

# UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática



## INTEGRACION DE TECNICAS Y LAS SECUENCIAS DE ALARMAS PARA LA DETECCION Y EL DIAGNOSTICO DE FALLOS

Elaborado por: Carlos Fernando Agudelo Gómez

Dirigido por: D. Francisco Morant Anglada  
D. Eduardo Quiles Cucarella

Valencia, Septiembre del 2015.

# **INTEGRACION DE TECNICAS Y LAS SECUENCIAS DE ALARMAS PARA LA DETECCION Y EL DIAGNOSTICO DE FALLOS**

Documento elaborado como requisito para optar al  
Título de Doctor en Automática e Informática Industrial

Ing. Carlos Fernando Agudelo Gómez  
Instituto Colombiano del Petróleo  
ECOPETROL S.A.  
Km 7 autopista Piedecuesta, Bucaramanga, Colombia  
e-mail: [carlos.agudelo@ecopetrol.com.co](mailto:carlos.agudelo@ecopetrol.com.co)  
[cagudelo@gmail.com](mailto:cagudelo@gmail.com)

## **Agradecimientos**

A mi Dios Padre todopoderoso, quien ha permitido que mi sueño de realizar mis estudios de doctorado se haga una realidad, y quien me guió, protegió y me ha permitido seguir disfrutando de su infinita gracia, misericordia y bendición. A nuestro Señor Jesucristo, Quien implementó la voluntad del Padre Celestial y me permitió disfrutar de la gracia y la misericordia de Dios.

En el Instituto Colombiano del Petróleo a Enrique Torres (ya jubilado) quien luchó para que me fueran aprobados mis estudios de doctorado y bajo cuya guía aprendí lo que era ser un ingeniero de control, a Ezequiel Acosta un gran amigo compañero del máster, a Jorge Herrera mi primer jefe quien también luchó por que mis condiciones laborales mejoraran, a mis grandes amigos del grupo de automatización del ICP.

En la Universidad Politécnica de Valencia a Francisco Morant quien fue un apoyo incondicional y en parte mi patrocinador al permitirme disfrutar de una beca que cubría mis gastos de manutención en Valencia, a Eduardo Quiles mi tutor, a Emilio Garcia un gran amigo y profesor durante mis estudios de doctorado, a Jose Luis Diez y Jose Simó grandes amigos y excelentes docentes durante mis estudios de doctorado.

A ECOPETROL S.A. mi gran patrocinador y al personal de las refinerías de Barrancabermeja y Cartagena quienes con su trabajo me permitieron poner en práctica los conocimientos adquiridos.

A Alfonso, Rubén, Anita, y todos los colegiales del Colegio Mayor La Coma gracias a cuyas vivencias con múltiples culturas y en especial con el pueblo musulmán me formaron y me enseñaron cosas muy valiosas, y permanecerán conmigo toda la vida.

A María (mi ex-esposa), mi hijo Gabriel, a Maria Alejandra y Maria Cristina, quienes soportaron valientemente la distancia que nos separó físicamente durante varios meses.

Bucaramanga, Mayo del 2015.

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis se ha desarrollado en torno a la integración de técnicas para la detección temprana y el diagnóstico de fallos en procesos industriales y a las secuencias de las alarmas de una unidad de Cracking Catalítico Fluidizado, y su uso en la detección temprana y el diagnóstico de fallos.

En la primera parte del documento se detallan los objetivos específicos y se habla de los temas de Seguridad de Proceso, Confiabilidad Operacional y Gerenciamiento de Alarmas, que dieron origen a esta tesis doctoral. Se muestra como el objetivo de esta tesis y de trabajos de investigación previos es el de incrementar la seguridad de proceso, la confiabilidad operacional y disminuir el número de alarmas que se le presentan a los operadores de plantas industriales, contribuyendo a la apropiada detección y diagnóstico de fallos. Luego se hace una revisión del estado del arte en las técnicas para la detección y el diagnóstico de fallos, y la integración de las mismas, así como de algoritmos de búsqueda para analizar las secuencias de alarmas. Su aplicación se mostrará posteriormente en un conjunto de datos asociados a un fallo real de una planta de Cracking Catalítico Fluidizado, para hallar la secuencia de las alarmas asociada al fallo en cuestión. Posteriormente se habla sobre las técnicas propuestas para la integración y se toca el tema del desarrollo de una herramienta de software inteligente para la detección y el diagnóstico de fallos, que ya se encuentra en operación en la refinería de Barrancabermeja (Colombia). Se muestra una metodología clara para poder hallar las secuencias de alarmas. Al final se llegan a algunas conclusiones valiosas y se detallan los aportes al estado del arte en el tema de detección y diagnóstico de fallos.

Durante el trabajo de investigación desarrollado se hizo un estudio de la viabilidad de utilizar modelos intervalares para abordar el tema de la incertidumbre. Se hicieron importantes hallazgos en dicho estudio, y se concluyó que es mejor el uso de modelos simplificados (como el de respuesta escalón) debido a la complejidad que trae implícita la construcción del modelo completo de una unidad de Cracking Catalítico Fluidizado. Se ha utilizado el Control Estadístico de Procesos (SPC) como herramienta para detectar los síntomas de los fallos operacionales sobre los que se ha centrado esta investigación. Esta investigación desarrolló y propuso el diccionario de fallos extendido como alternativa para la integración de diferentes técnicas de detección y diagnóstico de fallos. El diccionario extendido de fallos es un marco lógico donde se pueden plantear los síntomas que permite detectar cada técnica, junto con la hipótesis de fallo y el modo de operación del proceso, en el que son válidos los síntomas para detectar el fallo. Este marco permite la construcción de reglas lógicas a través de las cuales se puede aplicar el proceso de inferencia lógica para validar las hipótesis de fallo.

## ABSTRACT

The present thesis work has been developed around the integration of techniques for the early fault detection and diagnosis in industrial processes. It has been considered the sequence of the alarms of a fluidized catalytic Cracking Unit and its use in early fault detection and diagnosis.

The specific objectives are listed in the first part of the document and refer to process safety, operational reliability and alarm management. The aim of this thesis and previous research work is to increase process safety and operational reliability and to decrease the number of alarms that are presented to the operators of industrial plants, contributing to the appropriate fault detection and troubleshooting.

First I make a review of the state of the art techniques for the fault detection and diagnosis and their integration, as well as the search of algorithms to analyze sequences of alarms. Its application is subsequently displayed in a set of data associated with a real fault of a fluidized catalytic cracking plant, to find the sequence of alarms associated with the faults in question.

Then I discuss the techniques proposed for integration and the issue of the development of an intelligent software tool for the early fault detection and diagnosis, which is already in operation at the refinery in Barrancabermeja (Colombia). A clear methodology is shown to be able to find sequences of alarms. At the end I reach some valuable conclusions and detailed contributions to the state of the art in the field of fault detection and diagnosis.

During the research work I studied the feasibility of using intervalar models for dealing with uncertainty. I made important findings in this study, and concluded that the use of models (such as the step response) simplified the complexity of the construction of the complete model of a fluidized catalytic cracking unit. It has been used statistical process control (SPC) as a tool to detect symptoms of operational faults. This research developed and proposed the extended fault dictionary as an alternative to the integration of different fault detection and diagnosis techniques. The extended fault dictionary is a logical framework where symptoms which can detect each technique, along with the fault hypothesis and the mode of operation of the process that are valid to detect the fault. This framework allows the construction of logical rules through which the process of logical inference can be applied to validate the fault hypotheses.

## RESUM

El present treball de tesi s'ha desenvolupat al voltant de la integració de tècniques per a la detecció precoç i diagnòstic de fallades en els processos industrials. S'ha considerat la seqüència de les alarmes d'una unitat de craqueig catalític fluïditzat i el seu ús en la detecció precoç i diagnòstic d'avaries.

Els objectius específics s'enumeren en la primera part del document i es refereixen al procés de seguretat, fiabilitat de funcionament i gestió d'alarmes. L'objectiu d'aquesta tesi i el treball previ de recerca és augmentar la seguretat del procés i la confiabilitat operativa i disminuir el nombre d'alarmes que es presenten als operadors de plantes industrials, contribuint a la detecció adequada d'avaries i depuració d'alarmes.

Primer vaig fer una revisió del estat de l'art per a la detecció i diagnosi de fallades i la seva integració, així com la recerca d'algorismes per analitzar seqüències d'alarmes. La seva aplicació posteriorment es mostra en un conjunt de dades associades a una planta de craqueig catalític fluïditzat, trobar la seqüència d'alarmes associades amb les fallades en qüestió.

Llavors vaig parlar de les tècniques proposades per a la integració i del desenvolupament d'una eina de software intel·ligent per a la detecció i el diagnòstic de fallades, que ja està en funcionament a la refineria a Barrancabermeja (Colòmbia). Una metodologia clara es demostra que és capaç de trobar seqüències d'alarmes. Al final vaig arribar a algunes conclusions valuoses i detalle contribucions a l'estat de l'art en el camp de detecció i diagnosi de fallades.

Durant el treball de recerca vaig estudiar la viabilitat d'utilitzar models intervalars per tractar amb incertesa. He fet descobriments significatius en aquest estudi i vaig concloure que l'ús de models (com la resposta davant d'esglaó) simplifica la complexitat de la construcció del model complet d'una unitat de craqueig catalític fluïditzat. S'ha utilitzat el control estadístic de processos (SPC) com una eina per detectar símptomes de fallades operacionals. Aquesta investigació desenvolupa i proposa el diccionari estès de fallades com una alternativa a la integració de diferents tècniques de detecció i diagnòstic de fallades. El diccionari estès de fallades és un marc lògic on els símptomes que pot detectar cada tècnica, juntament amb la hipòtesi de fallada i el mode de funcionament del procés que són vàlids per detectar es avaries. Aquest marc permet la construcció de regles lògiques a través de les quals es pot aplicar el procés d'inferència lògica per validar les hipòtesis de fallada.

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION	1
1.1. Antecedentes y estado actual	2
1.2. Hipótesis y Objetivos	2
1.3. Metodología a utilizar	3
1.4. Gerenciamiento de Alarmas	4
1.5. Seguridad de Proceso	8
1.6. Confiabilidad Operacional	9
1.7. Integración de técnicas para la detección y el diagnóstico de fallos	10
1.8. Herramienta de software inteligente para realizar la detección y el diagnóstico de fallos en una unidad de Cracking Catalítico Fluidizado	10
1.9. Secuencias de alarmas para detectar y diagnosticar fallos	11
2. ESTADO DEL ARTE	13
2.1 Revisión bibliográfica de las técnicas de diagnóstico propuestas para la integración	14
2.2 Integración de técnicas de detección y diagnóstico de fallos	27
2.3 Las secuencias de alarmas y la forma de modelarlas	33
2.4 Búsqueda de secuencias de alarmas	34
3. TECNICAS DE DETECCION Y DIAGNOSTICO APLICADAS	39
3.1 Definición de síntomas, causas y fallos a detectar	39
3.2 Información relevante para la detección y el diagnóstico de fallos en una unidad de Cracking Catalítico Fluidizado	41
3.3 Determinación de los estados de operación del proceso	41
3.4 Información de alarmas del proceso	41
3.5 Sistema basado en conocimiento para la detección y el diagnóstico de fallos	46
3.6 El modelo dinámico del proceso	49
3.7 Detección y Diagnóstico basado en Control Estadístico de Procesos (SPC)	57
3.8 MANEJO DE LA INCERTIDUMBRE	62
4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	72
4.1. CONSIDERACIONES GENERALES	72
4.2. TRABAJO FUTURO EN DETECCION Y DIAGNOSTICO DE FALLOS EN EQUIPO ROTATIVO	73
4.3. PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES REALIZADAS EN EL MARCO DE LA PRESENTE INVESTIGACION	74
5. BIBLIOGRAFIA	79
Anexo 1. SPC aplicado a la detección y el diagnóstico de fallos	89
Anexo 2. Tabla Fallos Validada	103

# 1. INTRODUCCION

Las técnicas para la detección y el diagnóstico de fallos, medidas con criterios que definen la detección temprana y el diagnóstico, la discriminación entre diferentes fallas, robustez al ruido y la incertidumbre, identificación de fallas nuevas, identificación de fallas múltiples, facilidad de explicación de las fallas y adaptabilidad, adolecen de uno o más de estos criterios, lo que hace necesario un nuevo enfoque para resolver estas falencias. En el presente documento se plantea una alternativa que es el uso de un diccionario extendido de fallos, que a través de un motor de inferencia de reglas realiza la integración de varias técnicas para la detección temprana y el diagnóstico de fallos. La secuencia de las alarmas es una de las técnicas empleadas para la integración. El presente documento plantea la integración de técnicas para la detección y el diagnóstico de fallos, así como una técnica de modelado de las secuencias de alarmas, y la metodología con que dichas secuencias pueden ser utilizadas para la detección temprana y el diagnóstico de fallos.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la integración de técnicas existentes para la detección temprana y el diagnóstico de fallos al objeto de incorporar lo mejor de cada una para poder detectar el mal funcionamiento en procesos industriales. La detección y diagnóstico tempranos permiten asistir al personal de operaciones en plantas industriales acerca de las mejores acciones a tomar frente al estado real del proceso, evitando que fallos incipientes escalen a situaciones más críticas donde existirá riesgo de pérdida de vidas humanas, daño ambiental, y pérdidas económicas. Adicionalmente se plantea el uso de las secuencias de alarmas para detectar y diagnosticar fallos, y se muestra una metodología para buscar dichas secuencias utilizando los archivos históricos de las alarmas de la planta.

Se mostrará a lo largo del trabajo realizado el uso de las técnicas de detección y diagnóstico que hacen uso de la información disponible en ambientes industriales, sus fortalezas y debilidades, así como los mecanismos de fusión a utilizar para integrarlas. En este documento igualmente se muestra una herramienta prototipo de software construida para aplicar los conceptos

expuestos y aplicada a una unidad de Cracking Catalítico Fluidizado existente en una refinería de petróleo.

### **1.1. Antecedentes y estado actual**

Se realizó una revisión del estado del arte en las técnicas para la detección y el diagnóstico de fallos, y la integración de las mismas, así como de algoritmos de búsqueda para analizar las secuencias de alarmas, que estuvo principalmente encaminada, pero no limitada a los siguientes tópicos:

- Las alarmas del proceso como herramientas para la detección y el diagnóstico de fallos
- Los Sistemas Basados en Conocimiento aplicados a la detección y el diagnóstico de fallos
- Detección y diagnóstico de fallos basado en modelos
- La aproximación de la comunidad de inteligencia artificial
- La aproximación de la comunidad de control automático
- Arquitecturas para la integración de técnicas de diagnóstico
- Las secuencias de alarmas y la forma de modelarlas
- Detección y diagnóstico de fallos utilizando Control Estadístico de Procesos (SPC)

La aplicación de estas técnicas se realizó en un conjunto de datos asociados a fallos reales de una planta de Cracking Catalítico Fluidizado. Se desarrolló una herramienta de software inteligente para la detección y el diagnóstico de fallos, que ya se encuentra en operación en la refinería de Barrancabermeja (Colombia).

### **1.2. Hipótesis y Objetivos**

La hipótesis de investigación es la siguiente: Integrando diversas técnicas para la detección y el diagnóstico de fallos, se logrará obtener los beneficios de todas ellas en conjunto. Los atributos deseados para un sistema de detección y diagnóstico de fallos han sido definidos previamente (Venkatasubramanian et al., 2003): Detección temprana y diagnóstico de fallos; discriminación entre

diferentes fallos; robustez en presencia de ruido e incertidumbre; identificación de nuevos fallos; identificación de múltiples fallos; facilidad de explicación de resultados y adaptabilidad. Comparando diferentes métodos para la detección y el diagnóstico de fallos, de acuerdo a estos criterios, ninguna de las técnicas usadas hasta ahora cubre todos los atributos de evaluación (Dash & Venkatasubramanian, 2003; Biswas et al, 2004). Como resultado de esta comparación, una nueva aproximación se necesita para utilizar estas técnicas.

Los objetivos de la investigación son: Plantear, diseñar, desarrollar y comprobar una arquitectura para integrar diversas técnicas para la detección y el diagnóstico de fallos.

### **1.3. Metodología a utilizar**

En (Agudelo, 2010), se plantea la integración de tres técnicas para la detección y el diagnóstico de fallos: El conocimiento experto del proceso en los fallos del mismo, formulado en términos de reglas, donde en los antecedentes tendremos los síntomas a validar y en los consecuentes las hipótesis de fallo; un modelo tipo respuesta escalón que permita detectar perturbaciones en el proceso, para asociar las mismas a fallos de la planta (esta técnica fue migrada posteriormente al uso de Control Estadístico de Proceso); y la secuencia de alarmas de la planta, que si es identificada previamente y asociada a cada fallo en particular, permitirá detectar y diagnosticar los fallos de la planta (Agudelo, 2011).

La integración propuesta se plantea a través de un diccionario extendido de fallos, que vincula cada técnica con sus síntomas y el modo de operación de la planta (Agudelo, 2007). A través de un motor de reglas se hace la validación de los síntomas que disparan la detección de cada fallo y permiten validar la causa del mismo, realizando su diagnóstico.

Se realizó un estudio de las técnicas existentes para la detección y el diagnóstico de fallos. Se ha hecho énfasis en aquellas técnicas que hacen uso de la información disponible en un proceso industrial: Las alarmas asociadas a los límites operacionales permitidos para las variables del proceso; la

experiencia del personal de operaciones en los fallos más comunes de la planta, y que ha sido formulada en términos de reglas; y un modelo del proceso (primeramente se analiza el uso de modelos rigurosos basados en intervalos para resolver el problema de la incertidumbre en los parámetros del sistema, y luego se llega a la conclusión de que el mejor tipo de modelos son los simplificados como el modelo tipo respuesta escalón) que permite detectar perturbaciones en la conducta dinámica del proceso durante escenarios de fallos.

A continuación del estudio de las técnicas propuestas, se aborda el problema de su integración en un sistema supervisor, donde se puedan concatenar los diferentes síntomas observados, así como los resultados de los diagnósticos realizados por cada una de las técnicas, proponiendo una arquitectura de integración que permita incrementar el nivel de certidumbre sobre los resultados fusionados.

#### **1.4. Gerenciamiento de Alarmas**

En los ambientes industriales es común que los operadores de plantas industriales realicen sus labores silenciando las alarmas de proceso, debido a que ellas se han convertido en ruido en lugar de ayudar a detectar y diagnosticar las situaciones anormales. Lo anterior debido a que es muy sencillo configurar alarmas en los sistemas de control electrónico modernos, y los operadores se ven inundados con “alarmas” que no les ayudan a realizar sus tareas, sino que las entorpecen (Stanley, 1998). Es por esto que hay normas internacionales (ISA 18.2, EEMUA 191) que buscan normalizar los sistemas de alarmas de los procesos industriales, definiendo primero lo que es una alarma y luego definiendo criterios para racionalizar las alarmas que dichos sistemas despliegan.

Las alarmas de una planta deben ser administradas de acuerdo a una filosofía que incluya el propósito del sistema de alarmas, relación de los procedimientos asociados al sistema de alarmas con otros procedimientos de la planta, método para la asignación de prioridades, clases de alarmas, roles y responsabilidades del operador con respecto a las alarmas, principios de diseño de las alarmas, la documentación requerida para cada alarma, entrenamiento, los índices de desempeño claves del sistema y los valores objetivo para los mismos, el manejo del cambio, y la preservación de la historia de las alarmas (ISA 18.2).

Las normas internacionales contemplan el uso de herramientas avanzadas para aprovechar al máximo las capacidades de los sistemas de alarmas: ISA 18.2, sección 12, métodos para alarmar avanzados; EEMUA 191, apéndice 7, procesamiento lógico de las alarmas – detección inteligente de fallos. Estas herramientas contempladas en las normas internacionales deben asesorar al personal de operaciones en el manejo de situaciones anormales, no permitiendo que los fallos incipientes escalen a fallos más complejos y costosos en términos de vidas humanas, daño ambiental y pérdidas de equipos y producción.

El uso de estas herramientas de software avanzadas está supeditado a que en la planta se hayan aplicado las metodologías para la racionalización de las alarmas (Acero et al, 2005). Una vez se han desarrollado las fases previas del Gerenciamiento de las Alarmas en la planta, se pueden utilizar estas herramientas avanzadas.

#### **1.4.1. Pautas generales para el manejo y diseño de las alarmas**

La clasificación de cada una de las alarmas en las tres categorías (prioridad alta, media ó baja) se determina mediante la aplicación de la matriz de priorización (ver tabla 1), la cual combina dos criterios que son: la severidad de las consecuencias y el tiempo disponible para que el operador responda satisfactoriamente a la alarma para evitar situaciones no deseadas. La determinación de la severidad de las consecuencias se basa en el impacto que tendría que la alarma ocurra y el operador no tome una acción en respuesta a esta en el tiempo máximo contemplado para realizar las acciones de prevención o mitigación de las consecuencias causadas por la condición subestándar.

Según las características funcionales de un Sistema de Control, una variable de proceso tiene varios parámetros para configurar alarmas por alto, bajo, alto-alto y bajo-bajo, en el caso de los bloques análogos de entrada y alarmas de desviación, por ejemplo en los bloques PID (controlador Proporcional, Integral y Derivativo). Por esto, se configuran alarmas solo por alto y bajo para evitar la duplicidad de alarmas.

Cuando además de la indicación existe un control, las alarmas son configuradas en el bloque PID por alto y bajo, según el caso.

La jerarquización es uno de los factores importantes dentro de la racionalización de un sistema de alarmas, por lo que se definen tres (3) prioridades de alarmas: Alta, Media y Baja.

La frecuencia del tono ó la frecuencia de modulación debe ser diferente para cada área de proceso, ya que es muy importante que el operador identifique el sonido de las alarmas de su planta y la distinga de las alarmas dirigidas a otros operadores.

Se configuran alertas del sistema como apoyo a la operación (alarmas de menor prioridad que deben ser revisadas tan solo una vez en el turno).

Una alarma sólo podrá estar configurada dentro de una categoría: alarma o alerta.

Cada una de las tres prioridades de alarmas definidas son configuradas con atributos diferentes para cada sistema de control.

Los eventos normales o esperados ni de acciones del operador no son configurados como alarmas.

Solo en casos de tener alarmas para variables criticas del proceso, se tiene la opción de configurar alarmas de desviación en bloques PID.

Las alarmas criticas asociadas al Sistema de Parada de Emergencia de la planta (ESD), pueden tener una pre-alarma por la criticidad de las variables.

Esta pre-alarma debe ser configurada en el sistema de control con la más alta prioridad.

Las indicaciones de encendido y apagado de bombas no se consideran como alarmas, sino como alertas, excepto en casos donde tanto principal como la auxiliar se apaguen.

Se permite el enmascaramiento de alarmas, solo en caso de que pertenezcan a un grupo que posea una indicación de alarma definida y justificada, como por ejemplo, unidades o equipos, que se encuentren en mantenimiento, apagado o parada, siguiendo las pautas y el conducto regular para su seguimiento.

La alarma, según el tipo de variable (flujo, presión, nivel o temperatura) al que está asignada, tiene valores de banda muerta, filtros e histéresis y los valores

a ser configurados para una alarma en particular dependen del análisis de proceso y de los requerimientos de la operación.

Se debe hacer agrupamiento de alarmas, según una condición de operación específica y con la seguridad que el enmascaramiento de alguna de ellas no tengan consecuencias, ni ponga en riesgo la integridad y seguridad de otro aspecto del proceso.

La inhibición de alarmas está prohibida, anotando que es una práctica no recomendada por las normas internacionales, ya que esto puede poner en riesgo la operación e integridad de la operación, las plantas y las personas.

Salvo para los casos especiales tales como: salida de sistemas por mantenimiento.

Si se reconoce la existencia de un proceso por lotes (batch) o de un proceso que por definición operativa requiere el cambio en el límite de la alarma dependiendo del escenario de operación, como es el caso de inyección de flujos para mejoramiento de calidad, se configuran las alarmas dinámicas relacionadas con dicho proceso, determinando la condición que define dicho cambio de estado. Estos cambios de estado se ejecutan de manera automática.

La prioridad de una de alarma, se debe definir usando la Matriz de Evaluación de Riesgos (RAM), la cual define los escenarios evaluando el impacto en las personas, el ambiente y económico, principalmente, cruzado con la severidad de las consecuencias que el operador podría prevenir tomando la acción correctiva asociada a la alarma y en el tiempo requerido.

La matriz RAM se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 1. Matriz de Evaluación de Riesgos (RAM).

<b>Safety</b>	-	-	<b>Safety Shower Out of Service</b>	<b>Potential fatality or worse</b>
<b>Environmental</b>	-	<b>Minor release inside boundary</b>	<b>Significant release inside boundary</b>	<b>Notifiable release</b>
<b>Production loss</b>	<b>Lower efficiency, Increased fouling</b>	<b>Non-spared equipment trip</b>	<b>Non-spared equipment will trip</b>	<b>Downtime more than</b>
<b>Equipment damage</b>	<b>Pump damage (spare on hand)</b>	<b>Pump damage (no spare)</b>	<b>Damage to major equipment likely</b>	<b>Critical equipment destroyed</b>
<b>Inefficient operation</b>	<b>&lt; \$50k</b>	<b>\$50 to 100k</b>	<b>&gt; \$100k</b>	<b>-</b>
<b>Consequence</b>	<b>Minor</b>	<b>Moderate</b>	<b>Major</b>	<b>Extreme</b>
<b>Urgency</b>				
<b>Now ( &lt; 5 min)</b>	<b>High</b>	<b>High</b>	<b>Emergency</b>	<b>Critical</b>
<b>Next ( 5-15 min)</b>	<b>Low</b>	<b>High</b>	<b>Emergency</b>	<b>Critical</b>
<b>Later ( &gt;15 min)</b>	<b>Low</b>	<b>Low</b>	<b>High</b>	<b>Critical</b>

## 1.5. Seguridad de Proceso

La seguridad de proceso tiene que ver con la prevención de eventos catastróficos de muy baja probabilidad de ocurrencia, pero de un alto impacto en las organizaciones. Nombres como Chernobyl, Bhopal, o Piper Alpha son muy conocidos en ambientes industriales, por las tragedias que significaron, no solo para los trabajadores involucrados, sino para la comunidad circundante, y el daño ecológico causado (Norman, 1986; Reason, 1987; Salge & Milling, 2006; Belke & Dietrich, 2001; Shrivastava, 1987; Drysdale & Sylvester-Evans, 1998; Paté-Cornell, 1993).

Estos nombres nos recuerdan que la seguridad siempre debe acompañar los avances tecnológicos. Estos accidentes (con la pérdida en vidas humanas, daño ambiental, pérdidas económicas, consideraciones éticas y morales) son incentivos para centrar nuestro trabajo en la seguridad de proceso y evitar que accidentes como estos ocurran en el futuro.

De acuerdo a la norma internacional API 754 (American Petroleum Institute, 2010), los incidentes de seguridad de proceso pueden resultar en accidentes mayores que involucran la liberación de materiales peligrosos. Los incidentes de seguridad de procesos pueden tener heridos, fatalidades, daños ambientales, pérdidas económicas, y pueden implicar no solo a los trabajadores del proceso, sino también al público cercano.

En (Bakolas & Saleh, 2011) se muestra cómo es necesario incrementar la observabilidad para evitar los eventos de seguridad de proceso. Un sistema se dice que es observable si se puede determinar el comportamiento de todo el

sistema a partir de la medición de las salidas del mismo, en caso contrario los valores actuales de algunos de sus estados no podrán determinarse a partir de los sensores de salida, lo que implicará que su valor permanecerá desconocido para el controlador, y no se podrán cumplir las especificaciones de control de estas salidas. Hay múltiples trabajos que muestran el incremento de la observabilidad a través de la detección y el diagnóstico de fallos (Oktem et al, 2013; Methnani et al, 2013).

A través del uso de herramientas de software avanzadas se puede ayudar al personal de operaciones de una planta industrial a evitar que los fallos incipientes escalen a situaciones más graves. En el presente documento se muestra la integración de técnicas para la detección temprana y el diagnóstico de fallos operacionales en procesos industriales, y cómo estas técnicas pueden generar recomendaciones al personal de operaciones para incrementar la Seguridad de Procesos (Agudelo et al, 2013).

## **1.6. Confiabilidad Operacional**

La confiabilidad en ingeniería, se define como la capacidad de un sistema o componente para realizar sus funciones requeridas bajo las condiciones establecidas por un período determinado de tiempo.

En (Aranguren & Tarantino, 2006) se plantean las mejoras por el uso de la detección temprana y el diagnóstico de fallos:

- Maximizar la vida útil del equipo.
- Eficiencia en el momento de las intervenciones de los equipos.
- Confiabilidad del equipo.
- Seguridad de proceso.
- Protección del medio ambiente.
- Minimización de los costos.

El uso de técnicas para la detección temprana y el diagnóstico de fallos permiten las mejoras anteriores, debido a que pueden detectar la presencia de fallos incipientes en los sistemas bajo estudio. Esta información es necesaria para la planificación del mantenimiento basado en condiciones y la

toma de decisiones. Con base en la información proporcionada por las técnicas de detección temprana y diagnóstico de fallos pueden ser definidos los modos de fallo y escenarios de fallo para el taller de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

El uso de la detección temprana y el diagnóstico de fallos permiten planificar el mantenimiento en lugar del mantenimiento no-planificado. También reducir el riesgo en el proceso, a través de la prevención de que las situaciones anormales incipientes escalen a situaciones más críticas. El riesgo es generado por la incertidumbre en las condiciones del proceso o de los equipos, y se puede disminuir con el uso de sistemas que monitoreen las condiciones de operación del proceso o equipos (García, 2004).

### **1.7. Integración de técnicas para la detección y el diagnóstico de fallos**

Las técnicas basadas en datos son apropiadas para detectar fallos en aplicaciones industriales de gran tamaño, y cuando se encuentra disponible un modelo detallado basado en principios fundamentales (u otro tipo de modelo matemático) el enfoque analítico puede incorporar conocimiento físico del proceso a monitorear. Por estas razones, un esquema integrado de técnicas basadas en datos, y basadas en conocimiento, jugarán un papel muy importante en los sistemas industriales para detectar y diagnosticar fallos (Chiang et al, 2000).

### **1.8. Herramienta de software inteligente para realizar la detección y el diagnóstico de fallos en una unidad de Cracking Catalítico Fluidizado**

En (Agudelo, 2010) se plantea una herramienta inteligente de software para realizar la detección y el diagnóstico de fallos en una unidad de Cracking Catalítico Fluidizado, aplicando la integración de las tres técnicas propuestas.

Dicha herramienta se encuentra operando en línea en la unidad UOP1 de la refinería de Barrancabermeja (Colombia). Esta herramienta se convertirá en una ayuda muy valiosa para los operadores en el manejo de situaciones

anormales. Esto sumado al hecho de que los cuartos de control de esta refinería se están centralizando, imponiendo cargas adicionales a los operadores de consola, hacen de esta solución un aporte valioso para la operación segura de las plantas de la refinería de Barrancabermeja.

En el presente documento se realiza el análisis del módulo de aprendizaje de fallos asociado a la secuencia de alarmas del proceso, la forma en la que se pueden modelar dichas secuencias, y la forma en la que se pueden asociar a fallos de la unidad, permitiendo realizar una detección temprana y un diagnóstico asertivo.

### **1.9. Secuencias de alarmas para detectar y diagnosticar fallos**

Las secuencias de alarmas son indicadores tempranos de las situaciones anormales que se empiezan a presentar en una unidad de proceso industrial. En (Agudelo, 2010) se muestra cómo para el mismo tipo de fallo, las secuencias de las alarmas son similares, lo que permite asociarlas a los fallos de la planta.

En el presente documento se muestra una metodología para modelar las secuencias de alarmas y hallar secuencias similares que permitan ser asociadas a fallos que previamente se hayan presentado en la planta. Aquí el término “previamente” se debe asociar a aprendizaje supervisado.

Son múltiples los trabajos que se han desarrollado en torno al tema de correlacionar las variables análogas del proceso para realizar la detección y el diagnóstico de fallos (Singhal, 2001; Qian, 2006; y otros). Son también varios los trabajos realizados en torno a la correlación de eventos discretos (alarmas del proceso) para detectar y diagnosticar fallos (Mannila, 1998; Arellano, 1990; y otros). El diagnóstico de situaciones anormales puede ser ayudado si períodos de desempeño similar pueden ser localizados en la base de datos histórica de la planta.

Dicha aproximación ha venido desde diferentes tipos de industrias: La industria de las telecomunicaciones, como en el caso de (Mannila, 1998) y la industria de la producción de energía eléctrica, como en el caso de (Pereira, 2009). El presente trabajo busca mostrar una metodología para encontrar secuencias de

alarmas en los procesos industriales, específicamente en la industria petroquímica, para asociar dichas secuencias a fallos.

## 2. ESTADO DEL ARTE

Múltiples técnicas han sido utilizadas en la detección y el diagnóstico de fallos, una clasificación de las mismas de acuerdo al tipo de información utilizada es la siguiente (Venkatasubramanian, 2003):

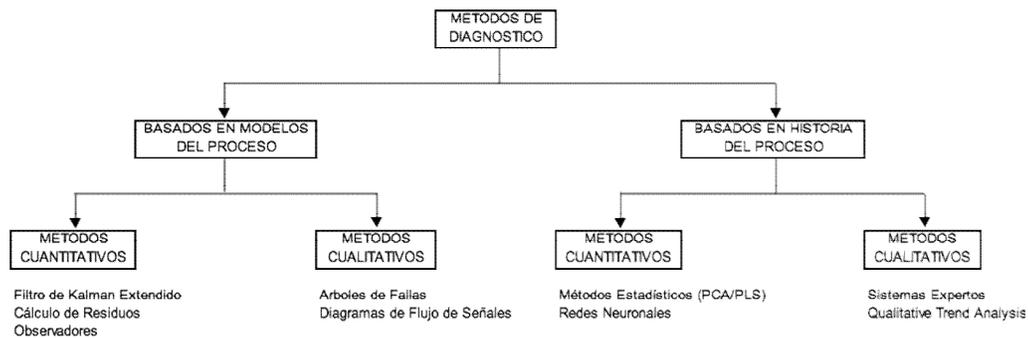


Figura 1. Clasificación de los métodos de detección y diagnóstico de fallos.

