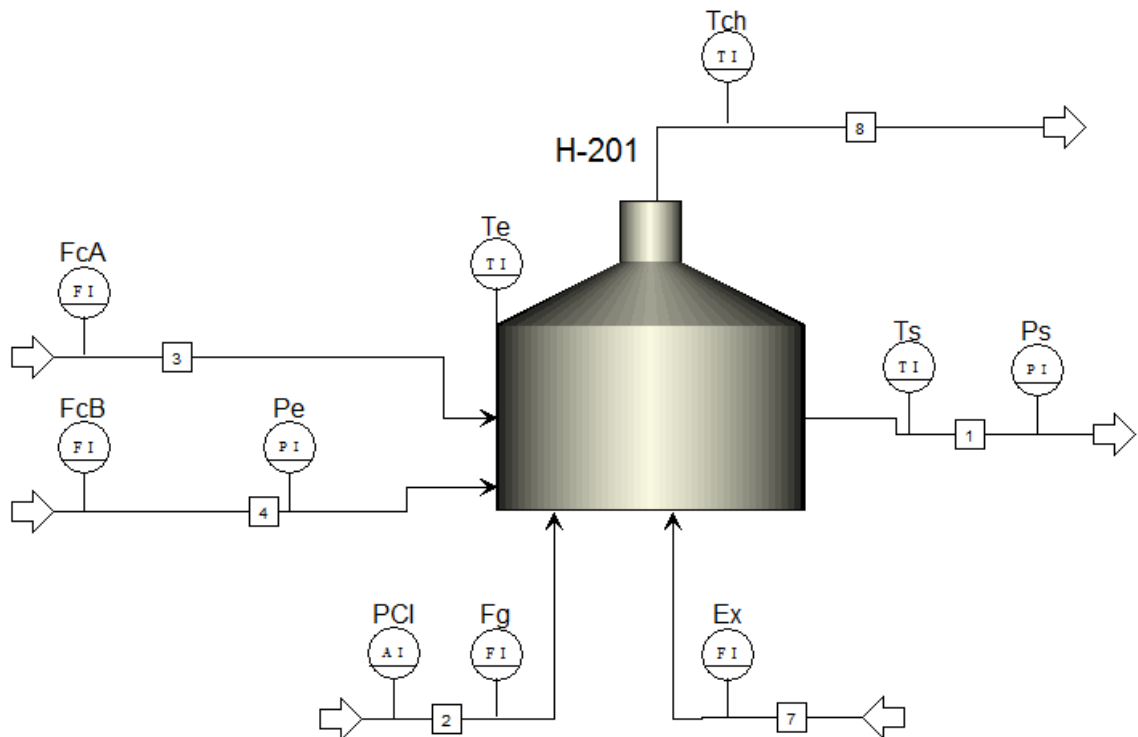
El presente documento se dirige a la evaluación energética del horno H-201 de la unidad U-200 de la GRB por medio de la técnica de reconciliación de datos para identificar mediciones con fuentes de error.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. HORNO DE REFINERÍA

En la industria, se entiende como horno a un recinto cerrado en el que se transfiere calor por los mecanismos de radiación y convección. Los hornos de refinería son el principal equipo de calentamiento y se encuentran ligados a operaciones como la destilación al vacío, cracking térmico, entre otros [3]. En la GRB, el horno H-201 está ubicado en la unidad U-200, la cual procesa 83 kbpd. La operación del horno H-201 comienza cuando recibe el crudo efluente del desalador D-222, representado por las corrientes 3 y 4 de la Figura 1. El crudo caliente de salida parcialmente vaporizado, representado por la corriente 1, se dirige hacia la torre de destilación atmosférica T-201. El combustible del horno corresponde en gran proporción a productos livianos de la destilación [7].

Figura 1. Instrumentación del horno H-201 de la unidad U-200.



Por otra parte, el balance de energía de un horno está definido de la siguiente forma:

$$Q_{Suministrado} = Q_{Absorbido} + Q_{Perdido} \quad (\text{Ec. 1})$$

El término $Q_{Perdido}$ hace referencia a las pérdidas de energía a través de las paredes del horno y los gases de combustión que salen por la chimenea sin intercambiar todo su calor [8], [9]. Asimismo, la eficiencia de un horno se define como la relación entre el calor total absorbido por la sustancia a calentar y el calor total entregado por el combustible, [9]:

$$\frac{Q_{Absorbido\ Crudo}}{Q_{Gas\ Combustible}} = e \quad (\text{Ec. 2})$$

El valor de la eficiencia puede ser estimada utilizando regresiones reportadas en la literatura. Rubio en 2017 reporta que la eficiencia es una función de la temperatura de chimenea [10], [11].

1.2. ERRORES DE MEDICIÓN

Dos tipos de errores pueden ser identificados en los datos de planta: los *errores aleatorios* y los *errores sistemáticos*. Los errores aleatorios son pequeñas variaciones respecto al valor real debidos principalmente a la fluctuación típica de un proceso y/o la misma variación inherente de cualquier instrumento de medición. En cuanto a los errores sistemáticos, estos tienen una magnitud mucho mayor la cual puede deberse a una inadecuada calibración o mal funcionamiento de los instrumentos, como también a fugas en los procesos. A este último tipo de error también se les conoce como *error grueso* [1]. A diferencia de lo errores aleatorios, los errores sistemáticos pueden ser evitados, al menos temporalmente, realizando una manutención e instalación adecuada en la instrumentación.

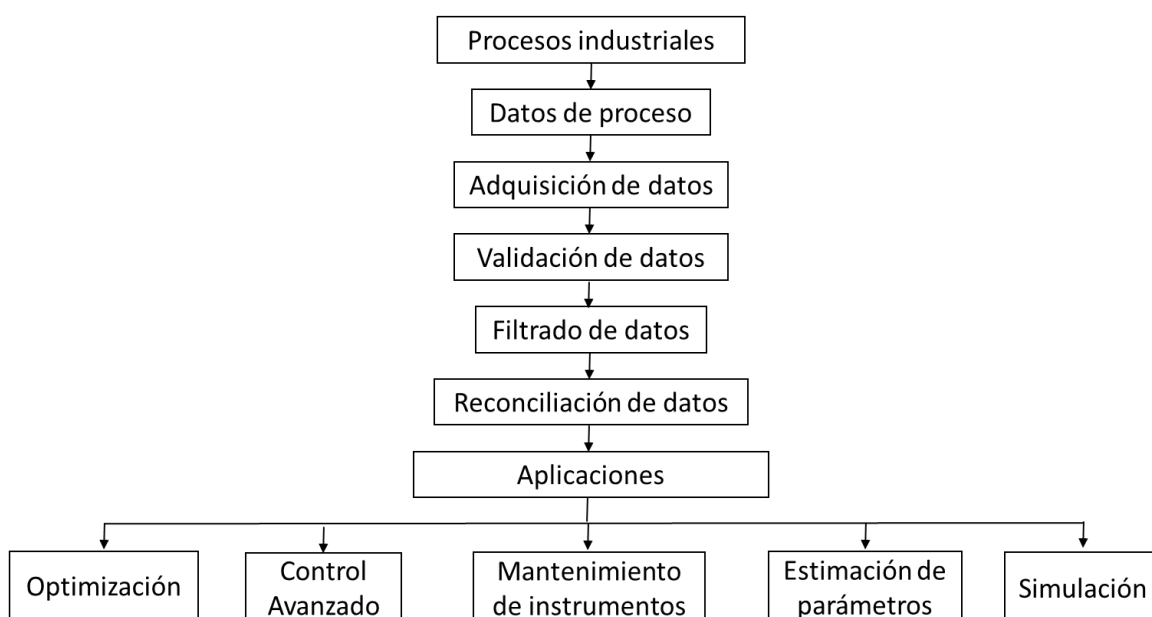
La existencia de errores de medición conduce a interpretaciones y estimaciones deficientes de los desempeños de los procesos y de los flujos de productos obtenidos. Lo anterior puede llevar a la planta a un estado de pérdidas económicas o en el peor de los casos a un régimen de operación inseguro [1], [12].

Ya que las mediciones siempre contienen algún tipo de error, es necesario corregir los datos históricos para reportar valores adecuados representativos del proceso. La aplicación de técnicas de reconciliación de datos permite realizar un ajuste a las mediciones de tal forma que cumplan las restricciones de masa y/o energía asociadas al proceso [13]. Haciendo posible también, la estimación de variables no medidas [3].

1.3. RECONCILIACIÓN DE DATOS

El avance de la tecnología en la industria en los últimos años, va de la mano también con el desarrollo de sistemas de recopilación de datos en los procesos químicos, con lo cual una gran cantidad de mediciones están disponibles en un periodo de muestreo relativamente corto. Sin embargo, el enorme volumen de datos a procesar requiere de técnicas adecuadas para su validación, lo cual ha impulsado la investigación en los últimos 30 años en el área de reconciliación de datos [1]. En la Figura 2 se ilustra el proceso de la reconciliación de datos de una planta junto con sus aplicaciones posteriores.

Figura 2. Recolección de datos en línea y sistema de acondicionamiento Acondicionado o modificado de Narasimhan [3].



El ajuste necesario a realizar a las mediciones para compensar la presencia de errores aleatorios es un problema de optimización, en el cual se minimiza una función objetivo con restricciones lineales o no lineales, usualmente esta función es la de mínimos cuadrados restringidos, según:

$$\text{Min: } \sum_{i=1}^9 w(i) * (Y(i) - X(i))^2 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde, $Y(i)$ es el vector de variables medidas, $X(i)$ es el vector de variables reconciliadas y $w(i)$ es el vector de ponderación. La función objetivo está sujeta

usualmente a restricciones de balances de energía y de masa. El problema de optimización puede ser resuelto utilizando métodos no lineales como el gradiente reducido generalizado, codificado en el *Solver* de Excel, o los métodos Quasi-Newton codificados en el *Toolbox* de optimización de Matlab.

Los valores reportados en la solución óptima, llamados valores reconciliados, resultan consistentes con las relaciones atribuidas entre las variables. Para mejorar la efectividad de esta técnica, es recomendable la reducción de los errores gruesos en un problema de optimización posterior, ya que estos pueden ocasionar que los valores reconciliados sean incluso más imprecisos que los medidos y además propagarse a otras variables, ocasionando el efecto conocido "Smearing Effect" [3].

