

**CRITICAL FAILURE IDENTIFICATION METHODOLOGY IN INDUSTRIAL
PROCESSES BASED ON OPERATIONAL RELIABILITY TECHNIQUES****METODOLOGÍA PARA IDENTIFICACIÓN DE FALLOS CRÍTICOS EN
PROCESOS INDUSTRIALES BASADA EN TÉCNICAS DE CONFIABILIDAD
OPERACIONAL**

MSc. Sandra Zambrano Contreras*, **PhD. Rocco Tarantino Alvarado***
MSc. Sandra Aranguren Zambrano*, **MSc. Carlos Agudelo Gómez****

* **Universidad de Pamplona**, Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Instituto de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Aplicadas (IIDTA)
Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
Tel.: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303, Ext. 164.

** **Instituto Colombiano del Petróleo**, Automatización y Control.
Km. 7 vía Piedecuesta, Bucaramanga, Santander, Colombia.
E-mail: zamilena@gmail.com, {roccot, saranguren}@unipamplona.edu.co,
carlos.agudelo@ecopetrol.com.co.

Abstract: This paper develops a methodology for identifying faults in a Fluidized Catalytic Cracking Unit (FCC) UOP model, initially a reliability analysis is performed to define the critical level for each of the equipments and the potential failure modes and how they affect plant operation; with the information provided by this analysis the requirements for a detection and classification of abnormal events monitoring system, that may result in a process failure, are established.

Keywords: System of Fault detection and diagnosis, Fluid Catalytic Cracking, Reliability Centred Maintenance, Alarm Systems, Extended fault dictionary.

Resumen: En el presente artículo se desarrolla una metodología para la identificación de fallos en una planta de Cracking Catalítico Fluidizado (FCC) modelo UOP, inicialmente se realiza un análisis de confiabilidad que permite definir el nivel de criticidad de cada uno de los equipos de la unidad e identificar modos de fallo potenciales y su efecto sobre la operación de la planta; con la información entregada por este análisis se establecen requerimientos para un sistema de supervisión, detección y clasificación de situaciones anómalas, que pueden llevar al proceso a una condición de fallo.

Palabras Clave: Sistemas de Detección y Diagnóstico de fallos, Cracking Catalítico Fluidizado, Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Sistema de Alarmas, Diccionario Extendido de fallos.

1. INTRODUCCIÓN

La implementación de la ingeniería de confiabilidad industrial proporciona beneficios orientados principalmente a corregir desviaciones del proceso productivo, evitar acontecimientos

anormales, reducir pérdidas de productividad, disminuir días de paradas no programadas y principalmente anticipar posibles situaciones que puedan llegar a generar peligro a las personas o el medio ambiente.

Los procesos industriales son cada vez más automatizados, complejos y vulnerables a fallos, sumado a lo anterior se evidencia el aumento en la demanda de seguridad y confiabilidad. De acuerdo a lo anterior, es una ventaja para la industria disponer de un sistema capaz de identificar y diagnosticar fallas potenciales que producen impactos sobre la confiabilidad de la planta.

Previamente se elaboró una revisión general de algunas técnicas desarrolladas en el área de detección y diagnóstico de fallos, sin embargo se observa que su aplicación a un proceso no lineal y variable en el tiempo puede exigir un alto requerimiento computacional, de modelado y almacenamiento. Teniendo en cuenta que en este artículo se evalúa la viabilidad de las técnicas para ser aplicadas en una unidad de Ruptura Catalítica FCC, la cual presenta dichas características, se encontró que aunque existen varios estudios en el área realizados por varios autores no se analiza los fallos a la luz de la confiabilidad industrial, no obstante los resultados mostraron una tendencia orientada hacia las técnicas híbridas, técnicas inteligentes, sistema experto y técnica escalón unitario principalmente.

Así mismo se plantea el análisis de confiabilidad operacional como la base fundamental del proceso de mejora continua que incorpora en forma sistemática herramientas avanzadas de diagnóstico, facilita la caracterización del estado actual y la predicción del comportamiento futuro de equipos, sistemas y/o procesos mediante el análisis de historial de fallas, datos de condición o datos técnicos con la finalidad de identificar las acciones correctivas y proactivas que puedan efectivamente optimizar costos y minimizar el impacto en el negocio.