En general puede afirmarse que los métodos basados en modelos cuantitativos del proceso utilizan información de las mediciones del proceso y un modelo matemático del mismo. El fallo puede ser tratado como un estado interno que cambia, un parámetro del proceso que cambia, ó una entrada desconocida (perturbación). Cuando se calcula dicha señal de posible fallo, se compara con un valor umbral para determinar si se ha presentado el fallo en cuestión. Estas técnicas pueden utilizar modelos lineales del proceso (filtros on-line), ó modelos no-lineales basados en los principios fisico-químicos subyacentes. La diferencia entre el modelo y el proceso real (denominada residuo) causará falsas alarmas si los umbrales son muy bajos, ó fallos no detectados si son muy altos.

En contraste, los métodos basados en modelos cualitativos del proceso se basan en la relación causal de las variables de proceso. La magnitud de las relaciones es ignorada, sólo importa el sentido del movimiento. Su resolución es regular. Algunas relaciones causales (como retroalimentación debido a un controlador) pueden generar estructuras difíciles de diagnosticar. Algunas

técnicas utilizadas son los grafos de señales que pueden incorporar la incertidumbre en el modelo utilizando redes bayesianas. Otra técnica muy utilizada ha sido la de los sistemas expertos, que se construyen a partir de la recopilación de conocimiento de expertos en forma de reglas de la forma si-antecedente-es-verdadero-entonces-consecuente-es-verdadero, para capturar las relaciones del proceso. El proceso de inferencia para la validación de una hipótesis de fallo se realiza utilizando el encadenamiento hacia atrás de las reglas, verificando el estado de verdad de los consecuentes de las mismas (hipótesis de fallo) a partir del estado de verdad de los antecedentes (síntomas observables durante el escenario de fallo) que se calcula con los datos recibidos en tiempo real del proceso.

La presente exposición de técnicas para la detección temprana y el diagnóstico de fallos se centrará en aquellas metodologías que emplean la información más relevante disponible en un proceso industrial típico: Las alarmas asociadas a las variables de la planta, las cuales están diseñadas para advertir al operador cuando se han violado los límites operacionales; la experiencia disponible en la detección y el diagnóstico de escenarios de fallo, y que puede formularse en forma de reglas que permitan replicar el mecanismo de inferencia utilizado por el personal de operaciones de la planta industrial al enfrentarse a una situación anormal; el Control Estadístico de Procesos (SPC).

## **2.1 Revisión bibliográfica de las técnicas de diagnóstico propuestas para la integración**

### **2.1.1 Las alarmas del proceso como herramientas para la detección y el diagnóstico de fallos**

Las alarmas en un proceso industrial son indicadores tempranos de que alguna situación anormal se está presentando en el proceso. En la siguiente figura se muestra la filosofía con la que se configuran los límites de las alarmas:

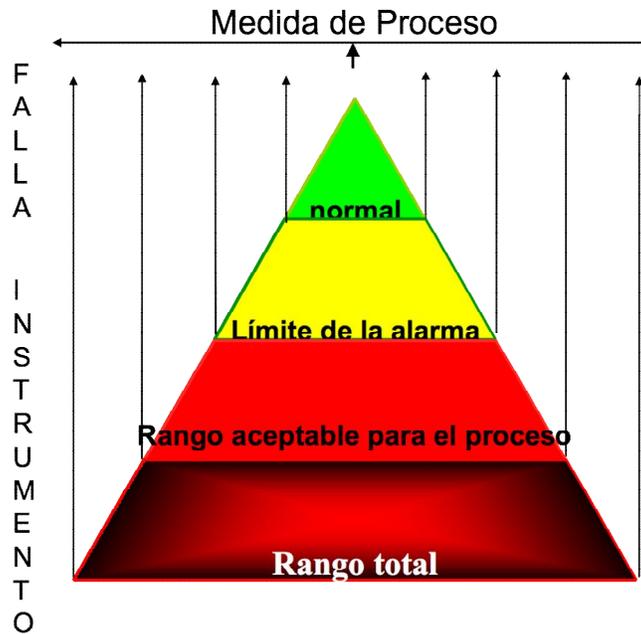


Figura 2. Pirámide de las alarmas.

La guía de control y la ventana operacional definen los rangos de operación normal y el rango aceptable para el proceso, respectivamente (figura 2). Existe una diferencia entre las alarmas del sistema de parada de emergencia y las del Sistema de Control Distribuido (DCS). Los límites mostrados en la figura 2 son los del DCS, pero en el sistema de parada de emergencia también se configuran alarmas, que advierten al personal de operaciones de que una parada de emergencia se ha realizado (llevando al proceso a una condición segura) ó se aproxima si no se toman las medidas para evitarla (pre-alarma de corte).

Las alarmas deben dirigir la atención del operador hacia las condiciones de la planta que requieren su evaluación y acción oportuna, centrándose en las decisiones importantes, permitiendo la reducción de riesgos para las personas, el medio ambiente y los equipos (Acero et al, 2005-1).

Las alarmas del sistema desplegadas al operador deben ser las más relevantes para atender las situaciones anormales, y brindarle suficiente tiempo para responder con las acciones apropiadas para su manejo. Desafortunadamente es común encontrar en los sistemas de control electrónico modernos, configuradas alarmas que en realidad no suponen una ayuda para el operador, sino que por el contrario entorpecen su labor al inundarlo con un

número inmanejable de eventos tanto audibles como visibles, no solo durante las situaciones de emergencia sino incluso durante los escenarios de operación normal. Por lo anterior es fundamental que para poder hacer un uso óptimo de la información proveniente de las alarmas del proceso, se realice una depuración de las mismas, atendiendo su prioridad en función de un análisis de escenarios posibles de operación insegura que se puedan presentar en la planta (Acero et al, 2005-2; Acero et al, 2005-3).

### **2.1.1.1 Análisis de secuencias de eventos discretos**

En una investigación dirigida al tema de modelado de las secuencias de eventos discretos (Ortiz, 2008), se plantearon los siguientes objetivos:

- Definir los modos de fallo asociados a los equipos principales, las causas que pueden originarlos y como la operación de un equipo en un modo de éstos desencadena otros modos de fallo en equipos adyacentes.
- Relacionar las causas y síntomas observables de los modos de fallo de los principales equipos de la Unidad de Cracking Catalítico Fluidizado para crear secuencias que describan la causalidad entre ellos.
- Asociar los modos de fallo de los equipos principales con los estados de fallo generales de la planta.
- Representar en un diagrama causal las transiciones entre modos de fallo de los equipos y el desencadenamiento de estados de fallo de la unidad.

Luego de realizar la investigación se encontró que los fallos desencadenan secuencias de alarmas que no son idénticas para el mismo fallo, pero que si tienen un grado de similitud apreciable (Figura 3).

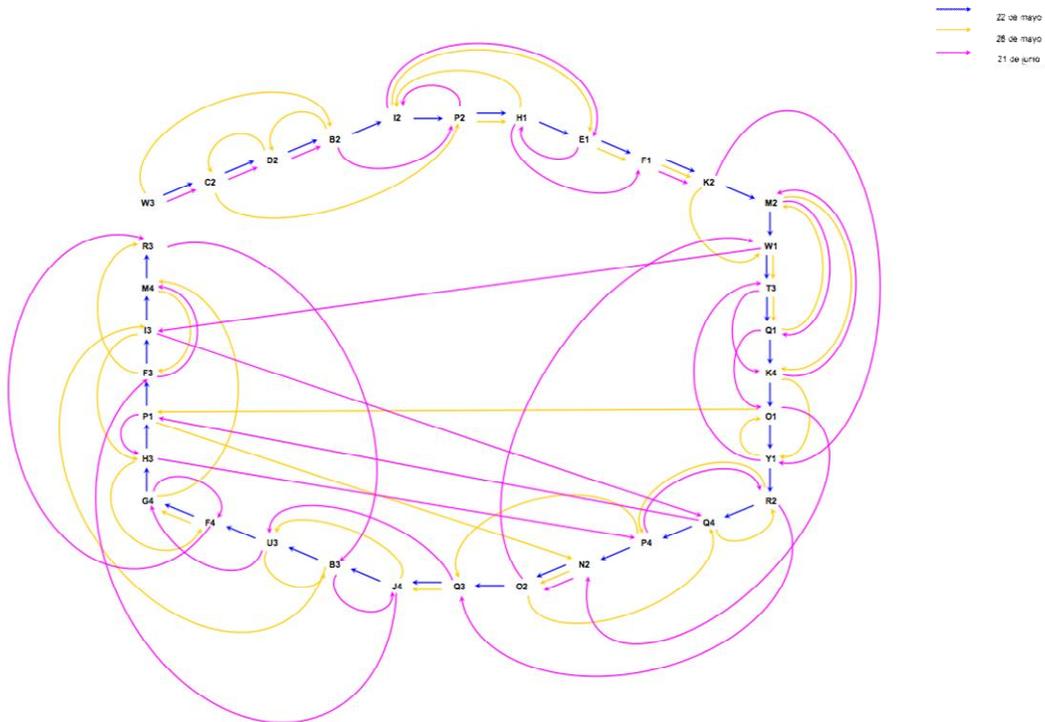


Figura 3. Secuencias de alarmas asociadas al mismo fallo ocurrido en 3 fechas diferentes.

En la figura anterior se han etiquetado las alarmas de la planta con números, y se muestra la secuencia de las alarmas para el mismo fallo en tres fechas diferentes, mostrando que aunque las secuencias no son idénticas, si tienen un grado de similitud apreciable.

Adicionalmente a este hallazgo, se construyeron los diagramas de causalidad de la planta, las causas que ocasionan los modos de fallo y los efectos que estos a su vez tienen sobre las demás variables del proceso. Esta representación gráfica tiene una estructura causa - efecto, es decir, muestra como la presencia de un evento dado desencadena otro. En la Figura 4 se observa la forma de esta estructura en la que se representa por medio de flechas el orden en que ocurren los eventos.

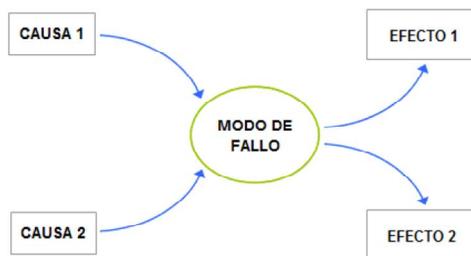


Figura 4. Estructura causa-efecto.

La presencia de un modo de fallo tiene efecto sobre el comportamiento de otras variables del proceso, y dicho efecto puede ser la causa que desencadene un nuevo modo de fallo en otro equipo. Según esta relación, si se unen las representaciones causa-efecto se mostraría la causalidad que tienen los modos de fallo entre si. La estructura que se obtiene de la unión planteada se presenta en la Figura 5 y es lo que se ha llamado diagramas de causalidad.

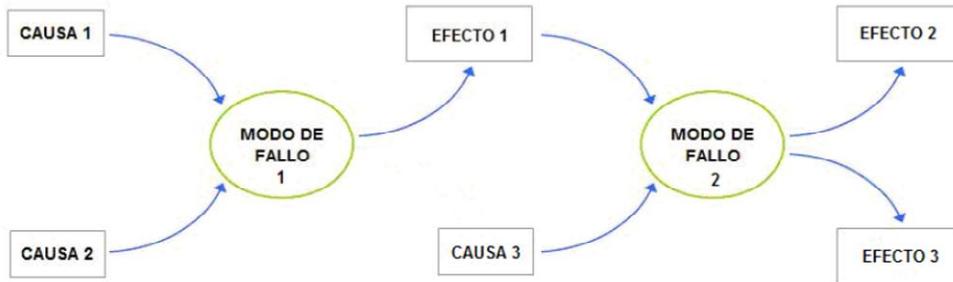


Figura 5. Estructura de los diagramas de causalidad.

La razón por la que estos diagramas de causalidad son importantes es porque permiten construir diferentes secuencias de ejecución de los eventos. Algunos ejemplos de secuencias para el diagrama de la Figura 5 son:

causa 1 → modo de fallo 1 → efecto 1 → modo de fallo 2 → efecto 3

causa 3 → modo de fallo 2 → efecto 2

Estas secuencias deben ser evaluadas, de manera que si la planta durante su operación real (*online*) ejecuta algunas de ellas, pueden construirse reglas que permitan predecir éste comportamiento en situaciones futuras.

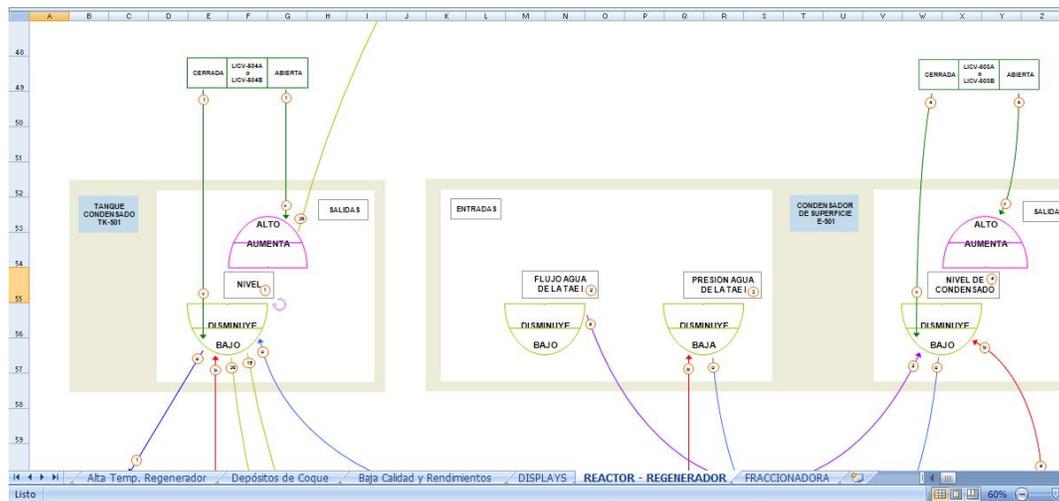


Figura 6. Parte del diagrama de causalidad de una unidad de Cracking Catalítico Fluidizado.

## **2.1.2 Los Sistemas Basados en Conocimiento aplicados a la detección y el diagnóstico de fallos**

Históricamente se ha asociado la Inteligencia Artificial a los sistemas basados en conocimiento (Quantrille y Liu, 1991). La ingeniería del conocimiento aplica una metodología para estructurar de manera apropiada la experiencia de los expertos (Russell y Norvig 1996): Definición de los factores que se van a modelar, los que influyen directamente sobre cada uno de ellos, ó a los que este influye; las variables aleatorias y sus posibles valores; codificación cualitativa y cuantitativa de la dependencia entre variables; codificación de casos específicos en el dominio; consultas a los procedimientos de inferencia para validar las respuestas obtenidas con las de los expertos; y realizar análisis de sensibilidad para determinar la robustez ante perturbaciones existentes (variables que afectan causalmente los síntomas observados pero que pueden ó no encontrarse presentes en un momento dado).

Son varias las aplicaciones de los sistemas basados en conocimiento al diagnóstico de fallos (Prieto et al, 2012). A través de técnicas de Knowledge Elicitation (O'Hagan, 2006) se pueden construir las bases de conocimiento a partir de los juicios y experiencia de los expertos. El propósito es construir una distribución de probabilidad que represente apropiadamente dicho conocimiento.

### **2.1.2.1 Inferencia con encadenamiento hacia adelante para monitoreo del proceso**

Se puede empezar por las oraciones que están en la base de conocimientos y generar nuevas conclusiones. Se utiliza por lo general cuando se incorpora en la base de conocimientos un nuevo hecho y deseamos generar sus consecuencias. Sus procedimientos de inferencia no están enfocados a resolver un problema en particular, por ello, se le conoce como procedimiento activado por datos (Russell y Norvig 1996).

### **2.1.2.2 Inferencia con encadenamiento hacia atrás para validación de hipótesis durante la fase de diagnóstico**

También se puede empezar por algo que se desea demostrar, se buscan las oraciones que nos permitirían llegar a tal conclusión y, se trata de establecer las premisas correspondientes. El encadenamiento hacia atrás se utiliza generalmente cuando es necesario demostrar una meta (Russell y Norvig 1996).

### **2.1.3 Detección y diagnóstico de fallos basado en modelos**

Son múltiples los tipos de modelos utilizados para la detección y el diagnóstico de fallos en procesos industriales. En (Celse et al, 2005) se plantea el uso de modelos con secuencias de eventos discretos, para realizar la detección y el diagnóstico de fallos en una planta piloto de FCC. Los enfoques más importantes en esta área se muestran a continuación.

#### **2.1.3.1 La aproximación de la comunidad de inteligencia artificial**

El desarrollo de sistemas basados en conocimiento para la detección y diagnóstico de fallos tiene como debilidad el hecho de que para la construcción de la base de conocimientos del mismo es necesario que exista la experiencia en el proceso. Cuando se presentan variaciones del mismo, es necesario desarrollar nueva experiencia a partir de experimentación sobre el nuevo proceso. La comunidad de inteligencia artificial ha ido migrando su enfoque de solución al problema de la detección y el diagnóstico de fallos buscando maneras de representar el conocimiento requerido sin recurrir a esta experiencia, utilizando modelos de funcionamiento normal del proceso que son conocidos a priori a partir del diseño del mismo, usando la lógica de primer orden como herramienta para la representación del conocimiento.

La esencia de la detección y el diagnóstico de fallos basado en modelos es la interacción entre la predicción del comportamiento del proceso y la observación del mismo: La generación de hipótesis a partir de los síntomas observados en el proceso real y los fallos en los componentes del proceso que puedan ser la causa de dichos síntomas; la validación de cada hipótesis para determinar si se ajusta a todas las observaciones disponibles del proceso y sus componentes; y

la discriminación de las hipótesis que siguen siendo válidas luego de la validación (Randall y Hamscher, 1992).

Diferentes tipos de diagnóstico surgen de esta aproximación (Poole, 1992), sin embargo se ha impuesto el diagnóstico basado en consistencia, que es el mínimo conjunto de fallos que es consistente con las observaciones y con los otros componentes del proceso actuando de manera correcta (Reiter, 1987).

De acuerdo a la aproximación del diagnóstico basado en consistencia, debe escribirse la negación de cada fallo como hipótesis posible, asumiendo que no existen fallos. El modelo del sistema se representa mediante un conjunto de fórmulas utilizando la lógica de primer orden, y un conjunto de constantes representando los diferentes componentes del sistema. Las observaciones hechas sobre el proceso real se describen igualmente mediante un conjunto de fórmulas de primer orden. El problema del diagnóstico se reduce a eliminar las inconsistencias entre el modelo del proceso, y el conjunto de observaciones realizadas en el proceso real (Figura 7). El diagnóstico corresponde al conjunto de componentes en fallo.

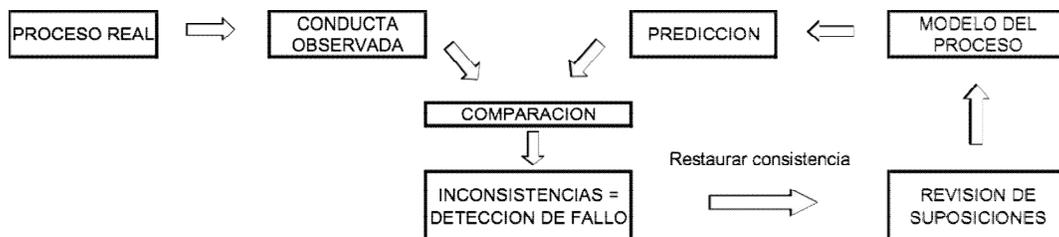


Figura 7. Diagnóstico basado en la consistencia.

Un ejemplo tomado de la comunidad de inteligencia artificial, el Polybox, que es un conjunto de bloques que realizan operaciones aritméticas de multiplicación y suma (Figura 8), permitirá ver en funcionamiento los principios descritos anteriormente. Debe tenerse en cuenta que este ejemplo hace referencia a un sistema estático, en el que no se han incorporado modelos de operación en fallo, en un ambiente ideal sin ruido, y sin tener en cuenta la evolución temporal del mismo. Más adelante se planteará un esquema de detección y diagnóstico similar que tiene en cuenta estos puntos.

Los bloques M1, M2 y M3 toman sus señales de entrada y propagan a sus salidas el producto de las mismas, y los bloques A1 y A2 son bloques sumadores.

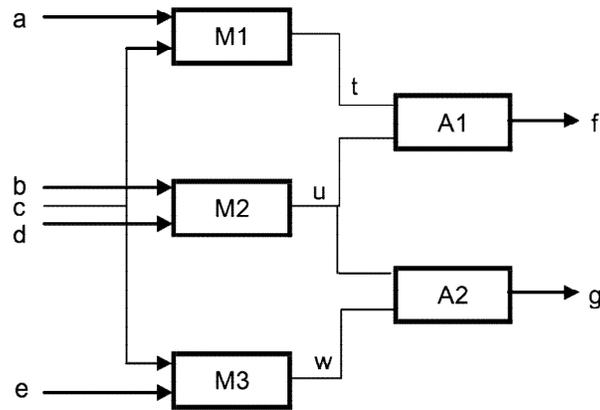


Figura 8. El ejemplo del Polybox.

Los componentes del sistema (COMPS), y la descripción del sistema (DS) se pueden escribir de la siguiente manera:

$$COMPS = \{M1, M2, M3, A1, A2\}$$

$$DS = \{ \text{Multiplicador}(x) \wedge \neg AB(x) \rightarrow \text{Salida}(x) = \text{Entrada1}(x) * \text{Entrada2}(x), \\ \text{Sumador}(x) \wedge \neg AB(x) \rightarrow \text{Salida}(x) = \text{Entrada1}(x) + \text{Entrada2}(x), \\ \text{Multiplicador}(M1), \text{Multiplicador}(M2), \text{Multiplicador}(M3), \\ \text{Sumador}(A1), \text{Sumador}(A2), \\ \text{Salida}(M1) = \text{Entrada1}(A1), \text{Salida}(M2) = \text{Entrada2}(A1), \\ \text{Salida}(M3) = \text{Entrada1}(A2), \text{Salida}(M3) = \text{Entrada2}(A2) \}$$

Donde el predicado  $\neg AB(x)$  se utiliza para indicar que el componente  $x$  se comporta de manera correcta. Ahora supongamos que nuestras observaciones del sistema real (OBS) arrojan los siguientes valores:

$$OBS = \{ \text{Entrada1}(M1) = 2, \text{Entrada2}(M1) = 3, \text{Entrada1}(M2) = 2, \text{Entrada2}(M2) = 3, \\ \text{Entrada1}(M3) = 3, \text{Entrada2}(M3) = 2, \text{Salida}(A1) = 10, \text{Salida}(A2) = 12 \}$$

Debido a estas observaciones realizadas sobre el sistema real, el sistema lógico (  $DS \cup OBS \cup \{ \neg AB(x) \mid x \in COMPS \}$  ) detecta una conducta anormal ya que no es coherente, es decir las observaciones ( $f=10$ ) no coinciden con la conducta predicha ( $f=12$ ). Un diagnóstico  $\Delta$  para  $\{DS, COMPS, OBS\}$  será el componente ó componentes del sistema que hagan que (  $DS \cup OBS \cup \{AB(x) \mid x \in \Delta\} \cup \{ \neg AB(x) \mid x \in COMPS \setminus \Delta \}$  ) sea consistente.

Los posibles diagnósticos serían {A1}, {M1}, {A2,M2}, {M2,M3}, y cualquier conjunto de componentes que contenga a los anteriores, sin embargo es preferible mantener el conjunto mínimo de posibles diagnósticos.

### 2.1.3.2 La aproximación de la comunidad de control automático

El enfoque común en la comunidad de control automático es aproximar el modelo del proceso a través de un modelo lineal e invariante en el tiempo (LTI), con señales de perturbación ( $d(t)$ ) y fallos aditivos ( $f(t)$ ):

$$\begin{aligned}dx/dt &= Ax(t) + Bu(t) + E_d d(t) + E_f f(t) \\y(t) &= Cx(t) + Du(t) + G_d d(t) + G_f f(t)\end{aligned}$$

A partir de este modelo se pueden calcular sus diferencias con las observaciones realizadas sobre el proceso real, y estas diferencias (llamadas residuos) permitirán la detección y diagnóstico de un fallo si los mismos se diseñan para ser sensibles a un subconjunto de fallos e insensibles a otros.

Las suposiciones subyacentes en este enfoque son las siguientes: Si no se presenta un residuo (si la diferencia entre el valor observado de la variable y su valor estimado por el modelo no excede cierto umbral) los fallos asociados al mismo no se encuentran presentes en el proceso (principio de exoneración); si se presentan múltiples fallos, los residuos correspondientes no se anulan entre sí (principio de no compensación).

Existen varias formas de generar estos residuos: Estimación de parámetros a través del monitoreo del proceso; el uso de observadores de estado; ó el uso de ecuaciones de paridad (Figura 9). En cada uno de estos casos, las ecuaciones del modelo matemático utilizadas actúan como relaciones analíticas redundantes, que al ser satisfechas (es decir el residuo calculado es cero) permiten inferir la ausencia de los fallos asociados.

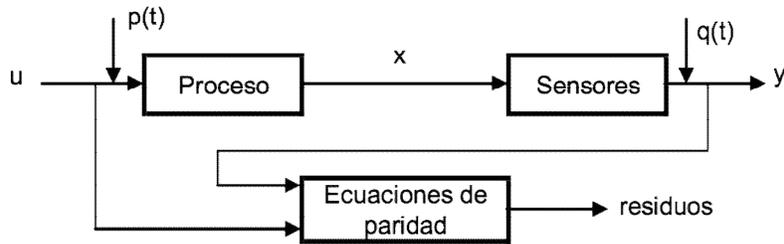


Figura 9. Estimación de residuos utilizando ecuaciones de paridad.

Cada uno de los residuos generados deberá estar asociado a uno ó más fallos del proceso, lo que se representa a través de la matriz de firmas de fallos (Figura 10).

	$f_1$	$f_2$	$f_3$	...	$f_f$
$r_1$	0	1	1		0
$r_2$	1	1	0		1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
$r_r$	0	1	1	...	1

Figura 10. Matriz de firmas de fallos.

En este enfoque, las observaciones se convierten en un vector binario ( $r_1, r_2, r_r$ ) donde  $r_i = 0$  si y solo si, las relaciones analíticas redundantes correspondientes son satisfechas (es decir los cálculos de las ecuaciones matemáticas del modelo coinciden con las observaciones realizadas sobre el proceso real).

El procedimiento de diagnóstico consiste entonces en construir el vector binario de observaciones y compararlo con la matriz de firmas de fallos (Figura 11) para determinar el fallo cuya firma se aproxima más a los residuos calculados a partir de las observaciones del proceso.

Observaciones		$f_1$	$f_2$	$f_3$	...	$f_f$
1	$r_1$	0	1	1		0
0	$r_2$	1	1	0		1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
1	$r_r$	0	1	1	...	1

Figura 11. Comparación de las observaciones con la matriz de firmas de fallos.

Regresando al ejemplo del Polybox, es posible construir las siguientes relaciones analíticas redundantes a partir del conocimiento del modelo del proceso y del vector de observaciones realizadas sobre el mismo  $\{ a_{obs}, b_{obs}, c_{obs}, d_{obs}, e_{obs}, f_{obs}, g_{obs} \}$ :

$$RAR_1 : f_{obs} - a_{obs}c_{obs} - b_{obs}d_{obs} = 0$$

$$RAR_2 : g_{obs} - b_{obs}d_{obs} - c_{obs}e_{obs} = 0$$

A partir de las dos relaciones analíticas redundantes anteriores es posible construir una tercera que nos permita modelar la interacción entre las entradas comunes a los bloques multiplicadores y sumadores:

$$RAR_3 : f_{obs} - g_{obs} - c_{obs}(a_{obs} - e_{obs}) = 0$$

### 2.1.3.3 Aproximación al problema de la incertidumbre de parámetros utilizando intervalos

Se ha propuesto el uso de modelos basados en intervalos para resolver el problema de la incertidumbre de los parámetros, así como perturbaciones y errores de modelado en los modelos utilizados para hacer detección y diagnóstico de fallos (Armengol, 2006). La propuesta es comparar el comportamiento real del sistema con el de un modelo intervalar, y si no se ajusta, generar una alarma de que un fallo se está presentando:

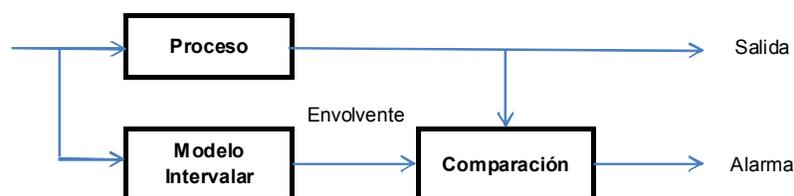


Figura 12. Principio de funcionamiento de los modelos intervalares para la detección y el diagnóstico de fallos.

El objetivo de estos algoritmos es resolver el conjunto de ecuaciones diferenciales (basadas en intervalos) que representan el modelo del sistema representado, y compararlo con la salida real del sistema. La solución del sistema de ecuaciones diferenciales representará una envolvente (debido al uso de intervalos), y si la salida real del sistema se encuentra dentro de dicha

envolvente, la planta se dice que no se encuentra en fallo; si por el contrario la salida real del sistema se encuentra por fuera de la envolvente del modelo, ambos no coinciden, y se dice que la planta se encuentra en fallo. Lo anterior dado que el modelo intervalar reproduce la dinámica del proceso sin fallos.

En muchos trabajos (Nedialkov, 2006; Rauh et al, 2006; Lin y Stadtherr, 2006) se ha ilustrado la solución de ecuaciones diferenciales con valores iniciales, con parámetros intervalares. En particular, el software VALENCIA-IVP (Rauh et al, 2006) (utilizado para realizar pruebas descritas más adelante) se basa en cálculos de envolventes de las variables de estado, y genera límites al error para las soluciones aproximadas del problema de valor inicial.

#### **2.1.4. Detección y diagnóstico de fallos utilizando Control Estadístico de Procesos (SPC)**

Existe una dualidad en el campo de Detección y Diagnóstico de Fallos: Causalidad Vs Correlación (Yang y Xiao, 2012). La aproximación de la causalidad ha buscado a través de modelos (matemáticos ó lógicos) describir cómo se comporta el sistema libre de fallo ó en fallo (Yang et al, 2014). La aproximación de la correlación ha usado técnicas estadísticas y en general aplicando técnicas de Análisis de Datos para detectar una anomalía (Cheng, 2014). También se deben tener en cuenta aquellas aproximaciones que han hecho uso de técnicas estadísticas para detectar perturbaciones y fallos (Bauer y Thornhill, 2008). Teniendo en cuenta estas aproximaciones, se decidió mudar el uso de modelos simplificados respuesta escalón unitario (Zambrano et al, 2011) al uso de Control Estadístico de Procesos (ver anexo 1).

Existen diferentes métodos y técnicas para la evaluar cambios dinámicos, métodos para detección basados en la comparación (chequeo de umbrales); aplicación de pruebas (hipótesis) sobre una variable (univariadas) o múltiples variables (multivariadas), evaluando propiedades estadísticas de las variables del proceso; métodos basados en análisis estadísticos de los datos para sistemas que producen una gran cantidad de datos, se reduce esta cantidad de información quedándose con la parte más significativa, por ejemplo el análisis de componentes principales PCA y análisis del discriminante de Fisher FDA

(Lei et al, 2009; Gustafson, 2007; Isermann, 2005; Hae et al, 2009; Misra et al, 2002; Nguyen y Golinval, 2010; Zhizhou et al, 2011).

El Control Estadístico de Procesos (SPC por sus siglas en inglés) es un concepto que está muy ligado con la calidad, por lo que es una herramienta que muestra el estado de un proceso de transformación en términos estadísticos, lo que permite el monitoreo y establecer los parámetros para su mejor control. El SPC es una metodología que tiene como objetivo proveer el control de procesos en términos estadísticos, además es muy útil para conseguir la estabilidad y mejorar la capacidad del proceso mediante la reducción de la variabilidad. El SPC se desarrolló a pasos agigantados después de la segunda guerra mundial, teniendo un desarrollo más completo en Japón, donde fue utilizado en la industria manufacturera para controlar la variabilidad y mejorar los procesos (Montgomery, 2001; Umut, 2003). Para una visión más detallada de la aplicación del SPC a la detección y el Diagnóstico de Fallos, referirse al anexo 1 del presente documento.

## **2.2 Integración de técnicas de detección y diagnóstico de fallos**

En (Kurtoglu et al, 2009) se realiza la comparación de varias técnicas de detección y diagnóstico de fallos: Sistemas Expertos, Sistemas basados en Modelos, Sistemas basados en Datos y Métodos Estocásticos. La integración de diferentes técnicas de diagnóstico trata de resolver conflictos en aquellos casos en los que no coinciden los resultados obtenidos por cada una de las técnicas.

Cada una de las técnicas integradas no cubrirá todos los fallos del proceso.

Un punto fundamental a la hora de integrar la información proveniente de diferentes fuentes de diagnóstico es la de etiquetar uniformemente la ocurrencia de los eventos en el tiempo, así como los resultados actualizados de cada una de las herramientas de diagnóstico.

Adicionalmente a lo anterior existe conocimiento asociado al desempeño de equipos y condiciones normales de operación que deberá incluirse dentro de la integración.