Existen múltiples documentos en los cuales se hace estudio de esta técnica para diferentes aplicaciones, por ejemplo, para obtener datos confiables para las redes de distribución de gas natural, se desarrolla una herramienta que detecta la falla de equipos de medición en la cual se hace uso de la función de mínimos cuadrados, así como posibles fugas en las redes del gas [12], también para encontrar el óptimo operacional de un reformador catalítico de nafta donde se reducen las pérdidas energéticas haciendo uso de la Distribución Gaussiana como función objetivo [14], hasta metodologías que aplican la reconciliación en condiciones de operación múltiples logrando valores precisos y útiles, a pesar de la presencia de errores gruesos, para optimizar un proceso de separación de aire haciendo uso del Estimador de Correntropía como función objetivo, el cual es un criterio que representa de buena forma la incertidumbre y dispersión de las mediciones[15].

2. METODOLOGÍA

En primera instancia se realizó la recolección de los datos de la planta los cuales provinieron de sensores de campo, laboratorio o registro de los operadores. A su vez, el conjunto de datos recopilados fue validado de forma que no hubiera registros de caracteres no numéricos, correspondientes al registro de sensores fuera de línea. Luego con el criterio estadístico y el algoritmo planteado en la Figura 4 se realizó la identificación de los estados estacionarios de operación presentes en la temperatura de salida de crudo, como variable de referencia. Con la base de datos numérica y en cada estado estacionario identificado se aplica el criterio de los cuartiles para identificar y eliminar los valores atípicos. Después de una revisión bibliográfica se planteó la función objetivo a minimizar junto con las relaciones entre las variables medidas con base en el balance de energía como restricciones al proceso. Posteriormente se estimó el valor del poder calorífico del crudo a partir de las restricciones del proceso planteadas para completar el problema de optimización y realizar la reconciliación de datos. Este procedimiento se resume en la Figura 3.

Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

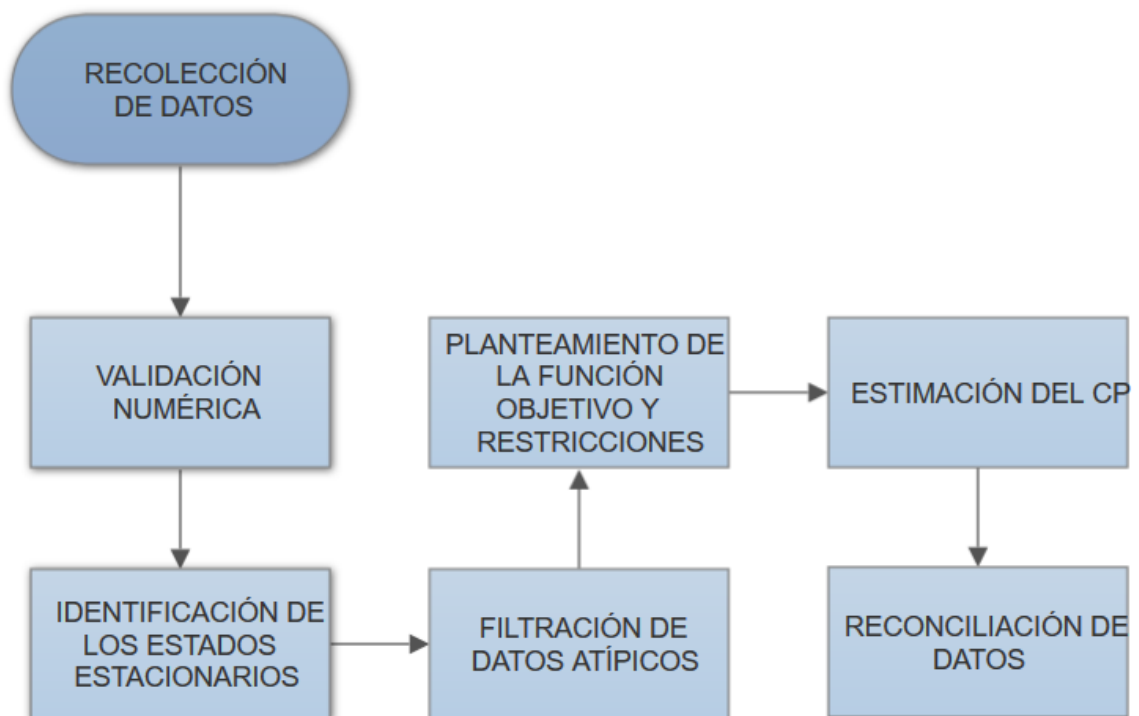
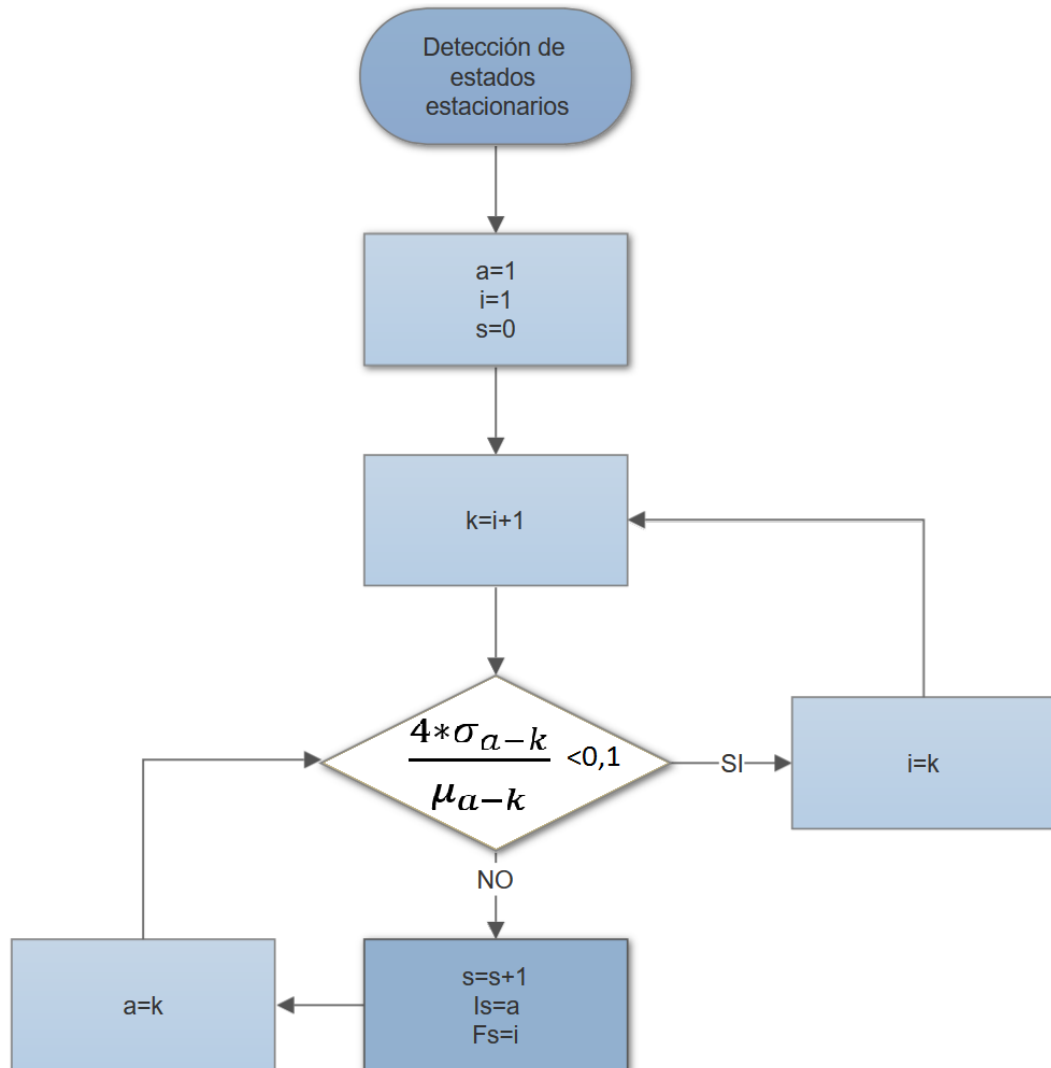


Figura 4. Diagrama de flujo del criterio de identificación de estados estacionarios.



Donde:

I: es un contador.

K: es un contador.

S: es el contador del número de estados estacionarios.

A: es el valor inicial del s-ésimo estado estacionario correspondiente al a-ésimo componente del vector de valores de la variable de referencia.

Is: es el vector del valor inicial del s-ésimo estado estacionario.

Fs: es el vector del valor final del s-ésimo estado estacionario.

a-K: es el intervalo en el que se evalúa el criterio en cada iteración.

μ : es el promedio del intervalo de datos a-K

σ : es la desviación estándar del intervalo de datos a-K

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 DATOS HISTÓRICOS

El horno H-201 cuenta con 7 sensores los cuales toman mediciones de las variables: presión de salida de crudo (Ps), temperatura de salida de crudo (Ts), flujo de gas combustible (Fg), flujo de crudo por el serpentín A (FcA), flujo de crudo por el serpentín B (FcB), presión de entrada (Pe) y temperatura de entrada de crudo (Te); cada cinco (5) minutos de operación, registrando el valor de la variable junto con el intervalo de tiempo de 5 minutos con fecha y hora. Para el H-201 se tienen registros desde el 12/08/2013 - 24:00:00 al 17/02/2016 - 23:55:00 con un total de 264.960 datos de operación por cada una de las 7 variables medidas. Adicionalmente, para cada fecha se tienen también 4 variables medidas obtenidas fuera del equipo, en laboratorio: poder calorífico inferior del gas combustible (PCI), exceso de oxígeno (Ex), temperatura de los gases de chimenea (Tch) y grado API (API). La Tabla 1 resume las variables medidas.

Tabla 1. Variables de proceso medidas.

Variable	Ps	Ts	Fg	FcA	FcB	Pe	Te	PCI	Ex	Tch	°API
Unidades originales	PSI	°F	kft ³ /h	Barril/dia	Barril/dia	PSI	G.F.	BTU/ft ³	%	°F	-
Unidades utilizadas	PSI	°C	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	PSI	°C	kJ/m ³	%	°F	-

La validación de los datos recopilados reportó múltiples periodos con registros vacíos y con valores alfabéticos, especificando el estado fuera de línea del sensor. Estos periodos de tiempo fueron eliminados de la base de datos.