2. METODOLOGIA BASADA EN CONFIABILIDAD INDUSTRIAL

La utilización de los sistemas de detección y diagnóstico de fallas (SDDF) en los procesos industriales, constituye un complemento para mejorar la gestión de mantenimiento ya establecida y que está funcionando a un nivel razonablemente satisfactorio, pero que aún presenta un alto potencial de mejora y por ende un alto potencial de ahorro económico.

La búsqueda de criterios para la implantación de los sistemas de detección y diagnóstico de fallas ha creado la necesidad de diseñar una metodología

que permitirá establecer los requerimientos necesarios como base para el análisis de los mismos, con el fin de fijar prioridades en sistemas complejos y optimizar recursos (humanos, económicos y tecnológicos). Para el desarrollo de la metodología propuesta se tuvo en cuenta que los SDDF son una estrategia para mejorar la confiabilidad operacional, la cual está definida como una serie de procesos de mejora continua, que incorporan en forma sistemática, avanzadas herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis, cálculo de riesgo y criticidad, entre otras técnicas, con el propósito de optimizar la gestión, planeación y control de la producción industrial. La metodología planteada consta básicamente de las siguientes etapas mostradas en la Figura 1.

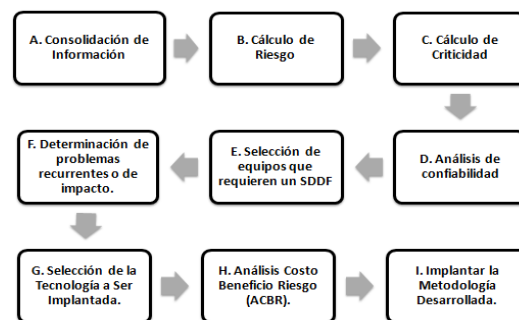


Fig. 1. Esquema general metodología Propuesta.

2.1 Consolidación de Información

Con el fin de fortalecer la presente investigación se realiza una recopilación, clasificación y extracción del estado del arte de sistemas de detección y diagnóstico de fallos, estudio de la fenomenología del proceso de craqueo catalítico y estudio de diferentes metodologías de confiabilidad industrial.

Mediante el Craqueo Catalítico Fluidizado, se llevan a cabo procesos de conversión primaria, donde por rompimiento molecular de fracciones del petróleo, se obtienen productos de mayor valor comercial. Entre los productos valiosos de esta reacción se encuentran el gas combustible, Etano-Etileno, Gas Licuado del Petróleo (GLP), Gasolina (liviana y pesada), Aceite liviano de Ciclo (ALC) Aceite Pesado de ciclo (APC).

El Proceso de FCC emplea un catalizador que se encarga de aumentar la velocidad de reacción. El catalizador fluidizado es continuamente circulado desde la zona de reacción (reactor), donde ocurre el rompimiento de partículas hasta la zona de regeneración (regenerador), donde el catalizador es reactivado (ver Figura 2).

La acción del catalizador también consiste en servir de vehículo para transferir calor desde el regenerador a la zona de reacción. La carga precalentada y atomizada fluye por el elevador donde se encuentra con el catalizador regenerado. Finalmente se cuenta con una unidad fraccionadora donde se recuperan los productos valiosos de la reacción. Este proceso es continuo debido a lo anterior se producen repetidamente ciclos de conversión y regeneración.

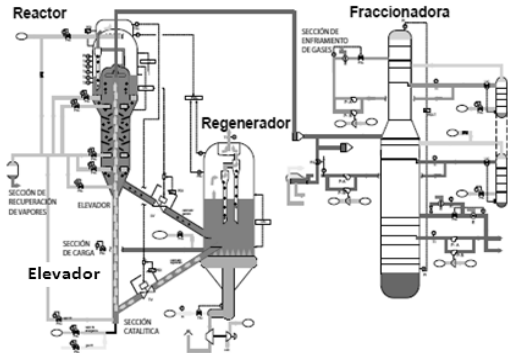


Fig. 2. Esquema general de Proceso.

