

**ESTUDIO Y REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS TÉCNICAS DE
MEDICIÓN DE REDUCCIÓN DEL RIESGO POR EL USO DE TECNOLOGÍAS
DE DETECCIÓN Y DIAGNOSTICO DE FALLOS APLICADO EN PROCESOS DE
REFINACIÓN DE PETRÓLEO-ECOPETROL S.A.**

LEONARDO FABIO SIERRA SANTOS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2015

**ESTUDIO Y REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS TÉCNICAS DE
MEDICIÓN DE REDUCCIÓN DEL RIESGO POR EL USO DE TECNOLOGÍAS
DE DETECCIÓN Y DIAGNOSTICO DE FALLOS APLICADO EN PROCESOS DE
REFINACIÓN DE PETRÓLEO - ECOPETROL S.A.**

LEONARDO FABIO SIERRA SANTOS

**Trabajo de Grado para optar al Título de
Especialista en Gerencia de Hidrocarburos**

Director

**CARLOS FERNANDO AGUDELO GÓMEZ
Ingeniero de Diseño & Automatización Electrónica
Master en Automatización e Informática Industrial**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

MARIANA ELIZABETH❤️

Este es un paso muy importante en mi vida, la conclusión de un proceso y una etapa más en mi formación personal y profesional. De esta manera, quiero dedicar con mucho cariño y afecto este trabajo a:

- *A **DIOS**, que me bendice, protege de todo mal y me permite compartir estos momentos tan valiosos con las personas que amo.*
- *A Mis amados Padres, **Luis Antonio Sierra Sierra y Marina Santos Otero** que con su apoyo incondicional, educación, tiempo, esfuerzo, paciencia, cariño y amor hicieron posible la obtención de este gran logro, siendo ellos los gestores y la base de toda mi formación.*
- *A mi amor **Laura Morales Mendoza**, gracias a ti por todo tu tiempo, consejos, comprensión, paciencia, amor y sobre por regalarme lo más hermoso que pudo llegar a mi vida: **MARIANA ELIZABETH**, la niña de mis ojos, la razón de mi vida, el amor verdadero.*
- *A Mi hermano, **Cristian Antonio**, que con su compañía, amistad, consejos, apoyo y cariño ha sido muy valioso en todo momento de mi vida.*
- *A Mi familia entera, de la cual he recibido mucho amor, cariño y comprensión.*

AGRADECIMIENTOS

- *A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería de Petróleos, por su competencia, profesionalismo, trayectoria, colaboración y compromiso hacia la formación de especialistas en Gerencia en Hidrocarburos.*
- *Al Ing. **Carlos Fernando Agudelo Gómez** – líder del grupo de Automatización y Control del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), por todo el tiempo, aportes, enseñanzas, confianza, amistad, dedicación y recomendaciones durante la dirección de la monografía.*
- *A todo el grupo de Automatización y Control del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) en Piedecuesta, quienes con su experiencia, aportes significativos, amistad, conocimiento, recomendaciones y apoyo aportaron en la realización del presente trabajo.*
- *A la oficina de Posgrados de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander; Sindy, Sylvia, Mónica, María Isabel por todo el tiempo, paciencia, alegría y colaboración recibida.*
- *Por último, a todos los profesores de la escuela de Ingeniería de Petróleos – UIS, compañeros y amigos por todo este periodo de aprendizaje, Lorena, Pedro, Alejo, Max, Álvaro, Diego, Emiro, Juan Carlos, Joseph y demás que de una u otra manera estuvieron presentes en este tiempo de formación y contribuyeron a la conquista de esta gran meta.*

CONTENIDO

	Pág
<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>17</u>
<u>1. FUNDAMENTOS DEL PROYECTO.</u>	<u>19</u>
1.1 Contexto General.	19
1.2 Planteamiento Del Problema.	20
1.3 Objetivos.	22
1.3.1 Objetivo General.	22
1.3.2 Objetivos Específicos.	23
1.4 Justificación.	23
1.5 Mejora De La Confiabilidad.	25
1.6 Concepto E Importancia De La Seguridad.	26
1.7 Fases De La Evaluación De Riesgos.	28
1.8 Metodología.	30
<u>2. MARCO TEÓRICO.</u>	<u>32</u>
2.1 Peligro.	32
2.2 Riesgo.	32
2.3 Plantas.	33
2.4 Procesos.	33
2.5 Sistemas.	34
2.6 Perturbaciones.	34
2.7 Control Realimentado.	34
2.8 Señal.	34
2.9 Incidente.	34

2.10 Descripción General Del Proceso De Craqueo Catalítico Fluidizado - Fcc.	35
2.10.1 Descripción Y Tipos Del Proceso.	44
2.10.2 Química Del Proceso.	46
2.10.3 Catalizadores.	47
2.10.4 Materias Primas, Productos Y Variables Principales.	47

3. REVISIÓN DE TÉCNICAS Y METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN DE REDUCCIÓN DEL RIESGO POR EL USO DE TECNOLOGÍAS DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLOS.

3.1 Análisis De Riesgos.	50
3.2 Aspectos A Tratar En Los Análisis De Riesgos.	51
3.3 Metodologías Más Usadas En Confiabilidad Industrial.	53
3.3.1 Análisis De Criticidad.	53
3.3.2 Rca. Análisis De Causa Raíz (Del Inglés Root Cause Analysis).	53
3.3.3 Hazop – Hazard And Operability Analysis. (Análisis De Peligros Y Operabilidad).	54
3.3.4 Rcm - Reliability Centred Maintenance (Mantenimiento Centrado En Confiabilidad).	58
3.3.5 Listas De Comprobación: Safety Check Lists.	61
3.3.6 Manuales Técnicos, Códigos Y Normas De Diseño.	62
3.3.7 Análisis Preliminar De Riesgos (Apr): Preliminary Hazard Analysis (Pha).	63
3.3.8 Análisis "¿What If...?": ¿Qué Pasaría Si...?.	64
3.3.9 Análisis Por Árboles De Sucesos (Aas). Event Tree Analysis (Eta).	66
3.3.10 Análisis De Modos De Fallo Y Efectos (Amfe): Failure Modes And Effects Analysis (Fmea).	68
3.4 Metodologías De Detección Y Diagnóstico De Fallos.	70
3.4.1 Métodos De Diagnóstico Basados En Modelos Cuantitativos.	74
3.4.1.1 Observadores.	76
3.4.1.2 Relaciones De Paridad.	78