## 2.2.1 Esquemas de votación

El voto por mayoría ha sido un tema muy estudiado; en particular el teorema del Jurado de Condorcet (TJC) ha validado que la opinión de la mayoría de un grupo es superior a las opiniones individuales (Lam, 2000). Matemáticamente, si asumimos que  $n$  personas independientes tienen la misma probabilidad  $p$  de tener razón, entonces la probabilidad de que la mayoría esté en lo correcto, notada como  $P_c(n)$ , puede ser calculada utilizando la distribución binomial así:

$$P_c(n) = \sum_{m=k}^n \binom{n}{m} p^m (1-p)^{n-m}$$

Donde el valor de  $k$  se determina así:

$$k = \begin{cases} \frac{n}{2} + 1 & \text{si } n \text{ es par,} \\ \frac{n+1}{2} & \text{si } n \text{ es impar.} \end{cases}$$

El teorema del jurado de Condorcet puede colocarse así (Lam, 2000):  
Suponga que  $n$  es impar y  $n \geq 3$ , entonces es cierto que:

1. Si  $p > 0.5$ , entonces  $P_c(n)$  se incrementará monotónicamente en  $n$  y  $P_c(n) \rightarrow 1$  a medida que  $n \rightarrow \infty$ .
2. Si  $p < 0.5$ , entonces  $P_c(n)$  se decrementará monotónicamente en  $n$  y  $P_c(n) \rightarrow 0$  a medida que  $n \rightarrow \infty$ .
3. Si  $p = 0.5$ , entonces  $P_c(n) = 0.5$  para todo  $n$ .

La idea básica del voto por mayoría es la de combinar decisiones de varias técnicas para mejorar la probabilidad de tomar decisiones correctas (Pirjanian, 1998).

## 2.2.2 Fusión Bayesiana

Las redes de creencia o bayesianas permiten representar la dependencia que existe entre determinadas variables y para especificar de manera concisa la distribución de probabilidad conjunta (Russell y Norvig, 1996). La red de

creencia es una gráfica en la que se cumple lo siguiente: Los nodos están formados por un conjunto de variables aleatorias; cada par de nodos se conecta entre sí mediante un conjunto de enlaces cuyo significado es que el nodo origen ejerce una influencia directa sobre el nodo destino; para cada nodo hay una tabla de probabilidad condicional que sirve para cuantificar los efectos de los nodos padre sobre el nodo hijo. La manera en la que se construyen estas redes de creencia consiste en poner primero las causas raíz y después las variables sobre las que tienen influencia, hasta llegar a las que no ejercen ninguna influencia causal sobre las otras variables. Las redes de creencia constituyen una manera natural de representar la información sobre la independencia condicional. Los vínculos entre los nodos representan los aspectos cualitativos del dominio; las tablas de probabilidad condicional representan los aspectos cuantitativos. La inferencia en las redes de creencia implica el cálculo de la distribución de probabilidad de un conjunto de variables de consulta, a partir de un conjunto de variables de evidencia.

### **2.2.3 Arquitecturas híbridas**

Combinar la salida de varios estimadores para crear sistemas con una gran fidelidad, no es una idea nueva. En (Hashem, 1993) se citan múltiples estudios sobre el tema. En (Gopinath, 1999) se reporta la creación de varios sistemas de diagnóstico basados en redes neuronales artificiales (ANN). Análisis en el dominio de la frecuencia (utilizando Wavelets), y análisis estadístico, utilizando PCA (análisis de componentes principales), entrenando redes neuronales artificiales con esta información, para detectar y diagnosticar fallos en un motor diesel.

En (Ramírez, 2003) se muestra cómo se pueden combinar la lógica difusa y la teoría de la probabilidad en la construcción de técnicas de diagnóstico de fallos, que hagan uso de información vaga en la formulación del conocimiento necesario para las tareas de detección y diagnóstico. En (Rao, 2000) se publican los resultados de una plataforma que combina inteligencia artificial, sistemas de computación y tecnología de la información, para desempeñar tareas de soporte a la operación, monitoreo de proceso en línea y diagnóstico, y se muestran dos casos de aplicación, en una caldera y en una planta de pulpa y papel.

Cuando se habla de arquitecturas híbridas se hace referencia a aquellas que mezclan dos o más técnicas para la detección y el diagnóstico de fallos. En (Korbicz et al, 2004) se muestran varias técnicas para utilizar modelos del sistema a diagnosticar, basadas en conocimiento, redes neuronales artificiales, lógica difusa, o algoritmos genéticos como técnica de búsqueda heurística en un conjunto de modelos entrada-salida que ayuda a resolver los problemas de detección y diagnóstico de fallos. Las redes neuronales artificiales, por ejemplo, son técnicas muy utilizadas cuando no se dispone de un modelo analítico del sistema a diagnosticar.

### 2.2.4 Arquitecturas para la fusión de información

Una manera de integrar la información proveniente de diferentes técnicas de diagnóstico es la de ponderar de manera jerárquica la información disponible (Goebel, 2001).

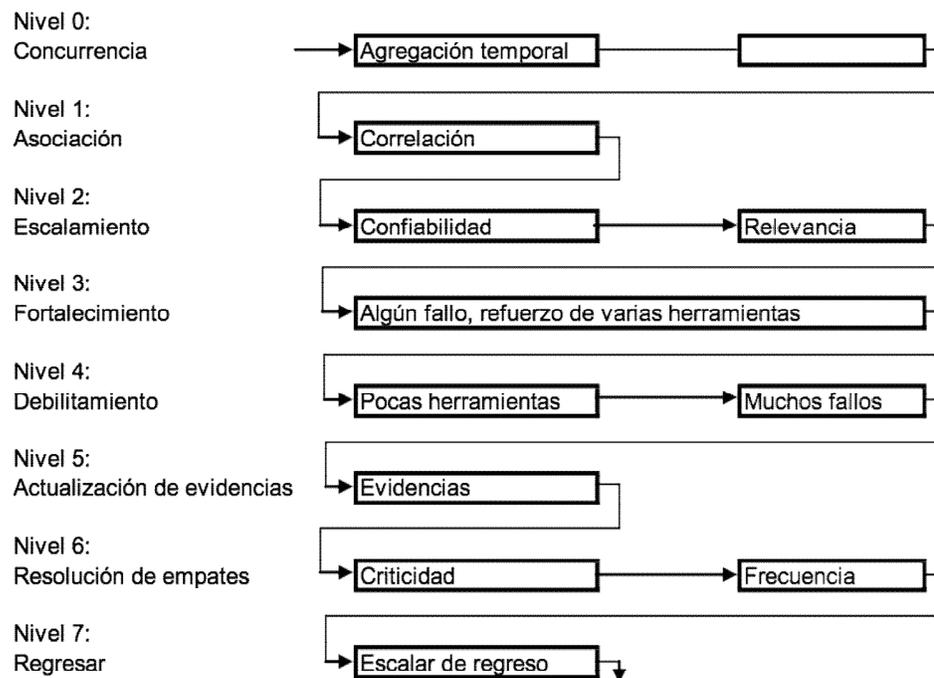


Figura 13. Proceso de fusión de la información de diagnóstico.

La matriz de confusión permite identificar el nivel de certeza de las técnicas empleadas en la detección y el diagnóstico de fallos. Mostrando el nivel de acierto en la técnica empleada para detectar el fallo presumido (  $f_1$  ) versus

el fallo real que ocurrió en el proceso ( $f_1$ ) se puede afianzar la confianza en las técnicas empleadas para la detección y el diagnóstico de fallos.

	$\hat{f}_0$	$\hat{f}_1$	$\hat{f}_2$	...	$\hat{f}_n$
$f_0$	1	0	0		0
$f_1$	0	1	0		0
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
$f_n$	0	0	0	...	1

Figura 14. Matriz de confusión.

### 2.2.5. El diccionario de fallos extendido

En (Agudelo, 2007) se muestra cómo se pueden modelar los fallos a detectar utilizando un diccionario de fallos extendido. Utilizando la información proveniente de las alarmas del proceso, con un modelo del proceso y la experiencia del personal de operaciones en los fallos típicos de la unidad, se pueden detectar y diagnosticar los fallos más comunes de la planta. Los diccionarios de fallos son técnicas basadas en información cuantitativa; una vez se han definido los fallos a detectar, se seleccionan medidas ó cálculos a partir de las mismas que puedan asociarse a los fallos y se registran en una tabla.

Las mediciones obtenidas de un sistema con fallo desconocido son comparadas con las registradas en la tabla, y de esta manera se puede identificar cuál es el fallo que se está presentando (Pous i Sabadí, 2004).

Dependiendo del tipo de técnicas integradas, la información a registrar en el diccionario de fallos extendido podrá ser: El ajuste entre las observaciones del proceso real y el modelo cuantitativo para un escenario de fallo en particular; el nivel de similitud entre la secuencia de alarmas observada en el proceso real, y una secuencia de alarmas asociada previamente al fallo en cuestión; ó simplemente un conjunto de síntomas que se deberán observar durante el escenario de fallo (extraídos del conocimiento de expertos en el proceso).

En cualquiera de las anteriores situaciones, la información se registrará en el diccionario de fallos extendido como un conjunto de síntomas  $S_{ij}$ , donde el primer subíndice hace referencia a la técnica utilizada para detectar dichos

síntomas, y el segundo subíndice hace referencia al fallo definido dentro del diccionario (Figura 19).

	$t_1$	$t_2$	$t_3$	...	$t_r$	Modo
$f_0$	$S_{10}$	$S_{20}$	$S_{30}$		$S_{r0}$	$m_0$
$f_1$	$\phi$	$S_{21}$	$S_{31}$		$S_{r1}$	$m_1, m_2$
$f_2$	$S_{12}$	$S_{22}$	$\phi$		$S_{r2}$	$m_2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	
$f_n$	$S_{1n}$	$S_{2n}$	$S_{3n}$		$S_{rn}$	$m_m$
				...		

Figura 15. Diccionario de fallos extendido.

Algunos de los elementos en este diccionario de fallos extendido podrán no existir ( $\phi$ ) debido a problemas en las técnicas utilizadas para detectar dicho fallo (falta de información de sensores, ausencia de un modelo cuantitativo durante dicho escenario de fallo, etc.); ó incluso tener síntomas repetidos para diferentes fallos debido a problemas de enmascaramiento que dificultan discernir la causa original de los síntomas observados. En el diccionario de fallos extendido se ha adicionado una columna (Modo) que permite identificar el modo de operación durante el cual se puede presentar dicho fallo (pudiendo presentarse un mismo fallo en diferentes modos de operación). Lo anterior facilita la inhibición de la detección de ciertos fallos durante operaciones de arrancada y parada, en las cuales ciertas técnicas tienen inconvenientes para discernir entre una condición anormal de operación y una condición perfectamente normal (por ejemplo, las alarmas de un proceso industrial normalmente se activan durante los procedimientos de arrancada y parada debido a la violación de las ventanas operativas establecidas para la operación normal). El diccionario de fallos extendido permite la integración de las diversas técnicas de detección y diagnóstico, al incorporar no solo los síntomas observables durante la operación normal ( $f_0$ ), sino también la de los síntomas observables durante cada escenario de fallo. La forma en la que un motor de reglas puede modelar este proceso de inferencia es a través del

encadenamiento hacia atrás de un conjunto de reglas que registren las posibles hipótesis de fallo a partir de las entradas en el diccionario de fallos extendido. La regla ij tendrá la siguiente forma:

$$S_{ij} \wedge Modo(m) \Rightarrow f_j$$

Donde en el consecuente se ha colocado la hipótesis de fallo, y en el antecedente el conjunto de síntomas que se deben verificar (modelo cuantitativo del proceso en fallo, secuencia de alarmas, conjunto de síntomas validados por un experto en el proceso, etc.), junto al modo de operación en el que se debe encontrar el proceso, todo a partir de la información registrada en el diccionario de fallos extendido.

El cálculo de la probabilidad asociada a esta sola regla puede realizarse aplicando el teorema de Bayes:

$$P(f_j | S_{ij}) = \frac{P(S_{ij} | f_j)P(f_j)}{\sum_{k=0}^n P(S_{ik} | f_k)P(f_k)}$$

Los valores de probabilidad condicional  $P(S_{ij}|f_j)$  son fácilmente obtenibles debido a que cada una de las técnicas de diagnóstico empleadas debieron realizar una comparación de los datos históricos del proceso durante cada escenario de fallo para validar la presencia del conjunto de síntomas. Sin embargo la extensión al cálculo de la probabilidad cuando se deben fusionar los resultados de más reglas (asociadas a los síntomas detectados por otras técnicas para el mismo fallo) no es tan directa, debido a que no podemos asumir la independencia condicional del conjunto de síntomas  $S_{ij}$  de las diferentes técnicas. Para poder calcular la probabilidad conjunta de estas reglas es necesario tener una buena aproximación de la interacción entre los diferentes síntomas a través de la matriz de covarianzas. Planteando la intersección de la covarianza de los síntomas detectados por las diferentes técnicas de diagnóstico se puede fusionar dicha información minimizando la redundancia (Julier y Uhlmann, 2001). Una buena estimación de esta matriz de covarianzas se puede obtener a partir de las matrices de confusión y relevancia, que para cada técnica muestran los fallos observados versus los fallos detectados, así como los fallos que puede detectar cada una de las técnicas empleadas, permitiendo obtener información tanto de los fallos clasificados de manera correcta, los fallos clasificados de manera incorrecta, fallos falsos detectados, y fallos no detectados (Goebel, 2001).

### 2.3 Las secuencias de alarmas y la forma de modelarlas

En (Mabroukeh y Ezeife, 2010) se presenta una taxonomía de los algoritmos de ajuste de patrones de secuencias. En (Cheng, 2013) se propone un algoritmo de Smith-Waterman teniendo en cuenta información del tiempo para calcular un índice de similitud de las inundaciones de alarmas y descubrir las conexiones entre las alarmas consecuenciales.

En (Mannila, 1998) se plantea una forma de modelar el grado de similitud entre dos secuencias de eventos discretos. En esta metodología se emplea el nivel de trabajo requerido para realizar la transformación de una secuencia en otra, y para ello se definen tres operaciones básicas:

Insertar( $e, t$ ) que inserta un evento del tipo  $e$  en el tiempo  $t$ ;  
Borrar( $e, t$ ) que borra un evento del tipo  $e$  en el tiempo  $t$ ;  
Mover( $e, t, t'$ ) que mueve un evento existente  $e$  desde el tiempo  $t$  hasta el tiempo  $t'$ .

La distancia entre dos secuencias de eventos discretos se define como el costo de realizar las operaciones necesarias para transformar una secuencia en la otra.

A partir de esta noción se puede definir el nivel de similitud entre dos secuencias de alarmas asociadas al mismo fallo, pero ocurridas en fechas diferentes.

## **2.4 Búsqueda de secuencias de alarmas**

En (Graham, 2000) se muestran varios algoritmos para la búsqueda de secuencias de caracteres en cadenas de texto. Entendiendo como una cadena de texto el informe de alarmas existente durante una emergencia, pueden aplicarse estos algoritmos para buscar repeticiones de alarmas en eventos similares ocurridos en fechas diferentes en la planta, para identificar la secuencia de alarmas asociada a dicho fallo.

En particular se citan los algoritmos de fuerza bruta, Knuth-Morris-Pratt y de Boyer-Moore-Horspol, y se pone de manifiesto que son los mejores algoritmos disponibles para aplicaciones generales.

### **2.4.1 Algoritmo de fuerza bruta**

Asumiendo que la cadena de caracteres que se va a analizar se llama  $S$ , y tiene  $n$  caracteres, y el patrón que se va a buscar se llama  $P$  y tiene  $m$

caracteres, en el algoritmo de fuerza bruta, la posición  $i$  del vector de caracteres  $P$  es comparada con la cadena de caracteres  $S(j, j+m-1)$  (para  $1 \leq j \leq n-m+1$ ) hasta que se encuentra una coincidencia ó el final del texto es alcanzado.

Como máximo  $m$  comparaciones pueden ser realizadas para cada posición  $j$ , y un máximo de  $m \cdot (n-m+1)$  comparaciones son requeridas en total en el peor caso. El desempeño esperado es cercano a  $O(m+n)$ . El pseudocódigo de este algoritmo se puede ver en la siguiente figura:

```
i = 1
j = 1
mientras(i ≤ m) y (j ≤ n)
    si Sj = Pi
        i = i + 1
        j = j + 1
    sino
        i = i - j + 2
        j = 1
si j > m
    i = i - m
sino
    i = 0
```

Figura 16. Pseudocódigo del algoritmo fuerza bruta

### 2.4.2 Algoritmo de Knuth-Morris-Pratt

El algoritmo de Knuth-Morris-Pratt es similar al de fuerza bruta, excepto que el subíndice del texto,  $j$ , nunca se decrementa. Cuando ocurre una no coincidencia, se desplaza el patrón para evitar comparaciones redundantes. Esto se logra desplazando el patrón  $P$  hacia adelante con respecto al texto  $S$ , en el caso de que no se encontró coincidencia, en un número de posiciones que dependerá de la estructura del patrón y la posición  $j$  en  $S$ , donde ocurre la no coincidencia. Este desplazamiento se obtiene de una tabla auxiliar previamente calculada.

En el evento de que no ocurra una coincidencia entre el texto y el patrón en las posiciones  $i$  y  $j$ , respectivamente, se sabe que los  $j - 1$  caracteres anteriores del

texto se ajustan a los  $j - 1$  caracteres del patrón. Esta información es utilizada a través de la tabla auxiliar, que contiene valores para la posición  $T_j$ .

La parte crucial del algoritmo es la tabla auxiliar, cuya importancia se verá a través de un ejemplo:

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$S_j$	A	B	C		A	B	C	D	A	B	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	D	E
Patrón (P)	A	B	C	D	A	B	D															
i	1	2	3	4	5	6	7															

Comenzamos ajustando cada carácter después de otro. En el cuarto paso,  $j=1$  e  $i=4$ , pero  $S_4$  es un espacio en blanco, y  $P_4$  es 'D', así que tenemos una no coincidencia. En lugar de comenzar nuevamente en  $j=2$ , se puede notar que una 'A' no ocurre sino hasta  $j=5$ , así que hacemos  $j=5$  e  $i=1$ :

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$S_j$	A	B	C		A	B	C	D	A	B	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	D	E
Patrón (P)					A	B	C	D	A	B	D											
i					1	2	3	4	5	6	7											

En  $j=11$  tenemos nuevamente una no coincidencia. Sin embargo hay que tener presente que justo antes de terminar la presente comparación, se pasó por una secuencia 'AB', que podría ser el comienzo de un ajuste de caracteres. Ya que sabemos que estos dos caracteres se ajustan a los dos primeros caracteres del patrón, no hay necesidad de compararlos nuevamente, así que hacemos  $j=9$  e  $i=3$ :

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$S_j$	A	B	C		A	B	C	D	A	B	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	D	E
Patrón (P)									A	B	C	D	A	B	D							
i									1	2	3	4	5	6	7							

La búsqueda falla inmediatamente, se incrementa  $j=11$  e  $i=1$ , y se comienza la búsqueda nuevamente:

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$S_j$	A	B	C		A	B	C	D	A	B	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	D	E
Patrón (P)											A	B	C	D	A	B	D					
i											1	2	3	4	5	6	7					

Nuevamente el último carácter no se ajusta al patrón, por lo que hacemos  $j=15$  e  $i=3$ :

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$S_j$	A	B	C		A	B	C	D	A	B	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	D	E
Patrón (P)															A	B	C	D	A	B	D	
i															1	2	3	4	5	6	7	

En esta oportunidad si obtenemos un ajuste perfecto entre la cadena de caracteres y el patrón. Hemos asumido la existencia de una tabla T que indica el ajuste parcial entre la cadena de caracteres del texto y el patrón, y que nos muestra dónde debemos empezar a buscar un ajuste, aún cuando la búsqueda actual termine en no coincidencia. El pseudocódigo del algoritmo se muestra a continuación:

$i = 1$

$j = 1$

Mientras  $i \neq n$

    Si  $j+i=n$  entonces

        Salir (no hay coincidencia)

    Sino

        Si  $P[i] = S[j+i]$  entonces

$i = i + 1$

        Sino

$e = T[i-1]$ , donde T representa el ajuste parcial en la tabla descrita arriba

$j = j + i - e$

```

                Si i > 0 entonces i = e
            Fin_Si
        Fin_Si
    Fin_Mientras

```

Figura 17. Pseudocódigo del algoritmo de Knuth-Morris-Pratt

La complejidad de este algoritmo es  $O(n)$ . La meta de la tabla de ajuste parcial  $T$  es no permitir que el algoritmo verifique cualquier carácter en la cadena de texto más de una vez. La observación clave para hacer que esto ocurra así es que habiendo verificado algún segmento de la cadena de texto contra el patrón, se conoce exactamente en qué lugares se pueden dar coincidencias antes de la posición actual en la cadena de texto. En otras palabras, se realiza una pre-búsqueda del patrón y se compila un listado de posibles posiciones donde existen coincidencias con el texto.

Para construir la tabla auxiliar se puede hacer uso del siguiente algoritmo, asumiendo que  $P$  tiene  $n$  caracteres:

```

T[-1] = -1
i = 0
j = T[i-1]
Mientras i ≠ n
    Si P[i] = P[j] entonces
        T[i] = j + 1
        j = j + 1
        i = i + 1
    Sino
        Si j > 0 entonces
            j = T[j-1]
        Sino
            T[i] = 0
            i = i + 1
            j = 0
        Fin_Si
    Fin_Si
Fin_Mientras

```

Figura 18. Pseudocódigo del algoritmo de construcción de la tabla auxiliar

### **3. TECNICAS DE DETECCION Y DIAGNOSTICO APLICADAS**

#### **3.1 Definición de síntomas, causas y fallos a detectar**

La detección y el diagnóstico de fallos incluye la serie de acciones que se toman y las técnicas que se aplican con el objetivo de detectar fallos y defectos de proceso y maquinaria en las etapas incipientes para evitar que dichos fallos se manifiesten en una falla más grande durante la operación, evitando que ocasionen paros de emergencia y tiempos muertos, ayudando a la Seguridad de Proceso y evitando impacto financiero negativo.

En (Sadeghbeigi, 2000) se definen los fallos típicos de una unidad de Cracking Catalítico Fluidizado:

1. Alta temperatura en el regenerador;
2. Circulación de catalizador limitada;
3. Flujo inverso;
4. Depósitos de coque;
5. Baja calidad y rendimientos (relacionada con baja conversión, alta producción de gas seco, baja producción de gasolina, y bajo octanaje en la gasolina);
6. Pérdidas de catalizador;
7. Postcombustión.

A partir de los escenarios de fallo típicos de la unidad y de los datos históricos recolectados se ha construido un diccionario de fallos que asocia los síntomas observables para cada uno de ellos, y que permite delimitar el número de situaciones anormales ante las que las técnicas de detección y diagnóstico de fallos (y posteriormente la plataforma de integración) deberán reaccionar. El uso del diccionario de fallos permite simplificar la complejidad en las tareas de diagnóstico, ya que aunque un comportamiento anormal sea detectado en el proceso, no siempre será diagnosticable. Entre las causas de dichos fallos tenemos:

ITEM	CAUSA	TAG	DESCRIPCION	RECOMENDACIONES PREVENTIVAS EN CONDICIONES DE OPERACIÓN.	RECOMENDACIÓN PARA MINIMIZAR LOS EFECTOS DE LA CAUSA - ACCION A SEGUIR	RECOMENDACIÓN PARA ERRADICAR LA CAUSA DEL FALLO - ACCION A SEGUIR	FALLAS											
							Alta temp. RG	Circulacion limitada	Flujo inverso	Depositos de coque	Baja calidad y rendimientos				Perdidas de catalizador	Postcomb.	Varios	
											Baja conversión	Alta producción de gas seco	Baja producción de gasolina	Bajo octanaje de gasolina				
1	Altas ratas de adición de catalizador fresco al regenerador	umenta_senal_proporcionador	La adición de catalizador fresco sin control de dosificación, produce una alta actividad del catalizador dentro del regenerador aumentando su temperatura.	* Realice la adición de catalizador fresco (frecuencia de adición y cantidad de catalizador) de acuerdo con los resultados de laboratorio y las recomendaciones del ingeniero del proceso. * El aumento de adición de catalizador fresco hace que se produzcan mas gases	* Aumentar el flujo del FIC27020 (Flujo de la Nafta Pesada Producto a D-3850) para mantener el punto final de ebullición de gasolina. * Disminuir el flujo de ALC Producto a Tanque K-2704 (FIC27017) para garantizar que el valor de la gravedad API se mantenga en tre 1 y 3.	* Detener la adición de catalizador fresco mientras se normaliza la temperatura de la fase densa y la fase diluida del regenerador. * Realizar una adición dosificada de catalizador fresco, mediante el proporcionador, cambiando los parametros de adición (libras y frecuencia).												
		umenta_T127147					Si el flujo de aire principal se aumenta y con esto se produce un aumento en la temperatura del regenerador quiere decir que se esta trabajando a combustión parcial (presencia de coque en la fase densa del regenerador). El catalizador regenerado llega al reactor con una mayor temperatura y sobrecarga la carga, produciendo más gas seco. El aumento del flujo del soplador también produce que se la velocidad superficial del regenerador aumente	* Antes de aumentar el flujo de aire del compresor C2701 tomar una muestra de catalizador, para revisar su contextura y color. * Aumentar gradualmente el flujo de aire principal monitoreando la temperatura de la fase densa del regenerador, si esta disminuye y la temperatura de salida de los ciclones aumenta quiere decir que se esta trabajando a combustión completa.	* Disminuir el flujo de ALC Producto a Tanque K-2704 (FIC27017) para garantizar que el valor API se mantenga en tre 1 y 3.	* Disminuir el flujo de aire principal (FIC2701).								
		umenta_T127144																
		igual_DIF_T127144_T127147																
		disminuye_FIC27029																
		disminuye_FIC27008																
umenta_F127501																		
2	Aumento del flujo de aire principal (con alto porcentaje de carbón en el catalizador en equilibrio - combustión parcial).	umenta_SIC27501	Adicionarle slurry reciclo a premezcla en condición normal de operación aumenta el contenido de carbon en la carga, que posteriormente se va a quemar en el regenerador aumentando su temperatura.  La coquización en el reactor es mas factible que ocurra con cargas pesadas, pues es probable que algunos de sus componentes no se vaporicen a las temperaturas.  Este vapor es utilizado para mantener la circulación, y evitar que el catalizador en el reactor caiga al fondo de este recipiente causando daños al equipo. El vapor de elevación entra por la parte inferior del riser; si se inyecta menor cantidad de vapor de elevación el soplador de aire C2701 es quien mantiene la presión en el regenerador, una disminución considerable del flujo de descarga puede hacer que la diferencial de presión entre el regenerador y el reactor se invierta a tal punto que el flujo de nafta al riser se deja de retirar calor al regenerador debido a que se deja de vaporizar este producto consumiendo menos calor.  Esta manera de cracking con bajo tiempo de residencia, le da menos oportunidad a los compuestos pesados (posiblemente sin vaporizar) de contactar los sitios activos del catalizador. Este material pasa	* Realice la adición de catalizador fresco (frecuencia de adición y cantidad de catalizador) de acuerdo con los resultados de laboratorio y las recomendaciones del ingeniero del proceso. * El aumento de adición de catalizador fresco hace que se produzcan mas gases	* Aumentar el flujo del FIC27020 (Flujo de la Nafta Pesada Producto a D-3850) para mantener el punto final de ebullición de gasolina. * Disminuir el flujo de ALC Producto a Tanque K-2704 (FIC27017) para garantizar que el valor de la gravedad API se mantenga en tre 1 y 3.	* Detener la adición de catalizador fresco mientras se normaliza la temperatura de la fase densa y la fase diluida del regenerador. * Realizar una adición dosificada de catalizador fresco, mediante el proporcionador, cambiando los parametros de adición (libras y frecuencia).												
		umenta_FIC2701																
		umenta_T127147																
		umenta_T127144																
		umenta_PIC27116																
		umenta_Z127100																
		umenta_Z127101																
		disminuye_FIC27029																
		disminuye_FIC27008																
		umenta_F127501																
		disminuye_Z127103																
		disminuye_Z127104																
umenta_A127100																		
umenta_vel_superficial_Rg																		
3	Inyección innecesaria de slurry reciclo a premezcla	umenta_FIC27010	Adicionarle slurry reciclo a premezcla en condición normal de operación aumenta el contenido de carbon en la carga, que posteriormente se va a quemar en el regenerador aumentando su temperatura.  La coquización en el reactor es mas factible que ocurra con cargas pesadas, pues es probable que algunos de sus componentes no se vaporicen a las temperaturas.  Este vapor es utilizado para mantener la circulación, y evitar que el catalizador en el reactor caiga al fondo de este recipiente causando daños al equipo. El vapor de elevación entra por la parte inferior del riser; si se inyecta menor cantidad de vapor de elevación el soplador de aire C2701 es quien mantiene la presión en el regenerador, una disminución considerable del flujo de descarga puede hacer que la diferencial de presión entre el regenerador y el reactor se invierta a tal punto que el flujo de nafta al riser se deja de retirar calor al regenerador debido a que se deja de vaporizar este producto consumiendo menos calor.  Esta manera de cracking con bajo tiempo de residencia, le da menos oportunidad a los compuestos pesados (posiblemente sin vaporizar) de contactar los sitios activos del catalizador. Este material pasa	* Realice la adición de catalizador fresco (frecuencia de adición y cantidad de catalizador) de acuerdo con los resultados de laboratorio y las recomendaciones del ingeniero del proceso. * El aumento de adición de catalizador fresco hace que se produzcan mas gases	* Aumentar el flujo del FIC27020 (Flujo de la Nafta Pesada Producto a D-3850) para mantener el punto final de ebullición de gasolina. * Disminuir el flujo de ALC Producto a Tanque K-2704 (FIC27017) para garantizar que el valor de la gravedad API se mantenga en tre 1 y 3.	* Detener la adición de catalizador fresco mientras se normaliza la temperatura de la fase densa y la fase diluida del regenerador. * Realizar una adición dosificada de catalizador fresco, mediante el proporcionador, cambiando los parametros de adición (libras y frecuencia).												
		disminuye_FIC27021																
		disminuye_FIC27029																
		disminuye_FIC27008																
		disminuye_L127010																
		disminuye_FIC27023																
		disminuye_FIC27005																
		umenta_T127147																
		umenta_T127144																
		umenta_L127002																
disminuye_L127003																		
4	Disminución del flujo de Vapor de Elevación al Elevador del Reactor de R2701 (Steam Lift)	disminuye_FIC27129	Este vapor es utilizado para mantener la circulación, y evitar que el catalizador en el reactor caiga al fondo de este recipiente causando daños al equipo. El vapor de elevación entra por la parte inferior del riser; si se inyecta menor cantidad de vapor de elevación el soplador de aire C2701 es quien mantiene la presión en el regenerador, una disminución considerable del flujo de descarga puede hacer que la diferencial de presión entre el regenerador y el reactor se invierta a tal punto que el flujo de nafta al riser se deja de retirar calor al regenerador debido a que se deja de vaporizar este producto consumiendo menos calor.  Esta manera de cracking con bajo tiempo de residencia, le da menos oportunidad a los compuestos pesados (posiblemente sin vaporizar) de contactar los sitios activos del catalizador. Este material pasa	* Una razón para disminuir el vapor de elevación es disminuir la producción de agua ácida en el Drum D2705, garantizando la manutención de la velocidad del riser inyectando gas lift. Cuando disminuya el vapor de elevación el soplador de aire C2701 es quien mantiene la presión en el regenerador, una disminución considerable del flujo de descarga puede hacer que la diferencial de presión entre el regenerador y el reactor se invierta a tal punto que el flujo de nafta al riser se deja de retirar calor al regenerador debido a que se deja de vaporizar este producto consumiendo menos calor.  Esta manera de cracking con bajo tiempo de residencia, le da menos oportunidad a los compuestos pesados (posiblemente sin vaporizar) de contactar los sitios activos del catalizador. Este material pasa	* Inyectar gradualmente gas lift de elevación. * Disminuir gradualmente la tempartura de reaccion TIC27157.	* Aumentar el flujo de Vapor de Elevación al Elevador del Reactor de R2701 (Steam Lift) * Si no se puede ajustar vapor por el FIC27129, inyectar vapor por el FIC27130 por el FIC27131.												
		disminuye_FV27129																
		disminuye_vel_preaceleracion																
		disminuye_vel_riser																
5	Disminución del flujo de descarga del soplador de aire principal. Controlador de eficiencia FIC2701.	disminuye_PDI27120	Este vapor es utilizado para mantener la circulación, y evitar que el catalizador en el reactor caiga al fondo de este recipiente causando daños al equipo. El vapor de elevación entra por la parte inferior del riser; si se inyecta menor cantidad de vapor de elevación el soplador de aire C2701 es quien mantiene la presión en el regenerador, una disminución considerable del flujo de descarga puede hacer que la diferencial de presión entre el regenerador y el reactor se invierta a tal punto que el flujo de nafta al riser se deja de retirar calor al regenerador debido a que se deja de vaporizar este producto consumiendo menos calor.  Esta manera de cracking con bajo tiempo de residencia, le da menos oportunidad a los compuestos pesados (posiblemente sin vaporizar) de contactar los sitios activos del catalizador. Este material pasa	* Una razón para disminuir el vapor de elevación es disminuir la producción de agua ácida en el Drum D2705, garantizando la manutención de la velocidad del riser inyectando gas lift. Cuando disminuya el vapor de elevación el soplador de aire C2701 es quien mantiene la presión en el regenerador, una disminución considerable del flujo de descarga puede hacer que la diferencial de presión entre el regenerador y el reactor se invierta a tal punto que el flujo de nafta al riser se deja de retirar calor al regenerador debido a que se deja de vaporizar este producto consumiendo menos calor.  Esta manera de cracking con bajo tiempo de residencia, le da menos oportunidad a los compuestos pesados (posiblemente sin vaporizar) de contactar los sitios activos del catalizador. Este material pasa	* Inyectar gradualmente gas lift de elevación. * Disminuir gradualmente la tempartura de reaccion TIC27157.	* Aumentar el flujo de Vapor de Elevación al Elevador del Reactor de R2701 (Steam Lift) * Si no se puede ajustar vapor por el FIC27129, inyectar vapor por el FIC27130 por el FIC27131.												
		umenta_F127501																
		disminuye_FIC2701																
		disminuye_SIC27001																
		disminuye_PIC27116																
		disminuye_Z127100																
		disminuye_Z127101																
		disminuye_A127100																
6	Disminución de flujo de nafta de viscorreductor FIC27133.	disminuye_FIC27133	Si se disminuye el flujo de nafta de viscorreductor es necesario compensarlo con destilado de baja presión por la bomba P2711.  Cuando aumente el flujo de vapor de elevación tenga en cuenta mantener la velocidad de elevación en el riser entre 11.5 y 12.5 ft/s, esto se logra retirando inicialmente gas lift e inyectando	* Retirar gradualmente gas lift de elevación.	* Ajustar la composición de carga tendiendo a hacerla mas liviana. * Bajar gradualmente temperatura de reaccion	* Aumentar el flujo del soplador de aire principal (controlador de eficiencia)												
		umenta_T127147																
		umenta_T127144																
		disminuye_F127501																
7	Aumento del vapor de elevación al elevador del reactor. Cracking en el elevador (a menor tiempo de residencia).	umenta_FIC27129	Esta manera de cracking con bajo tiempo de residencia, le da menos oportunidad a los compuestos pesados (posiblemente sin vaporizar) de contactar los sitios activos del catalizador. Este material pasa	Cuando aumente el flujo de vapor de elevación tenga en cuenta mantener la velocidad de elevación en el riser entre 11.5 y 12.5 ft/s, esto se logra retirando inicialmente gas lift e inyectando	* Retirar gradualmente gas lift de elevación.	* Ajustar el flujo del FIC27129 en su valor normal de operación.												
		umenta_FV27129																
		umenta_PDI27120																
		disminuye_F127535																
		disminuye_F127501																

Tabla 2.. Síntomas, causas y fallos a detectar.