Los equipos principales de proceso son el elevador, reactor, regenerador y la torre fraccionadora.

2.2 Cálculo de Riesgo para la Unidad de Cracking Catalítico FCC.

El riesgo es una medida de las pérdidas económicas, daños ambientales o daños ocurridos a seres humanos, y está dado en términos de la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado (frecuencia) y la magnitud de la pérdida o daño (consecuencias). Es decir, el riesgo está definido como se muestra en la ecuación (1):

$$Riesgo = \sum_{i=1}^n P_{fi} f_{fi} C_{fi} \quad (1)$$

Donde:

P_{fi} : Es la probabilidad de falla del evento.

f_{fi} : Es la frecuencia del evento.

C_{fi} : Es el costo asociado a esa falla.

En la figura 3 se muestra el riesgo estimado para la planta de cracking UOP, el riesgo base se calcula como la sumatoria del riesgo de todos los equipos bajo el escenario de Cero mantenimiento y el riesgo remanente como la sumatoria del riesgo de todos los equipos bajo el escenario de mantenimiento definido.

Se observa que al invertir en estrategias de mantenimiento aproximadamente un 7% del costo del riesgo base, se logra su reducción del riesgo remanente hasta aproximadamente 32%. De todas maneras, el riesgo remanente debería tender a cero, razón por lo cual se generan continuamente mayores estrategias de mantenimiento, con el fin de reducir aún más el riesgo de falla de los equipos y de esta manera aumentar las confiabilidad de la planta.

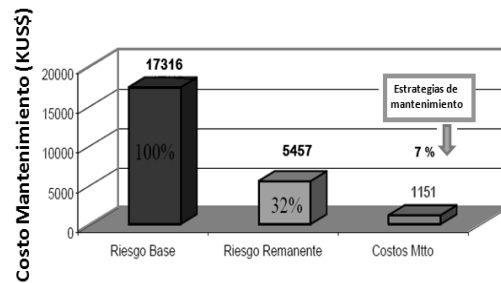


Fig. 3. Riesgo estimado cracking UOP.

2.3 Cálculo de Criticidad

El análisis de criticidad es una herramienta que permite identificar y jerarquizar, en función de su impacto global e importancia, los equipos dentro de una planta, con el objetivo de fijar prioridades en el momento de planificar el mantenimiento preventivo basado en tiempo, basado en condición y correctivo.

Para calcular la criticidad de un equipo dentro de una planta o sistema, se debe aplicar un criterio determinístico que transforme las características cualitativas de ese equipo (costo de producción, diseño, montaje, confiabilidad operacional, estrategia de mantenimiento etc.) en un valor numérico que permita clasificarlo objetivamente, en relación con el resto de los equipos de la planta o sistema. Básicamente es definida como se muestra en la ecuación 2.

$$\text{Consecuencia} \times \text{Probabilidad} = \text{Criticidad} \quad (2)$$

Al completar el cálculo de criticidad para la planta se encontró que los equipos se dividen según su criticidad dependiendo del mayor a menor impacto sobre la planta en E (Extensiva), H (alta), M (media), L (baja) y N (nula). Dichas clases constituyen la criticidad con la que se clasificaron los equipos de la planta de craqueo catalítico estudiada y los resultados se muestran a continuación en la Figura 4.

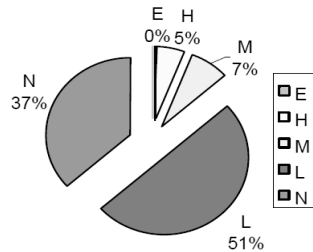


Fig. 4. Esquema de la criticidad

Como se aprecia en la Figura 4, podemos encontrar principalmente que 5% de los equipos presentan la criticidad alta (H), 7% criticidad media (M) y 51% criticidad baja (L). De esta manera podemos analizar la totalidad de equipos de la planta clasificados por especialidad y criticidad.