3.2 ESTADOS ESTACIONARIOS

La identificación de los estados estacionarios para el H-201 se efectuó con base en la temperatura de salida de crudo, ya que es la variable que generalmente se desea controlar y cuyo valor influye en el consumo energético del equipo. Para esta identificación se tomó un valor normalizado de la desviación estándar del grupo de datos como máximo, según:

$$\frac{4*\sigma}{\mu} < 0,1 \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

σ : es la desviación estándar

μ : es el promedio de la variable

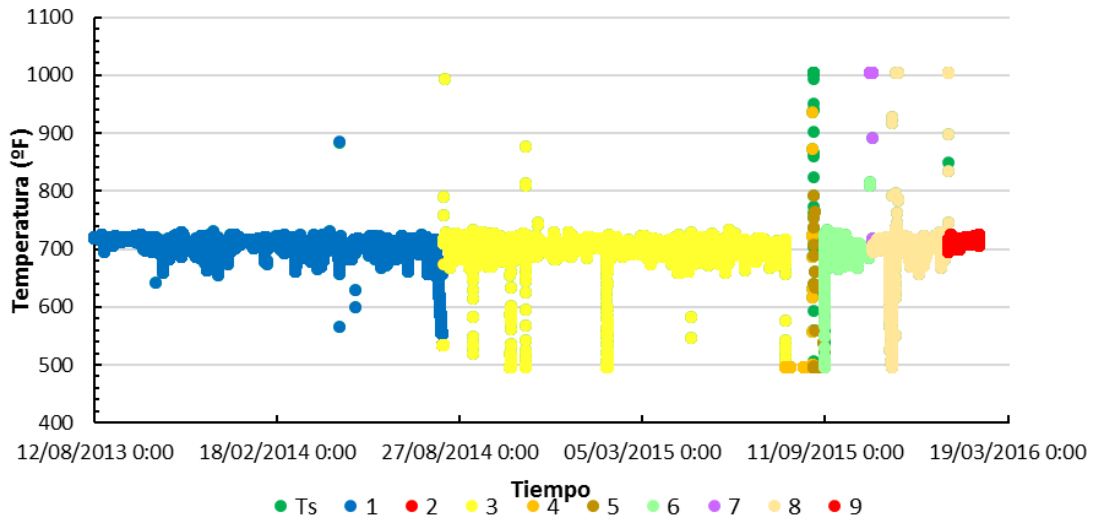
Los estados estacionarios identificados por medio del criterio en (Ec. 4) se reportan en la Tabla 2. La Tabla 2 muestra los 9 estados estacionarios detectados en los datos de la variable Ts, para los cuales se considera que el H-201 opera en estado estable.

Tabla 2. Resultados de la identificación de estado estacionario.

#Estado	Fecha inicial	Fecha final	Número de datos	Media	Varianza	Desviación Estándar	Criterio ¹
1	12/08/2013 0:00	09/08/2014 19:20	104465	706,1	311,5	17,7	10,0%
2	09/08/2014 19:25	10/08/2014 11:05	189	534,9	104,1	10,2	7,6%
3	10/08/2014 11:10	01/08/2015 5:20	101157	702,6	308,2	17,6	10,0%
4	01/08/2015 5:25	29/08/2015 10:45	3881	495,5	133,1	11,5	9,3%
5	29/08/2015 14:30	10/09/2015 1:30	3301	495,9	153,2	12,4	10,0%
6	10/09/2015 9:35	27/10/2015 19:50	13660	699,5	302,0	17,4	9,9%
7	27/10/2015 19:55	30/10/2015 16:50	828	1003,1	524,1	23,0	9,1%
8	30/10/2015 16:55	17/01/2016 2:00	22574	707,8	310,2	17,6	10,0%
9	17/01/2016 8:50	17/02/2016 23:55	9110	713,6	20,0	4,5	2,5%

¹ Hace referencia al criterio de detección de estado estacionario en el algoritmo dado por la Ecuación 4.

Figura 5. Intervalos de tiempo con operación estable del horno H-201.



En la Figura 5 se observan los intervalos de tiempo que forman los estados estacionarios identificados según el criterio establecido (4), observándose que a pesar del aparente tamaño del intervalo 9 en rojo, contiene más de 9000 datos representando cerca de un mes de operación.

Antes de aplicar la reconciliación, se aplica un filtro con la finalidad de eliminar datos atípicos, conocidos también como *outliers*, los cuales son un grupo de datos que son estadísticamente mucho menores o mayores a los demás en el intervalo estacionario (Figura 6); la eliminación de los atípicos puede mejorar de forma significativa los ajustes y las predicciones [3], [16]. El criterio para la eliminación de los datos atípicos tomado corresponde al de los cuartiles. Las Figuras 6 y 7 presentan el estado estacionario resultante de la aplicación del criterio de los cuartiles sobre los intervalos de tiempo identificados.

Figura 6. Estado estacionario.

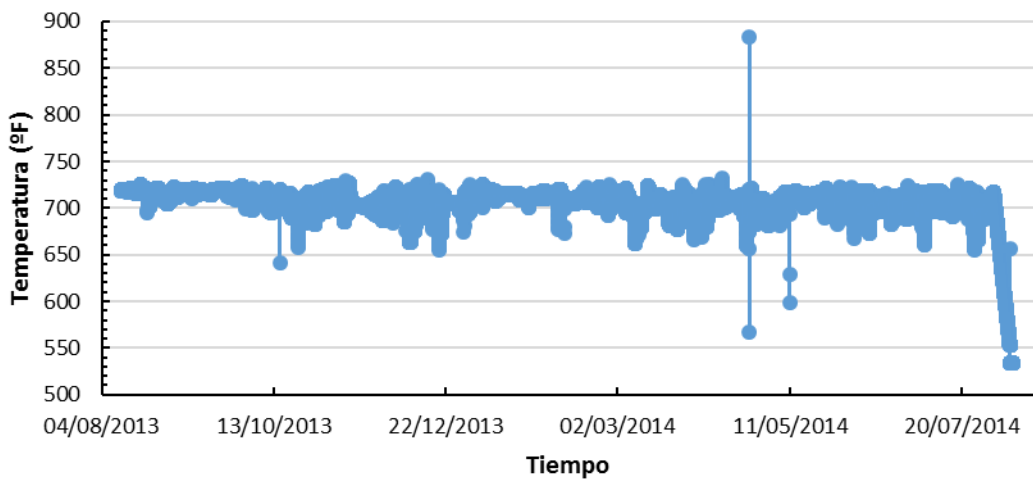
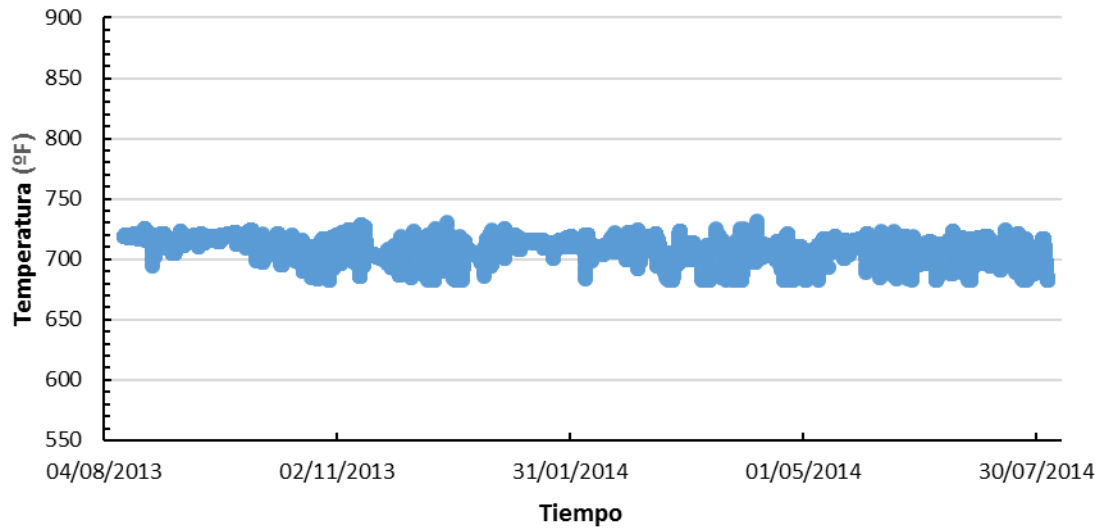


Figura 7. Datos del EE después de la aplicación del filtro.



Así, se considera que los errores presentes después de la rectificación realizada están aleatorizados y siguen una distribución normal; esta consideración es ampliamente usada ya que permite hacer uso de la función de minimización de mínimos cuadrados como función objetivo a minimizar [3].

3.3 RECONCILIACIÓN

Para la reconciliación se definen como restricciones las siguientes ecuaciones,

1. $\frac{Q_{\text{Absorbido Crudo}}}{Q_{\text{Gas Combustible}}} = e$
2. $Q_{\text{Absorbido Crudo}} = (F_{ca} + F_{cb}) * C_p * \Delta T$
3. $Q_{\text{Gas Combustible}} = F_g * PCI$
4. $e = (0.98 - 9.25 * 10^{-5} * T_{ch}^{1,128}) * (1 + \frac{Ex}{100})^{0,748})^2$

Asimismo, la estimación del C_p del crudo se efectúa por medio de la expresión propuesta por Watson y Nelson reportada en la bibliografía y ampliamente utilizada y revisada para la estimación del C_p de fracciones de crudo [17]:

$$C_p = 4,185 * (0,35 + 0,055Kw) * (0,3065 - 0,16734 * S + (1,467 * 10^{-3} - 5,508^{-4} * S) * T) \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde, Kw es el Factor de caracterización de Watson, S es la densidad relativa estándar del crudo, T es la temperatura promedio del crudo (K) y C_p el calor específico (kJ/kg*K). Con esta expresión se obtiene un valor de C_p promedio

² Correlación para la estimación de la eficiencia de un horno reportada por Rubio [10], [11].

de 1564.51 kJ/m³, el cual difiere del Cp obtenido por medio de las restricciones (2702,77 kJ/m³). Con esto, una regresión propia para los crudos colombianos es recomendable para la predicción de valores confiables para esta propiedad.