3.4.1.3 Filtros De Kalman.	80
3.4.1.4 Técnicas De Monitoreo De Condición.	81
3.4.2 Métodos De Diagnóstico Basados En Modelos Cualitativos.	84
3.4.2.1 Modelos Causales Basados En Grafos.	85
3.4.2.2 Análisis Por Árboles De Fallos (Aaf). Fault Tree Analysis, Fta.	86
3.4.3 Métodos Basados En La Historia Del Proceso.	90
3.4.3.1 Métodos Cualitativos Basados En La Historia Del Proceso.	90
3.4.3.1.1 Sistema Experto.	90
3.4.3.1.2 Inteligencia Artificial.	91
3.4.3.1.3 Conocimiento Experto.	92
3.4.3.1.4 Análisis De Tendencias Cualitativas (Qta).	93
3.4.3.2 Métodos Cuantitativos Basados En La Historia Del Proceso.	94
3.4.3.2.1 Método De Detección Y Diagnóstico De Fallos Basado En El Modelo Escalón Unitario.	95
<u>4. METODOLOGIA PROPUESTA PARA EL DESARROLLO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO BASADA EN EL ANÁLISIS DE FALLOS EN UNA UNIDAD CRACKING CATALÍTICO FLUIDIZADO – FCC</u>	<u>99</u>
4.1 Procedimiento De La Metodología.	99
4.1.1 Recopilación Y Compilación De Información.	99
4.1.2 Cálculo Del Riesgo Para La Unidad De Cracking Catalítico - Fcc.	100
4.1.3 Metodología De Cálculo Y Análisis De Criticidad.	102
4.1.4 Análisis De Confiabilidad.	113
<u>5. CONCLUSIONES.</u>	<u>123</u>
<u>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.</u>	<u>126</u>

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Procedimiento para la Evaluación de Riesgos.	29
Figura 2. Esquema del proceso de craqueo catalítico modelo UOP	37
Figura 3. Diagrama de bloques proceso de Craqueo Catalítico.	45
Figura 4. Diagrama descripción del proceso de Craqueo Catalítico.	45
Figura 5. Diagrama descripción del proceso de Craqueo Catalítico.	46
Figura 6. Materias Primas y Productos del proceso de Craqueo Catalítico.	47
Figura 7. FCC – Diagrama Simplificado	48
Figura 8. Variables principales del proceso FCC.	48
Figura 9. Craqueo Catalítico - FCC.	49
Figura 10. Aspectos a tratar en los Análisis de Riesgos.	52
Figura 11. Metodología de aplicación de un RCA.	54
Figura 12. Diagrama de Flujo de la Técnica Hazop.	56
Figura 13. Metodología Análisis por Árboles de Sucesos - AAS.	66
Figura 14. Árbol de Sucesos para fuga de GLP en zona próxima a depósitos de almacenamiento.	67
Figura 15. Clasificación de los métodos de detección y diagnóstico de fallos	71
Figura 16. Clasificación de Técnicas de Detección y Diagnóstico de Fallos.	73
Figura 17. Modelo de un Observador.	78
Figura 18. Esquema Relaciones de Paridad.	80
Figura 19. Ejemplo de Árbol de Fallos.	87
Figura 20. Simbología construcción Árbol de Fallos. Fuente: GUIAR, Universidad de Zaragoza - España.	88
Figura 21. Esquema de SDDF de un método basado en Inteligencia Artificial.	91
Figura 22. Modelo de Sistema Experto.	93
Figura 23. Modelo tipo Escalón Unitario.	95

Figura 24. Esquema de implementación de un SDDF tipo Escalón Unitario.	97
Figura 25. Riesgo estimado de la unidad cracking UOP1.	101
Figura 26. Cálculo de la Criticidad.	105
Figura 27. Esquema de evaluación de riesgo.	106
Figura 28. Matriz de Criticidad de Equipos.	112
Figura 29. Distribución de equipos por Especialidad.	115
Figura 30. Distribución de los equipos por Criticidad.	116
Figura 31. Esquema de Mantenimiento en la planta UOP1.	117
Figura 32. Estrategia de mantenimiento y costos.	118

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Variables Principales Del Proceso Fcc.	49
Tabla 2. Evolución Análisis Rcm.	61
Tabla 3. Apr Para Almacenamiento De Sulfuro De Hidrógeno Para Utilización En Proceso.	64
Tabla 4. Ejemplo Análisis "¿What If...?": ¿Qué Pasaría Si...?.	65
Tabla 5. Ejemplo De Formulario De Trabajo Para El Análisis Fmeca Aplicado A Un Sistema De Descarga De Cisternas Para Tanques.	70
Tabla 6. Criterios De Decisión Consecuencia - Ssa.	106
Tabla 7. Criterios De Decisión Consecuencia - Is.	107
Tabla 8. Criterios De Decisión Consecuencia - Cp.	108
Tabla 9. Criterios De Decisión Frecuencia De Falla – Confiabilidad Del Equipo.	109
Tabla 10. Criterios De Decisión Frecuencia De Falla - Diseño.	109
Tabla 11. Criterios De Decisión Frecuencia De Falla - Montaje.	110
Tabla 12. Criterios De Decisión Frecuencia De Falla – Condición Operación.	111
Tabla 13. Criterios De Decisión Frecuencia De Falla – Estrategia De Mantenimiento.	111
Tabla 14. Cantidad De Equipos Por Especialidad.	114
Tabla 15. Clasificación De Equipos Por Especialidad Según Criticidad.	120

GLOSARIO

AAF	Análisis por Árboles de Fallos.
AAS	Análisis por Árboles de Sucesos.
ACR	Análisis cuantitativos de riesgo.
ALC	Aceite liviano de Ciclo.
AMFE	Análisis de Modos de Fallo y Efectos.
APR	Análisis Preliminar de Riesgos.
ARL	Aceites de Reciclo Liviano.
Causa	Combinación de síntomas que identifican un problema causante de la desviación operación de un sistema estable.
DCS	Sistema de Control Distribuido.
DVGO	Gasóleos de vacío desulfurado.
EMPRESA	Se refiere a la Empresa Colombiana de Petróleos ECOPETROL.
Empresa	Empresa Colombiana de Petróleos ECOPETROL.
ETA	Event Tree Analysis.
Evento anormal o fallo	Desviación en el comportamiento dinámico de una variable.
FCC	Cracking Catalítico Fluidizado - Fluid Catalytic Cracking.
FDI	Detección y Localización de Fallas.
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis.
FMECA (AMFEC)	Análisis del Modo de Fallos, Efectos y Criticidad.
FTA	Fault Tree Analysis.
GAO	Gasóleo.