2.4 Análisis de confiabilidad

Para la refinería caso de estudio se definió el análisis de criticidad con base en la metodología RCM (Reliability Centred Maintenance), la cual se basa en un plan de actividades para aumentar la confiabilidad de los equipos y generar estrategias de mantenimiento confiable y planeado como se esquematiza a continuación en la Figura 5.

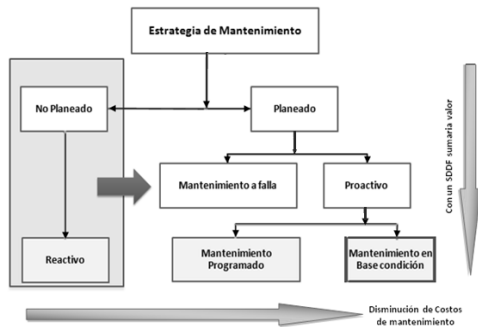


Fig. 5. Evaluación de Estrategia de Confiabilidad

La estrategia de confiabilidad de la planta se encuentra orientada hacia mantenimiento en base a condición, el cual disminuye en gran medida los costos de mantenimiento y constituye una oportunidad de mejora si se le adiciona un Sistema de detección y Diagnóstico de fallos.

2.5 Selección de equipos que requieren Sistema de Detección y Diagnóstico de Fallos.

Luego de definirse el nivel de criticidad de cada uno de los equipos y clasificarse de acuerdo a las bandas de criticidad se determina los equipos que requieren monitoreo, detección y diagnóstico de fallas, los cuales corresponden a aquellos clasificados con alta criticidad, ya que al fallar producen un impacto en la producción, seguridad

de personas y/o bienes y daños ambientales. Además se tienen en cuenta los equipos clasificados de mediana criticidad, que cuando fallan producen un impacto en la calidad de la producción y/o balances de masas.

Según los resultados obtenidos durante la evaluación realizada a la planta de estudio y después de revisar modos de fallo, seguimientos de alarma y criterios de seguridad y confiabilidad se seleccionaron los equipos que requieren la aplicación de un sistema de detección y diagnóstico de fallos.

2.6 Existencia de problemas recurrentes o de impacto.

En aquellos casos donde se encuentran problemas recurrentes o de impacto (seguridad, costos de mantenimiento o pérdida de producción) en las plantas, se realiza un análisis causa raíz del problema. Si en este análisis no se determina fácilmente la causa raíz del problema entonces se evaluará si la implantación de un sistema de detección y diagnóstico de fallas ayuda a detectar y diagnosticar cómo y quién ocasiona la falla, de lo contrario se procederá a realizar un análisis de reingeniería.

El análisis causa raíz, es una metodología sistemática utilizada para investigar la causa origen de cualquier problema, sin importar las disciplinas que pudieran estar involucradas en dicha investigación. Esta metodología, básicamente encuentra que causó el fallo y establece un diagrama en bloques (causa-efecto) posible el cual deberá ser validado por soportes fehacientes.

Para el desarrollo del análisis de causa raíz se usaron datos históricos de fallos presentados en equipos altamente críticos sin perder de vista que objetivo primordial está enfocado básicamente en permitir la detección y diagnóstico de fallos antes de que estos se presenten. Los principales problemas encontrados asociados a equipos altamente críticos se muestran en la Figura 6.

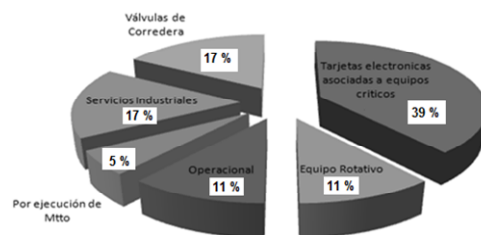


Fig. 6. Problemas recurrentes

Según los resultados encontrados los daños en las tarjetas electrónicas, daños en válvulas de corredera y fallos en servicios industriales constituyen el mayor porcentaje de problemas asociados a equipos altamente críticos.