En la anterior tabla tenemos algunas de las causas que hacen parte de la base de conocimientos recolectada con expertos en el proceso (ver Anexo 2), con sus síntomas y fallos asociados.

### **3.2 Información relevante para la detección y el diagnóstico de fallos en una unidad de Cracking Catalítico Fluidizado**

La definición de las técnicas de diagnóstico propuestas para la integración surge precisamente de los enunciados anteriores, en los que se ve claramente la necesidad de incorporar un modelo dinámico del proceso que permita detectar desviaciones tempranas de las condiciones de operación normales de la planta, así como también es importante incorporar la experiencia del personal de operaciones que ha desarrollado con el paso de los años su propio diccionario de fallos en el que se encuentran identificados los síntomas asociados a los fallos típicos del proceso.

### **3.3 Determinación de los estados de operación del proceso**

Es importante notar que aunque existan condiciones operacionales que no sean las de operación normal, el definir las como una situación anormal dependerá del modo de operación de la planta: Arrancada, operación normal, fallos incipientes, fallos críticos, parada, o transiciones entre estos. Definir los modos de operación de la planta, y las condiciones de operación asociadas a estos es clave para poder determinar si una condición corresponde a un fallo. En (Caceres & Roper, 2006) se introduce el modelo GEMMA (Garcia, 1999) de una planta de cracking catalítico que puede ser utilizado como punto de partida para determinar el modo de operación de la planta.

### **3.4 Información de alarmas del proceso**

#### **3.4.1 El procesamiento de las alarmas**

Los operadores de consola tienen que enfrentar ciertas condiciones en las alarmas de la planta:

- Alarmas poco descriptivas.
- Alarmas demasiado detalladas.
- Demasiadas alarmas durante una perturbación del proceso.
- Falsas alarmas.
- Multiplicidad de alarmas para el mismo evento.
- Alarmas que cambian demasiado rápido para ser leídas en el despliegue gráfico del operador.
- Alarmas que no se encuentran en orden de prioridad.

El procesamiento de las alarmas propuesto en el presente documento detecta secuencias de alarmas asociadas al mismo tipo de fallo y crea un análisis causa-efecto inteligente.

### **3.4.2 Módulo de aprendizaje de fallos basado en las secuencias de alarmas identificadas**

En lugar del algoritmo de Knuth-Morris-Pratt se puede aplicar el algoritmo de fuerza bruta a las secuencias de alarmas si se asume cada alarma como una secuencia de longitud 1, y se ejecuta varias veces el algoritmo permitiendo hallar las alarmas de la secuencia corta en la secuencia larga. Por lo anterior es válido el uso del algoritmo de fuerza bruta en la solución del problema de encontrar las secuencias de alarmas asociadas a un fallo en particular.

Para verificar los conceptos antes vistos se escogió el fallo asociado a la falta de agua de enfriamiento del compresor de aire. Dicho fallo ya había sido analizado previamente (Agudelo, 2010), y se tenían las secuencias de las alarmas asociadas al mismo para tres fechas diferentes. En la figura 3 se muestran las secuencias de las alarmas asociadas a la misma causa del fallo (pérdida de agua de enfriamiento al soplador C-501).

Para analizar automáticamente este fallo, se desarrolló una rutina en el lenguaje de programación C++, implementando el algoritmo de fuerza bruta.

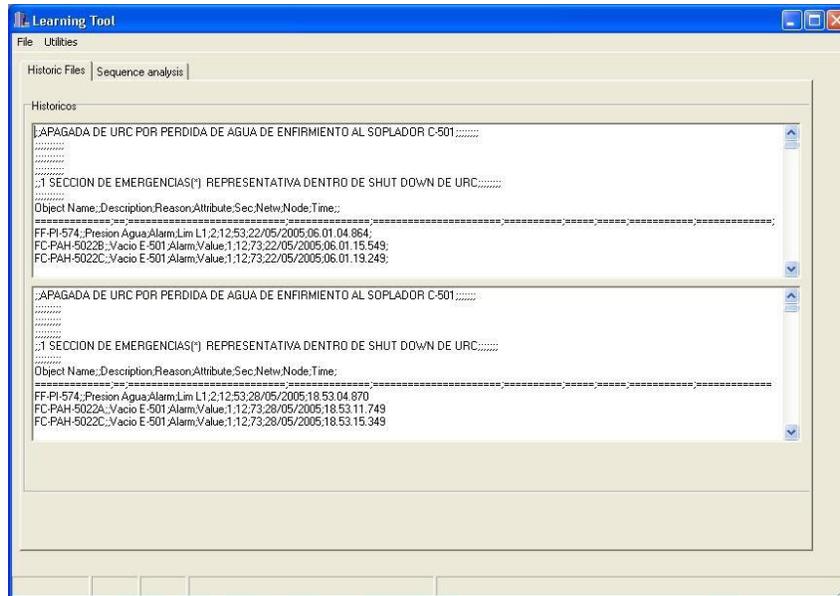


Figura 19. Interface gráfica de la aplicación para realizar el análisis de las secuencias de alarmas.

Se cargaron en esta aplicación dos archivos históricos correspondientes a datos del 22 de mayo del año 2005, y el 28 de mayo del año 2005, y se compararon las alarmas utilizando el algoritmo de fuerza bruta.

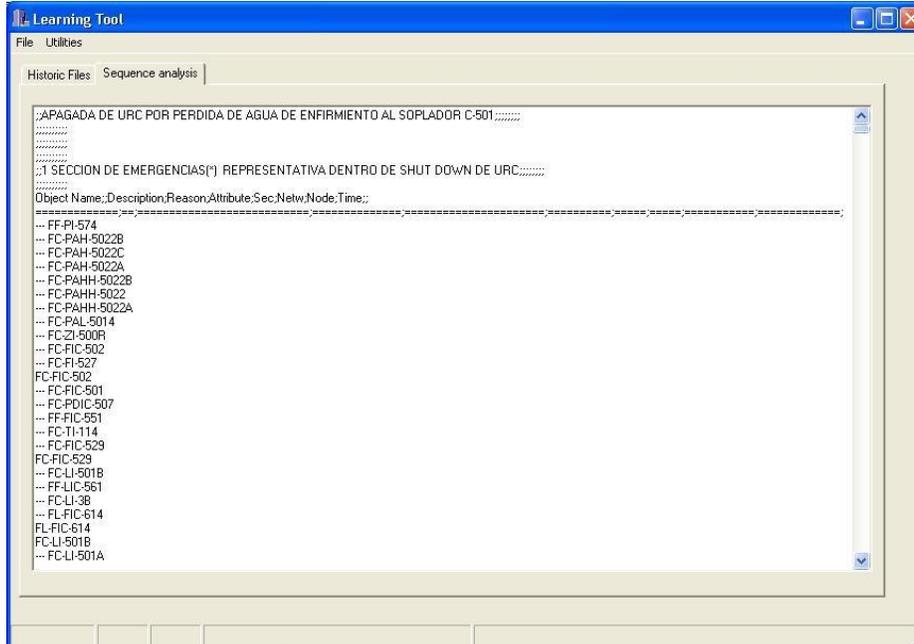


Figura 20. Resultados de la aplicación para hacer análisis de las secuencias de alarmas.

El resultado de aplicar el algoritmo fuerza bruta a los dos eventos históricos, fue comparado con la secuencia de las alarmas identificada de forma manual. Para esto se procedió a buscar en el listado manual de las alarmas su

identificación, y verificar que dicha identificación se encontrara presente en la secuencia de las alarmas identificada de manera manual. Lo que se obtuvo fue un ajuste entre el algoritmo manual y el algoritmo automatizado.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
3			Object Name	Description	Attribute				Time		
4											
5	A1		FC-A-M-507D	Estacion	MV < L1		A1			28/05/2005	
6	B1		FC-A-M-507D	Estacion	MV < L2		B1			28/05/2005	
7	C1		FCFI501-FCF	Dif TX Aire C501	FAH		C1				21/06/2006
8	D1		FC-FI-515	Vap. 600 a C-501	FAL		D1				21/06/2006
9	E1		FC-FI-527	Aire PPAL al RG	Lim L1 ó FAL		E1	22/05/2005	28/05/2005		21/06/2006
10	F1		FC-FIC-501	Aire a C-501	MV < L1 ó FAL		F1	22/05/2005	28/05/2005		21/06/2006
11	G1		FC-FIC-501	Aire a C-501	MV < L2		G1	22/05/2005	28/05/2005		
12	H1		FC-FIC-502	Aire Control	MV < L1 ó FAL		H1	22/05/2005	28/05/2005		21/06/2006
13	I1		FC-FIC-502	Aire Control	Quality2		I1		28/05/2005		
14	J1		FC-FIC-529	Antisurge C-501	MV < L1		J1	22/05/2005	28/05/2005		
15	K1		FC-FIC-529	Antisurge C-501	MV < L2		K1	22/05/2005	28/05/2005		
16	L1		FC-LAH-5009A	Condensado FC-E-501	Value		L1		28/05/2005		
17	M1		FC-LAH-5009B	Condensado FC-E-501	Value		M1		28/05/2005		
18	N1		FC-LAHH-5009B	Condensado FC-E-501	Value		N1		28/05/2005		
19	O1		FC-LI-1A	Catalizador RX	Lim L1 ó LAL		O1	22/05/2005	28/05/2005		21/06/2006
20	P1		FC-LI-1B	Catalizador RX	Lim L1 ó LAL		P1	22/05/2005	28/05/2005		21/06/2006
21	Q1		FC-LI-3B	Cataliz Lecho RG	Lim L1 ó LAL		Q1	22/05/2005	28/05/2005		21/06/2006
22	R1		FC-LI-3B	Cataliz Lecho RG	LAH		R1				21/06/2006
23	S1		FC-LI-5005	Aceite cons FC-C-501	LAL		S1				21/06/2006
24	T1		FC-LI-501A	Pozo Rebose RG	Lim L1		T1	22/05/2005	28/05/2005		
25	U1		FC-LI-501A	Pozo Rebose RG	LAH		U1				21/06/2006
26	W1		FC-LI-501B	Pozo Rebose RG	Lim H1 ó LAH		W1	22/05/2005	28/05/2005		21/06/2006
27	X1		FC-LI-501B	Pozo Rebose RG	Lim L1		X1	22/05/2005	28/05/2005		
28	Y1		FC-LIC-503	Nivel del E-501	MV < L1 ó LAL		Y1	22/05/2005	28/05/2005		21/06/2006
29	Z1		FC-LIC-503	Nivel del E-501	MV < L2		Z1	22/05/2005	28/05/2005		
30	A2		FC-LIC-503	Nivel del E-501	LAH		A2				21/06/2006
31	B2		FC-PAH-5022A	Vacio E-501	Value ó PAH		B2	22/05/2005	28/05/2005		21/06/2006
32	C2		FC-PAH-5022B	Vacio E-501	Value ó PAH		C2	22/05/2005	28/05/2005		21/06/2006
33	D2		FC-PAH-5022C	Vacio E-501	Value ó PAH		D2	22/05/2005	28/05/2005		21/06/2006
34	E2		FC-PAH-5022	Vacio E-501	Value		E2	22/05/2005	28/05/2005		

Figura 21. Alarmas tabuladas para encontrar su ocurrencia en los días analizados.

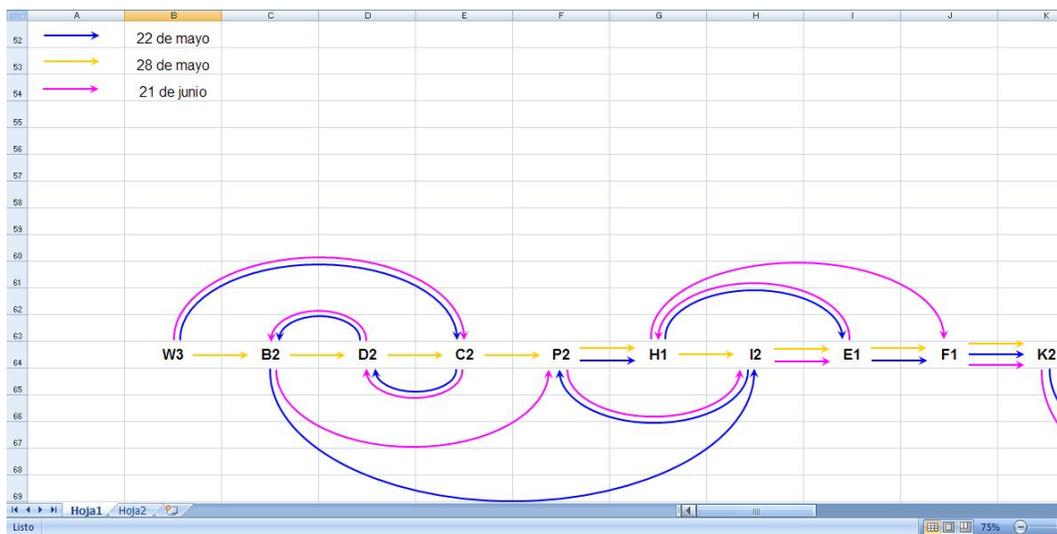


Figura 22. Secuencia de alarmas parcial identificada de manera manual correspondiente a la pérdida de agua de enfriamiento en el compresor C-501.

--- FF-PI-574  
--- FC-PAH-5022B  
--- FC-PAH-5022C  
--- FC-PAH-5022A  
--- FC-PAHH-5022B  
--- FC-PAHH-5022  
--- FC-PAHH-5022A  
--- FC-PAL-5014  
--- FC-ZI-500R  
--- FC-FIC-502  
--- FC-FI-527  
FC-FIC-502  
--- FC-FIC-501  
--- FC-PDIC-507  
--- FF-FIC-551  
--- FC-TI-114  
--- FC-FIC-529

Figura 23. Alarmas coincidentes entre la secuencia manual y la secuencia hallada de manera automática.

El objetivo de la aplicación del algoritmo de fuerza bruta a los históricos de alarmas es la detección de secuencias de alarmas que luego puedan ser incorporadas al diccionario extendido de fallos, como se muestra en (Agudelo, 2010).

Como conclusión de las pruebas realizadas podemos extraer que la ocurrencia de las alarmas no ocurre en estricto orden a través de los históricos con las alarmas asociadas al mismo fallo, por lo que es recomendable que las reglas asociadas a las secuencias de las alarmas se disparen siempre (en el antecedente tendremos las alarmas que hacen parte de la secuencia, y en el consecuente tendremos la hipótesis del fallo), mostrando el porcentaje de las alarmas que se han presentado y que hacen parte de la secuencia. Este porcentaje puede actuar como nivel de certeza en que el fallo en cuestión se está presentando.

Hay alarmas que tan solo se dispararon en dos de los tres eventos analizados. Estas alarmas actúan como ruido que no debe tenerse en cuenta en la estructuración de la secuencia de alarmas.

Otra conclusión de las pruebas es que a partir de la comparación con históricos de fechas adicionales, se puede acortar el listado de alarmas que hacen parte de la secuencia.

### **3.5 Sistema basado en conocimiento para la detección y el diagnóstico de fallos**

Se implementó la base de conocimientos recolectada en una herramienta de software (ECO AURORA) que, en arquitectura Servidor-Cliente, realiza la detección y diagnóstico de los fallos, a través de las causas programadas, comparando los síntomas observados con los previamente programados en las reglas.

La función principal de la aplicación servidora es detectar eventos anormales (fallos) y determinar sus respectivas causas, para esto utiliza el comportamiento de las variables del proceso, calculando periódicamente la tendencia (incremento o decremento) de los Tags establecidos como síntomas en la base de conocimiento. La tendencia de las variables se calcula por medio de una medida de dispersión como la desviación estándar, se toma una ventana de muestreo poblacional y se realiza el proceso matemático, teniendo en cuenta que dos desviaciones estándar por debajo o por encima del valor obtenido generan un decremento o incremento respectivamente. Esta ventana de muestreo se actualiza ubicando el valor actual en la última posición y los otros valores descendientemente.

En la siguiente figura se presenta la estructura utilizada para la programación del algoritmo:

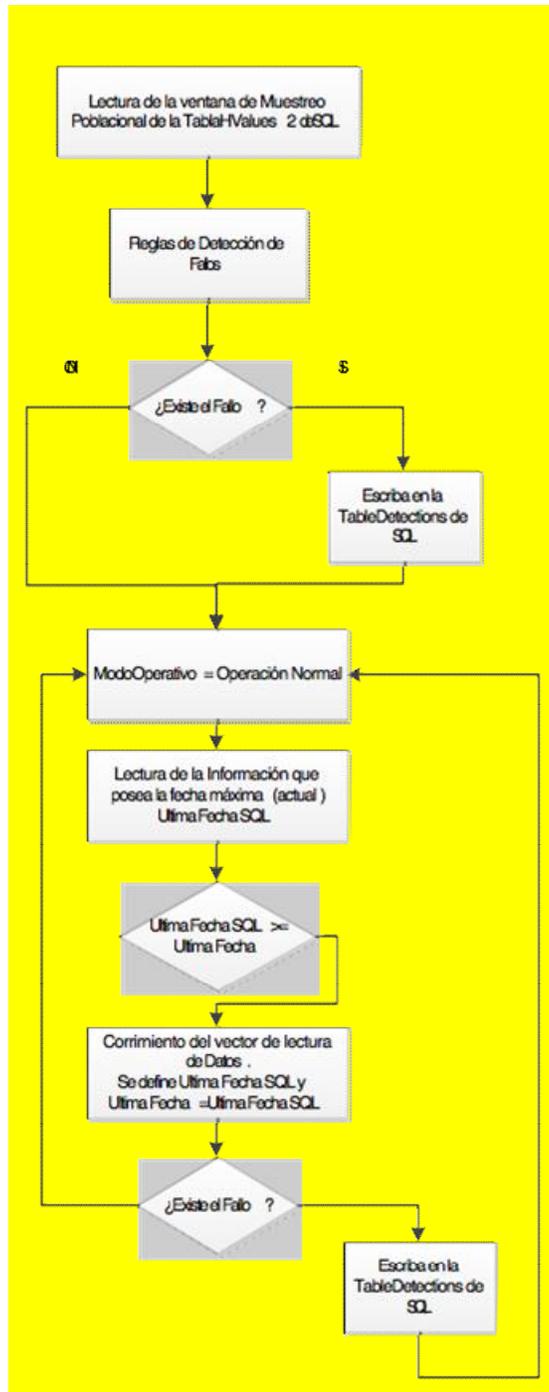


Figura 24. Algoritmo de la Aplicación Servidora Inteligente

### 3.5.1 Ventajas del aseguramiento del conocimiento para futuras generaciones de operadores

Una de las grandes ventajas de asegurar el conocimiento acerca de las mejores prácticas operacionales, y las acciones que se deben realizar para

cada conjunto de síntomas que muestren que una situación anormal se comienza a presentar en la planta, es que se incorpora la experiencia del personal experto, asegurando el conocimiento para futuras generaciones de operadores, estandarizando las mejores prácticas.

### **3.5.2 Base de conocimiento recolectada**

El conocimiento necesario para integrar las técnicas propuestas para la detección y el diagnóstico de fallos, se ha recolectado (y se muestra en el anexo 2) en términos de reglas, donde en los antecedentes tenemos los síntomas de los fallos principales de la unidad, y en los consecuentes la hipótesis de fallo que se confirma si los síntomas del antecedente se verifican como ciertos.

Con la revisión bibliográfica sobre el funcionamiento de la Unidad de FCC se empezó a crear la base del conocimiento por medio de textos relacionados con el tema, como por ejemplo libros de descripción del proceso de Cracking Catalítico Fluidizado, técnicas de adquisición del conocimiento, tesis de grado relacionadas con el tema, etc. Además se recibieron charlas sobre funcionamiento básico de la unidad de FCC.

Para la recolección y el análisis de la información de alarmas, modos de fallos, variables de proceso y equipos asociados a la URC, se recibieron charlas del personal experto del grupo de automatización y control del Instituto Colombiano del Petróleo y la FCC UOP1 de la GRB.

La presencia de un fallo depende de la aparición de ciertos síntomas en la planta en un preciso momento, la base de hechos verifica el grado de veracidad de esta sintomatología. Para esto, se creó una aplicación servidora de datos la cual permite la adquisición de información en línea de la base de datos en tiempo real de la refinería (inicialmente del sistema de control de la planta DCS I/A de Foxboro) y una aplicación servidora inteligente que constantemente evalúa la tendencia de las variables de proceso.

Inicialmente el motor de inferencia lógica se realizó por medio de un sistema Shell (programas que proveen una interfaz de usuario para acceder a los

servicios del sistema operativo, estos pueden ser gráficos o de texto simple) basado en reglas de Java, el cual utiliza como interprete el lenguaje Jess, que es ampliamente utilizado para construir sistemas inteligentes, el cual por medio de interrogaciones permite conocer el grado de verdad de cualquiera de las hipótesis que se puedan tener como causas de fallo una vez actualizada la base de hechos.

El análisis que realiza el prototipo de la herramienta inteligente se enfoca principalmente en la comparación de toda la base del conocimiento experto y la secuencia de alarmas con la base de datos en línea del sistema.

Finalmente se desarrolló una interfaz gráfica mediante el lenguaje de programación Borland C++ Builder (luego migrado a MatLab), que es un lenguaje de programación imperativa con la gran ventaja que ofrece de crear algoritmos orientados a objetos con un ambiente de desarrollo visual que facilita la construcción del programa y solución de problema, además permite concentrarse solo en resolver el problema planteado, debido a que la interface gráfica (pantallas) es generada por el propio compilador.

### **3.5.3. Razonamiento causal Vs Correlaciones estadísticas**

La técnica de razonamiento utilizada en la formulación de reglas es el razonamiento inductivo (Sinnot-Armstrong y Fogelin, 2010). Esta técnica ha sido utilizada para recopilar las causas posibles de los fallos definidos, que se encuentran de experiencias previas de los operadores, supervisores e ingenieros en la operación de una unidad de FCC. Sin embargo, se hace necesario el emplear técnicas estadísticas (correlaciones) (Mayer-Schöberger y Cukier, 2013) que ayuden a la apropiada detección y diagnóstico de fallos.

## **3.6 El modelo dinámico del proceso**

En la literatura científica se encuentran detallados varios modelos rigurosos desarrollados para unidades de cracking catalítico fluidizado (Secchi et al 2001; Han et al 2000; Ellis et al 1998). Se analiza primero el uso de un modelo riguroso basado en intervalos, a través del análisis del benchmark de los tres tanques de agua. Sin embargo se concluye que lo más apropiado es el uso de

un modelo simplificado (tipo respuesta escalón) debido a la complejidad de los procesos de refinación y en aras de la implementación que garantice el uso de la herramienta para la detección y el diagnóstico de fallos. Además, hacer uso de modelos rigurosos (basados en principios fundamentales), haría prácticamente de la construcción de una herramienta para la detección y el diagnóstico de fallos, una tarea demasiado compleja.

Ha sido estudiado el uso de modelos intervalares, que intentan resolver el problema de la incertidumbre en los parámetros del proceso (Agudelo et al 2007), y que han demostrado el nivel de complejidad de las ecuaciones diferenciales a resolver para los procesos más sencillos. El uso de modelos rigurosos intervalares resuelve el problema de la incertidumbre en los parámetros del modelo, sin embargo para un problema tan sencillo como el de los tres tanques de agua plantea ecuaciones diferenciales que son muy difíciles de resolver (Agudelo et al 2007).

El modelo tipo respuesta escalón propuesto para realizar la detección de perturbaciones, que permitan detectar un fallo en sus etapas iniciales (antes de que escale a problemas más complejos) es el mismo modelo utilizado en el control multivariable predictivo de la unidad.

La solución al problema de la incertidumbre en los parámetros del modelo se resuelve ya no a través del uso de modelos intervalares, sino a través de la especificación de franjas que determinan la variabilidad permitida para las variables de entrada, salida y estado de la planta:

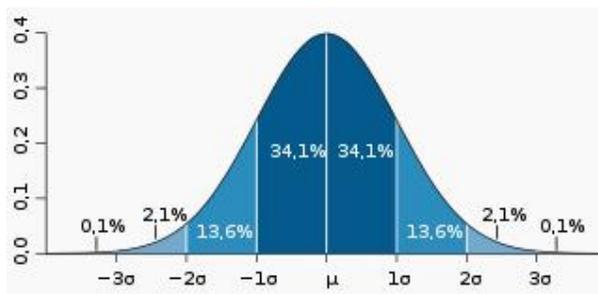


Figura 25. Franjas correspondientes a la distribución normal de los datos colectados en línea.

La incertidumbre se abordará en el análisis de franjas estadísticas que aproximarán el cálculo de los síntomas asociados a cada fallo detectable, haciendo que si una variable se encuentra por encima de dos desviaciones

estándar de su valor registrado, se asuma que el síntoma observado sea el aumento de dicha variable; mientras que si la variable se encuentra dos desviaciones estándar por debajo del valor registrado, el síntoma sea la disminución de dicha variable; y si la variable se encuentra dentro de la franja de dos desviaciones estándar entonces el síntoma asociado es que la variable permaneció igual.

Un trabajo previo a este análisis fue realizado en torno al uso de modelos rigurosos utilizando intervalos. Se realizaron pruebas utilizando el benchmark del sistema de los tres tanques de agua (Lunze, 1998). Dichas pruebas se realizaron resolviendo un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias basadas en intervalos, utilizando como conjunto de herramientas el software VALENCIA-IVP VALidation of state ENClosures using Interval Arithmetic for Initial Value Problems (Rauh et al, 2006).

Este benchmark consta de tres depósitos interconectados entre sí a través de válvulas on-off tal y como se muestra en la figura, en los cuales se simulan fallas como atascamientos de la válvula V1 y fuga en el tanque 1. El modelo continuo para los niveles de agua en los tres tanques se puede obtener a partir de la ley de conservación de la masa.

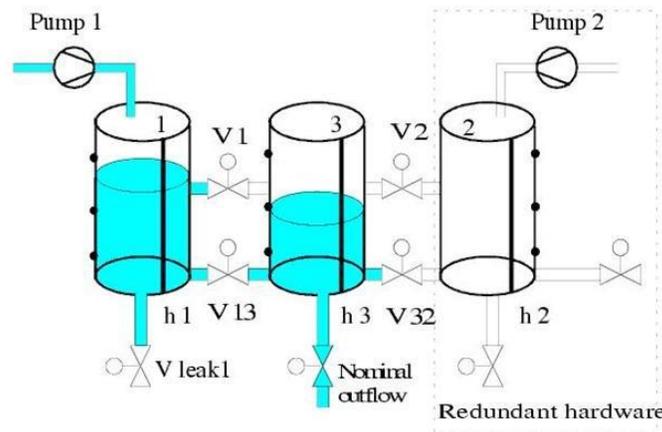
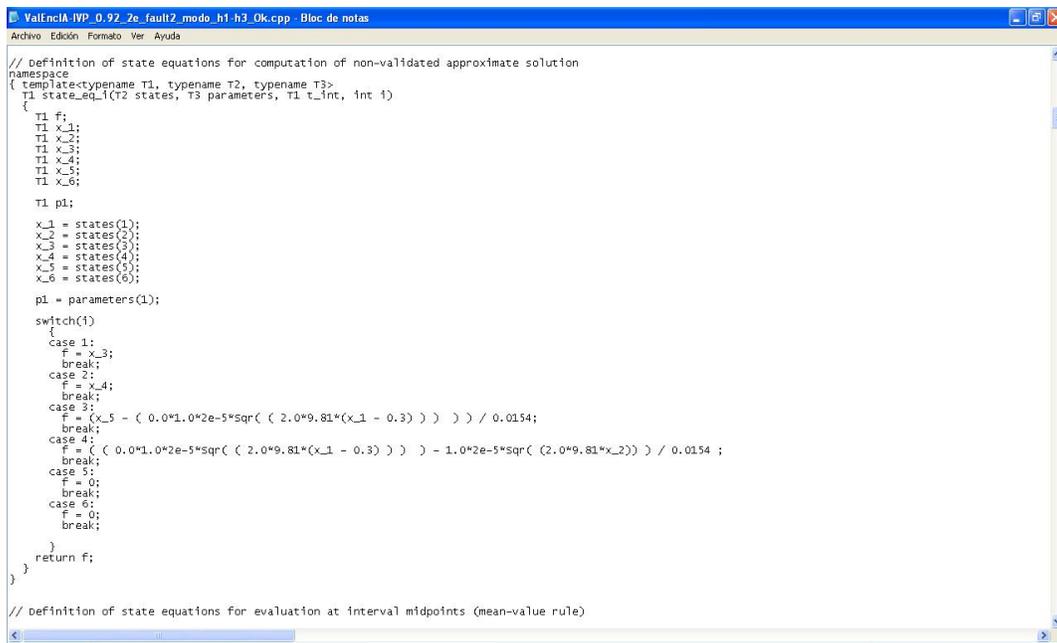


Figura 26. El sistema de los tres tanques de agua.

Como se puede apreciar del modelo, los flujos de entrada y salida dependerán del valor del nivel en cada tanque, debido a la posición de las válvulas V1 y V2. Los tres escenarios de fallos propuestos en el benchmark son:  $\phi_1$  fuga del tanque 1,  $\phi_2$  válvula V1 bloqueada cerrada y  $\phi_3$  válvula V1 bloqueada abierta. En función de los diferentes modos de operación del sistema el modelo

dinámico variará sustancialmente, ya que dependiendo del nivel de cada recipiente y la posición fija de las válvulas V1 y V2, el sentido del flujo de agua entre los recipientes cambiará. Igualmente, la presencia de alguno de los fallos hará que el modelo varíe: Si hay fuga en el tanque 1 entonces la variación de nivel en este tanque deberá descontar dicho flujo de salida (QL1); y si la válvula V1 se bloquea cerrada ó abierta, entonces dicho cambio en el flujo Q13V1 modificará las ratas de cambio de los niveles de los tanques 1 y 3.

Parte del código desarrollado en C++ para simular los tres tanques de agua, con los fallos citados, se muestra a continuación:



```

// ValEnCIA IVP_0.92_2e_fault2_mod0_h1-h3_0k.cpp - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

// Definition of state equations for computation of non-validated approximate solution
namespace
{
template<typename T1, typename T2, typename T3>
T1 state_eq_1(T2 states, T3 parameters, T1 t_int, int i)
{
    T1 f;
    T1 x_1;
    T1 x_2;
    T1 x_3;
    T1 x_4;
    T1 x_5;
    T1 x_6;

    T1 p1;

    x_1 = states(1);
    x_2 = states(2);
    x_3 = states(3);
    x_4 = states(4);
    x_5 = states(5);
    x_6 = states(6);

    p1 = parameters(1);

    switch(i)
    {
    case 1:
        f = x_3;
        break;
    case 2:
        f = x_4;
        break;
    case 3:
        f = (x_5 - ( 0.0*1.0*2e-5*sqr( ( 2.0*9.81*(x_1 - 0.3) ) ) ) ) / 0.0154;
        break;
    case 4:
        f = ( ( 0.0*1.0*2e-5*sqr( ( 2.0*9.81*(x_1 - 0.3) ) ) ) - 1.0*2e-5*sqr( (2.0*9.81*x_2) ) ) / 0.0154 ;
        break;
    case 5:
        f = 0;
        break;
    case 6:
        f = 0;
        break;
    }
    return f;
}
}

// Definition of state equations for evaluation at interval midpoints (mean-value rule)

```

Figura 27. Parte del código en C++ para simular el sistema de los tres tanques de agua con los fallos  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  y  $\phi_3$ .

La filosofía con la que se corrieron las pruebas fue la de detectar en qué momento la tendencia de los niveles de los tanques no se ajustaban a las envolventes calculadas con lógica intervalar, y que eran síntomas de que se estaba presentando un fallo (el cual se conocía a priori ya que era el que se estaba simulando).