El proceso de reconciliación se efectúa por medio del siguiente problema de optimización tomando como función objetivo la Ec 3,

Sujeto a:

$$\frac{Q_{Absorbido\ Crudo}}{Q_{Gas\ Combustible}} = e$$

$$Q_{Absorbido\ Crudo} = Vc * Cp * \Delta T$$

$$Q_{Gas\ Combustible} = Vgc * PCI$$

$$e = (0.98 - 9.25 * 10^{-5} * Tch^{1,128}) * (1 + \frac{Ex}{100})^{0,748}$$

Donde, Y(i) es el vector de variables medidas, X(i) es el vector de variables reconciliadas, w(i) es el vector de ponderación. Reemplazando 2, 3 y 4 en 1 se tiene la nueva restricción del proceso:

$$(FcA + FcB) * Cp * (Te - Ts) - (0.98 - 9.25 * 10^{-5} * Tch^{1,128}) * (1 + \frac{Ex}{100})^{0,748} * Fg * PCI = 0 \quad (Ec. 6)$$

Para cada variable se escoge el inverso de la varianza (Var) como factor de ponderación en la reconciliación de cada estado estacionario; respecto al Cp, ya que no es una variable medida, se escoge una varianza de 0,01. En la Tabla 3, se resumen estos cálculos donde los valores medios son los usados para la reconciliación.

Tabla 3. Valores de las variables en el EE sin reconciliar.

Variable	Abreviatura	1/Var (ponderación)	Valor medio	Unidad
1	Tsc	0,05	648,99	K
2	Fg	132,94	1,11	m ³ /s
3	FcA	122906,61	0,04	m ³ /s
4	FcB	108760,02	0,04	m ³ /s
5	Tec	0,01	501,26	K
6	PCI	2,63E-08	36235,21	kJ/m ³
7	Ex	5,87	3,19	%
8	Tch	0,01	737,34	°F
9	Cp	100	-	kJ/m ³ *K

El proceso de reconciliación aplicado sobre el primer estado estacionario puede ser analizado en la Tabla 4. Como se observa en la Tabla 4, el Cp promedio utilizado hace referencia a la regresión de Watson y Nelson (Ec. 5). El error en

el valor de Cp es propagado a todas las demás variables (Smearing Effect), afectando principalmente al PCI con una gran variación respecto a su valor medido (mayor coeficiente de ponderación). Con esto el Cp se obtiene a partir de (Ec. 6) escogiendo un intervalo aleatorio de tiempo dentro del respectivo estado. Los valores para la estimación del Cp para el EE se resumen en la Tabla 5. Con el valor de Cp estimado se obtuvieron, de igual forma que para la primera reconciliación realizada, los datos tabulados en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la reconciliación de datos en el EE utilizando la correlación de Watson y Nelson para crear redundancia.

	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error ¹
Tsc	1	0,049467	648,99	650,03	0,16%
Fg	2	132,935891	1,11	1,06	5,06%
FcA	3	122906,610624	0,04	0,04	1,83%
FcB	4	108760,020283	0,04	0,04	2,11%
Tec	5	0,010386	501,26	496,30	0,99%
PCI	6	0,000000	36235,21	23444,38	35,30%
Ex	7	5,867204	3,19	3,19	0,06%
Tch	8	0,005447	737,34	737,78	0,06%
Cp	9	100,00	1564,51	1564,51	0,00%
Valor de la Función²	-	-	-13879,33	0,00	5,19

Tabla 5. Estimación del Cp como variable independiente en base a un día de operación.

ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE								
DÍA ALEATORIO : 14/01/2014	Ts	Fg	FcA	FcB	Tec	PCI	EX	Tch
Promedio:	714,95	134,54	22753,74	22227,75	458,08	911,33	2,77	736,20
Convertido:	652,57	1,058	0,042	0,041	509,86	33935,82	2,77	736,20

¹ Se computa la diferencia absoluta porcentual entre las columnas "Sin reconciliar" y "Reconciliado" dividido en "Sin reconciliar", para todas las tablas con esta forma.

² Para la columna "Sin reconciliar" y "Reconciliado" la función a la que se hace referencia es al valor de la restricción (7), en la columna "%Error" la función referida es la función objetivo, para todas las tablas con esta forma.

Restricción:	0,000							
Cp estimado:	2487,57							

Tabla 6. Resultados de la reconciliación de datos del EE.

	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,05	648,99	649,24	0,04%
Fg	2	132,94	1,11	1,10	1,12%
FcA	3	122906,61	0,04	0,04	0,43%
FcB	4	108760,02	0,04	0,04	0,50%
Tec	5	0,01	501,26	500,08	0,24%
PCI	6	0,00	36235,21	34211,89	5,58%
Ex	7	5,87	3,19	3,19	0,01%
Tch	8	0,01	737,34	737,44	0,01%
Cp	9	100,00	2487,57	2487,57	0,00%
Valor de la función	-	-	-2624,01	0,00	0,15

Según los resultados de la reconciliación para el EE, los porcentajes de error resultan bajos para el valor de Cp estimado por medio de (7). Debido a los bajos errores, los valores para Ts, Fg, FcA y FcB, presentan mayor validez para representar el EE. Sin embargo, dado su gran tamaño (cerca de un año), se decide seccionar este estado estacionario en diferentes sub estados tomados por meses; *i.e.* se harán reconciliaciones de los datos con la misma metodología, pero dividiendo el EE en 2, 3, 4, 6 y 12 intervalos de aproximadamente 6, 4, 3, 2 y 1 meses, respectivamente.

El cambio de la función objetivo en los diferentes periodos de reconciliación se debe a la ponderación de las variables, la cual difiere en cada intervalo escogido dado que la desviación estándar cambia para cada grupo de datos además del ajuste realizado. Como se observa en la Tabla 7, la función objetivo tiene el menor valor cuando se realiza la reconciliación en dos periodos, es decir que los datos medidos sufren un menor ajuste para cumplir la restricción del proceso, respecto a los demás periodos de reconciliación. Esto se debe a que a más de dos periodos se presenta una dispersión mayor en los datos; en primera instancia, esto podría indicar que existen dos estados estacionarios diferentes, los cuales representan la operación de la unidad.

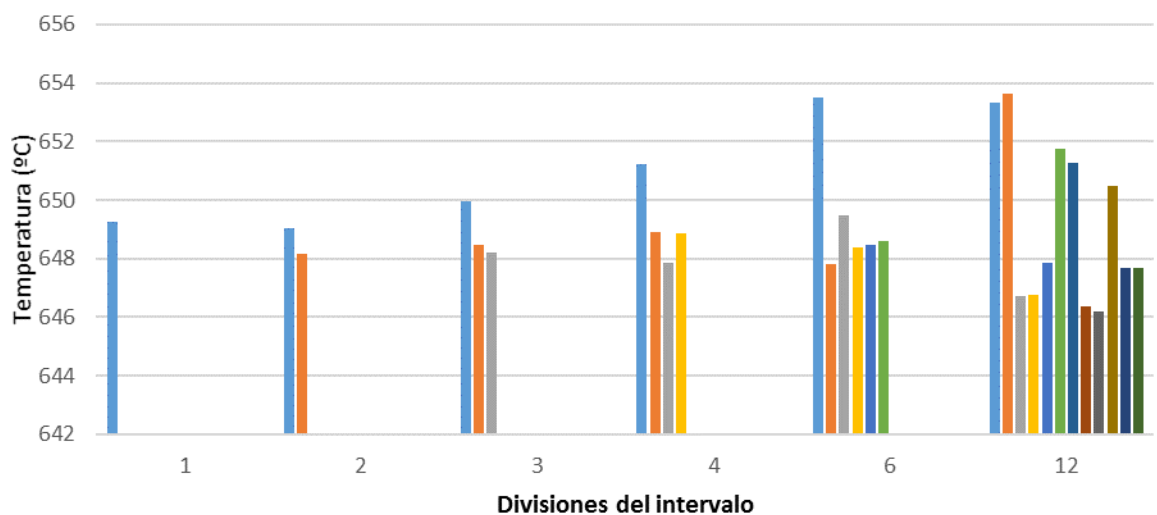
Tabla 7. Valor de la función objetivo promedio en función del número de periodos de reconciliación.

Número de periodos	Valor de la función objetivo
1	0,15
2	0,00
3	0,06
4	0,21
6	0,45
12	0,26

Para fines prácticos en el análisis de datos, se redefinen las variables FcA y FcB como Fc, el cual equivale a la suma algebraica de las mencionadas anteriormente y se entiende como el flujo total de crudo que es calentado por el horno.

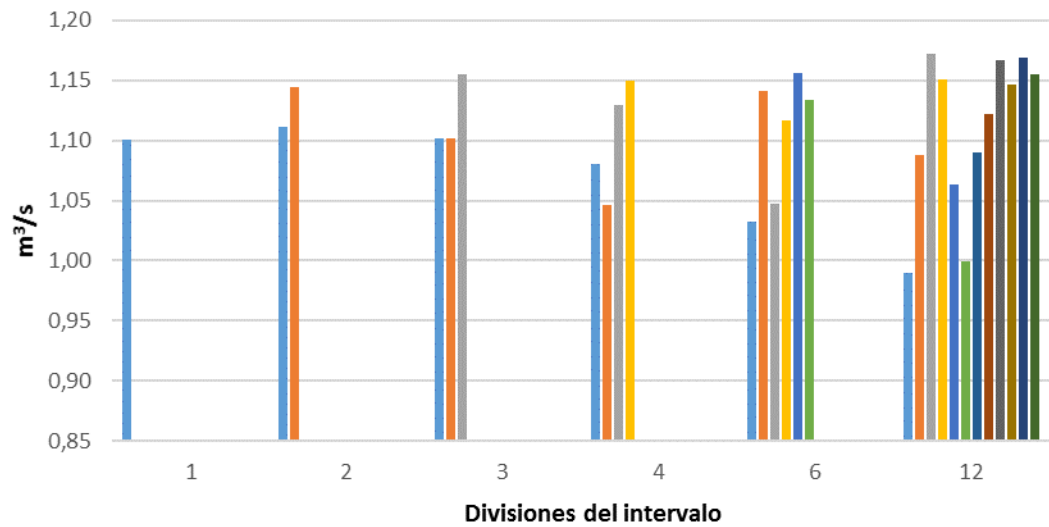
Como se mencionaba anteriormente, es posible que existan dos estados estacionarios dentro del EE, debido a diferentes modos de operación en la unidad. Estos modos pueden corresponder a la forma de operación de la unidad U-200: Modo de Crudo y Modo Viscosreductora. Como se observa en la Figura 6, a medida que se realizan más divisiones es posible identificar de manera sencilla en la reconciliación, los estados de operación del horno a diferentes temperaturas con una diferencia aproximada de 7 grados centígrados entre los modos de Crudo y Viscosreductora.

Figura 8. Datos reconciliados de Ts.