GLP	Gas Licuado del Petróleo.
GRB	Gerencia Refinería de Barrancabermeja.
HAZOP	Análisis de Peligros y Operabilidad.
HCGO	Heavy Coker Gas Oil.
HMI	Interfaz Humano Máquina.
ICI	Imperial Chemical Industries.
ISO	International Organization for Standardization.
LCGO	Light Catalytic Gas Oil.
MPC	Control Multivariable Predictivo.
PHA	Preliminary Hazard Analysis.
PI&D	Diagrama de Proceso e Instrumentación.
QTA	Análisis de Tendencias Cualitativas.
RAM	Matriz de Evaluación de Riesgos (Risk Assessment Matriz).
RBI	Inspección Basada en el Riesgo.
RCA	Análisis Causa Raíz (Root Cause Analysis).
RCS	Análisis de Repuestos Centrados en la Fiabilidad.
RIS	Refinery Information System - Sistema de Información de la Refinería.
SAH	Seguridad, Ambiente e Higiene.
SDDF	Sistema de Detección y Diagnóstico de Fallos.
SDG	Sistema de Detección por Grafos.
Slurry	Normalmente se conoce como Lechada o mezcla de cemento.
S-RCM	Shell – Reliability Centred Maintenance.
UOP1	Planta de operaciones de craqueo catalítico de la Refinería de Barrancabermeja – Ecopetrol S.A.

RESUMEN

TÍTULO.

ESTUDIO Y REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE REDUCCIÓN DEL RIESGO POR EL USO DE TECNOLOGÍAS DE DETECCIÓN Y DIAGNOSTICO DE FALLOS APLICADO EN PROCESOS DE REFINACIÓN DE PETRÓLEO - ECOPETROL S.A. *

AUTOR.

LEONARDO FABIO SIERRA SANTOS. **

PALABRAS CLAVES.

Detección de Fallos, Cracking Catalítico Fluidizado, Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Evaluación de Riesgos.

DESCRIPCIÓN.

La mejora del desempeño y seguridad de los procesos industriales exige cada vez un mayor grado de automatización y paralelamente demanda disponer de un sistema de detección y diagnóstico oportuno de fallas como una herramienta para el incremento de la confiabilidad operacional del proceso. Un ejemplo de esto puede ser encontrado en la industria del petróleo, la cual es una de las más productivas en el mundo. Actualmente el área de petroquímica reporta grandes pérdidas debidas a fallas en sus componentes.

En ingeniería, el análisis de riesgos para la toma de decisiones efectivas debe optimizar la relación entre las necesidades (propósito del artefacto), los costos (inversiones y los beneficios) y la seguridad.

Seleccionar y proponer una metodología para el desarrollo de un plan de mantenimiento basada en el análisis de fallos en una unidad cracking catalítico fluidizado de la Refinería de Barrancabermeja de Ecopetrol S.A., teniendo en cuenta un estudio del estado del arte de algunas herramientas técnicas de Sistemas de Detección y Diagnostico de Fallos, así como algunas metodologías a ser aplicadas en ingeniería de la confiabilidad industrial, análisis de criticidad y cálculo del riesgo para optimizar recursos humanos, económicos, físicos y tecnológicos al momento de establecer o implementar sistemas de detección y diagnóstico de fallos obteniendo una mayor efectividad a la hora de emplear estos sistemas para la planificación de mantenimiento basado en condiciones y la toma de decisiones.

Con base en la información proporcionada pueden ser definidos los modos de fallo y escenarios de fallo para el análisis de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), aplicado en procesos de refinación de petróleo, para este caso se realizó en la unidad de Cracking Catalítico Fluidizado UOP1 de la Refinería de Barrancabermeja – Ecopetrol S.A.

* Trabajo de Grado.

** Facultad Ingeniería Físico Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Especialización en Gerencia de Hidrocarburos. Director: Carlos Fernando Agudelo Gómez.

ABSTRACT

TITLE.

STUDY AND REVIEW OF THE STATE OF THE ART OF MEASUREMENT TECHNIQUES TO REDUCE THE RISK FOR THE USE OF DETECTION TECHNOLOGIES AND APPLIED IN FAULT DIAGNOSIS OF PETROLEUM REFINING PROCESSES – ECOPETROL S.A. *

AUTHOR.

LEONARDO FABIO SIERRA SANTOS. **

KEYWORDS.

Fault detection, Fluid Catalytic Cracking, Reliability Centred Maintenance, Risk Assessment.

DESCRIPTION.

Improving the performance and safety of industrial processes requires an increasing degree of automation and parallel demand for a system of detection and early diagnosis of faults as a tool for increasing operational reliability of the process. An example of this can be found in the oil industry, which is one of the most productive in the world. Currently the petrochemical area brings great losses due to faulty components.

In engineering, risk analysis for effective decision making should optimize the relationship between needs (purpose of the artifact), costs (investments and profits) and security.

Select and propose a methodology for developing a maintenance plan based on analysis of failures in a fluidized catalytic cracking of Ecopetrol Barrancabermeja refinery unit, considering a study of the state of the art technical tools detection systems and diagnosis of faults as well as some methodologies to be used in industrial engineering reliability, criticality analysis and risk calculation to optimize human, financial, physical and technological resources when establishing or implementing systems fault detection and diagnosis of obtaining more effective when using these systems for maintenance planning based on conditions and decision-making.

Based on the information provided can be defined failure modes and failure scenarios for analysis of Reliability Centered Maintenance (RCM), applied in processes of petroleum refining, is looking for this case was held in the Fluid Catalytic Cracking unit UOP1 Barrancabermeja Refinery - Ecopetrol S.A.

* Monograph.

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Specialization in Hydrocarbon. Management: Carlos Fernando Agudelo Gómez.