Una vez clasificados todos los equipos de la planta según su criticidad, especialidad y problemas recurrentes se determinaron sus características dinámicas, tales como: linealidad, variabilidad, retardo, ruido, entre otros. Lo anterior con la finalidad de poder determinar el comportamiento de las variables controladas y manipuladas asociadas a estos equipos críticos y seleccionar la metodología o tecnología de detección y diagnóstico adecuada.

2.7 Clasificación de la metodología o tecnología a ser implantada

En esta etapa se hace una revisión de las técnicas más comunes de detección y diagnóstico de fallos y se ubica cuál de ellas se ajusta de la mejor manera a las condiciones de la unidad de Cracking Catalítico caso de estudio.

Con base en lo anterior se clasificó los métodos en cualitativos, cuantitativos y basados en la data histórica del proceso.

Un sistema de diagnóstico puede contener el conocimiento a priori en forma explícita o puede deducirlo de alguna fuente o dominio del conocimiento, es decir, puede desarrollarse a partir de una comprensión fundamental del proceso utilizando principios fundamentales, tal conocimiento es el basado en modelos. Por otra parte, puede extraerse de la experiencia pasada del proceso, este conocimiento se conoce como superficial, evidencial, o conocimiento basado en la historia de procesos.

Los sistemas de diagnóstico basados en modelo pueden ser ampliamente clasificados como cualitativos o cuantitativos. Los modelos se desarrollan sobre la base de una comprensión fundamental de la física y química del proceso. En los modelos cuantitativos este entendimiento se expresa en términos de relaciones de funciones matemáticas entre las entradas y salidas del sistema. En contraste, los modelos cualitativos expresan estas relaciones en términos de funciones cualitativas centradas en torno a diferentes unidades en un proceso.

En el caso de los métodos basados en la historia del proceso se asume la disponibilidad de grandes cantidades de datos históricos del proceso. Existen diferentes formas en que estos datos pueden ser transformados y presentados como un conocimiento a priori a un sistema de diagnóstico. Esto se conoce como el proceso de extracción de características y se usa cuando se quiere reducir el número de datos a analizar para facilitar el posterior diagnóstico.

3. RESULTADOS

Para la selección de la(s) metodología(s) a ser aplicada(s) se realizó un análisis de Pareto relacionando todas las metodologías analizadas previamente con las características deseables que debe poseer un sistema de detección y diagnóstico de una unidad de craqueo catalítico y se obtuvo los resultados mostrados en la Figura 7.

Estas características seleccionadas como deseables para el sistema de detección y diagnóstico en una unidad FCC fueron sensibilidad, diagnóstico, robustez, novedad en identificación, clasificación del error estimado, adaptabilidad, facilidad de explicación, requerimiento de modelado computacional y almacenamiento y por último capacidad de la metodología para identificación de fallo múltiple.

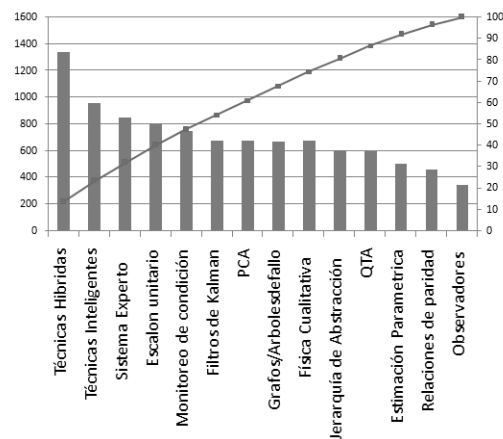


Fig. 7. Diagrama de Pareto resultante.

Los resultados del análisis de Pareto mostraron una tendencia orientada hacia las técnicas híbridas, técnicas inteligentes, sistema experto y la técnica escalón unitario principalmente. Con estos métodos es posible detectar fallas en las variables de estado del proceso asociadas a equipos altamente críticos.

El objetivo primordial es incorporar la técnica seleccionada a través de la metodología planteada en este estudio dentro de una infraestructura de implantación industrial.

El esquema de implantación consta una Base de conocimientos que involucra la adquisición del conocimiento y el análisis de la información de alarmas, modos de fallos, variables de proceso por medio de revisiones bibliográficas y entrevistas con los operadores, supervisores y coordinadores del sistema de control distribuido.