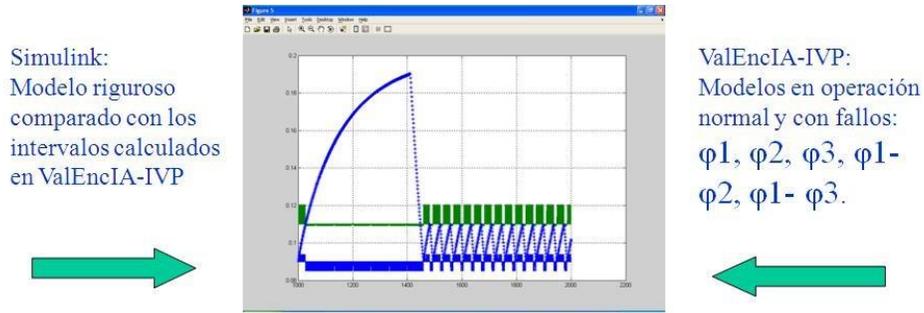


Figura 28. Pruebas VALENCIA-IVP.

Las simulaciones corridas mostraron lo siguiente:

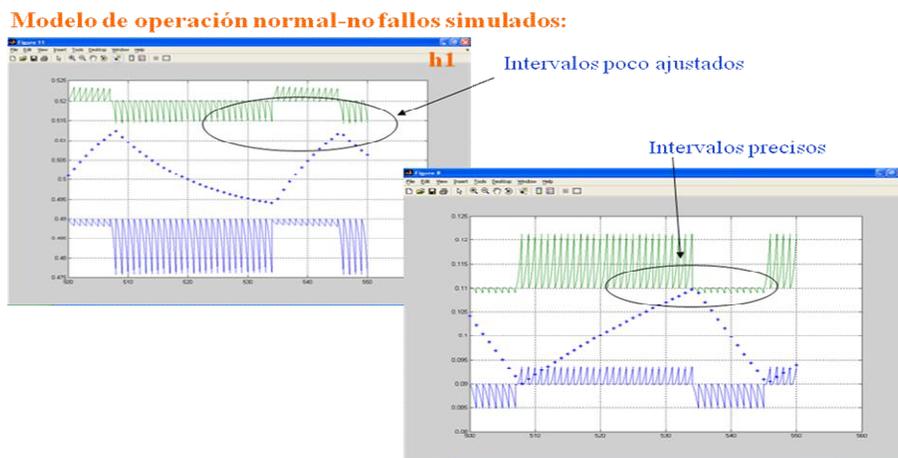


Figura 29. Observaciones sobre modelos intervalares sin fallos.

Con la simulación del sistema sin fallos (en operación normal), el uso de intervalos poco ajustados determinaba que las envolventes fueran “holgadas” haciendo que durante un fallo no se detectara la violación de las ventanas intervalares.

**Modelo de operación normal-fallo simulado  $\phi_3$  :**

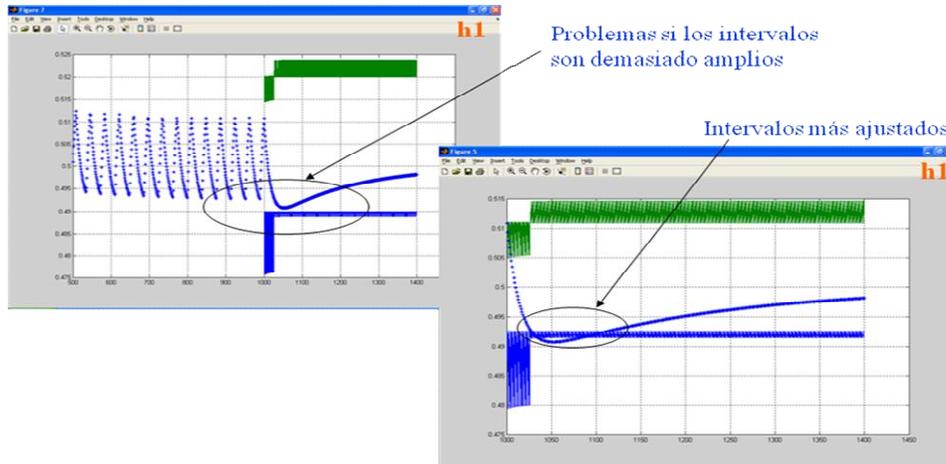
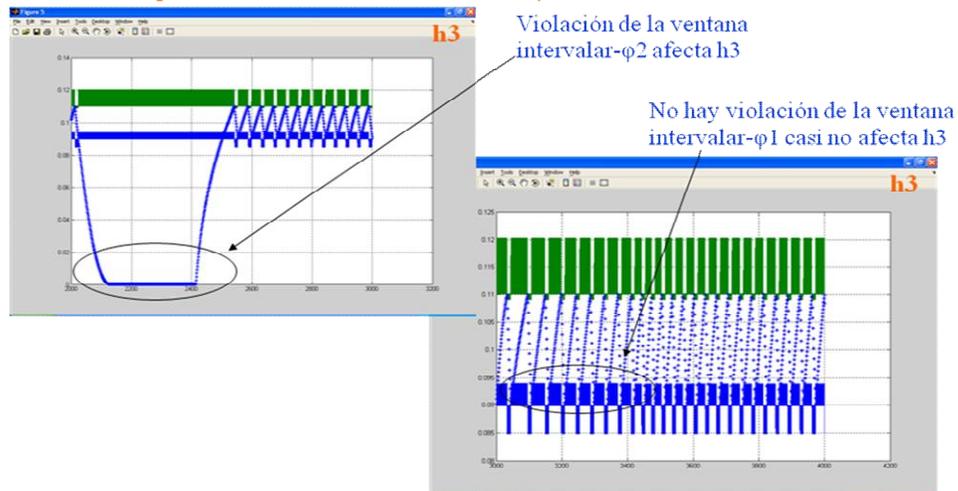


Figura 30. Observaciones sobre modelos intervalares - fallo simulado  $\phi_3$

Cuando los intervalos se hicieron más ajustados, se pudieron detectar los fallos simulados a través de la violación de la ventana intervalar.

**Modelo de operación normal-fallo simulado  $\phi_2$  :**



**Modelo de operación normal-fallo simulado  $\phi_1$**

Figura 31. Observaciones sobre modelos intervalares - fallo simulado  $\phi_2$  y  $\phi_1$

Igualmente se detectaron fallos que casi no afectaban a algunas de las variables de salida del sistema (niveles de los tres depósitos).

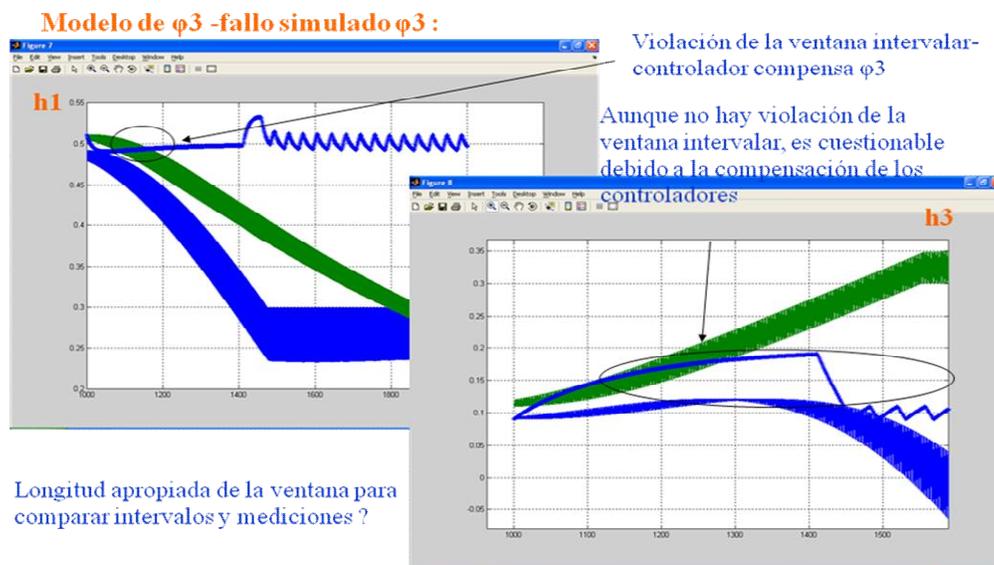


Figura 32. Observaciones sobre modelos intervalares - fallo simulado  $\phi_3$  y compensación del controlador

Se detectaron también escenarios de operación en los que los controladores compensaban los efectos observables en los cambios de los niveles de los tres depósitos.

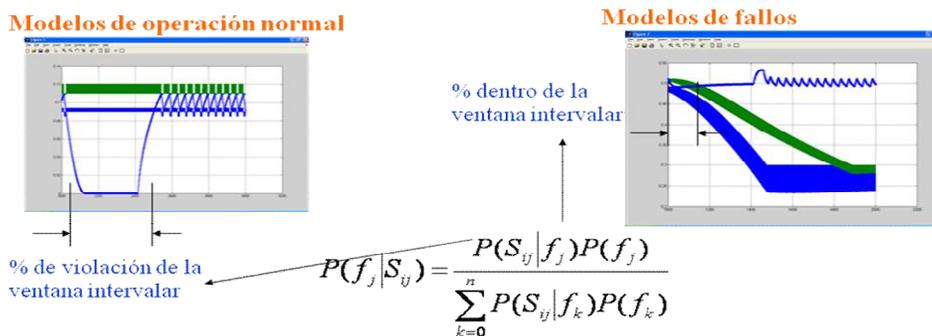


Figura 33. Manejo de la incertidumbre.

El porcentaje de violación de la ventana intervalar es un indicador directo de la probabilidad con la que se presenta el fallo dado los síntomas observados.

En la siguiente figura se muestra una plataforma diseñada para comprobar la detección de fallos utilizando un sistema basado en reglas. Fueron estudiados los casos en los que la base de conocimiento fue construída a partir de reglas, y posteriormente en el que el sistema de inferencia basado en reglas funciona como plataforma de integración (reglas con modelos en operación normal y en fallos). Fué construído un modelo en Simulink para el sistema de los tres

tanques. En dicho modelo se incorporaron los diferentes modos de operación del sistema a través del uso de bloques de programación lógica que evalúan el nivel de cada recipiente y lo comparan con la posición fija de las válvulas V1 y V2, para determinar el sentido del flujo de agua entre los recipientes, haciendo la comparación de los niveles de los tanques con las posiciones fijas de las válvulas para determinar el modo de operación. En el modelo propuesto por (Lunze,1998) se han incorporado modificaciones para permitir el envío de los tres fallos a estudiar, a través de una interface desarrollada en Visual Basic for Applications en una hoja de cálculo de Excel utilizando el protocolo DDE (Dynamic Data Exchange).

Posteriormente se construyó una base de conocimiento que ejecutada sobre un intérprete del lenguaje Prolog funciona como sistema basado en reglas para la detección y el diagnóstico de los tres fallos propuestos en el benchmark. Las reglas programadas en la base de conocimiento utilizan tres valores discretos para los niveles de los tanques. A través de la discretización de los niveles de los tres tanques en valores alto, normal y bajo, comparando las condiciones normales de operación con los valores actuales, fue posible actualizar la base de hechos del intérprete de Prolog para realizar el proceso de encadenamiento de reglas y validar la existencia de alguno de los tres fallos estudiados.

La discretización de los niveles, así como la interface de usuario para interrogar automáticamente al sistema de inferencia basado en reglas fueron desarrolladas en una hoja de cálculo de Excel. Utilizando estas herramientas desarrolladas como plataforma para la realización de pruebas, se realizaron simulaciones con los tres fallos estudiados para el benchmark propuesto, permitiendo el ajuste fino de los umbrales de discretización para los niveles de los tres tanques, que finalmente fueron implementados en la lógica de detección y diagnóstico de fallos utilizando el lenguaje Visual Basic for Applications en la interface construida en Excel.

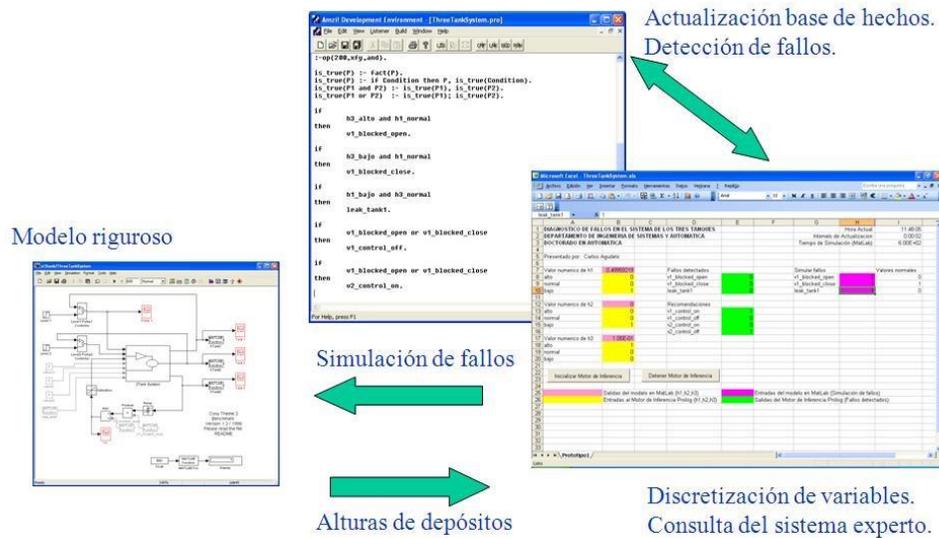


Figura 34. Arquitectura de pruebas de integración para el sistema de los tres tanques de agua.

Como se pudo apreciar de los modelos intervalares requeridos para correr las simulaciones, estos son bastante complejos (para un sistema tan sencillo como el de los tres tanques de agua interconectados). Por lo anterior es muy importante el realizar pruebas con modelos mucho más sencillos (modelos respuesta escalón) que permitan abordar el problema de construir un modelo de una unidad de Cracking Catalítico Fluidizado de una manera más simplificada.

### 3.7 Detección y Diagnóstico basado en Control Estadístico de Procesos (SPC)

El análisis de operaciones de un proceso utiliza la información del comportamiento de las variables a través del tiempo. El análisis visual, de esta información, es el procedimiento más utilizado para empezar a considerar fenómenos fuera de la operación normal. Usualmente se utilizan herramientas para desarrollar estas actividades de inspección, pero no es tan sencillo como aparenta, encontrar información que represente verdaderas situaciones de operación anormal en el proceso.

Hay tres posibilidades durante la inspección visual de la información:

1. El fenómeno que se observa visualmente es representativo, esto ocurre cuando la persona que observa el proceso es un experto y configura las herramientas para observar lo que es realmente importante observar, esto permite discriminar de forma efectiva situaciones de operación normal de otras condiciones que se presenten; la limitante es el conocimiento requerido para configurar las herramientas de acuerdo con las condiciones de operación actual y tener a un experto como observador de los fenómenos.
2. El fenómeno que se observa aparenta ser representativo, esto ocurre cuando la persona que observa no es un experto del proceso y no logra configurar las herramientas de forma adecuada, por esta razón empieza a observar situaciones que aunque parecen representativas no lo son, y lo que alcanza a apreciar son solo cambios generados por ruido de los sensores o cambios que aunque visualmente aparentan ser increíbles, no son realmente significativos; en conclusión para este caso se está utilizando demasiada sensibilidad en las observaciones por consiguiente todo aparenta estar fuera de control.
3. El fenómeno aparenta estar siempre en condiciones de operación normal, este es el caso contrario del anterior, esto ocurre cuando la persona que observa no es un experto del proceso y no logra configurar las herramientas de forma adecuada, por esta razón no discrimina situaciones representativas de las que no lo son, pues la sensibilidad es tan baja que todo aparenta estar en operación normal; en conclusión para este caso se está utilizando poca sensibilidad en las observaciones por consiguiente todo aparenta estar bajo de control.

Cuando la inspección visual la desarrolla un experto, se encuentra limitado por su capacidad para encontrar información de forma simultánea en las diferentes variables del sistema, no quiere decir que estas labores no se puedan desarrollar sino que los costos en tiempo y esfuerzo son muy altos para lograr discriminar una situación en la que se encuentran involucradas múltiples variables. Es para estos casos donde otra forma de observar la información se vuelve importante, más aun cuando lo que se desea observar y detectar son los fenómenos incipientes para lograr actuar antes de los desastres.

Se puede concluir que la herramienta de inspección debería actuar como un experto que configura o sintoniza correctamente una herramienta para análisis visual y lograr discriminar lo que aparenta ser importante y de aquellas situaciones que no lo son.

Para hacer esto se utilizan los resultados de las diferentes cartas de control de procesos, logrando discriminar lo que aparenta estar bajo control, de lo que se encuentra fuera de control o en situaciones incipientes o intermedias (transición bajo control-fuera de control). Para atacar los problemas de exceso y falta de sensibilidad, se utilizan los límites dinámicos de las diferentes cartas de control asociados o normalizados con los rangos operacionales de cada una de las variables de proceso.

Para cada variable, los resultados de las cartas de control se están condensando en un vector que representa las situaciones fuera de control, en este vector un valor de uno representa una violación al análisis de la carta de control y un valor de cero representa que el proceso se encuentra bajo control. Utilizar únicamente este valor de uno o cero genera la posibilidad de caer en el fenómeno 2 descrito anteriormente, exceso de sensibilidad, por esta razón es importante normalizar la situación detectada por la carta de control de acuerdo con los rangos establecidos en límites de operación. Esto hace que el vector de unos y ceros se convierta en un vector de la variable normalizada, para nuestro caso normalizado entre [0-1] entre los rangos de operación de cada variable.

Existe un vector por cada carta de control que se utiliza sobre una variable, estos vectores ordenados generan una -matriz de los vectores de operación fuera de control normalizados- para cada variable, esta matriz permite discriminar más fácilmente las situaciones bajo control (Vector=0) de las que están fuera de control (de acuerdo con los análisis de las cartas de control), y en las situaciones que aparentan estar fuera de control (Vector $\neq$ 0), las discrimina de acuerdo con los valores de la normalización.

Esta matriz se utiliza como un fotograma de las características de una variable del proceso, concibiendo que un fotograma represente el contenido de una película en un instante de tiempo y una animación no es más que una sucesión de fotogramas; para nuestro caso la sucesión de fotogramas representa la sucesión de eventos de operación normalizados sobre las variables a las que se aplica el análisis expuesto. Matemáticamente la matriz del fotograma está conformada por valores de muestras mayores que cero y para observar, visualmente, la información de la matriz como un fotograma se utiliza una paleta de colores que se define como lo sugiere la norma de alarmas (Estándar de Alarmas ISA 18.2 ) así: el color blanco representa variable bajo control

(Vector=0), el resto de colores de acuerdo con el nivel de la perturbación (Vector $\neq$ 0), que lo tiene fuera de control así: azul bajo, amarillo medio, alto rojo y negro totalmente fuera de control.

El propósito de la representación por medio de fotogramas es presentar al analista del proceso las situaciones discriminadas por medio de las cartas de control y normalizadas de acuerdo con los rangos y condiciones de operación de cada una de las variables del proceso. Al combinar los diferentes fotogramas (matriz de análisis de las cartas de control sobre la variable) de cada una de las variables, en uno solo aparece el fotograma del proceso (matriz de análisis de las cartas de control sobre todas las variables). Se espera que cada una de las variables se encuentren bajo control, por esto se esperaría observar una imagen blanca en el fotograma del proceso, además este permite hacer una rápida inspección visual por todas las variables del proceso, utilizando las diferentes cartas de control estadístico de procesos y los análisis planteados.

Esta herramienta de análisis permite hacer desplazamientos desde el tiempo en que existe información de las variables en las bases de datos hasta la fecha actual, para evidenciar diferentes sucesos de operación normal (Por ejemplo: paradas de planta, arranques, operación normal), fenómenos de operación anormal (Por ejemplo: pérdidas de catalizador, depósitos de coque) y otros fenómenos de operación que no se logran catalogar. El trabajo posterior a esto es clasificar los fenómenos de acuerdo con las condiciones de operación previa al fenómeno (bajo control antes del suceso), mientras se desarrolla (condiciones de transición, fenómeno incipiente) y las condiciones con el fallo presente (situación anormal o fuera de control relacionada con el fallo), desarrollando meta modelos para cada fallo. Para esto se almacenan las bases de datos de los fenómenos documentados y se entrena el clasificador utilizando una SVM sobre una matriz de entrada conformada por el fotograma del proceso y las estadísticas de los diferentes gráficos de control. Finalmente se entrena la herramienta para clasificar las situaciones que se lograron documentar totalmente (pérdidas de catalizador y depósitos de coque); así cuando estas ocurran se entrega una información al operador del sistema de su existencia.

Los fotogramas del proceso quedan clasificados por variable y por carta de control, por esto a cada variable corresponde una franja del fotograma del

proceso compuesta por las evidencias encontradas. Las zonas en el fotograma asignadas a cada variable son siempre las mismas, de esta forma un analista del proceso logra observar simultáneamente eventos dinámicos de múltiples variables y encontrar evidencias de fenómenos de operación anormal, discriminando visualmente los tonos presentados en el fotograma del proceso; luego estos síntomas se relacionan con fenómenos que se estén presentando, construyendo nuevas bases de conocimiento o de nuevos casos para entrenar el sistema de clasificación en el diagnóstico de estos nuevos casos (generar nuevos casos más fácilmente).

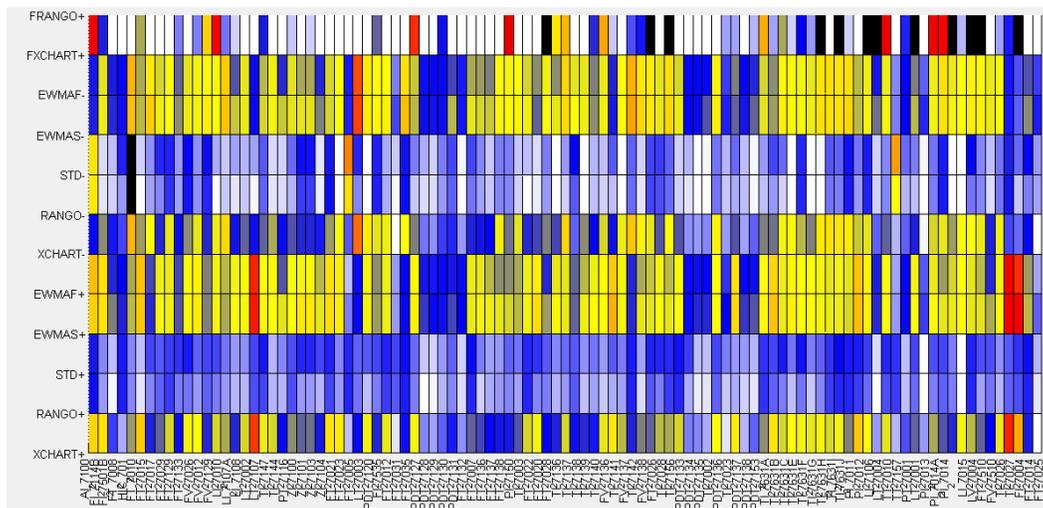


Figura 35. Ejemplo de un fotograma

Un fotograma se construye utilizando la información de las muestras fuera de control de cada carta de control estadístico de proceso, aplicada sobre cada una de las variables del sistema. Las muestras fuera de control se identifican con valores binarios, 1 representa fuera de control ó 0 bajo control, y se ordenan en un vector por cada gráfico de control. Para cada variable se ordenan los vectores en un solo conjunto, esto genera una matriz de las muestras fuera de control por cada variable, compuesta por unos y ceros, ordenada de acuerdo con los gráficos de control. Cada variable se encuentra operando en un contexto definido por medio de tres valores que se utilizan para operar el proceso que son, el valor típico, el valor mínimo y el valor máximo de operación. Esta información se utiliza para normalizar los fenómenos que se identifican en la muestras fuera de control, discriminando los cambios (suaves-medios-fuertes) por medio del valor asignado a la muestra normalizada o contextualizada, con esto se cambian los valores discretos de cada muestra (0 ceros-1 unos), por valores continuos mayores que cero, la matriz de ceros y

unos se transforma en una matriz de valores mayores que cero en cada pixel o muestra de la variable.

La nueva matriz presenta las muestras bajo control como un valor de cero, y las que se encuentran fuera de control por valores mayores que cero de acuerdo con la desviación del intervalo de confianza de operación; al reunir las matrices de las variables del proceso en una sola matriz y utilizar una paleta de colores adecuada (blanco-azul-amarillo-verde-naranja-rojo-negro) para presentar, esta nueva matriz, como una imagen de la operación del proceso o fotograma. El fotograma del proceso permite diferenciar de forma visual las variables que están bajo control de las que no lo están y representa patrones de diferentes modos de operación en el proceso.

### **3.8 MANEJO DE LA INCERTIDUMBRE**

En otra investigación dirigida al tema del modelado de la probabilidad de transición entre eventos discretos (Romero y Guerrero, 2008) se plantearon como objetivos específicos (entre otros):

- Seleccionar las alarmas producidas por el proceso a estudiar de acuerdo a los diferentes escenarios de fallos típicos.
- Analizar las alarmas históricas producidas por el proceso de acuerdo a las secuencias con las que se presentaron.
- Identificar un patrón de similitud entre todas las secuencias de fallos similares que permitan asociar a un fallo en particular.
- Construir y simular un modelo que permita procesar las secuencias de alarmas típicas producidas por el proceso durante un fallo dentro de la operación de la planta.
- Incluir junto al modelo de simulación de las secuencias, los fallos típicos de cada sección del proceso documentados en los manuales de operación de la planta.
- Verificar la aplicación del modelo en cadenas de Markov a la unidad de Cracking Catalítico Fluidizado de la Refinería de Ecopetrol-Cartagena para comprobar su correcto funcionamiento.

Para construir un modelo en cadenas de Markov de las secuencias de alarmas asociadas a los fallos principales de la planta, se registraron y analizaron los históricos de alarmas de la planta. Los grupos de historial de alarmas fueron

analizados por secciones que facilitaron la determinación de las secuencias de alarmas que se presentan durante los escenarios de fallo e identificar el patrón de similitud entre todas las secuencias. Para lograr separar por secciones los historiales se procedió a seleccionar cada uno de los historiales relacionados a cada fallo en particular. Una vez identificadas las alarmas producidas por el proceso durante un fallo típico se analizaron los listados de historiales que se presentaron, con el objeto de poder encontrar secuencias de alarmas similares es decir, cuando se determina una combinación de alarmas A,B,C,D durante un fallo 1, pero, durante un mismo fallo 1 en distinto espacio de tiempo la posición de esta estas alarmas varia a A,C,B,D.

Del resultado de los análisis a los historiales y basados en el número de ocurrencias de estos fallos se listó como los fallos típicos de esta unidad en la ciudad de Cartagena los siguientes:

- Perdida De Agua De Enfriamiento Al Soplador C-501
- Perdida De Vapor De 600#
- Falla En Primer Reciclo
- Inestabilidad Fondos T-552
- Falla De Suministro De Energía
- Falla Carga A URC
- Sales En Fraccionadora T-552

Una vez establecidos los fallos mas típicos de la unidad se agruparon los historiales de alarmas que pertenecieran a cada fallo en particular. Durante la presencia de un fallo en operación normal de la unidad es normal que se pueda coincidir con otras emergencia o fallos que generen alarmas en el mismo espacio de tiempo. Esta alarmas adicionales alteran las secuencias normales que deben producirse durante un fallo en particular, para la identificación del patrón de similitud entre los diferentes historiales es necesario realizar un filtrado y análisis consistente en:

1. Ubicar cronológicamente la primera alarma perteneciente al fallo a tratar: la primera alarma de cada fallo se determina basado en los efectos operacionales que se tienen durante la presencia de estos fallos decritos en los manuales de operación, experiencia del personal y en la relación causa efecto del proceso.
2. Identificación de alarmas en común: el proceso de identificación de alarmas en común consiste en interceptar las alarmas que aparecen en cada historial agrupado por fallos típicos. Una vez interceptadas las

alarmas. Las que quedaron restantes fueron revisadas para asegurar que no se obviaron alarmas directamente relacionadas con el fallo y extraídas de cada historial, quedando solo las alarmas de interés.

- Validación de la información obtenida: Los listados de las alarmas extraídas de los historiales agrupados por su fecha de aparición fueron revisados y validados.

El resultado de este análisis permite relacionar una secuencia de alarma para cada fallo resaltando un patrón de similitud entre los mismos fallos en común. Esta información obtenida hace parte de la información necesaria para la obtención de matrices de transición y posterior análisis de acuerdo a la teoría de Markov.

Una vez definidas las diferentes secuencias por fallos en común se procede a determinar la secuencia característica para cada fallo. La obtención de estas secuencias características es necesaria para poder asociar a diferentes secuencias de alarmas un fallo en particular. Este proceso se realizó para cada fallo típico definido en la unidad de Cracking Catalítico Fluidizado.

Para identificar un patrón de similitud y poder obtener una secuencia característica a cada fallo, cada alarma seleccionada se le identifico su tiempo de ocurrencia con respecto a la primera alarma del mismo fallo.

Alarma	22/Mayo/ 2005	$\Delta t$	28/Mayo/ 2005	$\Delta t$	21/Junio/ 2006	$\Delta t$
FF-PI-574 (PAL)	6:01:04	0:00:00	18:53:04	0:00:00	9:13:04	0:00:00
FC-PAH-5022B (PAH)	6:01:15	0:00:11	18:53:11	0:00:07	9:13:24	0:00:20
FC-PAH-5022C (PAH)	6:01:19	0:00:15	18:53:15	0:00:11	9:13:28	0:00:24
FC-PAH-5022A (PAH)	6:01:19	0:00:15	18:53:15	0:00:11	9:13:28	0:00:24
FC-PAL-5014	6:01:27	0:00:23	18:53:23	0:00:19	9:14:13	0:01:09
FC-ZI-500R (ZAL)	6:01:27	0:00:23	18:53:20	0:00:16	9:14:12	0:01:08
FCFI501- FCFI529 (FAH)	Alarma no configurada	Alarma no configurada	Alarma no configurada	Alarma no configurada	9:14:13	0:01:09
FC-FIC-502 (FAL)	6:01:28	0:00:24	18:53:22	0:00:18	9:14:14	0:01:10

FC-FI-515 (FAL)	Alarma no configurada	no	Alarma no configurada	no	Alarma no configurada	no	9:14:14	0:01:10	
FC-FI-527 (FAL)	6:01:29		0:00:25		18:53:24		0:00:20	9:14:14	0:01:10
FC-FIC-501 (FAL)	6:01:34		0:00:30		18:53:28		0:00:24	9:14:16	0:01:12
FC-PDIC-507 (PDAH)	6:01:39		0:00:35		18:53:37		0:00:33	9:14:24	0:01:20
FC-TI-114 (TAL)	6:01:47		0:00:43		18:54:03		0:00:59	9:15:11	0:02:07
FF-FIC-551 (FAL)	6:01:46		0:00:42		18:53:40		0:00:36	9:16:28	0:03:24
FC-LI-501B (LAH)	6:01:54		0:00:50		18:53:49		0:00:45	9:16:30	0:03:26
FF-LIC-561(LAH)	6:01:58		0:00:54		18:53:52		0:00:48	9:14:35	0:01:31
FC-LI-3B (LAL)	6:02:04		0:01:00		18:54:00		0:00:56	9:15:20	00:02:16
FC-LIC-503 (LAL)	6:02:31		0:01:27		18:54:21		0:01:17	9:14:25	0:01:21
FC-PAL-509 (PAL)	Alarma no configurada	no	Alarma no configurada	no	18:54:29		0:01:25	9:15:01	0:01:57
FC-TI-518 (TAL)	6:02:40		0:01:36		18:54:59		0:01:55	9:15:30	0:02:26

Tabla 3. Intercepción de Alarmas. Listados de alarmas en secuencias extraídos del análisis al fallo APAGADA POR PERDIDA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO AL SOPLADOR C-501.

En la tabla anterior se muestran los listados de alarmas en secuencias por fallos extraídos del análisis al fallo APAGADA POR PERDIDA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO AL SOPLADOR C-501. Luego se obtuvo la secuencia característica de cada fallo, cada secuencia de fallo identificada por este proceso se validó con el personal experto de la planta.