En la Figura 9 se observan los datos reconciliados de la variable F_g , para la cual se aprecia respecto a la Figura 8 una relación contraria al incremento o decremento de la temperatura. Es decir, en el intervalo en que sube la temperatura de operación el flujo de crudo se reduce y viceversa. Así, esto refleja el hecho de que, ante una lectura en la planta, si baja la temperatura de salida del crudo del horno, los operarios aumentan el flujo de gas combustible para corregir esta disminución y aumentar la temperatura de salida del crudo.

Figura 9. Datos reconciliados de F_g .



Se presta especial atención a las variables F_g , F_c y T_s , ya que se pueden manipular y/o controlar en el proceso, y además pueden determinar el modo de operación del horno. Y la eficiencia, estimada a partir de las variables Ex y Tch con la ecuación recomendada y reportada por [10] y [11], como variable de gran interés en los procesos de transferencia de calor. Para observar más de cerca el comportamiento de estas variables de interés observamos en las Figuras 10, 11, 12 y 13 alguna relación visual en la forma en que varían cada periodo.

Figura 10. Datos reconciliados de Ts en 12 divisiones del EE.

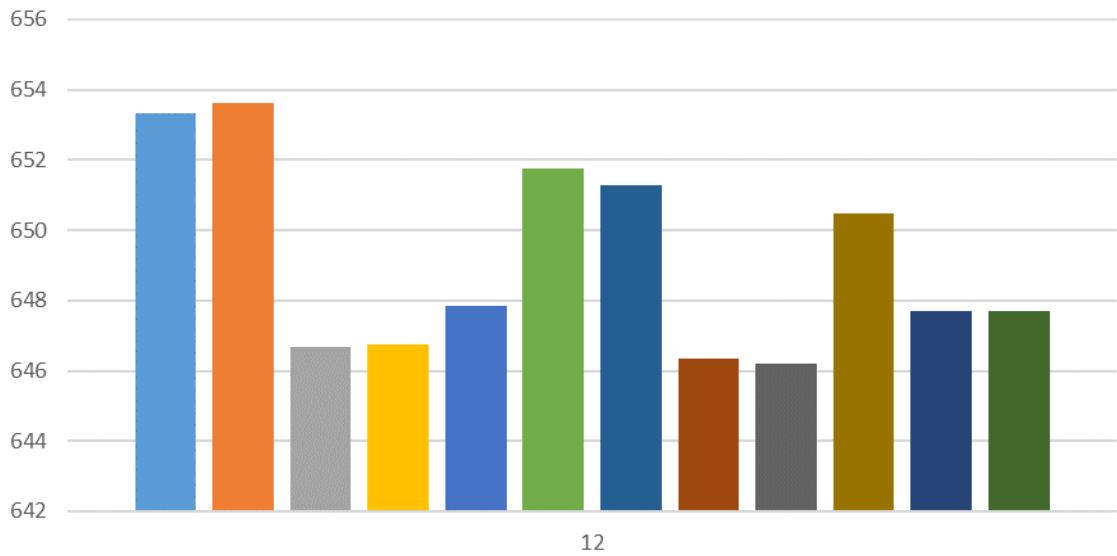
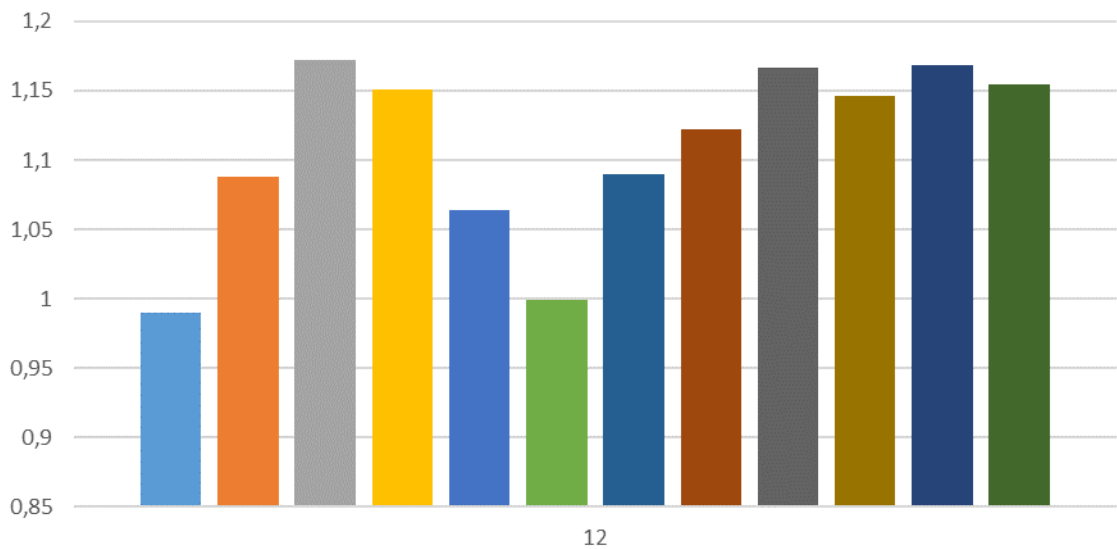


Figura 11. Datos reconciliados de Fg en 12 divisiones del EE.



En las Figura 10 y 11 se observan los datos reconciliados de las variables Ts y Fg, respectivamente. Para la cual se aprecia más fácilmente una relación inversa al aumentar Ts, se reduce Fg y viceversa. En la Figura 13 se observan los datos calculados a partir de las variables Tch y Ex reconciliadas, encontrándose que varían entre el 81,3% y el 82,2%, observándose una relación con los datos de Fc en la Figura 12. Teniendo en cuenta el consumo energético de la U-200, considerando el consumo de los hornos como el 80% de ese valor, junto con un 50% de este último como el consumo del H-201, se tendría hasta un ahorro de cerca de 30.000\$USD/año al operar con la menor carga de crudo registrada.

Figura 12. Datos reconciliados de Fc en 12 divisiones del EE.

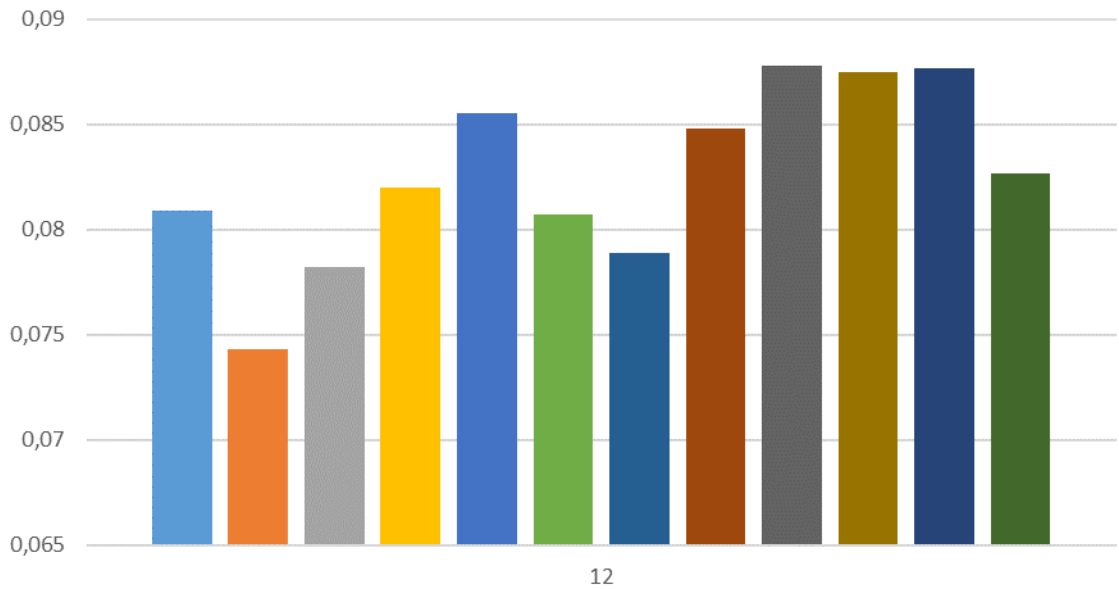
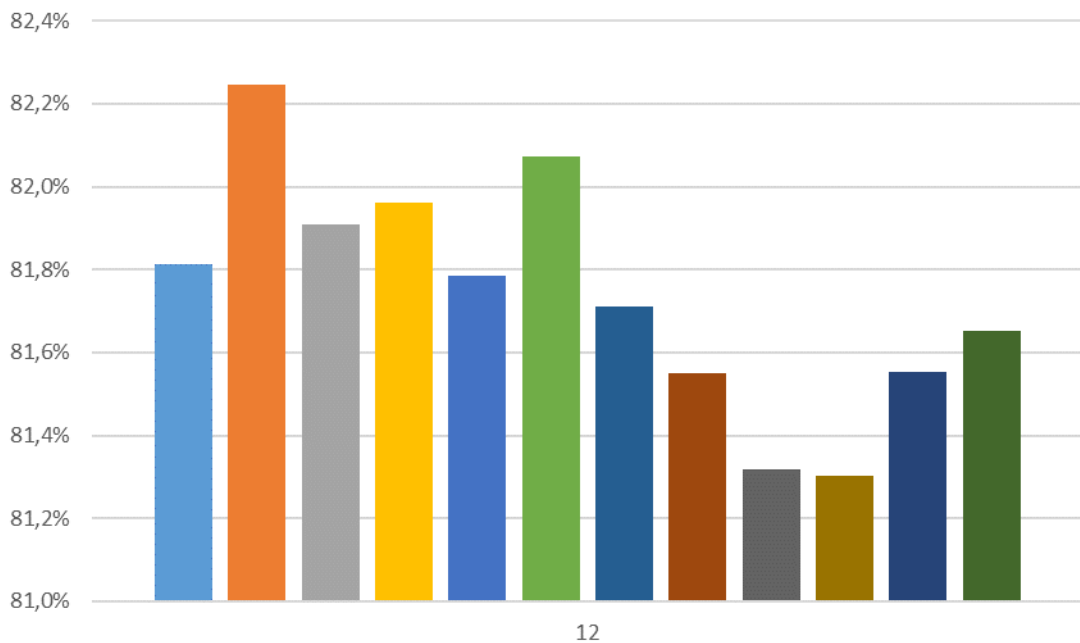


Figura 13. Datos reconciliados y calculados de eficiencia en 12 divisiones del EE.



Para determinar cómo se comporta la relación entre estas variables a lo largo del intervalo, se efectúa un “Análisis de correlación” entre ellas, haciendo uso la herramienta informática Microsoft Excel 2017 cuyos resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8. Análisis de correlación de las variables de interés.