INTRODUCCIÓN

Actualmente a nivel industrial los procesos son cada vez más complejos, debido al número de variables que se utilizan y la interrelación entre estas. Esto es un problema a la hora de diseñar y ejecutar mejoras ya que poseer una descripción completa y detallada de cada parte del proceso implicaría tener un modelo matemático detallado. El área de automatización desarrolla actividades de investigación y de extensión, en el campo de sistemas dinámicos, modelamiento matemático y sus aplicaciones al control automático, teoría de señales, identificación, e Instrumentación. En el área de Investigación y desarrollo, ofrece asesoría y soporte en el desarrollo e implementación de nuevas técnicas en el área de instrumentación, identificación, tratamiento de señales, ajuste y diseño de controladores.

La automatización en los procesos Industriales, juega un importante rol en el aumento de la productividad de las operaciones de refinación, mejora la calidad y seguridad, se basa en la capacidad para controlar la información necesaria en proceso productivo, mediante la implementación de mecanismos de medición y evaluación de las normas de producción.

El desarrollo de un sistema de detección y diagnóstico de fallos operacionales o incipientes proporciona beneficios orientados principalmente a corregir desviaciones del proceso productivo, reducir pérdidas de productividad, evitar acontecimientos anormales, disminuir los días de paradas no programadas y principalmente prevenir posibles situaciones que pongan en riesgo o peligro a las personas o el medio ambiente.

Las fallas pueden ser detectadas utilizando distintos métodos y técnicas de detección y diagnóstico, y pueden ser aplicadas dependiendo de las características dinámicas del sistema y del número de señales disponibles por variable.

Actualmente, existen muchos métodos de detección de fallas aplicados a procesos basados en técnicas estadísticas y en reglas basadas en el conocimiento experto.

En la industria se ha documentado el impacto económico debido al manejo inapropiado de situaciones anómalas haciendo énfasis en la necesidad de automatizar las tareas requeridas para la detección temprana y el diagnóstico de fallos utilizando toda la información disponible en tiempo real.

Existen muchas técnicas de detección temprana y diagnóstico de fallos, algunas de estas técnicas incluyen el uso de sistemas expertos con bases de conocimiento que contienen las relaciones causales entre los síntomas observados en los procesos reales y las fallas que los causaron.

Con el desarrollo de este trabajo se busca realizar un estudio y revisión del estado del arte de las técnicas de medición de reducción del riesgo por el uso de tecnologías de detección y diagnóstico de fallos aplicado en procesos de refinación de petróleo, para este caso se realizará en la unidad de Cracking Catalítico Fluidizado UOP1 de la Refinería de Barrancabermeja – Ecopetrol S.A., seleccionar una metodología óptima para la detección y diagnóstico de fallos en una unidad de Cracking Catalítico Fluidizado para optimizar recursos humanos, económicos, físicos y tecnológicos al momento de establecer o implementar sistemas de detección y diagnóstico de fallos obteniendo una mayor efectividad a la hora de emplear estos sistemas.

Por último, se desarrollará una metodología para la implementación de un Sistema de Detección y Diagnóstico de Fallos – SDDF en una unidad FCC, es decir, la unidad de Cracking Catalítico Fluidizado UOP1 de la Refinería de Barrancabermeja – Ecopetrol S.A. teniendo en cuenta un estudio del estado del arte de herramientas

técnicas de Sistemas de Detección y Diagnóstico de Fallos (SDDF), así como metodologías a ser aplicadas en ingeniería de la confiabilidad industrial.

1. FUNDAMENTOS DEL PROYECTO.

1.1 CONTEXTO GENERAL.

El riesgo es un concepto a través del cual se evalúan las posibles consecuencias de un evento futuro indeseado. El objetivo de un análisis de riesgos es suministrar evidencia al proceso de toma de decisiones. El análisis de riesgos no está circunscrito a problemas físicos únicamente, ni tampoco requiere de la utilización de modelos matemáticos. El espectro de los análisis de riesgos es muy amplio e involucra disciplinas muy diversas que incluyen ciencias sociales, medicina, medio ambiente e ingeniería, entre otras.

En ingeniería, el análisis de riesgos para la toma de decisiones efectivas debe optimizar la relación entre las necesidades (propósito del artefacto), los costos (inversiones y los beneficios) y la seguridad.¹

La primera etapa a desarrollar en el diagnóstico de fallos en los sistemas industriales, es la adquisición de la información, esto puede resultar complejo ya sea el caso de información analítica o heurística. En el caso de la información analítica o cuantitativa los instrumentos de medición suelen proveer información que dependiendo de la calidad de los sensores introducen mayor o menor grado de incertidumbre en las medidas.

¹ Sánchez Silva M. Introducción a la Confiabilidad y Evaluación de Riesgos: Teoría y aplicaciones en Ingeniería. Universidad de Los Andes. Bogotá D.C. 2010.

En el caso de la información cualitativa o heurística la incertidumbre es todavía mayor, pues depende del punto de vista del ser humano, cuyos criterios pueden ser subjetivos y varían de un operador a otro.

Tras la adquisición de la información la siguiente etapa, es la inferencia o razonamiento de diagnóstico.

En esto, se han desarrollado muchos tipos de técnicas en el razonamiento de diagnóstico las del tipo analítico, que se basan en los modelos matemáticos de los procesos industriales y las del tipo de conocimiento superficial, que se basan en las relaciones causa-efecto de dichos sistemas.

La detección temprana y el diagnóstico de fallos permiten asistir al personal de operaciones en una planta industrial para tomar las mejores acciones durante el estado real del proceso, evitando que los fallos incipientes escalen a situaciones críticas donde existe el riesgo de pérdida de vidas humanas, daños al medio ambiente y pérdidas económicas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la industria de refinación del petróleo, se han documentado problemas operacionales principalmente en las unidades de cracking catalítico debido a fallas en equipos, restricciones de flujo, señales falsas, entre otras, que conllevan a paradas de planta no programadas.

En la literatura se encuentra que los problemas típicos que presenta la unidad de cracking catalítico son atribuidos generalmente a condiciones operacionales como alta temperatura del regenerador, circulación limitada, flujo inverso, depósitos de coque, baja calidad y rendimientos, pérdidas de catalizador y Post-combustión.

Con base en datos históricos se han registrado muchas fallas en las unidades de cracking catalítico que terminan en parada de planta no programadas, lo anterior afecta en gran medida la confiabilidad del proceso, consecuencia de lo anterior, se observa incremento de costos de mantenimiento de activos y aumento en las probabilidades de riesgos operacionales que afecta directamente las personas, los equipos y el medio ambiente.