Como resultado del proceso de reconocimiento de secuencias asociadas a fallos y de su análisis final se obtuvo el listado final de las secuencias características las cuales vemos en la siguiente tabla:

<b>PERDIDA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO AL SOPLADOR C-501</b>	<b>PERDIDA DE VAPOR DE 600#</b>	<b>FALLA PRIMER RECICLO</b>	<b>INESTABILIDAD FONDOS T-552</b>	<b>FALLA SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA</b>	<b>FALLA CARGA</b>	<b>SALES EN FRACCIONADORA T-552</b>
FF-PI-574 (PAL)	FF-PI-203 (PAL)	FL-FI-601B (FAH)	FF-FI-2 (FAL)	FC-PAL-410 (PAL)	FF-FIC-551 (FAL)	FF-FIC-8 (FAH)

FC-PAH-5022B (PAH)	FCFI501-FCFI529 (FAH)	FC-PI-5001 (PAH)	FF-LIC-557 (LAL)	FF-FIC-572 (FAL)	FC-ZI-500R (ZAL)	FF-LIC-3 (LAL)
FC-PAH-5022C (PAH)	FL-FI-601B (FAL)	FC-PI-5002 (PAH)	FC-PI-5001 (PAH)	FC-PAL-509 (PAL)	FF-TIC-557 (TAL)	FF-LIC-562 (LAH)
FC-PAH-5022A (PAH)	FL-FI-602B (FAL)	FC-LI-501B (LAL)	FC-PDI-503 (PDAH)	FF-PI-574 (PAL)	FC-PDIC-507 (PDAH)	FF-LIC-3 (LAH)
FC-PAL-5014	FC-FIC-502 (FAL)	FC-FIC-501 (FAL)	FF-LIC-3 (LAH)	FF-FIC-551 (FAL)	FCFI501-FCFI529 (FAH)	FF-FIC-8 (FAL)
FC-ZI-500R (ZAL)	FC-PDIC-507 (PDAH)	FC-FIC-502 (FAL)	FF-LIC-562 (LAL)	FF-FIC-8 (FAL)	FC-FI-515 (FAL)	FF-LIC-562 (LAH)
FCFI501-FCFI529 (FAH)	FC-FI-527 (FAL)	FC-FI-527 (FAL)		FC-ZI-500R (ZAL)	FC-FI-527 (FAL)	FC-PI-5001 (PAH)
FC-FIC-502 (FAL)	FF-LIC-561 (LAH)	FC-FI-515 (FAL)		FC-FI-515 (FAL)	FC-FIC-501 (FAL)	FF-LIC-551 (LAL)
FC-FI-515 (FAL)	FC-FIC-501 (FAL)	FC-PDIC-507 (PDAH)		FF-FIC-6 (FAL)	FC-FIC-502 (FAL)	FF-LIC-1(LAH)
FC-FI-527 (FAL)	FC-LI-501A (LAL)	FC-TI-518 (TAL)		FC-FIC-502 (FAL)	FF-LIC-553 (LAH)	FF-LI-555 (LAH)
FC-FIC-501 (FAL)	FC-TI-518 (TAL)	FF-FIC-551 (FAL)		FC-FI-527 (FAL)	FCFI501-FCFI529 (FAL)	FF-LIC-1 LAH
FC-PDIC-507 (PDAH)	FF-FIC-551 (FAL)	FF-LIC-3 (LAH)		FF-FI-2 (FAL)	FF-LIC-561 (LAH)	
FF-FIC-551 (FAL)	FC-PAH-5022B (PAH)	FC-PDI-503 (PDAH)		FC-FIC-501 (FAL)	FC-LI-501B (LAL)	
FC-TI-114 (TAL)	FC-PAH-5022A (PAH)			FC-PDIC-507 (PDAH)	FC-LI-501A (LAL)	
FC-LI-501B (LAH)	FC-PAH-5022C (PAH)			FF-LIC-561 (LAH)		
FF-LIC-561(LAH)	FC-TI-114 (TAL)			FC-LI-1A (LAL)		
FC-LIC-503 (LAL)	FC-FI-515 (FAL)			FF-LIC-3 (LAH)		
FC-LI-3B (LAL)	FC-LI-1A (LAL)					
FC-TI-518 (TAL)						
FC-PAL-509 (PAL)						

Tabla 4. Listado final de las secuencias características.

Las cadenas de Markov se representan en diagramas de estados o de transiciones, que no son más que círculos, puntos o nodos comúnmente numerados (donde cada uno de ellos simboliza un estado) y se enlazan o

conectan a través de ramas (las cuales significan las transiciones entre los estados). Las ramas por lo general se etiquetan con el valor o el nombre de la probabilidad de transición que representan. La propuesta de Markov se puede aplicar a comportamientos aleatorios de sistemas que cambian en continuo o en discreto con respecto al tiempo y al espacio. Estas variaciones son conocidas como procesos estocásticos. Mediante la propuesta de Markov se pueden modelar sistemas donde los tiempos de reparación no son despreciables. Sin embargo, no todos los procesos estocásticos se pueden modelar utilizando la propuesta básica de Markov. Para poder aplicar la propuesta de Markov se debe cumplir que el comportamiento del sistema debe estar caracterizado por una carencia de memoria, es decir, los estados futuros de un sistema son independientes de todos los estados anteriores, excepto del estado inmediatamente precedente.

Las matrices de transición de alarmas representan el comportamiento del sistema analizado. Del resultado del análisis de obtención de patrón de similitud de secuencias y cumpliendo con una metodología propuesta (Larraz, 2007) se elaboraron las matrices de transición de forma manual siguiendo el siguiente procedimiento:

- Seleccionar fallo típico a analizar.
- Crear una matriz de dimensión  $A = n \times n$ , donde  $n$  es el total numero de alarmas presentes en cada secuencia de fallos típico. El tamaño de cada matriz depende exclusivamente del número de alarmas presente en las secuencias extraídas.
- De acuerdo al nivel a cada alarma  $A_i$ , nombrar las filas y columnas de la matriz con  $A_1, A_2, A_3, A_4, \dots, A_n$ , donde  $A_1$  representa a la primera alarma,  $A_2$  a la segunda y así sucesivamente.
- Si la alarma  $A_1$  es seguida de la alarma  $A_2$  y  $A_3$ , se llena la matriz con 1 en la intersección correspondiente entre la fila  $A_1$  y la columnas  $A_2$  y  $A_3$ . Se llenan los lugares vacios con ceros. Cada elemento en la matriz debe ser 0 ó 1 dependiendo si existe relación o no, y es definido como  $A_{ij}$  donde  $i$  representa las filas y  $j$  las columnas.
- Repitiendo este proceso para todos los fallos, se obtienen las matrices que describen el comportamiento de las alarmas de acuerdo con los resultados de análisis del historial.
- Esta matriz tiene interesantes propiedades, por ejemplo: la suma de los elementos en la columna  $A_j$ , donde  $j \in (1, \dots, n)$ , representa el número de alarmas generadas después de la alarma  $A_j$ . de la misma manera la

suma de los elementos de las alarmas generadas por la alarma  $A_i$ , donde  $i \in (1, \dots, n)$ , representa el número de alarmas generadas después de la alarma  $A_i$ .

- Ahora bien  $A_1$ , es reemplazado por A,  $A_2$  por B,  $A_3$  por C y así sucesivamente.

Para el primer fallo (pérdida de agua de enfriamiento en el soplador C-501) representaremos las alarmas por las siguientes letras:

Alarma	Letra
FF-PI-574 (PAL)	A
FC-PAH-5022B (PAH)	B
FC-PAH-5022C (PAH)	C
FC-PAH-5022A (PAH)	D
FC-PAL-5014	E
FC-ZI-500R (ZAL)	F
FCFI501-FCFI529 (FAH)	G
FC-FIC-502 (FAL)	H
FC-FI-515 (FAL)	I
FC-FI-527 (FAL)	J
FC-FIC-501 (FAL)	K
FC-PDIC-507 (PDAH)	L
FF-FIC-551 (FAL)	M
FC-TI-114 (TAL)	N
FC-LI-501B (LAH)	Ñ
FF-LIC-561(LAH)	O
FC-LIC-503 (LAL)	P
FC-LI-3B (LAL)	Q
FC-TI-518 (TAL)	R
FC-PAL-509 (PAL)	S

Tabla 5. Asociación de alarmas para el fallo de pérdida de agua de enfriamiento al soplador C-501.

De acuerdo a las pautas anteriores se realiza la siguiente matriz de transición:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S
A	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
D	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
E	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
G	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
H	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
I	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
J	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
K	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
L	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
M	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0
N	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
Ñ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
O	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
P	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Q	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
R	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0
S	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.6	0.0	0.0

Tabla 6. Matriz A.

Se consideró que la próxima alarma activada debe ser una de las mostradas en la columna comenzada por  $A_j$  en la matriz de alarmas, la columna de  $A_j$  en la matriz representa las alarmas generadas por la alarma  $A_j$  y en las filas están las alarmas que causan la activación de  $A_j$ . La aplicación del modelo probabilístico no es determinativo, solo se puede estimar la probabilidad de la alarma en la columna relacionada a  $A_j$  como la próxima alarma que será activada. Para considerar una distribución uniforme, la probabilidad se define como (Larraz, 2007):

$$P_{ij} = 0.9 \frac{A_{ij}}{N_j} + \frac{0.1}{n}$$

Donde  $N_j$  es el número de alarmas generadas por  $A_j$  o la suma de elementos de la columna  $A_j$ , y  $n$  es el número total de alarmas en el historial;  $P_{ij}$  representa la probabilidad de que la alarma  $a_j$  comienza seguidamente por la alarma  $a_i$ . El término  $0.1/n$  es introducido en la cuenta del 10% de las alarmas inesperadas (Larraz, 2007), el valor de 10% es un valor conservador estipulado teniendo en cuenta que a pesar de analizarse un espacio de tiempo de 17 meses y con más de 8500 alarmas se puede en un futuro presentar eventos o fallos con alarmas no registradas en este análisis.

Representando la secuencia de alarmas del mismo fallo durante tres días diferentes, y representando las alarmas de acuerdo a la notación de letras que se estipuló, tendremos:

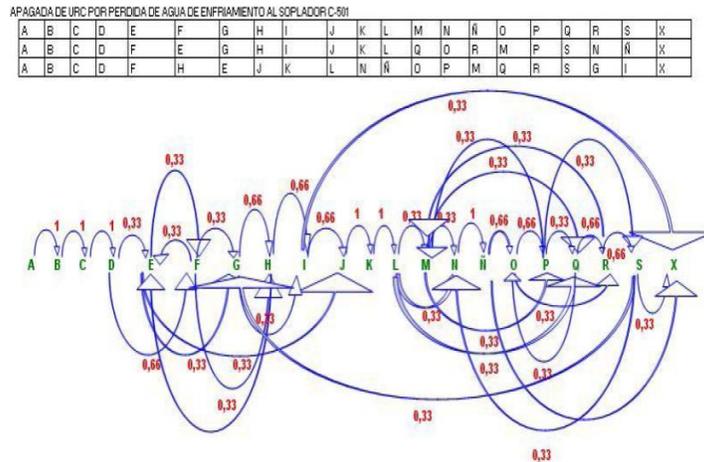


Figura 36. Secuencias de alarmas representadas como cadenas de transición.

Ahora la evolución del sistema se representa por los valores tomados en cada paso del tiempo,  $k$ , por el vector,  $V_k=(A_1 A_2 A_j...A_n)$  los cuales son la activación de la probabilidad para cada alarma. Cuando no existan alarmas activadas, los elementos del vector  $V_k$  son 0, excepto los que corresponden a una alarma particular que tiene unos valores de 1, indicando que con una probabilidad igual a 1 la alarma tiene que estar activada. Formalmente, el vector  $V_k=(A_1 A_2 A_j...A_n)$  es un vector probabilidad que representa los estados del sistema por paso  $k$ , cada tiempo será el producto de multiplicar  $K$  veces la matriz.  $K$  puede tomar valores infinitos de manera aleatoria y opcional, pero, hay que tener en cuenta que dependiendo del sistema al ser evaluado  $n$  veces el sistema se estabiliza tendiendo a una misma respuesta.

Este trabajo permitió desarrollar un simulador con la finalidad de informar al usuario que las alarmas de proceso que se están presentando hacen parte de un fallo reconocido lo que asegura que las acciones tomadas para corregir dicho fallo sean las correctas, de tal forma que el tiempo de retorno a condiciones normales sea mínimo al igual que su impacto en el proceso y de esta manera evitar paradas de emergencias en la planta y además reducir costos de mantenimiento de la misma.

## **4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

### **4.1. CONSIDERACIONES GENERALES**

Se ha mostrado el uso de un diccionario extendido de fallos para integrar tres técnicas para la detección y el diagnóstico de fallos: El conocimiento experto del proceso, formulado en términos de reglas; Control Estadístico de Procesos (SPC); y la secuencia de alarmas del proceso. El uso del diccionario extendido de fallos permitirá a futuro crecer en el conjunto de técnicas empleadas para la detección y el diagnóstico de fallos (utilizando por ejemplo modelos cualitativos).

En el presente documento se ha abordado también el uso de la secuencia de eventos anormales (alarmas) para detectar y diagnosticar fallos en procesos industriales. Sería muy interesante contar con muchos más eventos que fueran indicadores de que algo anormal está ocurriendo en la planta, debido a que las alarmas están diseñadas para avisar al personal de operaciones cuando las situaciones extremas se han alcanzado. Sin embargo, si existieran más eventos discretos que alertaran sobre las condiciones de la planta, podrían ser aprovechados por esta u otras metodologías para detectar y diagnosticar fallos. Dichos eventos no se podrían configurar como alarmas debido a que se entenderían como alarmas redundantes que sólo agregarían ruido al sistema de alarmas, pero podrían aprovecharse para correlacionar dichos eventos con situaciones anormales.

La escala de tiempo en la que ocurren las alarmas de la planta, y se analiza su secuencia tiene un alto impacto en el tipo de fallos que pueden ser detectados y diagnosticados. Adicionalmente existe la limitante de que detectar alarmas con una frecuencia muy alta (períodos de muestreo muy pequeños), puede generar una carga adicional al sistema de control, que en la mayoría de los casos no es permisible, por entrar en conflicto con el tiempo destinado por el hardware de control a las actividades de muestreo y control de las variables del proceso. Debido a lo anterior es necesario delimitar el alcance de las alarmas

que se van a muestrear y los fallos que pueden ser detectados y diagnosticados, para evitar esta sobrecarga adicional al hardware del sistema de control de la planta.

El aprendizaje del que trata la metodología cubierta en este documento es supervisado, en el sentido de que se necesita previo al análisis haber identificado los días de fallos similares en la planta, para poder realizar el análisis de similitud en las secuencias de alarmas. Se necesita también tener claro el tipo de fallos a detectar, debido a las limitantes en el muestreo de las alarmas, mostradas en el punto anterior.

También se puede probar el algoritmo de Lempel-Ziv para acortar el tiempo de ejecución de las corridas de análisis de datos.

Los aportes al estado del arte de la presente tesis tienen que ver con la integración de varias técnicas para la detección y el diagnóstico de fallos utilizando un diccionario extendido de fallos y el análisis de secuencias de alarmas para asociarlas a los fallos de una unidad industrial en la industria petroquímica. Estas secuencias se identifican utilizando algoritmos de ajuste de patrones que permiten identificar secuencias de alarmas comunes, ocurridas en días diferentes, pero asociadas al mismo fallo en cuestión. Adicionalmente a lo anterior se toca el tema de un diccionario de fallos extendido, que hace uso de un sistema de inferencia lógica, basado en reglas, para hacer la integración de técnicas para la detección y el diagnóstico de fallos. Las secuencias de las alarmas identificadas pueden ser posteriormente incorporadas en el diccionario extendido de fallos, para detectar y diagnosticar de manera apropiada los fallos de los cuales se tengan datos históricos de las alarmas generadas.

## **4.2. TRABAJO FUTURO EN DETECCION Y DIAGNOSTICO DE FALLOS EN EQUIPO ROTATIVO**

La detección y el diagnóstico de fallos desarrollado en esta investigación ha sido principalmente sobre equipo estático (Reactor, Regenerador, Fraccionadora Principal, etc.). Los fallos han sido los de proceso citados en el capítulo 3. Es importante analizar fallos en equipo dinámico (como por ejemplo equipo rotativo), y analizar la interacción entre diferentes tipos de fallos (de proceso, mecánicos, eléctricos, etc.). Revisando la relación que existe entre ellos, a través de la causalidad y/o la correlación.

Como se puede observar de la siguiente gráfica, dentro de la línea roja se encuentran los pasos desarrollados en la presente investigación: Generación

de síntomas, detección de fallos, diagnóstico de fallos, evaluación y decisión. Dentro de la línea amarilla se encuentran las acciones desarrolladas por los sistemas de parada de emergencia: Evaluación de señales, alarmas (hay alarmas también en el sistema de control) y protección. Y dentro de la línea verde se encuentran las acciones desarrolladas por el equipo humano de la planta (ingenieros y operadores): Detener la operación, manejo del cambio, reconfiguración, mantenimiento y reparación.

La hipótesis de varios investigadores (Lind y Zhang, 2014; Mukhtar e Irfan Tahir, 2005; Agudelo et al, 2013) es que la integración del conocimiento de los fallos, su detección y diagnóstico, pueden ayudar a tomar mejores decisiones en la operación de la planta. Por tanto se debe trabajar sobre la integración de las actividades desarrolladas por ingenieros y operadores, desde la perspectiva del uso de la tecnología de detección y diagnóstico de fallos.

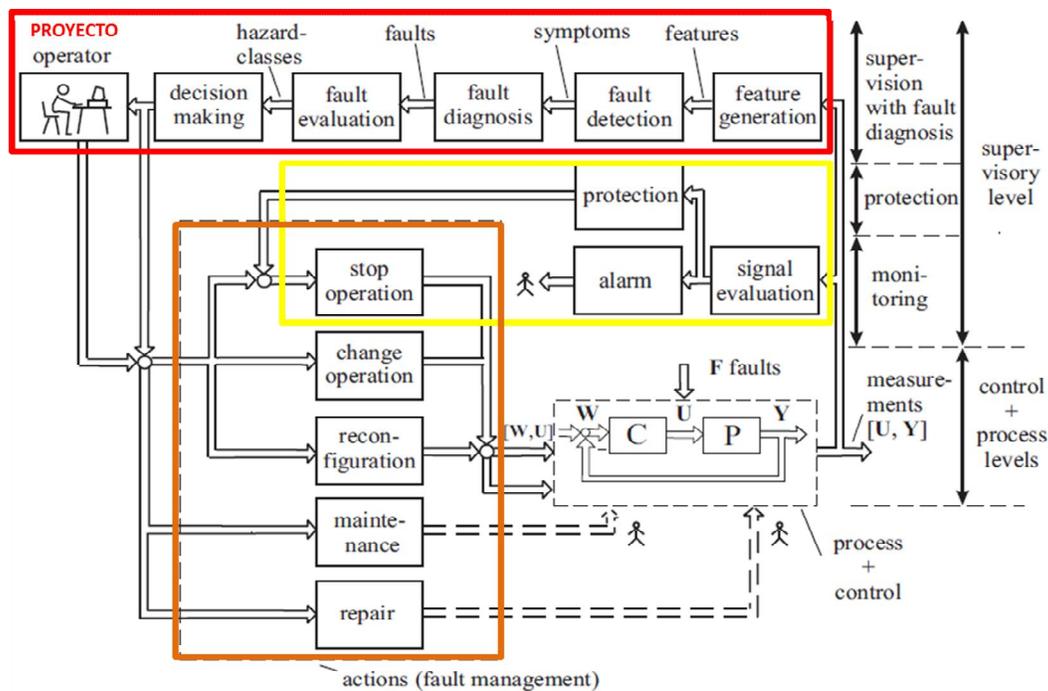


Figura 37. Necesidad de la integración de las actividades de ingenieros y operadores.

### 4.3. PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES REALIZADAS EN EL MARCO DE LA PRESENTE INVESTIGACION

Las siguientes publicaciones fueron realizadas en el marco de la presente investigación:

- Vasquez, John; Travé-Massuyès, Louise; Subias, Audine; Jimenez, Fernando; Agudelo, Carlos. Chronicle based alarm management in startup and shutdown stages. SAPROCESS and DX 2015. Paris (Francia), Septiembre 2015.
- Agudelo, Carlos; Morant, Francisco; Quiles, Eduardo; Garcia, Emilio. Early fault detection and diagnosis for improving process safety: application to a FCC refinery process. SIAM DATA MINING 2013. Austin, TX (USA), Mayo 2013.
- Agudelo, Carlos; Morant, Francisco; Quiles, Eduardo; Garcia, Emilio. Integration of techniques for early fault detection and diagnosis for improving process safety: Application to a Fluid Catalytic Cracking refinery Process. Journal of Loss Prevention in the Process Industries (2013). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2013.01.002>
- Metodología para identificación de fallos críticos en procesos industriales basada en técnicas de confiabilidad operacional. Zambrano, Sandra; Tarantino, Rocco; Aranguren, Sandra; Agudelo Carlos. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada. ISSN: 1692-7257- Volumen 2 – Número 20 – 2012. Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura. Instituto de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Aplicadas (IIDTA). [http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIIG/home\\_10/recursos/general/pag\\_contenido/publicaciones/revista\\_tec\\_avanzada/2012\\_vol\\_1/29102012/revista\\_avanzada\\_20.jsp](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIIG/home_10/recursos/general/pag_contenido/publicaciones/revista_tec_avanzada/2012_vol_1/29102012/revista_avanzada_20.jsp)
- Integración de técnicas para la detección temprana y el diagnóstico de fallos para mejorar la seguridad de proceso: Aplicación en un proceso de refinería del petróleo. Agudelo, Carlos; Morant, Francisco; Quiles, Eduardo; Garcia, Emilio. Universidad Autónoma de Occidente, Cali (Colombia). Octubre 2012. I CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN.
- Detección y diagnóstico temprano de fallos para mejorar la seguridad de proceso y la confiabilidad: aplicación en un proceso de refinería. Agudelo, Carlos; Morant, Francisco; Quiles, Eduardo; Garcia, Emilio. Universidad De La Salle, Bogotá (Colombia). Agosto 2012. SIMPOSIO INTERNACIONAL EN AUTOMATIZACIÓN AVARC (Automatización, Visión Artificial, Robótica y Control). “Impacto de la Automatización en el Desarrollo Industrial”. <http://automatizacion.lasalle.edu.co/OCS/Memorias.html>

También en: Epsilon: revista de las facultades de ingeniería. Universidad De La Salle, Bogotá, Junio 2013.

- PCA y lógica difusa para la detección de eventos anómalos de operación, en una planta de Crackeo Catalítico Fluidizado FCC. Zambrano, Sandra; Higuera, Cristhiam; Villamizar, Rodolfo; Agudelo, Carlos. 3er CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA – Universidad Autónoma de Bucaramanga. Bucaramanga, Octubre 2011. También en: <http://revistas.unab.edu.co/index.php?journal=mecatronica&page=article&op=view&path%5B%5D=1539>

También en: Revista Colombiana de Computación. Vol. 12 No 2. Diciembre 2011.

<http://revistas.unab.edu.co/index.php?journal=rcc&page=issue&op=view&path%5B%5D=139&path%5B%5D=showToc>

- Secuencias de alarmas para detección y diagnóstico de fallos. Agudelo, Carlos; Morant, Francisco; Quiles, Eduardo; Garcia, Emilio. 3er CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA – Universidad Autónoma de Bucaramanga. Bucaramanga, Octubre 2011. <http://revistas.unab.edu.co/index.php?journal=mecatronica&page=article&op=view&path%5B%5D=1384>

También en: Ingeniería y gestión de mantenimiento. Octubre/Noviembre/Diciembre 2011, No 75. Versión electrónica: <http://cde.bluevista.es/1M4f10673d64377012.cde/page/16>

También en: Revista Colombiana de Computación. Vol. 12 No 2. Diciembre 2011.

<http://revistas.unab.edu.co/index.php?journal=rcc&page=issue&op=view&path%5B%5D=139&path%5B%5D=showToc>

- Intelligent Alarm Management. Agudelo, Carlos; Morant, Francisco; Quiles, Eduardo; Garcia, Emilio. IEEE LARC & CCAC 2011. Bogotá, Octubre 2011.

También en: IEEE Explore:

[10.1109/LARC.2011.6086852](https://doi.org/10.1109/LARC.2011.6086852)

- Integración de técnicas para la detección temprana y el diagnóstico de fallos en procesos complejos. Aplicación a un proceso de Cracking Catalítico Fluidizado. Documento elaborado como requisito para optar al Diploma de Estudios Avanzados. Agudelo, Carlos. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia (España), Diciembre 2010.

- Uso de Sistemas Expertos en el Diagnóstico de Fallos en Procesos Complejos. Agudelo, Carlos; Quiles, Eduardo; Morant, Francisco; García, Emilio. XIII Convención de Ingeniería Eléctrica (CIE2007). Univ. Central Maria Abreu de las Villas. Villa Clara (Cuba), Junio 2007.

Las siguientes presentaciones han sido realizadas en el marco de la presente investigación:

- Early fault detection and diagnosis for improving process safety: application to a FCC refinery process. SIAM DATA MINING 2013. Austin, TX (USA), Mayo 2013.
- Integración de técnicas para la detección temprana y el diagnóstico de fallos para mejorar la seguridad de proceso: Aplicación en un proceso de refinería del petróleo. Universidad Autónoma de Occidente, I CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN. Cali, Octubre 2012.
- Detección y diagnóstico temprano de fallos para mejorar la seguridad de proceso y la confiabilidad: aplicación en un proceso de refinería. Universidad De La Salle, SIMPOSIO INTERNACIONAL EN AUTOMATIZACIÓN AVARC (Automatización, Visión Artificial, Robótica y Control). "Impacto de la Automatización en el Desarrollo Industrial". Bogotá, Agosto 2012.
- Secuencias de alarmas para detección y diagnóstico de fallos. 3er CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA – Universidad Autónoma de Bucaramanga. Bucaramanga, Octubre 2011.
- Intelligent Alarm Management. IEEE LARC & CCAC 2011. Bogotá, Octubre 2011.
- Gerenciamiento Inteligente de Alarmas". Foro de entorno tecnológico: Gestión de Información. Ecopetrol S.A. Bucaramanga, Mayo 2010.
- "El control avanzado y la detección temprana y el diagnóstico de fallos". 1er Congreso Nacional de Instrumentación y Control Unidades Tecnológicas de Santander. Bucaramanga, Noviembre 2008.

- "Integration of Early Fault Detection and Diagnosis in Industrial Processes: FCC Application". National Petrochemical and Refiners Association. Austin, TX (USA), Octubre 2007.

## 5. BIBLIOGRAFIA

Acero, Carolina; Riascos, Federico; Agudelo, Carlos; Torres, Enrique. Gerenciamiento de Alarmas: Documento filosófico para el manejo de alarmas en la Gerencia Refinería de Cartagena. Instituto Colombiano del Petróleo, ECOPETROL. Piedecuesta (Colombia), Mayo 2005.

Acero, Carolina; Riascos, Federico; Agudelo, Carlos; Torres, Enrique. Gerenciamiento de Alarmas en GRC: Diagnóstico preliminar Unidad de Ruptura Catalítica-Fase I. Instituto Colombiano del Petróleo, ECOPETROL. Piedecuesta (Colombia), Septiembre 2005.

Acero, Carolina; Riascos, Federico; Agudelo, Carlos; Torres, Enrique. Gerenciamiento de Alarmas en GRC: Informe de medición Post-Fase I Unidad de Ruptura Catalítica. Instituto Colombiano del Petróleo, ECOPETROL. Piedecuesta (Colombia), Diciembre 2005.

Agudelo, Carlos; Quiles, Eduardo; Morant, Francisco; García, Emilio. Uso de Sistemas Expertos en el Diagnóstico de Fallos en Procesos Complejos. XIII Convención de Ingeniería Eléctrica (CIE2007). Univ. Central Maria Abreu de las Villas. Villa Clara (Cuba), Junio 2007.

Agudelo, Carlos. Integración de técnicas para la detección temprana y el diagnóstico de fallos. Aplicación a un proceso de Cracking Catalítico Fluidizado. Documento elaborado como requisito para optar al Diploma de Estudios Avanzados. Universidad Politécnica de Valencia, Diciembre 2010.

Agudelo, Carlos; Quiles, Eduardo; Morant, Francisco; García, Emilio. Intelligent Alarm Management. Presentado y publicado en el IEEE LARC - LARS - CCAC & IASCW 2011 (XI Latin American Robotics Competition & Colombian Conference on Automatic Control & II Industry Applications Society Colombian Workshop) realizado en Bogotá (Colombia) del 1 al 4 de Octubre del 2011. <http://mecatronica.umng.edu.co/ieeelarc/>

Agudelo, Carlos; Morant, Francisco; Quiles, Eduardo; Garcia, Emilio. Integration of techniques for early fault detection and diagnosis for improving process safety: Application to a Fluid Catalytic Cracking refinery Process. Journal of Loss Prevention in the Process Industries (2013). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2013.01.002>

American Petroleum Institute. Process Safety Performance Indicators for the Refining and Petrochemical Industries. ANSI/API RECOMMENDED PRACTICE 754. Primera Edición. Abril 2010.

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, No 8, 2006

Arellano, Juan; Galicia, Yalu; Ramírez, Edgar. A new shell for the development of alarm pattern recognition expert systems. Proceedings of the 3rd international conference on Industrial and engineering applications of artificial intelligence and expert systems - Volume 2. 1990.

Bakolas, Efstathios; & Saleh, Joseph. (2011). Augmenting defense-in-depth with the concepts of observability and diagnosability from Control Theory and Discrete Event Systems. Reliability Engineering and System Safety 96, 184–193

Bao, Huizhi; Khan, Faisal; Iqbal, Tariq; Chang, Yanjun. (2011). Risk-based fault diagnosis and safety management for process systems. Process Safety Progress (Vol 30 No 1).

Bauer, M. y Thornhill, N. A Practical Method for Identifying the Propagation Path of Plant-Wide Disturbances. Journal of Process Control, 18, 2008.

Belke JC, & Dietrich DY. (2001). Chemical accident risks in US industry—a preliminary analysis of accident risk data from US hazardous chemical facilities. Paper presented at the 10th international symposium on loss prevention and safety promotion in the process industries, Stockholm, Sweden.

Biswas, Cordier, Lunze, Travé-Massuyès, Staroswiecki. Diagnosis of Complex Systems: Bridging the Methodologies of the FDI and DX Communities. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B: Cybernetics, Vol. 34, No 5, Octubre 2004. p 2159-2162.

Burges, C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition. Data Mining and Knowledge Discovery, 2:121-167, 1998.

Butler S., White D., Barna G., Wise B., Gallagher, N. Development and benchmarking of multivariate statistical process control tools for a semiconductor etch process: Impact of measurement selection and data treatment on sensitivity. Eigenvector research, inc., 1998.

Butler S., White D., Barna G., Wise B., Gallagher, N. Development and benchmarking of multivariate statistical process control tools for a

semiconductor etch process: Improving robustness through model updating. Eigenvector research, inc., 1999.

Caceres, L. y Roper, A. 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. Tesis de grado para optar al título de Ingeniería Electrónica. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga (Colombia), 2006.

Celse, B.; Cauvin, S.; Heim, B.; Gentil, S.; Travé-Massuyès, L. Model Based Diagnostic Module for a FCC Pilot Plant. Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 60 (2005), No. 4, pp. 661-679.

Cheng, Yue. Data-driven Techniques on Alarm System Analysis and Improvement. Phd tesis. Universidad de Alberta. 2014.

Cogollo, Vicente; Rojas, Rafael; Castaño, J. Manual de Cracking. Gerencia Refinería de Cartagena, ECOPETROL. Cartagena (Colombia), 2005.

Cheng, Yue. Data-driven Techniques on Alarm System Analysis and Improvement. Universidad de Alberta. Tesis doctoral. Canada, 2013.

Chiang, L. H.; Russell, E. L.; Braatz, R. D. Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer, 2000.

Dash y Venkatasubramanian. Integrated Framework for Abnormal Event Management and Process Hazards Analysis. AIChE Journal, Enero 2003. Vol 49, No 1.

De la Vara R., Gutiérrez H. Control Estadístico de la calidad y Seis Sigma. McGraw-Hill Interamericana, 2004.

Drysdale DD, & Sylvester-Evans R. (1998). The explosion and fire on the PiperAlpha platform, 6 July 1988. A case study. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series, a Mathematical Physical and Engineering Sciences; 356(1748):2929–51.

Dunning T. y Friedman E. Practical Machine Learning A New Look at Anomaly Detection. O'Really. Estados Unidos de América, 2014.

Dvorak, Daniel y Kuipers, Benjamin. Process monitoring and Diagnosis: A model-based approach. IEEE Expert 6(3): 67-74, junio 1991.

EEMUA. Alarm Systems: A Guide to Design, Management and Procurement. The Engineering Equipment and Materials Users Association, Publication No 191, Londres (Inglaterra), 1999.

Flach, Peter; Kakas, Antonis. Abduction and Induction: Essays on their Relation and Integration. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands, 2000.

Garcia, E.; Quiles, E.; Morant, F.; Correcher, A.; Blasco, R. Diagnóstico de fallos de una columna de destilación. XXII Jornadas de Automática. Barcelona (España), 2001.

Garcia Moreno, Emilio. Automatización de procesos industriales. Universidad Politécnica de Valencia. Editorial U.P.V., 1999.

García, Javier. Mejora en la confiabilidad operacional de las plantas de generación de energía eléctrica: Desarrollo de una metodología de gestión de mantenimiento basado en el riesgo. Máster en gestión técnica y económica en el sector eléctrico. Universidad Pontificia Comillas, 2004.

Ghariani, A.; Toguyéni, A. K. A.; Craye, E. A Functional Graph Approach for Alarm Filtering and Fault Recovery for Automated Production Systems, wodes, pp.289, Sixth International Workshop on Discrete Event Systems (WODES'02), 2002.

Godfrey A., Wadsworth H., Kenneth JR, Stephens S. Métodos de control de calidad. CECSA, 2005.

Goebel, K. Architecture and design of a diagnostic information fusion system. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Vol. 15, No 4, pp 335-348, 2001.

Gomathy, B.; Ramesh, S. M.; Shanmugam, A. A Hybrid Model for Enhanced Prediction of Medical Diagnosis Based on Discriminative Rule Framing and Correlated Framework Approaches. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. Vol. 23, No. 1 (2015) 33–48. Ed. World Scientific Publishing Company. DOI: 10.1142/S0218488515500026

Gopinath, Odayammadath Chandroth. DIAGNOSTIC CLASSIFIER ENSEMBLES: ENFORCING DIVERSITY FOR RELIABILITY IN THE COMBINATION. Submitted for the degree of PhD. Department of Computer Science, University of Sheffield. Noviembre, 1999.

Graham, Stephen. String searching algorithms. Lecture notes series on Computing – Vol. 6. World Scientific. Londres, 2000.

Gustafsson, F. Statistical signal processing approaches to fault detection. ANNUAL REVIEWS IN CONTROL, 31(1):41-54, 2007.

Hae Woo Lee, Min Woo Lee, and Jong Moon Park. Multi-scale extension of PLS algorithm for advanced on-line process monitoring. CHEMOMETRICS AND INTELLIGENT LABORATORY SYSTEMS, 98(2):201-212, Octubre 2009.

Hamscher, W.; Console, L.; De Kleer, J. Readings in Model-based Diagnosis. Morgan Kaufmann Publishers Inc., California, 1992.

Hashem, S. Optimal linear combinations of neural networks. Tesis presentada en la Universidad de Purdue para optar al título de Doctor, School of Industrial Engineering, 1993.