Variable	E	Fg	Fc	Ts
E	1			
Fg	-0,47	1		
Fc	-0,84	0,34	1	
Ts	0,45	-0,72	-0,55	1

En la Tabla 8 se encuentran diferentes correlaciones entre estas variables de interés; respecto a la eficiencia del horno, se encuentra una alta correlación con el flujo de crudo. En la Figura 14 se observa la relación existente en estas variables Fc y Eficiencia mediante una regresión cuadrática con la ecuación de la curva mostrada en la misma figura, y con un $R^2=0,7143$. Es válido afirmar que ajuste en estas dos variables sería mayor, pero se ve reducido por el cambio en las propiedades del crudo alimentado al horno cuyas perturbaciones se atribuyen a las variables Te y Cp.

En cuanto al flujo de gas combustible, se encuentra que una regresión cuadrática alcanza un coeficiente de determinación de $R^2= 0,5381$. Esta regresión mostrada en la Figura 15, indica que cuando ocurre un aumento en la temperatura de salida del crudo, el flujo de gas combustible alimentado es disminuido, evidenciando la estrategia de control aplicada para el horno. Tal como en el caso anterior, este ajuste del modelo dado por R^2 sería mayor pero variables como el PCI que sufre las mayores perturbaciones a lo largo de todos los intervalos lo reducen, junto con el Cp y la Te que encierran el cambio en las propiedades del crudo que ingresa al equipo.

Figura 14. Eficiencia contra Fc en 12 divisiones del EE.

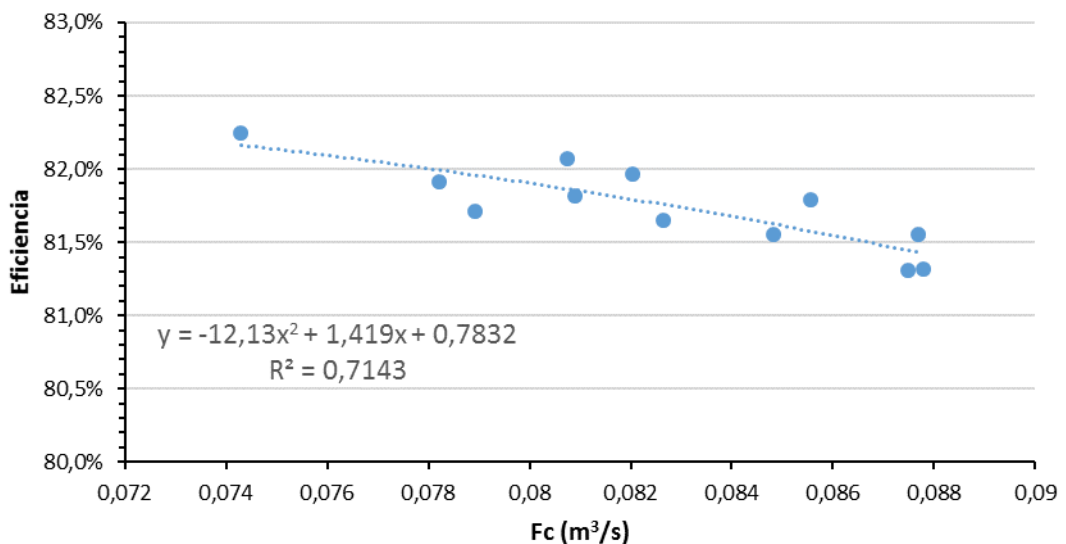
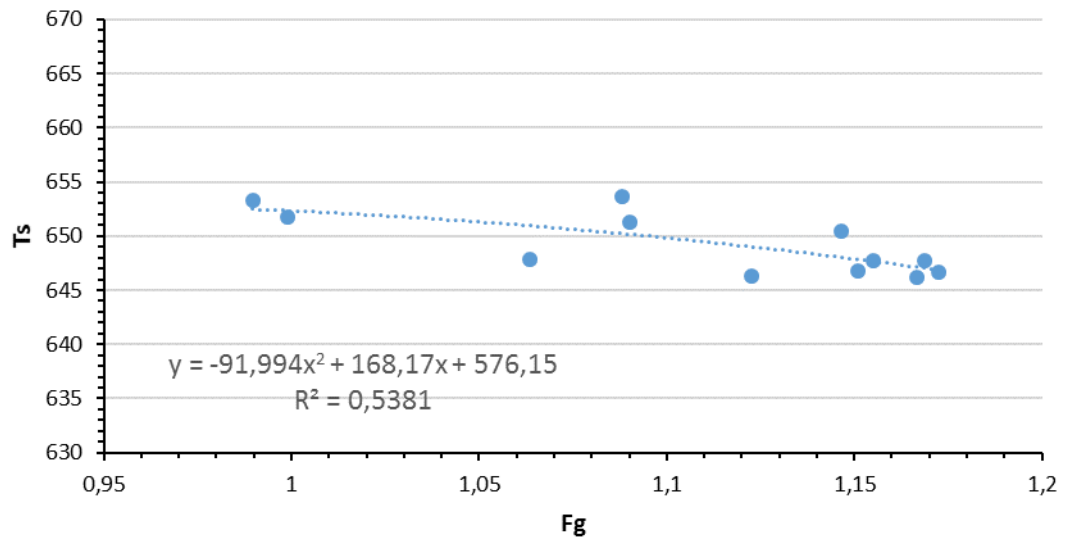


Figura 15. Ts contra Fg en 12 divisiones del EE.



4. CONCLUSIONES

Los resultados de la reconciliación de datos del horno H-201 muestran que, al aumentar la alimentación de crudo al horno, se reduce la eficiencia de la transferencia de calor, este comportamiento es consecuencia de un ajuste tardío en el flujo de alimentación del gas combustible y la variación en el poder calorífico del mismo. De otro lado, si se opera a caudales de crudo menores como el que se operó durante el segundo periodo del intervalo de 12 divisiones, se podría obtener una mejora en la eficiencia de la transferencia de calor de un 0,9% respecto al mayor flujo operado en el décimo periodo. No obstante, el incremento en la eficiencia se ve opacada por las menores cargas procesadas en la unidad.

También, se encuentra una alta correlación inversa con la temperatura de salida del crudo. Es decir, que cuando ocurre un aumento en la temperatura de salida del crudo, el flujo de gas combustible alimentado es disminuido, evidenciando el control ejercido por los operadores y/o sistema de control.

Variables como el Cp, la Te y el PCI sufren perturbaciones a lo largo del tiempo las cuales se ven representadas en las perturbaciones sufridas en las propiedades del crudo y gas combustible que ingresa al equipo, variando la cantidad de gas combustible requerido para calentar la misma cantidad de crudo en un mismo estado de operación y afectando también la correlación entre la eficiencia y el flujo de crudo en el horno, por lo cual se debe dar importancia a la medición más frecuente y completa de estas variables ya que afectan de forma directa el gasto energético del equipo.

5. RECOMENDACIONES

- Continuar con el proceso de reconciliación en otros equipos de refinería.
- Diseñar una herramienta que permita la reconciliación de los datos de proceso para cualquier equipo según las ecuaciones definidas por el usuario.
- Se debe dar importancia a la medición más frecuente y completa de las variables Cp, Te y PCI ya que afectan de forma directa el gasto energético del equipo.

REFERENCIAS

- [1] Data Processing and Reconciliation for Chemical Process Operations. Process systems engineering Vol. 2. Academic Press. 2000. Jose A. Romagnoli. Mabel Cristina Sánchez.
- [2] Bagajewicz M. Smart Process Plants: Software and Hardware for Accurate Data and Profitable Operations. 4 ed McGraw Hill. 2010
- [3] Narasimhan shankar, jordache cornelius. Data reconciliation and gross error detection. And intelligent use of the process data. Gulf Publishing. 2000.
- [4] BP, 2017 Energy Outlook. <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017.pdf>
- [5] ExxonMobil, 2017 Outlook for Energy: A View to 2040, December 2016
<http://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/outlook-for-energy/2017/2017-outlook-for-energy.pdf>
- [6] Institute of Energy Economics Japan, Asia/World Energy Outlook 2016, Tokyo, Japan, October 2016
<http://eneken.ieej.or.jp/data/7007.pdf>
- [7] Manuel S. Salazar. Análisis de datos de consumo energético de la unidad de refinación de crudos U-200 del complejo industrial Barrancabermeja: Regresión lineal múltiple. 2015.
- [8] Cálculo riguroso de eficiencia de hornos de proceso. Sebastian Biset, Martin E. Ferreyra. Oil Combustibles S.A. Refinería de SanLorenzo. VII CAIQ 2013 y 2das JASP.AAIQ, Asociación Argentina de Ingenieros Químicos – CSPQ. http://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/04_025/papers/04a/04a_1406_538.pdf
- [9] Biblioteca Digital. Universidad de Sonora. México. Diseño termodinámico del horno. Capitulo V. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/628/Capitulo5.pdf>
- [10] (Ricardo.Rubio@ecopetrol.com.co)
- [11] Diseño de equipos e instalaciones. Antonio M. Domingo Moya. Universidad de Salamanca. Curso. <http://www.revistavirtualpro.com/biblioteca/disen-de-equipos-e-instalaciones>.
- [12] Desarrollo de una herramienta para la evaluación y control de los balances en las redes de distribución de gas natural, basada en la reconciliación de datos y detección de errores gruesos. Jesus David Badillo Herrera. 2012.EIQ.
- [13] Nonlinear dynamic data reconciliation and parameter estimation through particle

[14] Tore L. Sigurd S. Data reconciliation and optimal operation of a catalytic nafta reformer. 2008

[15] Zhengjiang Z. Ying-Yu C: Methodology of data reconciliation and parameter estimation for process systems with multi-operating conditions. 2014

[16] Estadística descriptiva y distribuciones de probabilidad. Humberto Llinás Solano, Carlos Rojas Álvarez. 2005. Pag 75. Capítulo 1. Estadística descriptiva. 1.5 Análisis exploratorio de datos.

[17] El Refino del Petróleo. Vol 1. J P Wauquier. 2004. Métodos de cálculo de las propiedades físicas de los hidrocarburos. Pg. 119.

BIBLIOGRAFÍA

BADILLO HERRERA, Jesus David. Desarrollo de una herramienta para la evaluación y control de los balances en las redes de distribución de gas natural, basada en la reconciliación de datos y detección de errores gruesos. 2012.EIQ.

BAGAJEWICZ, M. Smart Process Plants: Software and Hardware for Accurate Data and Profitable Operations. 4 ed McGraw Hill. 2010.