La mejora del desempeño y seguridad de los procesos industriales exige cada vez un mayor grado de automatización y paralelamente demanda disponer de un sistema de detección y diagnóstico oportuno de fallas como una herramienta para el incremento de la confiabilidad operacional del proceso. Un ejemplo de esto puede ser encontrado en la industria del petróleo, la cual es una de las más productivas en el mundo. Actualmente el área de petroquímica reporta grandes pérdidas debidas a fallas en sus componentes.

Debido a lo anterior se seleccionó el proceso petroquímico de craqueo catalítico, esta unidad procesa diariamente grandes cantidades de materia prima lo que permite inclusive con pequeños incrementos en la eficiencia obtener importantes beneficios económicos.

La Unidad de Cracking Catalítico Fluidizado - FCC debido a que constituye uno de los procesos más importantes en el área de refinación, el propósito es de disponer de un sistema de detección y diagnóstico que permita oportunamente tomar acciones en el proceso; en un sistema complejo como lo es una Unidad Cracking Catalítico Fluidizado es inevitable la aparición de fallos en un determinado momento de su funcionamiento ya que por múltiples razones no siempre un operador puede detectarlos oportunamente.

Fallos tales como malas mediciones de parámetros y resultados errados que no se adecuan a la realidad del avance y desempeño del proceso, altos porcentajes de

error y pérdidas económicas en los procesamientos de datos y cálculos operativos por malos datos obtenidos con los equipos de instrumentación, pérdida de credibilidad ante el cliente, porcentajes de errores altos en los resultados del proceso crean porcentajes de errores altos o errores de índole humano que en resumen, pueden causar grandes pérdidas económicas a una empresa.

El propósito es desarrollar un estudio y revisión del estado del arte de las diferentes técnicas de medición de reducción del riesgo por el uso de tecnologías de detección y diagnóstico de fallos, analizar, evaluar e integrar la información de fallos en los instrumentos de control y la información operacional de los mismos (sintonía, variabilidad de los lazos de control, estado manual/automático de los PID, etc.), donde se tomará como piloto para esta propuesta a la UOP1 (Unidad de Cracking Catalítico Fluidizado) de la Refinería de Barrancabermeja.

Propuesta de mitigación del riesgo operacional en la planta, utilizando técnicas avanzadas de detección y diagnóstico de fallos operacionales, medición de la mitigación del riesgo operacional enfocados en el tema de Gestión de Activos (Asset Management), detección temprana y el diagnóstico de fallos en procesos industriales, con el propósito de hacer recomendaciones al personal de operaciones en un proceso industrial y evitar eventos de seguridad de proceso.

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 OBJETIVO GENERAL.

Realizar estudio y revisión del estado del arte de las técnicas de medición de reducción del riesgo por el uso de tecnologías de detección y diagnóstico de fallos aplicado en procesos de refinación de petróleo, en la Unidad de Cracking Catalítico Fluidizado (FCC) UOP1 de la Refinería de Barrancabermeja.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Definir las propiedades y aspectos relevantes de la planta piloto UOP1 (Unidad de Cracking Catalítico Fluidizado), respecto a la confiabilidad de los instrumentos de medición y control.
- Describir los conceptos generales del proceso de Craqueo Catalítico Fluidizado, marco teórico del sistema en general de la Unidad de Cracking Catalítico Fluidizado UOP1 de la refinería de Barrancabermeja.
- Consultar y verificar las diferentes metodologías para medir la reducción del riesgo operacional o incipiente por el uso de tecnologías de Detección y Diagnóstico de Fallos en la Unidad de Cracking Catalítico Fluidizado UOP1 de la Refinería de Barrancabermeja.
- Seleccionar una metodología o técnica avanzada de detección y diagnóstico de fallos operacionales, medición de la mitigación del riesgo operacional enfocado en el proceso de cracking catalítico fluidizado.
- Realizar una evaluación de la confiabilidad de los sistemas de control electrónicos y de la metodología desarrollada en la unidad FCC.

1.4 JUSTIFICACIÓN.

La automatización en los procesos Industriales, se basa en la capacidad para controlar la información necesaria en el proceso productivo, mediante la

implementación de mecanismos de medición y evaluación de las normas de producción. A través de diversos instrumentos controlados por la información suministrada por el computador, se regula el funcionamiento de las máquinas u otros elementos que operan el proceso productivo.

La presente monografía se enfoca en un estudio y revisión del estado del arte de las diferentes técnicas de medición de reducción del riesgo por el uso de tecnologías de detección y diagnóstico de fallos, analizar, evaluar e integrar la información de fallos en los instrumentos de control y la información operacional de los mismos, donde se tomará como piloto para esta propuesta a la planta UOP1 (unidad de Cracking Catalítico Fluidizado), una de las cuatro máquinas cracking destinadas a la refinación de gasolina en la refinería de Ecopetrol de Barrancabermeja.

Realizar una propuesta de mitigación del riesgo operacional en la planta, utilizando técnicas avanzadas de detección y diagnóstico de fallos operacionales, medición de la mitigación del riesgo operacional enfocadas en el tema de Detección y Diagnóstico de Fallos.

La evaluación de la confiabilidad de los sistemas de control electrónicos y el estudio a desarrollar arrojarán los resultados que le permitirán a la empresa evaluar e integrar la información de fallos y operacional en los instrumentos de control tales como sintonía, variabilidad de los lazos de control, estado manual/automático de los PID, aumento o disminución de la productividad, disminución de costos y riesgos.

Los aportes de este trabajo permitirán sentar las bases para el desarrollo de una herramienta para detectar y diagnosticar desviaciones de un proceso productivo, evitando de esta manera reducción de pérdidas de productividad, acontecimientos anormales o fuera de contexto y principalmente informar oportunamente de posibles situaciones anormales que pongan en peligro o riesgo la vida humana, el medio ambiente o la imagen e infraestructura de la empresa.

1.5 MEJORA DE LA CONFIABILIDAD.

La fiabilidad 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.

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.
- Costos de la minimización.

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 de 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.²

Con el presente estudio se espera mejorar la confiabilidad del proceso de cracking catalítico fluidizado mediante la aplicación de un sistema de detección y diagnóstico de fallas al proceso industrial.