Isermann, R. Model-based fault-detection and diagnosis - status and applications. ANNUAL REVIEWS IN CONTROL, 29(1):71-85, 2005.

Josephson, John; Josephson, Susan. Abductive Inference: Computation, Philosophy, Technology. Cambridge University Press, 1996.

Julier, S. y Uhlmann, J. General Decentralized Data Fusion with Covariance Intersection. In Handbook of multisensor data fusion. CRC Press, 2001.

Kayihan F., Cinar A., Palazoglu A. Chemical Process Performance Evaluation. CRC. Press Taylor & Francis Group, 2007.

Korbicz, J.; Koscielny, J.M.; Kowalczyk, Z.; Cholewa, W. Fault Diagnosis: Models, Artificial Intelligence, Applications. Editorial Springer. Berlin, 2004.

Kurtoglu, T.; Narasimhan, S.; Poll, S.; Garcia, D.; Kuhn, L.; de Kleer, J.; Gemund, A.; Feldman, A. Towards a Framework for Evaluating and Comparing Diagnosis Algorithms. DX 2009.

Lam, Louisa. Theory and application of majority vote – from condorcet jury theorem to pattern recognition. Proc. Int. Conference on Mathematics for Living, Amman, Jordan, Noviembre 2000, 177-182.

Larraz, R. Probabilistic Alarm Management. Hydrocarbon Processing: Special report on process control and information systems. Octubre 2007.

Lei Guo, Liping Yin, Hong Wang, and Tianyou Chai. Entropy Optimization Filtering for Fault Isolation of Nonlinear Non-Gaussian Stochastic Systems. IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, 54(4):804-810, Abril 2009.

Lind M. y Zhang X. Functional modelling for fault diagnosis and its application for NPP. Nuclear Engineering and Technology, Volume 46, Issue 6, Diciembre 2014, 753–772.

Llanos Rodríguez, David Alejandro. Time disalignments in fault detection and diagnosis. Disertación presentada en la Universidad de Girona como requisito parcial para optar al título de doctor en filosofía. Girona (España), 2008.

Mabroukeh, N. y Ezeife C. A taxonomy of sequential pattern mining algorithms. ACM Computing Surveys, 43(3), 2010.

Mannila, Heikki; Ronkainen, Pirjo. Similarity of Event Sequences (Extended Abstract). University of Helsinki, Department of Computer Science, 1998.

Mayer-Schöberger, Viktor y Cukier, Kenneth. Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think. Ed. Eamon Dolan/Houghton Mifflin Harcourt, 2013.

Methnani, S.; Lafont, F.; Gauthier, J.; Damak, T.; Toumi, A. Actuator and Sensor Fault Detection, Isolation and Identification in Nonlinear Dynamical Systems, with an Application to a Waste Water Treatment Plant. Journal of Computer Engineering and Informatics. Vol. 1 Issue 4, PP. 112-125, 2013.

Mingsheng, Qian. Efficient methodologies for real-time state identification during process transitions. A thesis submitted for the degree doctor of philosophy, Department of Chemical and Biomolecular Engineering. National University of Singapore. 2006.

Misra, M., Yue, HH., Qin, SJ, y Ling, C. Multivariate process monitoring and fault diagnosis by multi-scale PCA. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 26(9):1281-1293, Septiembre 2002.

Montgomery, Douglas. Introduction to statistical Quality Control. John Wiley & Sons, Inc., 2001.

Mukhtar, Z. e Irfan Tahir, M. Diagnostics Data Collection and Analysis: Improving an Industrial Problem Resolution Process. Mälardalen University, Master Thesis. Suecia, 2005.

Nguyen, Viet Ha y Golival, Jean-Claude. Fault detection based on Kernel Principal Component Analysis. ENGINEERING STRUCTURES, 32(11):3683-3691, Noviembre 2010.

Norman C. (1986). Chernobyl—errors and design flaws. Science; 233(4768): 1029–31.

O'Hagan, A.; Buck, C.; Daneshkhah, A.; Eiser, J.; Garthwaite, P.; Jenkinson, D.; Oakley, J. y Rakow, T. *Uncertain Judgements: Eliciting Experts' Probabilities*. University of Sheffield y University of Essex. John Wiley & Sons, 2006.

Oktem, U.; Pariyani, A.; Soroush, M.; Seider W. *Improve Process Safety with Near-Miss Analysis*. CEP Magazine. AIChE. Mayo 2013.

Ortiz Barajas, María Clemencia. *Definición de los modos de fallo de una unidad de ruptura catalítica a partir de información bibliográfica y conocimiento previo*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Electrónica. Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Bucaramanga, 2008.

Padilla, Pedro. *Desarrollo de una interfaz para el control estadístico de procesos utilizando herramientas de MatLab*. Master's thesis, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA, HUAJUAPAN DE LEON, OAXACA, Diciembre 2010.

Paté-Cornell ME. (1993). *Learning from the Piper Alpha accident—a postmortem analysis of technical and organizational factors*. Risk Analysis;13(2): 215–32.

Pereira, Rodrigo; Kezunovic, Mladen; Mantovani, José. *Fault Location Algorithm for Primary Distribution Feeders Based on Voltage Sags*. International Journal of Innovations in Energy Systems and Power. Vol 4 No 1. Abril 2009.

Pirjanian, P.; Christensen, H. I.; Fayman, J.A. *Application of voting to fusion of purposive modules: An experimental investigation*. Preprint submitted to Elsevier, 1998.

Pous i Sabadí, C. *Case based reasoning as an extensión of fault dictionary methods for linear electronic analog circuits diagnosis*. PhD dissertation. Universidad de Girona, 2004.

Poole, D. *Normality and Faults in Logic-Based Diagnosis*. Readings in Model-based Diagnosis. Editado por Hamscher W., Console, L. y de Kleer J. Morgan Kaufmann Publishers. San Mateo, CA (USA), 1992.

Prieto, A.; Llanes, O.; Folgueras, J.; Garcia, E. y Morant, F. *Diseño basado en diagnóstico de fallos y sistemas híbridos aplicado en un equipo de desfibrilación ventricular*. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 20 N° 1, 2012, pp. 48-65.

Quantrille, T. y Liu, Y. INTRODUCTION TO ARTIFICIAL INTELLIGENCE Artificial Intelligence in Chemical Engineering, Elsevier 1991, 197-231.

M. A. Rashid, M. T. Hoque and A. Sattar, Association Rules Mining Based Clinical Observations, arXiv preprint arXiv:1401.2571, 2014.

Ramírez, Julio César. MÉTODOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN DIAGNÓSTICO. Trabajo presentado para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados. Universidad Politécnica de Valencia, 2003.

Randall, D. y Hamscher, W. Model-based reasoning: Troubleshooting. Readings in Model-based Diagnosis. Editado por Hamscher W., Console, L. y de Kleer J. Morgan Kaufmann Publishers. San Mateo, CA (USA), 1992.

Rao, M. et al. Intelligent system architecture for process operation support. Expert Systems with Applications (19), p. 279-288. 2000.

Reason J. (1987). The Chernobyl errors. Bulletin of the British Psychological Society;40:201–20→206.

Reiter, R. A Theory of Diagnosis from First Principles. Artificial Intelligence, Vol 32, No 1, pp 57-95, 1987.

Rodríguez, A. Control estadístico de la calidad de un servicio mediante gráficas X y R. Redalyc, 151-169, 2009.

Rusell E. y Chiang L.. Fault detection and diagnosis in industrial systems. Springer, 2001.

Russell, S y Norvig, P. Inteligencia Artificial: Un enfoque moderno. Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1ª edición. México (México), 1996.

Sadeghbeigi, Reza. Fluid Catalytic Cracking Handbook. Gulf Professional Publishing Company, 2<sup>nd</sup> edition. Houston (USA), 2000.

Saleh, Joseph; & Cummings, Amy. (2011). Safety in the mining industry and the unfinished legacy of mining accidents: Safety levers and defense-in-depth for addressing mining hazards. Safety Science 49, 764–777.

Salge M, & Milling PM. (2006). Who is to blame, the operator or the designer? Two stages of human failure in the Chernobyl accident. System Dynamics Review;22(2):89–112.

Schut, C. y Bredeweg, Bert. An overview of approaches to qualitative model construction. The Knowledge Engineering Review, 11: 1-25. Cambridge University Press, 1996.

Shewhart, W.A. Statistical Method: From the Viewpoint of Quality Control. Lancaster Press Inc., 1939.

Shrivastava P. (1987). Bhopal: anatomy of a crisis. Cambridge, Mass: BallingerPub. Co.

Singhal, Ashish; Seborg, Dale. Matching Patterns from Historical Data Using PCA and Distance Similarity Factors. Department of Chemical Engineering. University of California, Santa Barbara. Proceedings of the American Control Conference. Arlington, VA. June 25-27, 2001.

Sinnot-Armstrong, Walter y Fogelin, Robert. Understanding Arguments. Wadsworth Cengage Learning, 8a edición, 2010.

Stanley, G.M.; Vaidhyanathan, R. A Generic Fault Propagation Modeling Approach To On-Line Diagnosis and Event Correlation. Submitted to 3rd IFAC Workshop on On-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries, Solaize, France. June 4-5, 1998.

Umut, K. Application of statistical process control to software development processes via control charts. Master's thesis, The middle east technical university.(School of informatics), 2003.

Venkatasubramanian, V. et al. A review of process fault detection and diagnosis. Part II: Qualitative models and search strategies. Computers and Chemical Engineering 27 (2003), p 313-326.

Venkatasubramanian, V. et al. A review of process fault detection and diagnosis. Part III: Process history based methods. Computers and Chemical Engineering 27 (2003) p 327-346.

Wittenberg, David. CLP(F) Modeling of Hybrid Systems. Dissertation. Brandeis University, Massachusetts, 2004.

Yang, Fan y Xiao, D. Progress in Root Cause and Fault Propagation Analysis of Large-Scale Industrial Processes. Journal of Control Science and Engineering. Article ID 478373. Hindawi Publishing Corporation. doi:10.1155/2012/478373. 2012.

Yang, f.; Duan, p.; Shah, S.; Chen, T. Capturing Connectivity and Causality in Complex Industrial Processes. Ed. Springer, 2014.

Zambrano, Sandra; Higuera, Cristhiam; Villamizar, Rodolfo; Agudelo, Carlos. PCA y lógica difusa para la detección de eventos anómalos de operación, en una planta de Crackeo Catalítico Fluidizado FCC. 3er CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA – Universidad Autónoma de Bucaramanga. Bucaramanga, Octubre 2011. También en:

<http://revistas.unab.edu.co/index.php?journal=mecatronica&page=article&op=view&path%5B%5D=1539>

También en: Revista Colombiana de Computación. Vol. 12 No 2. Diciembre 2011.

<http://revistas.unab.edu.co/index.php?journal=rcc&page=issue&op=view&path%5B%5D=139&path%5B%5D=showToc>

Zhizhou Li, Guohua Liu, Rui Zhang, y Zhencai Zhu. Fault detection, identification and reconstruction for gyroscope in satellite based on independent component analysis. ACTA ASTRONAUTICA, 68(7-8):1015-1023, Abril 2011.

## **Anexo 1. SPC aplicado a la detección y el diagnóstico de fallos**

## **1.El SPC y la variabilidad**

Cuando Shewart inició sus estudios en el SPC, determinó que todos los procesos están sujetos a variación, y esta, genera disminución de la calidad debido a que causa ineficiencia y gastos. Como resultado, si se logra identificar la fuente de variación, se pueden tomar acciones necesarias para disminuir o eliminar la ineficiencia e incrementar la productividad, o como en nuestro caso responder de manera oportuna ante fenómenos incipientes (Shewhart, 1939; Umut, 2003). La variación en un proceso tiene dos tipos de causas, causas asignables y causas aleatorias o fortuitas. Son consideradas causas asignables a los cambios de materia prima, cambios de turno, errores del operador, materia prima defectuosa, entre otros, mientras que se consideran causas aleatorias a cualquier fenómeno fortuito que pueda afectar la variabilidad del proceso, como los fenómenos climáticos por mencionar algunos. Cuando un proceso opera únicamente con causas fortuitas de variación, está bajo control estadístico y cuando un proceso opera en presencia de causas asignables está fuera de control (Montgomery, 2001; De la Vara y Gutiérrez, 2004). Actualmente el control estadístico de procesos se ha desarrollado de tal manera que un área más compleja se denomina Control Estadístico de Procesos Multivariable (SPCM) (Butler, 1998; Butler, 1999), en donde se analizan al mismo tiempo las repercusiones que tienen un conjunto de variables en un proceso.

## **2. Fundamentos de una gráfica de control**

Se analizará la herramienta que se llama gráficas de control con la finalidad de analizar sus conceptos, tipos y ecuaciones que la conforman. Las gráficas son elaboradas a partir de valores medidos de muestras tomadas del proceso, se menciona que las gráficas de control son una herramienta que se utiliza para analizar datos estadísticos de manera sofisticada, que incluye Límites de Control Superiores e Inferiores, tal como se observa en la siguiente figura (Padilla, 2010; Umut, 2003).

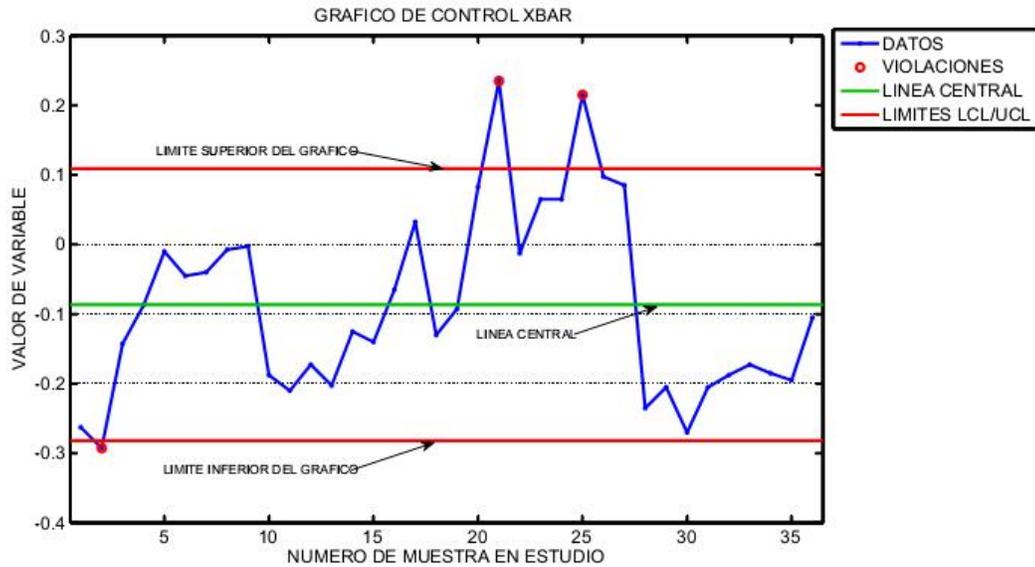


Figura 1. Ejemplo de gráfico de control

Los límites de control dan poder analítico a la gráfica de control para que el usuario determine si un proceso se puede considerar estable y por lo tanto, predecible, impredecible o inestable. Por lo que dicha información lleva a controlar un proceso cuando este se considera estable o mejorar su control para cuando el proceso se considera inestable. Las gráficas de control muestran la cantidad y naturaleza de la variación en el tiempo, indican el control estadístico o la falta de él y permiten la interpretación y detección del patrón de cambios en el proceso de estudio. En general, hay dos tipos de datos que son útiles en el estudio de las características de la calidad, que son por Atributos y por Variables. Los primeros son el conteo o la conversión de los conteos a proporciones o porcentaje de la presencia o ausencia de algunas características o atributos en las unidades examinadas, mientras que las segundas son mediciones reales junto con una escala de una característica de calidad o propiedad del proceso capaz de ser la media (Rodríguez, 2009; Godfrey, 2005). Las gráficas de control por Variables se emplean cuando es necesario examinar una característica de escala o medición y no la presencia de un atributo. Este tipo de gráficas se utilizan para analizar una característica de calidad, las cuales contempla gráficas de medias  $\bar{X}$ , rangos  $R$ , desviaciones estándar  $S$  y medianas  $\tilde{X}$ . Las gráficas de control por Atributos se emplean para demostrar el comportamiento básico de la variación de los

Atributos en muestras tomadas de un proceso que tiene un nivel estable del porcentaje de ciertas características. En este trabajo se utilizan los gráficos de control por variables.

### 3. Muestreo

Se define el vector de  $X_p$  conformado por una cantidad de datos igual a  $W_p$  como el vector de la población o muestra poblacional. Se define el vector de  $X_m$  conformado por una cantidad de datos igual a  $W_m$  como el vector de la muestra, conjunto muestral o muestra. El número de datos  $W_p$  (dato =  $x_{[t+w]}$ ) que conforman la población, corresponde con el número de datos totales que se toman del experimento y puede variar de acuerdo a como se conformen los  $n$  conjuntos muestrales (por ejemplo tomar  $m$  datos aleatorios, o  $m$  datos consecutivos), a partir de los datos disponibles en la población y teniendo definida una ventana de muestreo  $W_m = m$  datos. Si el muestreo se desarrolla sin repetir muestras la ventana poblacional es de tamaño  $W_p = W_m * n = m * n$  datos (para el caso de  $n$  muestras). Para el caso de un muestreo que tenga en cuenta datos repetidos el tamaño cambia. En este trabajo el tamaño de la muestra poblacional se fija  $W_p = 256$  y se actualiza desplazando la muestra más antigua e incorporando las muestras más recientes del proceso en el tiempo, así el vector de muestras en análisis queda compuesto por: La Muestra Poblacional en el tiempo =  $[t]$  :

$$X_{p[t]} = [x_{[t]}, x_{[t-1]}, x_{[t-2]}, \dots, x_{[t-W_p]}]$$

La Muestra Poblacional en el tiempo= $[t + 1]$ :

$$X_{p[t+1]} = [x_{[t+1]}, x_{[t]}, x_{[t-1]}, \dots, x_{[t-1-W_p]}]$$

Se define una ventana de análisis  $W_m = m$ , que es el número de datos que se toma de la población para conformar cada conjunto muestral o muestra.

Los Valores de la ventana muestral  $W_m$ , el tiempo de muestreo  $T_s$  y la ventana poblacional  $W_p$ , se toman teniendo en cuenta criterios de tiempo y frecuencia, de acuerdo con lo que se desea evidenciar; para nuestro caso la ventana muestral es de 8 datos  $W_m = 8[\text{Datos}]$ , el periodo de muestreo es de 30 segundos  $T_s = 30[\text{Seg}]$  y la ventana poblacional es de 256 datos  $W_p = 256[\text{Datos}]$ .

#### 4. Gráficas de control de medias $\bar{X}$

Se selecciona una población de tamaño adecuado para el análisis  $W_p$ , esta población es dividida en un número de muestras  $n$  de tamaño  $W_m$ , se determinan las características (Montgomery, 2001; Padilla, 2010):

1. Media aritmética poblacional, es igual al promedio de las medias muestrales.

$$\mu_p[t] = \sum_{i=1}^n \frac{X_{m[i,t]}}{n}$$

Donde  $X_{m[i,t]}$  representa cada uno de las medias de las muestras,  $n$  es el número de muestras en que se ha dividido la población total y  $\mu_p$  la media aritmética poblacional,  $\mu_p$  se convierte en la línea central del gráfico.

2. Rango poblacional, es igual al promedio de los rangos muestrales, se obtiene de:

$$R_p[t] = \sum_{i=1}^n \frac{\max(X_{m[i,t]}) - \min(X_{m[i,t]})}{n}$$

Donde el rango muestral se define como  $\max(X_{m[i,t]}) - \min(X_{m[i,t]})$ , el número de muestras tomadas es  $n$  y el rango promedio de acuerdo con el teorema del límite central corresponde con el promedio de los rangos muestrales.

3. Desviación estándar poblacional, es igual al promedio de las desviaciones estándar muestrales, se obtiene de:

$$S_p[t] = \sum_{i=1}^n \frac{STD_{m[i,t]}(X_{m[i,t]})}{n}$$

$$STD_{m[i,t]}(X_{m[i,t]}) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (X_{m[i,t,j]} - X_{m[i,t]})^2}{m-1}}$$

Donde las desviaciones estándar muestrales se definen como  $STD_{m[i,t]}(X_{m[i,t]})$ , el número de muestras tomadas es  $n$  y la desviación estándar poblacional de acuerdo con el teorema del límite central corresponde con el promedio de las desviaciones estándar muestrales. Como se muestra en las ecuaciones la

cantidad de muestras va desde  $i = 1, \dots, n$ ; y cada muestra se encuentra compuesta por una cantidad de datos que van desde  $j = 1, \dots, m$ , por tanto se puede entender el número de individuos que componen una muestra es igual a la ventana muestral y su tamaño es igual a  $W_m = m$  datos.

4. Los Límites de Control están dados por las ecuaciones descritas anteriormente, de la forma:

Línea Central, Center Line

$$CL = LC = \mu_p$$

Límite de control Bajo o Limite de control Inferior, Low Control Limit

$$LCI = LCL = \mu_p - [A_2 \cdot R_p] \text{ o } LCI = LCL = \mu_p - [\kappa \cdot S_p]$$

Límite de control Alto o Limite de control Superior, Up Control Limit

$$LCS = LCU = \mu_p + [A_2 \cdot R_p] \text{ o } LCS = LCU = \mu_p + [\kappa \cdot S_p]$$

De acuerdo con la filosofía que se defina el límite se puede establecer respecto al rango poblacional  $R_p$  o a la desviación estándar poblacional  $S_p$ .  $A_2$  es una constante que se obtiene de acuerdo al número de elementos que contiene cada muestra ( $W_m$ ), que se está analizando (Ver figura 19) o la constante  $\kappa$  puede ser definida como 3 para manejar la filosofía 6-Sigma.

5. Las muestras que se consideran fuera de control (Out of Control), son aquellas que violan los límites del gráfico de control, y las muestras que se consideran bajo control (In Control), son las que permanecen entre los límites definidos. El número de muestras que se encuentran fuera de control constituye el denominado vector de muestras fuera de control, y el tamaño de este vector es lo que se considera como magnitud o longitud del vector de muestras fuera de control ARLO (Average Run Length Out of Control = ARLO), de igual forma la longitud del vector bajo control se denomina ARLI (Average Run Length In Control = ARLI).
6. En nuestro caso de estudio discriminamos las muestras que se encuentran fuera de control por encima y fuera de control por debajo de los límites establecidos, creando los vectores  $ARLO_{MAS}$  (muestras fuera de control que violan el límite superior) y  $ARLO_{MENOS}$  (muestras que violan el límite inferior), transformando nuestro vector de datos poblacionales en una estructura binaria de las muestras fuera de control como se aprecia en las figuras 19(a) y 19(b).

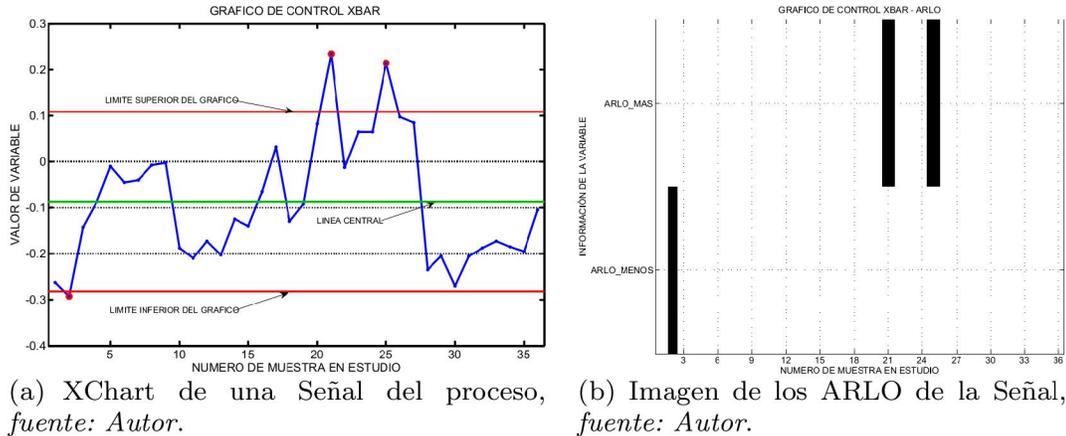


Figura 2. Transformación de la señal del proceso en pixeles de una imagen

## 5. Gráficas de control de rangos R

Este gráfico es más sensible para mostrar los cambios en la muestra.

Linea Central, Center Line  
 $CL = LC = R_p$

Límite de control Bajo o Limite de control Inferior, Low Control Limit  
 $LCI = LCL = D_3 \cdot R_p$

Límite de control Alto o Limite de control Superior, Up Control Limit  
 $LCS = LCU = D_4 \cdot R_p$

Al igual que con el gráfico XCHART discriminamos las muestras que se encuentran fuera de control por encima y fuera de control por debajo de los límites establecidos, creando los vectores  $ARLO_{MAS}$  (muestras fuera de control que violan el límite superior) y  $ARLO_{MENOS}$  (muestras que violan el límite inferior), transformando nuestro vector de datos poblacionales en una estructura binaria de las muestras fuera de control, las variables  $D_3$ ,  $D_4$  se toma de los datos que aparecen en la figura 19.

## 6. Gráficas de control de desviaciones estándar S

Estas gráficas ofrecen una mayor eficiencia en la estimación de la dispersión que la gráfica de rango, manejando tamaños de muestras  $W_m$  mayores.

Línea Central, Center Line

$$CL = LC = S_p$$

Límite de control Bajo o Límite de control Inferior, Low Control Limit

$$LCI = LCL = B_3 \cdot S_p$$

Límite de control Alto o Límite de control Superior, Up Control Limit

$$LCS = LCU = B_4 \cdot S_p$$

Al igual que con el gráfico XCHART discriminamos las muestras que se encuentran fuera de control por encima y fuera de control por debajo de los límites establecidos, creando los vectores  $ARLO_{MAS}$  (muestras fuera de control que violan el límite superior) y  $ARLO_{MENOS}$  (muestras que violan el límite inferior), transformando nuestro vector de datos poblacionales en una estructura binaria de las muestras fuera de control, las variables  $B_3$ ,  $B_4$  se toma de los datos que aparecen en la figura 19.

## **7. Análisis de Componentes Principales ACP o Principal Component Analysis PCA y el estadístico $T^2$ o Hotelling**

Análisis de Componentes Principales (PCA) es una técnica estadística multivariable que extrae la correlación de un conjunto de datos a través de un conjunto de funciones ortogonales (Kayihan et al, 2007). La aplicación de componentes principales radica en la potencial de esta técnica para realizar compresión de datos, correlacionar información y detectar patrones o tendencias. Uno de los objetivos al usar PCA, es identificar las variables responsables de la varianza conjunta, que puede encontrarse relacionada con un fallo. Los componentes principales son una transformación del espacio de operación de las variables a una nueva serie de ejes de coordenadas o espacio en el que las nuevas variables o componentes principales son ortogonales entre sí. La primera componente indica la dirección de mayor variación en los datos, el segundo componente indica la mayor variación no explicada por la primera componente y en una dirección ortogonal a la primera componente como lo muestra la figura 20. El número de componentes principales es por lo general menor que el número de variables medidas, o la mayor parte de la variación del sistema o proceso, puede describirse con menos variables que el número de variables originales totales.

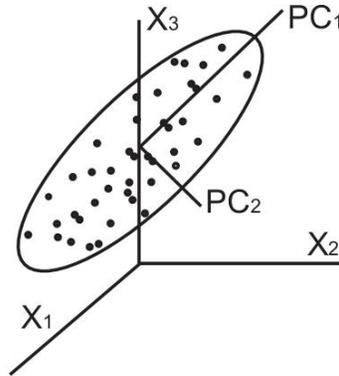


Figura 3. Componentes Principales PC<sub>1</sub> y PC<sub>2</sub> de un conjunto de datos en R<sub>3</sub>, se proyectan en un solo plano R<sub>2</sub>

Dada una matriz de datos con n observaciones sobre m variables de la forma:

$$X = \begin{bmatrix} x_1^T \\ \dots \\ x_i^T \\ \dots \\ x_3^T \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, n \quad x_i = \begin{bmatrix} x(1) \\ \dots \\ x(j) \\ \dots \\ x(m) \end{bmatrix} \quad j = 1, \dots, m$$

Para el cálculo de los componentes principales, se plantea el cálculo de la descomposición en Valores Singulares SVD (Singular Value Decomposition), a la matriz de datos como:

$$X = U \Sigma V^T$$

donde las columnas de U son los autovectores normalizados del  $X \cdot X^T$ , las columnas de V son los autovectores normalizados de  $X^T \cdot X$ , y  $\Sigma$  es una matriz diagonal que tiene como elementos los valores singulares. La matriz de transformación es descrita como  $P = V$  y la proyección o scores T es  $T = U \cdot \Sigma$ . Los componentes principales PC<sub>i</sub> también se pueden calcular por la descomposición espectral (Kayihan et al, 2007), calculando los valores y vectores propios, de la matriz de covarianza S de la matriz de datos X.

$$S = \frac{X^T \cdot X}{(m-1)}$$

$$S = P \Lambda P^T$$

Donde P es una matriz unitaria cuyas columnas son los autovectores normalizados de S y  $\Lambda$  es una matriz diagonal que contiene los valores propios

$\lambda_i$  de S. La proyección o scores T se calcula mediante el uso de la transformación  $T = X.P$ .

Un método rápido para la selección del número apropiado de componentes principales es agregar PC en el modelo hasta que el porcentaje de la variación acumulada explicada por los componentes principales seleccionados no cambia significativamente. La variación acumulada se calcula como:

$$\% \text{ Varianza Acumulada} = \frac{\sum_{i=1}^a \lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \cdot 100 \geq \beta$$

Aquí la varianza de cada componente se calcula y se divide en la varianza total. Finalmente el corte se elige cuando el porcentaje de variabilidad es mayor o igual que el umbral  $\beta$  predefinido.

Un método más preciso que requiere más tiempo de cálculo es a través de la validación cruzada. Una vez que se eligen los componentes de los datos se proyecta hacia el espacio utilizando la matriz de transformación,

$$P \in \mathbb{R}^{m \times a} \subset V \in \mathbb{R}^{m \times m}$$

$$T = X.P \quad \in \mathbb{R}^{n \times a}$$

Al llevarlo al espacio original:

$$\hat{X} = T.P^T \quad \in \mathbb{R}^{n \times m}$$

El vector de residuos se compone por:

$$E = X - \hat{X}$$

## 8. Estadístico $T^2$ Hotelling

$T^2$  de Hotelling, detecta los pequeños cambios y desviaciones del normal funcionamiento definido por el sistema, incluye las contribuciones de todas las variables que pueden llegar a ser importantes más rápido que la desviación individual de una variable, estadísticos multivariantes como  $T^2$  que mide la

variación media se utiliza para detección de fallos. La estadística  $T^2$  en función de las variables de proceso en el tiempo de muestreo  $k$  es:

$$T_k^2 = (X_{(k)} - \bar{X}) \cdot S^{-1} \cdot (X_{(k)} - \bar{X})$$

Si las observaciones individuales  $X_{(k)}$  son independientes de  $\bar{X}$  y  $S$ , entonces  $T^2$  sigue una distribución  $F^\alpha$  con  $m$  y  $n-m$  ( $m$  variables medidas,  $n$  tamaño de la muestra) grados de libertad (Kayihan et al, 2007):

$$T^2 \propto \left[ \frac{m \cdot (n+1)(n-1)}{n \cdot (n-m)} \right] F_{\alpha(m, n-m)}$$

Si el vector de observación  $X_{(k)}$  no es independiente de los estimadores  $\bar{X}$  y  $S$ , pero se incluye en su cálculo, entonces  $T^2$  sigue una distribución Beta con  $m/2$  y  $(n-m-1)/2$  grados de libertad (Kayihan et al, 2007).

$$T^2 \propto \left[ \frac{(n-1)^2}{n} \right] \beta_{m/2, (n-m-1)/2}$$

Este estadístico se puede calcular a partir de los PCA como se presenta a continuación (Russell y Chiang, 2001):

$$T_{PCA}^2(i) = X_i^T \cdot V \cdot (\Sigma^T \Sigma)^{-1} \cdot V^T \cdot X_i$$

$$T_{PCA}^2(i) = X_i^T \cdot (P \cdot \Lambda^{-1} \cdot P^T) X_i$$

El umbral estadístico se puede calcular como:

$$T_{PCA, \alpha}^2 = \frac{a \cdot (n-1) \cdot (n+1)}{n \cdot (n+a)} F_{\alpha}(a, n-a)$$

## 9. Las Máquinas de Soporte Vectorial (SVM)

Son operadores de base lineal y solución única, fundamentadas en la teoría del aprendizaje estadístico. Estas máquinas aprenden la superficie de decisión de dos clases distintas de los puntos de entrada. La descripción dada por los datos de los vectores de soporte es capaz de formar una frontera de decisión alrededor del dominio de los datos de aprendizaje con poco o ningún conocimiento de los datos fuera de esta frontera. Los datos son mapeados por

medio de un kernel Gaussiano (la función Gaussian Radial Basis, o RBF) u otro tipo de kernel a un espacio de características en un espacio dimensional más alto, donde se busca la máxima separación entre las clases. En consecuencia, las SVM resultan en un excelente método para clasificación y reconocimiento de patrones, exhibiendo ciertas mejoras respecto a otras técnicas, como por ejemplo las redes neuronales o fuzzy c-means. Así, las SVM representan un mecanismo para el reconocimiento de patrones, lo cual permite distinguir escenarios operacionales; además, sirven para la generación de residuos orientados a la detección y diagnóstico de fallos mediante regresión. A pesar de ello, aún persisten problemas abiertos relativos al diseño de filtros de detección y diagnóstico de fallos basados en SVM con propiedades de robustez garantizada frente a perturbaciones e incertidumbres, la detección de fallos no reconocidas a priori, un algoritmo eficiente para la identificación de fallos en línea, entre otros aspectos.