Adicionalmente plantea incorporar una base de hechos para la actualización del sistema sobre el grado de verdad de los posibles síntomas que se presenten en la planta. Se contará con una base de datos en línea para detectar las condiciones normales y anormales de la operación.

Conjuntamente con la infraestructura se desea desarrollar un motor de inferencia enfocado principalmente en la comparación de toda la base del conocimiento experto programado con la base de datos en línea del sistema y la información suministrada por el operador a través de cuestionamientos, lo anterior, con el fin de obtener conclusiones acerca del caso de estudio.

La siguiente fase es integrar las herramientas de detección y diagnóstico de fallos: Conocimiento Experto, Seguimiento de Alarmas y la técnica seleccionada que es la recomendada en la presente metodología a través de un diccionario extendido de fallos para lograr efectuar el diagnóstico y emitir la recomendación pertinente.

Por último se desarrollará una interfaz de usuario que permita aprovechar toda la información del prototipo de la herramienta inteligente con la que interactuaría el usuario.

3.1 Análisis Costo Beneficio Riesgo (ACBR)

Una vez determinada la metodología de detección y diagnóstico de fallas a ser implantada, se debe realizar un análisis costo beneficio riesgo, con el objetivo de tomar en cuenta la posibilidad de ocurrencia de daños materiales, tanto a la instalación como a propiedades de terceros, así como la pérdida de producción durante los períodos de parada para reparación de los daños. Si este valor es mayor que el costo de las medidas para minimizar el riesgo, entonces el proyecto es económicamente justificable.

Si la metodología seleccionada no es justificable, entonces no se implantará el sistema de detección y diagnóstico de fallas, de lo contrario se realizará su implantación industrial, se analizará los resultados y se documentará el análisis de la variable o proceso monitoreada por el mismo.

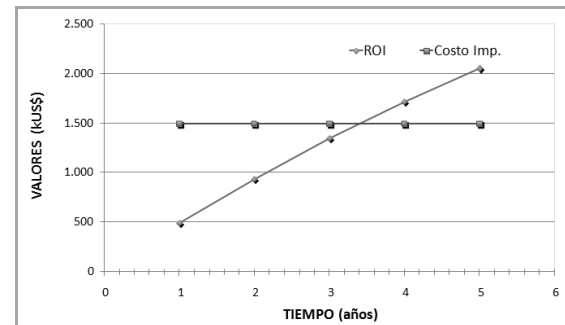


Fig. 8. Análisis costo beneficio.

El resultado del análisis costo beneficio para la implantación de la técnica de detección y diagnóstico de fallos presenta una muy buena rentabilidad y una reducción considerable de costos de capital. Como se puede apreciar en la Figura 8, el punto de equilibrio del proyecto, que es el momento cuando se intercepta la tendencia del ROI (Retorno sobre la inversión) con la tendencia de la implementación (*Cost imp*), significa que el retorno de la inversión será en un periodo comprendido entre tres y cuatro años. Este período de tiempo permite inferir que la implementación del sistema de detección y diagnóstico de fallos es viable.

3.2 Validación de la técnica seleccionada

Se selecciona un caso de alta criticidad que corresponde a un fallo en la Turbina compresor soplador, este equipo relaciona las variables controladas A10 Analizador de O₂ de Gases de Combustión, Z10 Posición de la válvula corredera y Z11 Posición de la válvula corredera (redundante), con la variable manipulada FIC0 Controlador de eficiencia-Aire de Combustión.

Las características dinámicas estudiadas corresponden con las distribuciones estadísticas de los datos históricos de las variables relacionadas, en estado de operación normal y en estado de fallo, como se aprecia en la Tabla 1.

La convención utilizada $\sim N(\mu, s)$, para representar los datos en la tabla 1, corresponde a una distribución estadística normal, donde la variable μ representa la media poblacional y s la desviación estándar, estos valores se calcularon para las variables asociadas al fallo estudiado.