1.6 CONCEPTO E IMPORTANCIA DE LA SEGURIDAD.

La seguridad es un estado de ausencia de cualquier tipo de riesgo o peligro, los riesgos y peligros pueden provocar diversos tipos de daños, ya sean de tipo físico, psicológico o material y son controlados con un nivel de seguridad adecuado para preservar la salud e integridad primordialmente de los individuos que forman parte de cualquier tipo de comunidad y de forma secundaria evitar o disminuir las pérdidas materiales que deriven del resultado de cualquier tipo de accidente.

La seguridad laboral es el conjunto de actividades multidisciplinarias orientadas a preservar, conservar y mejorar la salud de los trabajadores buscando un alto grado de bienestar físico y mental.

Teniendo como objetivo el establecer y mantener un ambiente de trabajo seguro y sano para prevenir o minimizar los riesgos.

² Agudelo C., Morant F., Quiles E., García E. Detección y diagnóstico temprano de fallos para mejorar la seguridad de proceso y la confiabilidad: aplicación en un proceso de refinería. Agosto 2012.

El alcance que pueda tener la seguridad laboral depende de la aplicación de ciertas consideraciones lógicas que son las siguientes:

- ✓ Análisis de los casos (identificar causas, determinar tendencias y realizar evaluaciones).
- ✓ Comunicación (relación informativa de los conocimientos obtenidos del análisis de los casos).
- ✓ Inspección (Observación del cumplimiento, detección de condiciones inseguras).
- ✓ Entrenamiento (Orientar las responsabilidades de seguridad).

La importancia de la seguridad radica en el hecho de que no se debe de ver al trabajador como un factor de producción si no como un ser integral, que al garantizar los niveles adecuados de seguridad se verá reflejado en un mejor rendimiento laboral y una mayor productividad.

Para llevar a cabo el concepto de seguridad, se debe realizar una evaluación de riesgos que constituye la base de la acción preventiva, ya que a partir de la información obtenida con la valoración podrán adoptarse las decisiones precisas sobre la necesidad o no de implementar acciones preventivas.

De acuerdo con las “Directrices para la evaluación de riesgos”, elaboradas por la Comisión Europea y editadas por la oficina de publicaciones oficiales de las comunidades europeas, Luxemburgo 1996, se entiende por evaluación de riesgos “el proceso de valoración del riesgo que entraña para la salud de los trabajadores y seguridad de los equipos ante la posibilidad de que se verifique un determinado peligro en el lugar de trabajo”.

Con la evaluación de riesgos, se alcanza el objetivo de facilitar la toma de medidas adecuadas, para poder cumplir con su obligación de garantizar la seguridad y la

protección de trabajadores y equipo de trabajo, comprendiendo las siguientes medidas:

- Prevención de los riesgos laborales.
- Información.
- Formación.
- Organización y medios para poner en práctica las medidas necesarias.

Con la evaluación de riesgos se consigue:

- Identificar los peligros existentes en el lugar de trabajo y evaluar los riesgos asociados a ellos, a fin de determinar las medidas que deben tomarse para proteger la seguridad de los trabajadores y seguridad del equipo de trabajo.
- Poder efectuar una elección adecuada sobre los equipos de trabajo, los preparados o sustancias que se empleen, el acondicionamiento del lugar de trabajo y la organización de éste.
- Comprobar si las medidas existentes son adecuadas.
- Establecer prioridades en el caso de que sea preciso adoptar nuevas medidas como consecuencia de la evaluación.
- Comprobar y hacer valer los factores de riesgo tomados en cuenta para demostrar que las medidas preventivas estén bien establecidas y documentadas, garantizando un mayor nivel de protección.

1.7 FASES DE LA EVALUACIÓN DE RIESGOS.

La evaluación del riesgo se realiza considerando los siguientes puntos:

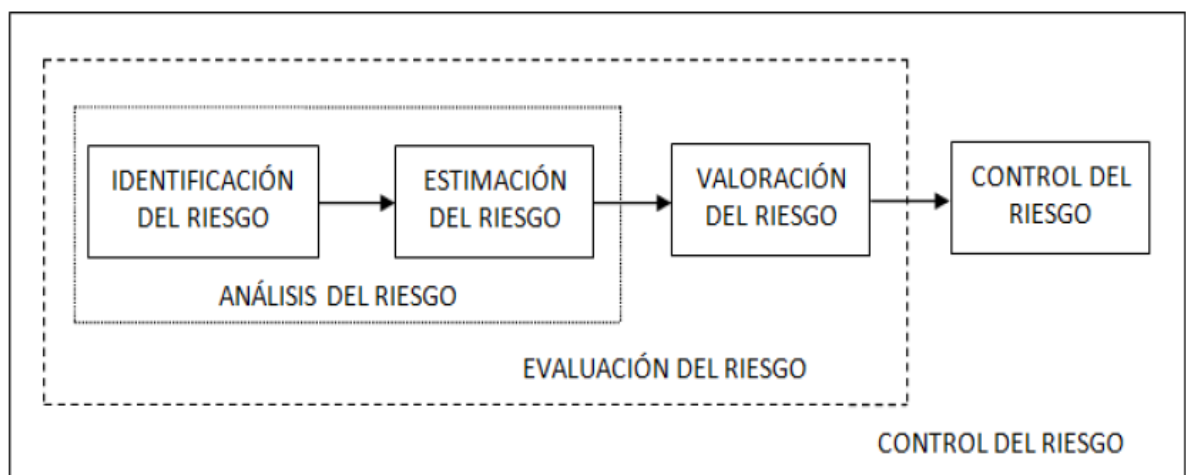
- a) Identificación de riesgos.
- b) Identificación de los equipos y operarios expuestos a los riesgos que entrañan los elementos peligrosos.
- c) Evaluar cualitativa o cuantitativamente los riesgos existentes.
- d) Analizar si el riesgo puede ser eliminado, y en caso de que no pueda serlo, decidir si es necesario adoptar nuevas medidas para prevenir o reducir el riesgo.

Las cuales se pueden sintetizar en:

- Análisis del riesgo, comprendiendo las fases de identificación de riesgos y estimación de los riesgos.
- Valoración del riesgo, que permitirá enjuiciar si los riesgos detectados resultan tolerables.