En este trabajo se propone usar una máquina de soporte vectorial para el desarrollo de meta modelos para los fallos detectables, ya que los fallos planteados para la unidad de Cracking Catalítico Fluidizado son detectados y diagnosticados a través del diccionario extendido de fallos (como se mostró en la sección 2.2.5), utilizando un conjunto de reglas lógicas.

La teoría de las SVM fue desarrollada por Vapnik basado en la idea de minimización del riesgo estructural (Burges, 1998). Primero, la SVM mapea los puntos de entrada a un espacio de características de una dimensión mayor (ejemplo, si los puntos de entrada están en  $R^2$  entonces serán mapeados a  $R^3$  o  $R^4$  por la SVM), para luego encontrar el hiperplano que los separe y maximice el margen  $m$  entre las clases, ver figura 21. En consecuencia, una SVM tiene la estructura de una red estática basada en kernels,

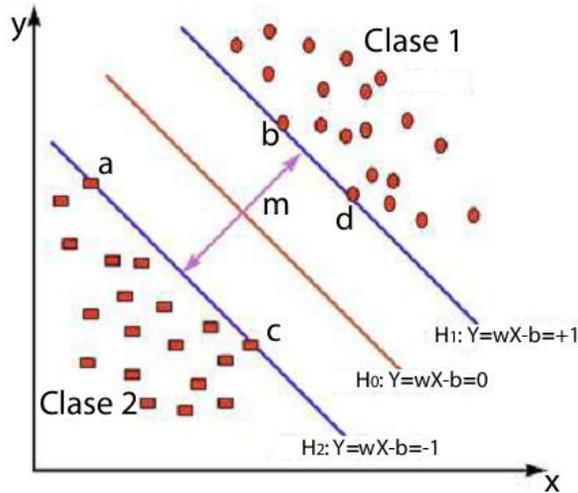


Figura 4. Problema de separación lineal: Maximización del margen  $m$

para realizar clasificación lineal sobre vectores transformados a un espacio de dimensión superior, es decir, separa mediante un hiperplano en el espacio transformado. Así, las operaciones de una SVM son:

1. Transformar los datos a un espacio de dimensión muy alta a través de una función kernel, lo que implica que se reformula el problema de tal forma que los datos se mapean implícitamente en este espacio.
2. Encontrar el hiperplano que maximiza el margen  $m$  entre dos clases, mediante el cálculo eficiente del hiperplano óptimo.
3. Si los datos no son linealmente separables, encuentra el hiperplano que maximiza el margen y minimiza una función del número de clasificaciones incorrectas (término de penalización de la función).

Cuando los conjuntos son linealmente separables, se selecciona el hiperplano que maximiza el margen  $m$ . Al maximizar el margen  $m$ , la separación de las clases es un problema de programación cuadrática y puede ser resuelto por su problema dual introduciendo multiplicadores de Lagrange (Burges, 1998). La SVM puede encontrar el hiperplano óptimo utilizando el producto escalar con funciones en el espacio de características que son los kernels. Los vectores de soporte son combinaciones de unos pocos puntos de entrada que permite escribir la solución del hiperplano de manera más sencilla. Considerando el caso de:

- Un conjunto de  $N$  puntos de datos de entrenamiento.  

$$\{(X_1, Y_1), \dots, (X_N, Y_N)\}$$

- Un hiperplano

$$H_0 : Y = \omega \cdot X - b = 0$$

Donde  $\omega$  es normal al hiperplano,  $b/|\omega|$  es la distancia perpendicular al origen y  $|\omega|$  es la norma euclídea de  $\omega$ .

## **Anexo 2. Tabla Fallos Validada**



TIPO DE CAUSA	ITEM	CAUSA	TAG	DESCRIPCION	RECOMENDACIONES PREVENTIVAS EN CONDICIONES DE OPERACION.	RECOMENDACION PARA MINIZAR LOS EFECTOS DE LA CAUSA - ACCION A SEGUIR	RECOMENDACION PARA ERRADICAR LA CAUSA DEL FALLO - ACCION A SEGUIR	FALLAS																																																								
								Alta temp. RG	Circulacion limitada	Flujo inverso	Depositos de coque	Baja calidad y rendimientos			Perdidas de catalizador	Postcomb.	Varios																																															
												Baja conversion	Alta produccion de gas seco	Baja produccion de gasolina																																																		
C o n d i c i o n e s d e	1	Altas ratas de adición de catalizador fresco al regenerador	umenta_senal_proporcionador	La adición de catalizador fresco sin control de dosificación, produce una alta actividad del catalizador dentro del regenerador aumentando su temperatura.	* Realice la adición de catalizador fresco (frecuencia de adición y cantidad de catalizador) de acuerdo con los resultados de laboratorio y las recomendaciones del ingeniero del proceso. * El aumento de adición de catalizador fresco hace que se produzcan más gases valiosos (G.P. Etileno y Gasolina) y color.	* Aumentar el flujo del FIC27020 (Flujo de la Nafta Pesada Producto a D-2850) para mantener el punto final de ebullición de gasolina. * Disminuir el flujo de ALC Producto a Tanque K-2704 (FIC27017) para garantizar que el valor de la gravedad API se mantenga en tres 1 y 3.	* Detener la adición de catalizador fresco mientras se normaliza la temperatura de la fase densa y la fase diluida del regenerador. * Realizar una adición dosificada de catalizador fresco, mediante el proporcionalador, cambiando los parámetros de adición (libras y frecuencia).																																																									
			umenta_T127147					Si el flujo de aire principal se aumenta y con esto se produce un aumento en la temperatura del regenerador quiere decir que se está trabajando a combustión parcial (presencia de coque en la fase densa del regenerador). El catalizador regenerado llega al reactor con una mayor temperatura y sobrecarga la carga, produciendo más gas seco. El aumento del flujo del soplador también produce que se la velocidad superficial del regenerador aumente favoreciendo que los finos del catalizador salgan hacia la	* Antes de aumentar el flujo de aire del compresor C2701 tomar una muestra de catalizador, para revisar su contextura y color. * Aumentar gradualmente el flujo de aire principal monitorizando la temperatura de la fase densa del regenerador, si esta disminuye y la temperatura de salida de los cícloes aumenta quiere decir que se está trabajando a combustión completa.	* Disminuir el flujo de ALC Producto a Tanque K-2704 (FIC27017) para garantizar que el valor API se mantenga en tres 1 y 3.	* Disminuir el flujo de aire principal (FIC2701).																																																					
			umenta_T127144									Adicionarle slurry reciclo a premezcla en condición normal de operación aumenta el contenido de carbon en la carga, que posteriormente se va a quemar en el regenerador aumentando su temperatura. La coquización en el reactor es más factible que ocurre con cargas pesadas, pues es probable que algunos de sus componentes no se vaporicen a las condiciones de operación de la unidad, se queden sin	Es recomendable mantener en modo manual las válvulas FIC27015 (Reciclo de APC a premezcla) y FIC27010 (Reciclo de Slurry a premezcla) con fin de evitar las aperturas automáticas en momentos que no se necesitan dichos reciclos.	* Variar la composición de la mezcla de la carga, disminuyendo en 5% aproximadamente el porcentaje de carga pesada (FIC27023) y aumentando el mismo porcentaje de gasoleno (FIC27005 en el relacionador LV2702, manteniendo el mismo flujo de salida y verificar con planeación la disponibilidad de carga.	* Cerrar completamente la válvula de slurry reciclo a premezcla FIC27010.																																																	
			umenta_Z127100													Este vapor es utilizado para mantener la circulación, y evitar que el catalizador de la reactor caiga al fondo de este recipiente causando daños al equipo. El vapor de elevación entra por la parte inferior del riser; si se inyecta menor	* Una razón para disminuir el vapor de elevación es disminuir la producción de agua ácida en el Drum D2705, garantizando la manutención de la velocidad del riser inyectando gas lift. Cuando disminuya el vapor de elevación	* Inyectar gradualmente gas lift de elevación. * Disminuir gradualmente la temperatura de reacción FIC27157.	* Aumentar el flujo de Vapor de Elevación al Elevador del Reactor de R2701 (Steam Lift) * Si no se puede ajustar vapor por el FIC27129, inyectar vapor por el FIC27130 o por el FIC27131.																																													
			umenta_Z127101																	El soplador de aire C2701 es quien mantiene la presión en el regenerador, una disminución considerable del flujo de descarga puede hacer que la diferencial de presión entre el regenerador y el reactor se invierta a tal punto que causen problemas.	* Al manipular el flujo de descarga del soplador tenga en cuenta el tipo de combustión (parcial o completa) que se está presentando en el regenerador para predecir comportamiento de sus temperaturas y minimizar los disturbios.	* Ajustar la composición de carga tendiendo a hacerla más liviana. * Bajar gradualmente temperatura de reaccion	* Aumentar el flujo del soplador de aire principal (controlador de eficiencia)																																									
			disminuye_FIC27029																					Al disminuir el flujo de nafta al riser se deja de retirar calor al regenerador debido a que se deja de vaporizar este producto consumiendo menos calor.	Si se disminuye el flujo de nafta de viscorreductora es necesario compensarlo con destilado de baja presión por la bomba P2711.		* Alinear destilado de baja presión al riser utilizando la bomba P2711A/B																																					
			disminuye_FIC27008																									Esta manera de cracking con bajo tiempo de residencia, le da menos oportunidad a los compuestos pesados (posiblemente sin vaporizar) de contactar los sitios activos del catalizador. Este material pasa a través de la	* Al disminuir el flujo de vapor de elevación tenga en cuenta mantener la temperatura del fondo de la fraccionadora, tenga en cuenta que la	* Retirar gradualmente gas lift de elevación.	* Ajustar el flujo del FIC27129 en su valor normal de operación.																																	
			disminuye_FIC27029																													Al disminuir el flujo de slurry (pump around) en el fondo de la fraccionadora aumenta el	* Al disminuir los flujos del fondo de la fraccionadora, tenga en cuenta que la		* Aumentar los flujos de slurry a través de los intercambiadores del																													
			disminuye_FIC27010																																	Al disminuir los Quench al fondo de la fraccionadora, causa un aumento en la temperatura del fondo de la fraccionadora.	Al disminuir los flujos FIC27031 y FIC27035 tenga en cuenta mantener la temperatura del fondo de la fraccionadora por debajo		Aumentar los flujos FIC27031 y FIC27035																									
			disminuye_FIC27010																																					La disminución del rendimiento de slurry por debajo del 9% afecta la composición de API del slurry, tomando valores de 0 o negativos, local hace que se aumente o se acelere la formación de coque y tienda	Tenga en cuenta que al aumentar el flujo de ALC, puede afectar la composición API del slurry. Mantenga el valor API entre 1 y 3		* Disminuir el flujo de ALC FIC27017 o FIC27016																					
			disminuye_PD127127																																									La carga no es atomizada correctamente y por lo tanto no se mezcla de forma adecuada con el catalizador caliente, causando que la carga no se vaporice por completo y forme depósitos de coque en las boquillas de carga y también afecte a la producción de gases valiosos.	Si disminuye el flujo de vapor, la carga no es atomizada correctamente y no se mezcla de forma adecuada con el catalizador caliente. Lo anterior causa que la carga no se vaporice por completo produciéndose coque aditivo que posteriormente va ser quemado en el regenerador produciendo que se eleve su temperatura. Mantenga el flujo de vapor a boquillas de atomización de la carga entre 9000 y 12000 LB/H.	* Disminuir el flujo de carga total al riser (FIC271007). * Disminuye el flujo del FIC27020 (Flujo de la Nafta Pesada Producto a D-2850) para mantener el punto final de ebullición de gasolina. * Aumentar el flujo de ALC Producto a Tanque K-2704 (FIC27017) para mantener el rendimiento slurry entre 10% y 11%.	* Aumentar el flujo de vapor a las boquillas de atomización de la carga FIC27132.																	
			disminuye_PD127128																																													* Una baja relación catalizador/acetate genera una disminución en la conversión y la conversión a productos valiosos.	* Tenga en cuenta que la manipulación de la temperatura de precaliente incide en la relación catalizador/acetate, al realizar algún ajuste en esta visible evalúe el impacto en la recuperación de productos valiosos.		* Aumentar gradualmente la temperatura de precaliente.													
			disminuye_PD127129																																																	Si no se adiciona la cantidad necesaria de catalizador fresco, disminuye la actividad del catalizador que está circulando en la unidad, y esto genera una menor conversión.	* Realice la adición de catalizador fresco (frecuencia de adición y cantidad de catalizador) de acuerdo con los resultados	* Medir el nivel de catalizador en la total C27018 para calcular la adición acumulada de la carga. Si la adición acumulada esta por debajo del objetivo del día aumente la	* Aumentar la adición de catalizador fresco teniendo en cuenta la temperatura de la fase densa y la fase diluida del regenerador. * Realizar una adición dosificada de catalizador									
			disminuye_PD127130																																																					La adición de catalizador fresco por presión se realiza cuando la adición por el proporcionalador se encuentra fuera de servicio, esta practica implica riesgo para elevar las temperatura del regenerador.	* Colocar la adición por presión sin violar las ventanas operativas de temperaturas de la fase densa y fase diluida del regenerador.		* Suspender la adición por presión y reanudarla cuando las temperaturas de la fase densa y fase diluida del regenerador se encuentren normalizadas.					
			disminuye_PD127131																																																									Esto causa una mala regeneración del catalizado gastado y lo desactiva por contaminación, causando que no reaccione bien con la carga y por consiguiente disminuya la conversión a productos valiosos.	* Al manipular el flujo de descarga del soplador tenga en cuenta el tipo de combustión (parcial o completa) que se está presentando en el regenerador para predecir comportamiento de sus temperaturas y minimizar los disturbios. El exceso de O2 (A127100) debe estar por encima de 0.5% para garantizar que el regenerador se encuentre en combustión total.		* Tomar la muestra de catalizador regenerado para verificar la apariencia física, evidenciar coque sobre el catalizador (color gris oscuro). * Aumentar el flujo del soplador de aire principal (controlador de eficiencia) hasta aumentar el exceso de O2 a un valor normal de operación entre 1.5% y 2%.	
disminuye_PD127132	Al disminuir el flujo de nafta al riser se deja de retirar calor al regenerador debido a que se deja de vaporizar este producto consumiendo menos calor.	Si se disminuye el flujo de nafta de viscorreductora es necesario compensarlo con destilado de baja presión por la bomba P2711.		* Alinear destilado de baja presión al riser utilizando la bomba P2711A/B																																																												
disminuye_PD127133					Esta manera de cracking con bajo tiempo de residencia, le da menos oportunidad a los compuestos pesados (posiblemente sin vaporizar) de contactar los sitios activos del catalizador. Este material pasa a través de la	* Al disminuir el flujo de vapor de elevación tenga en cuenta mantener la temperatura del fondo de la fraccionadora, tenga en cuenta que la	* Retirar gradualmente gas lift de elevación.	* Ajustar el flujo del FIC27129 en su valor normal de operación.																																																								
disminuye_PD127134									Al disminuir el flujo de slurry (pump around) en el fondo de la fraccionadora aumenta el	* Al disminuir los flujos del fondo de la fraccionadora, tenga en cuenta que la		* Aumentar los flujos de slurry a través de los intercambiadores del																																																				
disminuye_PD127147													Al disminuir los Quench al fondo de la fraccionadora, causa un aumento en la temperatura del fondo de la fraccionadora.	Al disminuir los flujos FIC27031 y FIC27035 tenga en cuenta mantener la temperatura del fondo de la fraccionadora por debajo		Aumentar los flujos FIC27031 y FIC27035																																																
disminuye_PD127148																	La disminución del rendimiento de slurry por debajo del 9% afecta la composición de API del slurry, tomando valores de 0 o negativos, local hace que se aumente o se acelere la formación de coque y tienda	Tenga en cuenta que al aumentar el flujo de ALC, puede afectar la composición API del slurry. Mantenga el valor API entre 1 y 3		* Disminuir el flujo de ALC FIC27017 o FIC27016																																												
disminuye_PD127149																					La carga no es atomizada correctamente y por lo tanto no se mezcla de forma adecuada con el catalizador caliente, causando que la carga no se vaporice por completo y forme depósitos de coque en las boquillas de carga y también afecte a la producción de gases valiosos.	Si disminuye el flujo de vapor, la carga no es atomizada correctamente y no se mezcla de forma adecuada con el catalizador caliente. Lo anterior causa que la carga no se vaporice por completo produciéndose coque aditivo que posteriormente va ser quemado en el regenerador produciendo que se eleve su temperatura. Mantenga el flujo de vapor a boquillas de atomización de la carga entre 9000 y 12000 LB/H.	* Disminuir el flujo de carga total al riser (FIC271007). * Disminuye el flujo del FIC27020 (Flujo de la Nafta Pesada Producto a D-2850) para mantener el punto final de ebullición de gasolina. * Aumentar el flujo de ALC Producto a Tanque K-2704 (FIC27017) para mantener el rendimiento slurry entre 10% y 11%.	* Aumentar el flujo de vapor a las boquillas de atomización de la carga FIC27132.																																								
disminuye_PD127150																									* Una baja relación catalizador/acetate genera una disminución en la conversión y la conversión a productos valiosos.	* Tenga en cuenta que la manipulación de la temperatura de precaliente incide en la relación catalizador/acetate, al realizar algún ajuste en esta visible evalúe el impacto en la recuperación de productos valiosos.		* Aumentar gradualmente la temperatura de precaliente.																																				
disminuye_PD127151																													Si no se adiciona la cantidad necesaria de catalizador fresco, disminuye la actividad del catalizador que está circulando en la unidad, y esto genera una menor conversión.	* Realice la adición de catalizador fresco (frecuencia de adición y cantidad de catalizador) de acuerdo con los resultados	* Medir el nivel de catalizador en la total C27018 para calcular la adición acumulada de la carga. Si la adición acumulada esta por debajo del objetivo del día aumente la	* Aumentar la adición de catalizador fresco teniendo en cuenta la temperatura de la fase densa y la fase diluida del regenerador. * Realizar una adición dosificada de catalizador																																
disminuye_PD127152																																	La adición de catalizador fresco por presión se realiza cuando la adición por el proporcionalador se encuentra fuera de servicio, esta practica implica riesgo para elevar las temperatura del regenerador.	* Colocar la adición por presión sin violar las ventanas operativas de temperaturas de la fase densa y fase diluida del regenerador.		* Suspender la adición por presión y reanudarla cuando las temperaturas de la fase densa y fase diluida del regenerador se encuentren normalizadas.																												
disminuye_PD127153																																					Esto causa una mala regeneración del catalizado gastado y lo desactiva por contaminación, causando que no reaccione bien con la carga y por consiguiente disminuya la conversión a productos valiosos.	* Al manipular el flujo de descarga del soplador tenga en cuenta el tipo de combustión (parcial o completa) que se está presentando en el regenerador para predecir comportamiento de sus temperaturas y minimizar los disturbios. El exceso de O2 (A127100) debe estar por encima de 0.5% para garantizar que el regenerador se encuentre en combustión total.		* Tomar la muestra de catalizador regenerado para verificar la apariencia física, evidenciar coque sobre el catalizador (color gris oscuro). * Aumentar el flujo del soplador de aire principal (controlador de eficiencia) hasta aumentar el exceso de O2 a un valor normal de operación entre 1.5% y 2%.																								
disminuye_PD127154																																									Al disminuir el flujo de nafta al riser se deja de retirar calor al regenerador debido a que se deja de vaporizar este producto consumiendo menos calor.	Si se disminuye el flujo de nafta de viscorreductora es necesario compensarlo con destilado de baja presión por la bomba P2711.		* Alinear destilado de baja presión al riser utilizando la bomba P2711A/B																				
disminuye_PD127155																																													Esta manera de cracking con bajo tiempo de residencia, le da menos oportunidad a los compuestos pesados (posiblemente sin vaporizar) de contactar los sitios activos del catalizador. Este material pasa a través de la	* Al disminuir el flujo de vapor de elevación tenga en cuenta mantener la temperatura del fondo de la fraccionadora, tenga en cuenta que la	* Retirar gradualmente gas lift de elevación.	* Ajustar el flujo del FIC27129 en su valor normal de operación.																
disminuye_PD127156																																																	Al disminuir el flujo de slurry (pump around) en el fondo de la fraccionadora aumenta el	* Al disminuir los flujos del fondo de la fraccionadora, tenga en cuenta que la		* Aumentar los flujos de slurry a través de los intercambiadores del												
disminuye_PD127157																																																					Al disminuir los Quench al fondo de la fraccionadora, causa un aumento en la temperatura del fondo de la fraccionadora.	Al disminuir los flujos FIC27031 y FIC27035 tenga en cuenta mantener la temperatura del fondo de la fraccionadora por debajo		Aumentar los flujos FIC27031 y FIC27035								
disminuye_PD127158																																																									La disminución del rendimiento de slurry por debajo del 9% afecta la composición de API del slurry, tomando valores de 0 o negativos, local hace que se aumente o se acelere la formación de coque y tienda	Tenga en cuenta que al aumentar el flujo de ALC, puede afectar la composición API del slurry. Mantenga el valor API entre 1 y 3		* Disminuir el flujo de ALC FIC27017 o FIC27016				
disminuye_PD127159	La carga no es atomizada correctamente y por lo tanto no se mezcla de forma adecuada con el catalizador caliente, causando que la carga no se vaporice por completo y forme depósitos de coque en las boquillas de carga y también afecte a la producción de gases valiosos.	Si disminuye el flujo de vapor, la carga no es atomizada correctamente y no se mezcla de forma adecuada con el catalizador caliente. Lo anterior causa que la carga no se vaporice por completo produciéndose coque aditivo que posteriormente va ser quemado en el regenerador produciendo que se eleve su temperatura. Mantenga el flujo de vapor a boquillas de atomización de la carga entre 9000 y 12000 LB/H.	* Disminuir el flujo de carga total al riser (FIC271007). * Disminuye el flujo del FIC27020 (Flujo de la Nafta Pesada Producto a D-2850) para mantener el punto final de ebullición de gasolina. * Aumentar el flujo de ALC Producto a Tanque K-2704 (FIC27017) para mantener el rendimiento slurry entre 10% y 11%.	* Aumentar el flujo de vapor a las boquillas de atomización de la carga FIC27132.																																																												
disminuye_PD127160					* Una baja relación catalizador/acetate genera una disminución en la conversión y la conversión a productos valiosos.	* Tenga en cuenta que la manipulación de la temperatura de precaliente incide en la relación catalizador/acetate, al realizar algún ajuste en esta visible evalúe el impacto en la recuperación de productos valiosos.		* Aumentar gradualmente la temperatura de precaliente.																																																								
disminuye_PD127161									Si no se adiciona la cantidad necesaria de catalizador fresco, disminuye la actividad del catalizador que está circulando en la unidad, y esto genera una menor conversión.	* Realice la adición de catalizador fresco (frecuencia de adición y cantidad de catalizador) de acuerdo con los resultados	* Medir el nivel de catalizador en la total C27018 para calcular la adición acumulada de la carga. Si la adición acumulada esta por debajo del objetivo del día aumente la	* Aumentar la adición de catalizador fresco teniendo en cuenta la temperatura de la fase densa y la fase diluida del regenerador. * Realizar una adición dosificada de catalizador																																																				
disminuye_PD127162													La adición de catalizador fresco por presión se realiza cuando la adición por el proporcionalador se encuentra fuera de servicio, esta practica implica riesgo para elevar las temperatura del regenerador.	* Colocar la adición por presión sin violar las ventanas operativas de temperaturas de la fase densa y fase diluida del regenerador.		* Suspender la adición por presión y reanudarla cuando las temperaturas de la fase densa y fase diluida del regenerador se encuentren normalizadas.																																																
disminuye_PD127163																	Esto causa una mala regeneración del catalizado gastado y lo desactiva por contaminación, causando que no reaccione bien con la carga y por consiguiente disminuya la conversión a productos valiosos.	* Al manipular el flujo de descarga del soplador tenga en cuenta el tipo de combustión (parcial o completa) que se está presentando en el regenerador para predecir comportamiento de sus temperaturas y minimizar los disturbios. El exceso de O2 (A127100) debe estar por encima de 0.5% para garantizar que el regenerador se encuentre en combustión total.		* Tomar la muestra de catalizador regenerado para verificar la apariencia física, evidenciar coque sobre el catalizador (color gris oscuro). * Aumentar el flujo del soplador de aire principal (controlador de eficiencia) hasta aumentar el exceso de O2 a un valor normal de operación entre 1.5% y 2%.																																												
disminuye_PD127164																					Al disminuir el flujo de nafta al riser se deja de retirar calor al regenerador debido a que se deja de vaporizar este producto consumiendo menos calor.	Si se disminuye el flujo de nafta de viscorreductora es necesario compensarlo con destilado de baja presión por la bomba P2711.		* Alinear destilado de baja presión al riser utilizando la bomba P2711A/B																																								
disminuye_PD127165																									Esta manera de cracking con bajo tiempo de residencia, le da menos oportunidad a los compuestos pesados (posiblemente sin vaporizar) de contactar los sitios activos del catalizador. Este material pasa a través de la	* Al disminuir el flujo de vapor de elevación tenga en cuenta mantener la temperatura del fondo de la fraccionadora, tenga en cuenta que la	* Retirar gradualmente gas lift de elevación.	* Ajustar el flujo del FIC27129 en su valor normal de operación.																																				
disminuye_PD127166																													Al disminuir el flujo de slurry (pump around) en el fondo de la fraccionadora aumenta el	* Al disminuir los flujos del fondo de la fraccionadora, tenga en cuenta que la		* Aumentar los flujos de slurry a través de los intercambiadores del																																
disminuye_PD127167																																	Al disminuir los Quench al fondo de la fraccionadora, causa un aumento en la temperatura del fondo de la fraccionadora.	Al disminuir los flujos FIC27031 y FIC27035 tenga en cuenta mantener la temperatura del fondo de la fraccionadora por debajo		Aumentar los flujos FIC27031 y FIC27035																												
disminuye_PD127168																																					La disminución del rendimiento de slurry por debajo del 9% afecta la composición de API del slurry, tomando valores de 0 o negativos, local hace que se aumente o se acelere la formación de coque y tienda	Tenga en cuenta que al aumentar el flujo de ALC, puede afectar la composición API del slurry. Mantenga el valor API entre 1 y 3		* Disminuir el flujo de ALC FIC27017 o FIC27016																								
disminuye_PD127169																																									La carga no es atomizada correctamente y por lo tanto no se mezcla de forma adecuada con el catalizador caliente, causando que la carga no se vaporice por completo y forme depósitos de coque en las boquillas de carga y también afecte a la producción de gases valiosos.	Si disminuye el flujo de vapor, la carga no es atomizada correctamente y no se mezcla de forma adecuada con el catalizador caliente. Lo anterior causa que la carga no se vaporice por completo produciéndose coque aditivo que posteriormente va ser quemado en el regenerador produciendo que se eleve su temperatura. Mantenga el flujo de vapor a boquillas de atomización de la carga entre 9000 y 12000 LB/H.	* Disminuir el flujo de carga total al riser (FIC271007). * Disminuye el flujo del FIC27020 (Flujo de la Nafta Pesada Producto a D-2850) para mantener el punto final de ebullición de gasolina. * Aumentar el flujo de ALC Producto a Tanque K-2704 (FIC27017) para mantener el rendimiento slurry entre 10% y 11%.	* Aumentar el flujo de vapor a las boquillas de atomización de la carga FIC27132.																				
disminuye_PD127170																																													* Una baja relación catalizador/acetate genera una disminución en la conversión y la conversión a productos valiosos.	* Tenga en cuenta que la manipulación de la temperatura de precaliente incide en la relación catalizador/acetate, al realizar algún ajuste en esta visible evalúe el impacto en la recuperación de productos valiosos.		* Aumentar gradualmente la temperatura de precaliente.																
disminuye_PD127171																																																	Si no se adiciona la cantidad necesaria de catalizador fresco, disminuye la actividad del catalizador que está circulando en la unidad, y esto genera una menor conversión.	* Realice la adición de catalizador fresco (frecuencia de adición y cantidad de catalizador) de acuerdo con los resultados	* Medir el nivel de catalizador en la total C27018 para calcular la adición acumulada de la carga. Si la adición acumulada esta por debajo del objetivo del día aumente la	* Aumentar la adición de catalizador fresco teniendo en cuenta la temperatura de la fase densa y la fase diluida del regenerador. * Realizar una adición dosificada de catalizador												
disminuye_PD127172																																																					La adición de catalizador fresco por presión se realiza cuando la adición por el proporcionalador se encuentra fuera de servicio, esta practica implica riesgo para elevar las temperatura del regenerador.	* Colocar la adición por presión sin violar las ventanas operativas de temperaturas de la fase densa y fase diluida del regenerador.		* Suspender la adición por presión y reanudarla cuando las temperaturas de la fase densa y fase diluida del regenerador se encuentren normalizadas.								
disminuye_PD127173																																																									Esto causa una mala regeneración del catalizado gastado y lo desactiva por contaminación, causando que no reaccione bien con la carga y por consiguiente disminuya la conversión a productos valiosos.	* Al manipular el flujo de descarga del soplador tenga en cuenta el tipo de combustión (parcial o completa) que se está presentando en el regenerador para predecir comportamiento de sus temperaturas y minimizar los disturbios. El exceso de O2 (A127100) debe estar por encima de 0.5% para garantizar que el regenerador se encuentre en combustión total.		* Tomar la muestra de catalizador regenerado para verificar la apariencia física, evidenciar coque sobre el catalizador (color gris oscuro). * Aumentar el flujo del soplador de aire principal (controlador de eficiencia) hasta aumentar el exceso de O2 a un valor normal de operación entre 1.5% y 2%.				
disminuye_PD127174	Al disminuir el flujo de nafta al riser se deja de retirar calor al regenerador debido a que se deja de vaporizar este producto consumiendo menos calor.	Si se disminuye el flujo de nafta de viscorreductora es necesario compensarlo con destilado de baja presión por la bomba P2711.		* Alinear destilado de baja presión al riser utilizando la bomba P2711A/B																																																												
disminuye_PD127175					Esta manera de cracking con bajo tiempo de residencia, le da menos oportunidad a los compuestos pesados (posiblemente sin vaporizar) de contactar los sitios activos del catalizador. Este material pasa a través de la	* Al disminuir el flujo de vapor de elevación tenga en cuenta mantener la temperatura del fondo de la fraccionadora, tenga en cuenta que la	* Retirar gradualmente gas lift de elevación.	* Ajustar el flujo del FIC27129 en su valor normal de operación.																																																								
disminuye_PD127176									Al disminuir el flujo de slurry (pump around) en el fondo de la fraccionadora aumenta el	* Al disminuir los flujos del fondo de la fraccionadora, tenga en cuenta que la		* Aumentar los flujos de slurry a través de los intercambiadores del																																																				
disminuye_PD127177													Al disminuir los Quench al fondo de la fraccionadora, causa un aumento en la temperatura del fondo de la fraccionadora.	Al disminuir los flujos FIC27031 y FIC27035 tenga en cuenta mantener la temperatura del fondo de la fraccionadora por debajo		Aumentar los flujos FIC27031 y FIC27035																																																
disminuye_PD127178																	La disminución del rendimiento de slurry por debajo del 9% afecta la composición de API del slurry, tomando valores de 0 o negativos, local hace que se aumente o se acelere la formación de coque y tienda	Tenga en cuenta que al aumentar el flujo de ALC, puede afectar la composición API del slurry. Mantenga el valor API entre 1 y 3		* Disminuir el flujo de ALC FIC27017 o FIC27016																																												
disminuye_PD127179																					La carga no es atomizada correctamente y por lo tanto no se mezcla de forma adecuada con el catalizador caliente, causando que la carga no se vaporice por completo y forme depósitos de coque en las boquillas de carga y también afecte a la producción de gases valiosos.	Si disminuye el flujo de vapor, la carga no es atomizada correctamente y no se mezcla de forma adecuada con el catalizador caliente. Lo anterior causa que la carga no se vaporice por completo produciéndose coque aditivo que posteriormente va ser quemado en el regenerador produciendo que se eleve su temperatura. Mantenga el flujo de vapor a boquillas de atomización de la carga entre 9000 y 12000 LB/H.	* Disminuir el flujo de carga total al riser (FIC271007). * Disminuye el flujo del FIC27020 (Flujo de la Nafta Pesada Producto a D-2850) para mantener el punto final de ebullición de gasolina. * Aumentar el flujo de ALC Producto a Tanque K-2704 (FIC27017) para mantener el rendimiento slurry entre 10% y 11%.	* Aumentar el flujo de vapor a las boquillas de atomización de la carga FIC27132.																																								
disminuye_PD127180																									* Una baja relación catalizador/acetate genera una disminución en la conversión y la conversión a productos valiosos.	* Tenga en cuenta que la manipulación de la temperatura de precaliente incide en la relación catalizador/acetate, al realizar algún ajuste en esta visible evalúe el impacto en la recuperación de productos valiosos.		* Aumentar gradualmente la temperatura de precaliente.																																				
disminuye_PD127181																													Si no se adiciona la cantidad necesaria de catalizador fresco, disminuye la actividad del catalizador que está circulando en la unidad, y esto genera una menor conversión.	* Realice la adición de catalizador fresco (frecuencia de adición y cantidad de catalizador) de acuerdo con los resultados	* Medir el nivel de catalizador en la total C27018 para calcular la adición acumulada de la carga. Si la adición acumulada esta por debajo del objetivo del día aumente la	* Aumentar la adición de catalizador fresco teniendo en cuenta la temperatura de la fase densa y la fase diluida del regenerador. * Realizar una adición dosificada de catalizador																																
disminuye_PD127182																																	La adición de catalizador fresco por presión se realiza cuando la adición por el proporcionalador se encuentra fuera de servicio, esta practica implica riesgo para elevar las temperatura del regenerador.	* Colocar la adición por presión sin																														