Tabla 1: Selección de Variables de estudio

TAG	Operación normal	Operación anormal	Parada de planta
AIO	$\sim N(2,0.06)$	$\sim N(4.3,0.31)$	$\sim N(0,0)$
FICO	$\sim N(63,0.04)$	$\sim N(31,5.1)$	$\sim N(2.2,0.8)$
ZIO	$\sim N(13.4,0.2)$	$\sim N(5.14,2.1)$	$\sim N(0.1,0.2)$
Z11	$\sim N(13.5,0.2)$	$\sim N(5.13,2.5)$	$\sim N(0.4,0.2)$

Después se ajusta los algoritmos basados en PCA y Lógica Fuzzy para detectar los dos tipos de operación del proceso y se procesa en simulink, como lo muestra en la Figura 9.

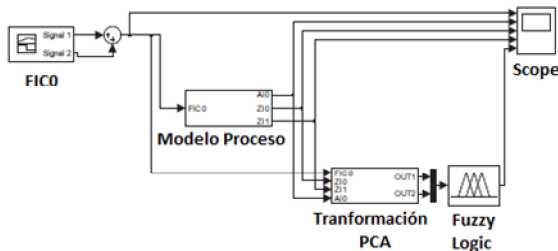


Fig. 9. Sistema final en Simulink de Matlab

Como se aprecia en la figura anterior, primero se introducen los datos históricos al sistema final, luego se hacen pasar a través del modelo de proceso que relaciona las variables estudiadas mediante funciones de transferencia, posteriormente se aplica la transformada PCA para reducir la dimensionalidad de los datos a procesar, más adelante se utiliza el controlador Fuzzy que clasifica la respuesta en los estados de operación normal y anormal y por último se grafica la correspondiente superficie de respuesta.

La superficie de respuesta del sistema final obtenido en el proceso de validación se presenta a continuación en la Figura 10.

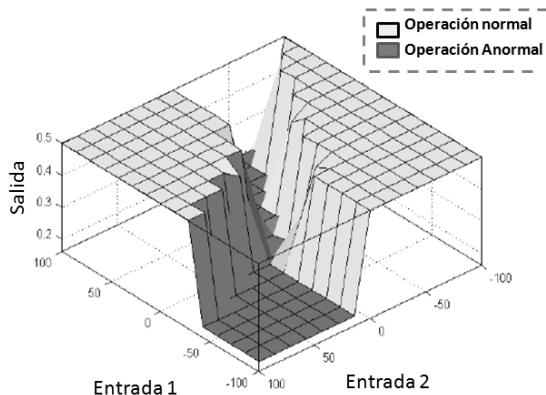


Fig. 10. Respuesta del sistema en Matlab

Como se aprecia claramente en la Figura 10, se obtienen dos superficies de respuesta, la superficie en gris claro corresponde a un estado de operación típico de un comportamiento normal y en gris oscuro los datos se ajustan a estados de operación anormal que corresponde a una parada de planta o un cambio brusco asociado a un fallo incipiente.

El sistema de detección y diagnóstico se puede implantar en los Sistemas de Control Distribuidos y/o Sistemas de Control Supervisorio para el monitoreo de las variables alta y medianamente críticas del proceso.

4. CONCLUSIONES

La metodología planteada en este artículo permite seleccionar tecnologías de detección y diagnóstico de fallos incipientes viables para una unidad de cracking catalítico a nivel industrial.

Además se analizan aspectos relevantes para tener en cuenta antes de seleccionar cualquier metodología de detección y diagnóstico como por ejemplo la naturaleza del fallo, análisis de causa raíz, confiabilidad de la planta, entre otros aspectos importantes desde el punto de vista operacional.

Los resultados generados por el sistema final desarrollado en Matlab serán validados por los Ingenieros de Mantenimiento, Mantenedores e Instrumentista de la planta y podrán ser utilizados para la planificación y mejora del Mantenimiento Basado en Condición (MPBC). Una vez analizados los resultados se puede almacenar la data de las fallas encontradas de manera que pueda servir como patron para el diagnóstico en futuras implantaciones.

Es posible mediante esta metodología seleccionar y aplicar diferentes técnicas que permitan detectar y diagnosticar diferentes tipos de fallos característicos de una unidad de proceso industrial.