El procedimiento para la evaluación de riesgos se ilustra en la Figura 1.

Figura 1. Procedimiento para la Evaluación de Riesgos.



Fuente: Bravo O., Sánchez M. Gestión Integral de Riesgos. Tomo I.

1.8 METODOLOGIA.

- a) Estudio bibliográfico: Hace referencia a la búsqueda bibliográfica y documentación que se realizará de todos los temas tratados en el presente proyecto de grado, recopilación de métodos, implementación, fundamentación e identificación de los diferentes procesos, las técnicas de control, sacar ideas principales de los estudios bibliográficos e identificar las herramientas necesarias.

Fundamentación teórica, estudio bibliográfico, recopilación de métodos, reformulación investigación, estado del arte, recopilación de información e investigación.

Revisión profunda del estado del arte de diferentes metodologías de sistemas de identificación y detección de fallos, metodologías a ser aplicadas en ingeniería de confiabilidad industrial, aplicación de metodologías de selección multi-criterio y profundización teórica en el proceso de Craqueo Catalítico Fluidizado.

Recopilación de la información necesaria en la planta, presiones caudales temperaturas diagrama de instrumentación tablas de comportamiento de los diferentes elementos que intervienen en el proceso de refinación de la gasolina.

- b) Clasificación de la información se realiza con el propósito de mejorar, fortalecer y direccionar el trabajo a realizar, por tal motivo, se extrae la información útil para

el desarrollo del modelo de detección y diagnóstico de fallos en una Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado - FCC.

Identificar las fallas de mayor impacto o criticidad que han producido mal funcionamiento o parada total de la Unidad por medio de la aplicación de metodologías de confiabilidad industrial para de esta manera mejorar la confiabilidad del proceso de Cracking Catalítico Fluidizado (FCC) mediante la aplicación de un sistema de detección y diagnóstico de fallas al proceso industrial.

- c) Estudio del proceso de cracking catalítico fluidizado. Esta parte del trabajo incluye el estudio de las variables de interés en el proceso de refinación, unidad de balance, fenomenología del proceso de Craqueo Catalítico Fluidizado, balances másicos y térmicos para entender los modelos de desarrollo, análisis de la instrumentación electrónica del proceso.

Revisión de las tecnologías y metodologías utilizadas en el diseño de los SDDF, revisión de metodologías de detección y diagnóstico de fallos, sus características más importantes en cuanto a debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas.

Una vez reunida toda la información antes mencionada se realiza una selección de metodologías viables para ser aplicadas en el proceso de Cracking Catalítico Fluidizado - FCC.

- d) Realizar análisis y evaluación de la confiabilidad de los sistemas de control electrónicos y de la gestión de activos desarrollada utilizando técnicas avanzadas de detección y diagnóstico de fallos operacionales, medición de la mitigación del riesgo operacional enfocados en el tema de Gestión de Activos (Asset Management).

Con el propósito de desarrollar el modelo de detección e identificación de fallos se implementará una metodología con base en técnicas de confiabilidad industrial, caracterización del proceso, planteamiento de la caracterización de la unidad de balance de los diferentes comportamientos en el sistema, caracterización de fallos, entre otros aspectos significativos que se deben tener en cuenta.

- e) Establecer la validación de los resultados obtenidos para comprobar si la metodología de trabajo proyectada es viable y si la técnica de identificación y detección de fallos es la adecuada para proseguir con su implementación, se comparan los resultados obtenidos y se determina si se logró el objetivo planteado inicialmente.
- f) Elaboración del documento final, documentar los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo, formular conclusiones y observaciones que generen un aporte importante a las investigaciones llevadas a cabo en el área desarrollada.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1 PELIGRO.

Puede definirse el peligro como aquello que puede producir un accidente o un daño. Situación física que puede provocar daños a la vida, a los equipos o al medio.

2.2 RIESGO.

Se han propuesto diversas definiciones del riesgo: “situación que puede conducir a una consecuencia negativa no deseada en un acontecimiento”, o bien “probabilidad de que suceda un determinado peligro potencial”, o aún, “consecuencias no deseadas de una actividad dada, en relación con la probabilidad de que ocurra”.

Un tratamiento riguroso del riesgo requiere una definición más precisa que permita su cuantificación. Una definición que cumple estos requisitos y que es utilizada por muchos profesionales es la basada en el producto de la frecuencia prevista para un determinado suceso por la magnitud de las consecuencias probables:

$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia} \times \text{Magnitud Consecuencias.}^3$$

2.3 PLANTAS.

Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular. Se puede llamar Planta a cualquier objeto físico que se va a controlar como un dispositivo mecánico, un horno de calefacción, un reactor químico o una nave espacial.

2.4 PROCESOS.

Se define Proceso como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden unos a otros de una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados; o una operación artificial o voluntaria que se hace de forma progresiva que consta de una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinado, es decir, un Proceso es cualquier operación que se va a controlar.

³ Casal J.; Planas E.; Montiel H.; Vílchez J. *Análisis del Riesgo en Instalaciones Industriales*. Edición UPC. 1999.

2.5 SISTEMAS.

Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Un sistema no está necesariamente limitado a los sistemas físicos. El concepto de sistema se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos, por tanto, la palabra sistema debe interpretarse en un sentido amplio que comprenda sistemas físicos, biológicos, económicos y similares.

2.6 PERTURBACIONES.

Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina *interna*, mientras que una perturbación *externa* se genera fuera del sistema y es una entrada.

2.7 CONTROL REALIMENTADO.

El control realimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, y lo realiza tomando en cuenta esta diferencia. Aquí sólo se especifican con este término las perturbaciones impredecibles, ya que las perturbaciones predecibles o conocidas siempre pueden compensarse dentro del sistema.

2.8 SEÑAL.

Una señal es una variable física tal que su magnitud o la variación en el tiempo contiene información.

2.9 INCIDENTE.

Secuencia de eventos no planeada, la cual puede ocasionar enfermedades, lesiones y/o daños a la Gente, los Bienes, el Medio Ambiente o la imagen. El lapso

de tiempo entre los eventos y su manifestación en un incidente puede variar de cero a varios años.⁴

2.10 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO - FCC.

Es un proceso para convertir hidrocarburos que ebulen en el rango 280°C - 570 °C (650°F - 1050°F), típicamente gasóleos obtenidos en la destilación al vacío, en productos de alto valor agregado, como gasolina y GLP (Gas Licuado del Petróleo), utilizando un catalizador sólido en estado fluidizado.