BISET, Sebastian; FERREYRA, Martin E.. Cálculo riguroso de eficiencia de hornos de proceso. [En línea]. Oil Combustibles S.A. Refinería de San Lorenzo. VII CAIQ 2013 y 2das JASP.AAIQ, Asociación Argentina de Ingenieros Químicos – CSPQ.
http://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/04_025/papers/04a/04a_1406_538.pdf

LLINÁS SOLANO, Humberto; ROJAS ÁLVAREZ, Carlos. Estadística descriptiva y distribuciones de probabilidad. 2005. Pag 75. Capítulo 1. Estadística descriptiva. 1.5 Análisis exploratorio de datos.

NARASIMHAN, Shankar; JORDACHE Cornelius. Data reconciliation and gross error detection. And intelligent use of the process data. Gulf Publishing. 2000.

PRATA, Diego Martínez, *et al.* Nonlinear dynamic data reconciliation and parameter estimation through particle swarm optimization: Application for an industrial polypropylene reactor.

ROMAGNOLI, Jose A.; SÁNCHEZ, Mabel Cristina. Data Processing and Reconciliation for Chemical Process Operations. Process systems engineering Vol. 2. Academic Press. 2000.

SALAZAR, Manuel S.. Análisis de datos de consumo energético de la unidad de refinación de crudos U-200 del complejo industrial Barrancabermeja: Regresión lineal múltiple. 2015.

TORRE L. Sigurd S. Data reconciliation and optimal operation of a catalytic nafta reformer. 2008

WAUQUIER, J P. El Refino del Petróleo. Vol 1. 2004. Métodos de cálculo de las propiedades físicas de los hidrocarburos. Pg. 119.

ANEXOS

ANEXO A. RECONCILIACIÓN DE DATOS EN EL ESTADO ESTACIONARIO DIVIDIDO EN DOS INTERVALOS.

INTERVALO 1 Celdas 4 - 50504		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 06/11/2013		Cp estimado:	2683,23
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,05	648,99	649,02	0,00%
Fg	2	108,25	1,11	1,11	0,15%
FcA	3	135105,09	0,04	0,04	0,04%
FcB	4	141899,35	0,04	0,04	0,04%
Tec	5	0,01	501,26	501,07	0,04%
PCI	6	3,83E-08	36235,21	36093,33	0,39%
Ex	7	6,57	3,19	3,19	0,00%
Tch	8	0,01	737,34	737,35	0,00%
Cp	9	100,00	2683,23	2683,23	0,00%
Valor de la función			-238,22	0,00	0,00

INTERVALO 2 Celdas 50505 - 101005		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 17/05/2014		Cp estimado:	2745,54
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,05	648,15	648,14	0,00%
Fg	2	267,22	1,15	1,14	0,02%
FcA	3	142859,96	0,04	0,04	0,01%
FcB	4	130534,45	0,04	0,04	0,01%
Tec	5	0,02	501,02	501,04	0,00%
PCI	6	0,00	36647,77	36718,03	0,19%
Ex	7	5,82	3,10	3,10	0,00%
Tch	8	0,01	746,93	746,93	0,00%
Cp	9	100,00	2745,54	2745,54	0,00%
Valor de la función			80,05	0,00	0,00

ANEXO B. RECONCILIACIÓN DE DATOS EN EL ESTADO ESTACIONARIO DIVIDIDO EN TRES INTERVALOS.

INTERVALO 1 Celdas 4 - 33669		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 05/09/2013		Cp estimado:	2784,64
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,04	650,03	649,94	0,01%
Fg	2	110,61	1,10	1,10	0,45%
FcA	3	150251,05	0,04	0,04	0,13%
FcB	4	173885,50	0,04	0,04	0,11%
Tec	5	0,01	498,20	498,77	0,11%
PCI	6	0,00	36173,39	36703,92	1,47%
Ex	7	12,90	3,157141	3,16	0,00%
Tch	8	0,01	727,61	727,59	0,00%
Cp	9	100,00	2784,64	2784,64	0,00%
Valor de la función			811,48	0,000000	0,014889

INTERVALO 2 Celdas 33670 - 67337		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 27/03/2014		Cp estimado:	2790,18
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,05	648,82	648,48	0,05%
Fg	2	134,92	1,08	1,10	1,57%
FcA	3	217403,90	0,04	0,04	-0,34%
FcB	4	172455,00	0,04	0,04	-0,44%
Tec	5	0,01	503,38	504,81	0,28%
PCI	6	0,00	35386,16	36462,06	3,04%
Ex	7	4,51	3,35	3,34	-0,02%
Tch	8	0,01	734,80	734,72	-0,01%
Cp	9	100,00	2790,18	2790,18	-0,00%
Valor de la función			1998,61	0,00	0,16

INTERVALO 3 Celdas 67338 101005		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 25/05/2014		Cp estimado:	2697,22
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,06	648,13	648,19	0,01%
Fg	2	314,48	1,16	1,16	0,12%
FcA	3	156712,88	0,04	0,04	0,08%
FcB	4	141421,85	0,04	0,04	0,09%
Tec	5	0,02	502,19	502,02	0,03%
PCI	6	0,00	37138,11	36262,28	2,36%
Ex	7	5,72	3,08	3,08	0,00%
Tch	8	0,01	749,42	749,43	0,00%
Cp	9	100,00	2697,22	2697,22	0,00%
Valor de la función			-948,64	0,00	0,01

ANEXO C. RECONCILIACIÓN DE DATOS EN EL ESTADO ESTACIONARIO DIVIDIDO EN CUATRO INTERVALOS.

INTERVALO 1 Celdas 4 - 25251		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 03/11/2013		Cp estimado:	2776,98
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,06	651,33	651,24	0,01%
Fg	2	105,25	1,08	1,08	0,58%
FcA	3	152770,10	0,04	0,04	0,15%
FcB	4	183342,53	0,04	0,04	0,13%
Tec	5	0,01	500,91	501,51	0,12%
PCI	6	0,00	35791,30	36564,70	2,16%
Ex	7	14,16	3,22	3,22	0,00%
Tch	8	0,01	727,02	726,99	0,00%
Cp	9	100,00	2776,98	2776,98	0,00%
Valor de la función			1062,51	0,000000	0,023378

INTERVALO 2 Celdas 25252 - 50502		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 15/01/2014		Cp estimado:	2308,88
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,06	648,35	648,91	0,09%
Fg	2	112,27	1,09	1,05	3,71%
FcA	3	172250,85	0,04	0,04	0,79%
FcB	4	155819,55	0,04	0,04	0,90%
Tec	5	0,01	502,08	497,23	0,97%
PCI	6	0,00	35824,95	33941,88	5,26%
Ex	7	4,48	3,36	3,36	0,05%
Tch	8	0,01	728,48	728,60	0,02%
Cp	9	100,00	2308,88	2308,88	0,00%
Valor de la función			-4070,83	0,000000	0,65

INTERVALO 3 Celdas 50503 - 75754		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 14/03/2014		Cp estimado:	2560,53
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,05	647,56	647,87	0,05%
Fg	2	289,40	1,14	1,13	0,64%
FcA	3	160899,18	0,04	0,04	0,42%
FcB	4	185876,83	0,04	0,04	0,37%
Tec	5	0,03	498,40	497,81	0,12%
PCI	6	0,00	35901,11	35076,90	2,30%
Ex	7	6,76	3,03	3,03	0,02%
Tch	8	0,01	746,41	746,47	0,01%
Cp	9	100,00	2560,53	2560,53	0,00%
Valor de la función			-1290,19	0,000000	0,09

INTERVALO 4 Celdas 75755 -	ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE
-------------------------------	--

101005		Día aleatorio: 01/06/2014		Cp estimado:	2621,63
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,06	648,74	648,85	0,02%
Fg	2	257,33	1,15	1,15	0,28%
FcA	3	134863,59	0,04	0,04	0,19%
FcB	4	112063,07	0,04	0,04	0,23%
Tec	5	0,02	503,64	503,30	0,07%
PCI	6	0,00	37417,40	35086,34	6,23%
Ex	7	5,37	3,17	3,17	0,01%
Tch	8	0,01	747,12	747,15	0,01%
Cp	9	100,00	2621,64	2621,64	0,00%
Valor de la función			-2454,22	0,00	0,07

ANEXO D. RECONCILIACIÓN DE DATOS EN EL ESTADO ESTACIONARIO
DIVIDIDO EN SEIS INTERVALOS.

INTERVALO 1 Celdas 4 - 16833		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 20/09/2013		Cp estimado:	2734,92
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,25	653,51	653,49	0,00%
Fg	2	150,95	1,03	1,03	0,40%
FcA	3	128340,04	0,04	0,04	0,16%
FcB	4	149621,11	0,04	0,04	0,14%
Tec	5	0,01	506,50	506,87	0,07%
PCI	6	0,00	35737,28	36813,81	3,01%
Ex	7	18,33	3,28	3,28	0,00%
Tch	8	0,01	725,28	725,22	0,00%
Cp	9	100,00	2734,92	2734,92	0,00%
Valor de la función			1161,28	0,00	0,02

INTERVALO 2 Celdas 16834 -		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio:		Cp estimado:	2453,83

33667		10/11/2013			
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,06	646,55	647,82	0,20%
Fg	2	471,99	1,17	1,14	1,99%
FcA	3	206248,83	0,04	0,04	1,83%
FcB	4	222184,84	0,04	0,04	1,76%
Tec	5	0,02	489,90	485,37	0,93%
PCI	6	0,00	36644,36	34621,63	5,52%
Ex	7	13,17	3,05	3,05	0,04%
Tch	8	0,02	729,79	730,00	0,03%
Cp	9	100,00	2453,83	2453,83	0,00%
Valor de la función			-4298,31	0,000000	1,65

INTERVALO 3 Celdas 33668 - 50502		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 22/01/2014		Cp estimado:	2552,83
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,06	649,46	649,48	0,00%
Fg	2	123,74	1,05	1,05	0,09%
FcA	3	161982,01	0,04	0,04	0,02%
FcB	4	148357,33	0,04	0,04	0,02%
Tec	5	0,01	508,08	508,01	0,01%
PCI	6	0,000000	34965,75	34914,76	0,15%
Ex	7	5,02	3,54	3,54	0,00%
Tch	8	0,01	728,09	728,09	0,00%
Cp	9	100,00	2552,83	2552,83	0,00%
Valor de la función			-96,63	0,00	0,00

INTERVALO 4 Celdas 50503 - 67336		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 20/02/2014		Cp estimado:	2599,94
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,05	648,18	648,38	0,03%
Fg	2	246,24	1,12	1,12	0,47%
FcA	3	217403,20	0,04	0,07	0,20%