Como propuesta para trabajos futuros se plantea aplicar variaciones en la arquitectura utilizando técnicas similares, por ejemplo, reemplazar PCA por FDA (Análisis por discriminante de Fischer) ó KPCA (Análisis de componentes principales utilizando Kernel) ó PLS (Regresión en mínimos cuadrados parciales), también se podría reemplazar el clasificador que utiliza lógica Fuzzy por uno que utilice una red neuronal tipo SOM (Mapas con características auto-organizativas) para la etapa de validación.

REFERENCIAS

- [1]. V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, and S. Kavuri. (2003) "A review of process fault detection and diagnosis Part II: Quantitative model and search strategies," *COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING*, vol. 27, pp. 313–326,
- [2]. V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. Kavuri, and K. Yin. (2003) "A review of process fault detection and diagnosis Part III: Process history based methods," *COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING*, vol. 27, pp. 327–346.
- [3]. Sadeghbeigi, Reza. (2000). *Fluid Catalytic Cracking Handbook Design, Operation and Troubleshooting of FCC facilities*, 2Ed, Gulf Professional Publishing, Houston. 2 Ed pp. 234-275.
- [4]. Modarres, Mohammad. Kaminsky, Mark; Kritsov, Vasily. (1999) "Reliability Engineering and Risk Analysis". Marcel Dekker, New York.
- [5]. Qin, S. J. (2003) *Process monitoring: Basics and Beyond*. *Journal of Chemometrics*, 17(8-9), pp.480-502.
- [6]. Woodhouse, Jhon. (2000). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. The Woodhouse Partnership. 2000.
- [7]. Dash and Venkatasubramanian. (2003) *Integrated Framework for Abnormal Event Management and Process Hazards Analysis*. *AIChE Journal*. Vol 49, No 1.
- [8]. Aranguren Sandra, Tarantino Rocco. (2006). *Approaches And Directives For The Development And Application Of Fault Detection And Diagnosis Systems*. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. Vol 2.
- [9]. Ebeling, Charles. (1997). "An Introduction to Reability and Maintainability Engineering". MacGraw Hill. New York.
- [10]. Jain, A. K., M. N. Murty y P. J. Flynn. (1999). *System Deteccion and Diagnosis: A Review*. *ACM Computing Surveys*, 31(3), pp.264-323.
- [11]. Hwang, D. H. y C. Han. (1999). *Real-time monitoring for a process with multiple operating modes*. *Control Engineering Practice*., 7, pp.891-902.
- [12]. Tarantino, R, and Aranguren S. (2006). "Métodos de Detección y Diagnóstico de Fallas Industriales" Pamplona. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. Vol 2.
- [13]. Gastelbondo Walter. (2007). *Estudio Para el Incremento del Nivel Integrado de Seguridad (S.I.L.), de los Sistemas Instrumentados de Seguridad (S.I.S.) Industrial, Mediante Esquemas y Algoritmos Tolerantes a Fallas Utilizando Sistemas de Detección y Diagnóstico de Fallas*, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
- [14]. Agudelo, Carlos. (2010). *Integration of early fault detection and diagnosis techniques. Application to a Fluid Catalytic Cracking process*. Document developed as requirement for the Advanced Studies Diploma. Universidad Politécnica de Valencia.
- [15]. Agudelo, Carlos; Morant, Francisco; Quiles, Eduardo; García, Emilio. (2011). *Secuencias de alarmas para detección y diagnóstico de fallos*. 3er CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA Universidad Autónoma de Bucaramanga. Bucaramanga.
- [16]. Agudelo, Carlos; (2011). Morant, Francisco; Quiles, Eduardo; Garcia, Emilio. *Intelligent Alarm Management*. IEEE LARC & CCAC. Bogotá.
- [17]. Cáceres, L. and Roper, A. (2006). *Desarrollo de un modelo de simulación para el análisis de fallos en la unidad de ruptura catalítica de la refinería de Cartagena – ECOPETROL S.A. B.S.* Tesis. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga (Colombia).