FcB	4	208050,23	0,04	0,04	0,21%
Tec	5	0,02	498,67	498,26	0,08%
PCI	6	0,00	35732,89	35036,96	1,95%
Ex	7	5,87	3,15	3,15	0,01%
Tch	8	0,02	740,91	740,94	0,00%
Cp	9	100,00	2599,94	2599,94	0,00%
Valor de la función			-985,75	0,00	0,05

INTERVALO 5 Celdas 67337 - 84171		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 17/04/2014		Cp estimado:	2560,40
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,07	648,37	648,47	0,02%
Fg	2	692,32	1,16	1,16	0,11%
FcA	3	357197,29	0,04	0,04	0,07%
FcB	4	136968,69	0,04	0,04	0,19%
Tec	5	0,03	502,44	502,16	0,06%
PCI	6	0,00	37820,92	34944,30	7,61%
Ex	7	7,06	2,94	2,94	0,01%
Tch	8	0,03	756,03	756,04	0,00%
Cp	9	100,00	2560,40	2560,40	0,00%
Valor de la función			-2869,49	0,00	0,07

INTERVALO 6 Celdas 84172 - 101005		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 20/06/2014		Cp estimado:	2313,71
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,05	647,89	648,58	0,11%
Fg	2	203,47	1,16	1,13	1,93%
FcA	3	121432,72	0,04	0,04	1,16%
FcB	4	147242,95	0,04	0,04	0,95%
Tec	5	0,02	501,94	499,79	0,43%
PCI	6	0,00	36436,56	32111,12	11,87%
Ex	7	5,92	3,22	3,22	0,04%
Tch	8	0,03	742,80	742,86	0,01%

Cp	9	100,000000	2313,713338	2313,713343	0,00%
Valor de la función			-5535,25	0,00	0,95

ANEXO E. RECONCILIACIÓN DE DATOS EN EL ESTADO ESTACIONARIO DIVIDIDO EN DOCE INTERVALOS.

INTERVALO 1 Celdas 4 - 8420		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 29/08/2013		Cp estimado:	2414,48
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,19	653,30	653,33	0,00%
Fg	2	224,70	0,99	0,99	0,31%
FcA	3	179947,22	0,04	0,04	0,12%
FcB	4	263445,31	0,04	0,04	0,08%
Tec	5	0,03	512,55	512,37	0,04%
PCI	6	0,00	36273,60	34004,16	6,26%
Ex	7	20,80	3,23	3,23	0,00%
Tch	8	0,02	734,22	734,23	0,00%
Cp	9	100,000000	2414,48	2414,48	0,00%
Valor de la función			-1995,11	0,000000	0,05

INTERVALO 2 Celdas 8421 - 16837		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 03/10/2013		Cp estimado:	2849,88
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,34	653,71	653,63	0,01%
Fg	2	159,65	1,06	1,09	2,29%
FcA	3	150896,44	0,04	0,04	0,99%
FcB	4	241385,03	0,04	0,04	0,64%
Tec	5	0,02	500,44	502,17	0,35%
PCI	6	0,00	35193,90	35831,95	1,81%
Ex	7	15,78	3,36	3,36	0,01%
Tch	8	0,01	716,35	716,25	0,01%
Cp	9	100,00	2849,88	2849,88	0,00%
Valor de la función			1926,30	0,00	0,25

INTERVALO 3 ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE

Celdas 16838 - 25254		Dia aleatorio: 17/10/2013		Cp estimado:	2812,25
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,06	646,98	646,69	0,04%
Fg	2	433,26	1,17	1,17	0,41%
FcA	3	254820,57	0,04	0,04	0,31%
FcB	4	335088,17	0,04	0,04	0,24%
Tec	5	0,06	489,74	490,02	0,06%
PCI	6	0,00	35726,51	35882,03	0,44%
Ex	7	17,19	3,07	3,07	0,01%
Tch	8	0,02	731,23	731,19	0,01%
Cp	9	100,00	2812,25	2812,25	0,00%
Valor de la función			510,76	0,000000	0,04

INTERVALO 4 Celdas 25255 - 33670		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Dia aleatorio: 12/11/2013		Cp estimado:	2540,64
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,067	646,13	646,74	0,09%
Fg	2	522,26	1,16	1,15	0,97%
FcA	3	211550,34	0,04	0,04	0,95%
FcB	4	196243,45	0,04	0,040296	1,06%
Tec	5	0,01	490,07	485,84	0,86%
PCI	6	0,00	37339,49	35550,75	4,79%
Ex	7	19,09	2,97	2,97	0,02%
Tch	8	0,02	729,37	729,50	0,02%
Cp	9	100,00	2540,64	2540,64	0,00%
Valor de la función			-3366,73	0,00	0,68

INTERVALO 5 Celdas 33671 - 42087		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Dia aleatorio: 10/12/2013		Cp estimado:	2366,30
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,05	647,15	647,86	0,11%
Fg	2	129,24	1,10	1,06	3,57%
FcA	3	198079,55	0,04	0,04	0,74%
FcB	4	172172,15	0,04	0,04	0,88%
Tec	5	0,01	502,74	499,95	0,55%

PCI	6	0,00	36458,04	34428,14	5,57%
Ex	7	5,12	3,51	3,51	0,04%
Tch	8	0,02	733,97	734,06	0,01%
Cp	9	100,00	2366,31	2366,31	0,000000%
Valor de la función			-3879,67	0,00	0,69

INTERVALO 6 Celdas 42088 - 50504		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 30/01/2014		Cp estimado:	2553,71
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,54	651,77	651,74	0,00%
Fg	2	398,61	0,99	1,00	0,49%
FcA	3	187418,83	0,04	0,04	0,31%
FcB	4	168447,25	0,04	0,04	0,36%
Tec	5	0,06	513,43	513,66	0,05%
PCI	6	0,00	34038,55	34734,12	2,04%
Ex	7	4,56	3,58	3,58	0,02%
Tch	8	0,02	722,21	722,18	0,00%
Cp	9	100,00	2553,71	2553,72	0,00%
Valor de la función			855,99	0,00	0,06

INTERVALO 7 Celdas 50505 - 58921		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Día aleatorio: 13/02/2014		Cp estimado:	2750,55
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,19	651,25	651,29	0,01%
Fg	2	260,45	1,09	1,09	0,34%
FcA	3	264687,07	0,04	0,04	0,13%
FcB	4	219385,76	0,04	0,04	0,16%
Tec	5	0,04	501,65	501,45	0,04%
PCI	6	0,00	36514,75	36514,75	0,00%
Ex	7	4,85	3,26	3,26	0,01%
Tch	8	0,02	738,21	738,23	0,00%
Cp	9	100,00	2750,55	2750,55	0,00%
Valor de la función			-210,55	0,00	0,01

INTERVALO 8	ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE
--------------------	--

Celdas 58922 - 67338		INDEPENDIENTE			
		Dia aleatorio: 23/03/2014		Cp estimado:	2356,74
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,06	645,20	646,35	0,19%
Fg	2	364,05	1,15	1,12	2,34%
FcA	3	843954,37	0,04	0,04	0,36%
FcB	4	876082,56	0,04	0,04	0,35%
Tec	5	0,02	495,70	492,79	0,59%
PCI	6	0,00	34788,45	33533,01	3,61%
Ex	7	10,34	3,03	3,03	0,05%
Tch	8	0,03	745,73	745,83	0,01%
Cp	9	100,00	2356,74	2356,74	0,00%
Valor de la función			-2849,06	0,000000	1,01

INTERVALO 9 Celdas 67339 - 75755		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Dia aleatorio: 04/05/2014		Cp estimado:	2656,71
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,07	646,32	646,20	0,02%
Fg	2	1059,65	1,17	1,17	0,08%
FcA	3	548275,32	0,05	0,04	0,05%
FcB	4	725343,11	0,04	0,04	0,04%
Tec	5	0,04	497,84	498,03	0,04%
PCI	6	0,00	36305,57	36420,78	0,32%
Ex	7	22,58	2,80	2,80	0,00%
Tch	8	0,06	756,30	756,30	0,00%
Cp	9	100,00	2656,71	2656,71	0,00%
Valor de la función			224,62	0,00	0,01

INTERVALO 10 Celdas 75756 - 84171		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Dia aleatorio: 07/05/2014		Cp estimado:	2381,37
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,14	650,42	650,48	0,01%
Fg	2	558,06	1,15	1,15	0,15%

FcA	3	266718,80	0,04	0,04	0,11%
FcB	4	75903,17	0,04	0,04	0,39%
Tec	5	0,07	507,03	506,91	0,02%
PCI	6	0,00	39083,63	32085,14	17,91%
Ex	7	4,83	3,07	3,067	0,011%
Tch	8	0,02	755,48	755,50	0,00%
Cp	9	100,000000	2381,37	2381,37	0,00%
Valor de la función			-6689,78	0,00	0,25

INTERVALO 11 Celdas 84172 - 92588		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Dia aleatorio: 01/07/2014		Cp estimado:	2617,12
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,06	647,93	647,69	0,04%
Fg	2	259,60	1,16	1,17	0,60%
FcA	3	204459,73	0,04	0,04	0,27%
FcB	4	268379,74	0,04	0,04	0,20%
Tec	5	0,03	503,13	503,66	0,10%
PCI	6	0,00	34039,67	34678,71	1,88%
Ex	7	4,94	3,23	3,23	0,02%
Tch	8	0,04	744,71	744,70	0,00%
Cp	9	100,00	2617,12	2617,12	0,00%
Valor de la función			1053,67	0,00	0,07

INTERVALO 12 Celdas 92589 - 101005		ESTIMACIÓN DEL CP COMO VARIABLE INDEPENDIENTE			
		Dia aleatorio: 27/07/2014		Cp estimado:	3108,86
	Variable	Ponderación	Sin reconciliar	Reconciliado	%Error
Tsc	1	0,04	647,86	647,69	0,03%
Fg	2	169,43	1,15	1,15	0,47%
FcA	3	151342,16	0,04	0,04	0,21%
FcB	4	124383,80	0,04	0,04	0,24%
Tec	5	0,01	500,74	501,36	0,12%
PCI	6	0,00	39073,36	39871,67	2,04%
Ex	7	6,90	3,21	3,21	0,01%
Tch	8	0,02	740,89	740,88	0,00%

Cp	9	100,00	3108,86	3108,86	0,00%
Valor de la función			1211,02	0,00	0,03