Sus siglas en ingles son su nombre más común FCC “Fluid Catalytic Cracking”.

Actualmente, el proceso de **Craqueo Catalítico de Hidrocarburos** en lecho fluidizado, conocido como **FCC** (fluid catalytic craking) (Scherzer, 1989), es considerado el más importante dentro de la refinería para convertir cortes pesados en otros livianos y valiosos. Este proceso fue desarrollado e industrializado en la década de 1940 y ha sufrido, a lo largo del tiempo, diferentes modificaciones y mejoras en cuanto a su tecnología y al catalizador empleado, incrementando su eficiencia, los beneficios económicos del proceso y atendiendo las demandas específicas de cada refinería (Sedran 1994).

Con las características mencionadas, la alimentación empleada en refinerías es usualmente Gas Oil de Vacío (VGO). Se caracteriza por tener puntos de ebullición promedio del orden de 450 °C.

El craqueo catalítico o desintegración catalítica tiene como finalidad transformar destilados de alto peso molecular en componentes livianos de alta calidad. Este proceso se realiza en presencia de un catalizador a altas temperaturas y en un ambiente de baja presión.

⁴ Instructivo para uso de la matriz de evaluación de riesgos – RAM. Ecopetrol S.A. Gerencia complejo de Barrancabermeja. Abril de 2002.

Los principales productos obtenidos en el proceso de desintegración catalítica son:

- Olefinas (Propileno y butilenos).
- Gasolinas.
- Aceites de Reciclo Liviano (ARL).
- Aceites Diluentes (ARP/Lodoso).

El craqueo catalítico ocupa un papel importante en los procesos de refinación. En la unidad de Craqueo Catalítico fluidizado (FCC), se llevan a cabo procesos de conversión primaria, donde a partir de fracciones del petróleo, en este caso gasóleos se pueden obtener productos de mayor valor comercial.

Lo anterior se presenta debido a que ocurre una reacción química mediante la cual se rompen las moléculas de hidrocarburo y se obtienen productos económicamente rentables como gas combustible, Etano-Etileno, Gas Licuado del Petróleo (GLP), Gasolina (liviana y pesada), Aceite liviano de Ciclo (ALC) y Slurry.

Este proceso emplea un catalizador en forma de partículas muy finas que se comportan como un fluido, cuando se fluidizan con vapor.

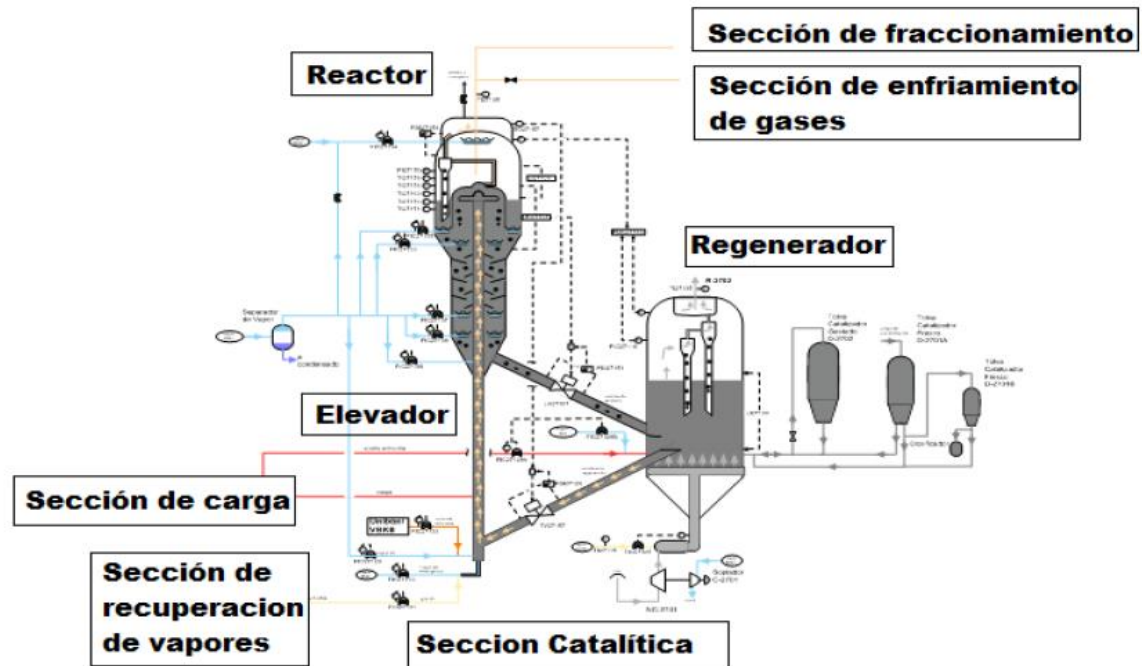
El catalizador fluidizado circula continuamente entre la zona de reacción y regeneración, actuando como un medio para transferir calor del regenerador al alimento y al reactor.⁵

Hoy en día los esquemas de unidades FCC más usados son los Lado por Lado donde el reactor y el regenerador son dos unidades adyacentes, lo cual es propio de la tecnología UOP y las de tipo Orthoflow donde el reactor se encuentra en la parte superior del regenerador.

En este caso nos enfocaremos en la tecnología UOP como se puede apreciar en la Figura 2.

⁵ SADEGHBEIGI R. Fluid Catalytic Cracking Handbook Design, Operation and Troubleshooting of FCC facilities, 2Ed, Gulf Professional Publishing, Houston (2000) 2Ed.

Figura 2. Esquema del proceso de craqueo catalítico modelo UOP



Fuente. Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo - ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

Como se aprecia en la Figura 2, dentro del esquema general de proceso se pueden identificar las siguientes secciones:

a) **Sección de Carga.** Esta sección se relaciona con el pre-tratamiento de la carga alimentada a la unidad FCC.

En esta parte del proceso se adiciona calor a la carga o corriente que va a ser alimentada a la unidad para llevar a cabo la reacción. La carga está constituida principalmente por Aceite Demetalizado (DMO), Aceite Demetalizado Hidrogenado (DMOH), Gasóleo (GAO) y Crudo Reducido (CR) y es enviada a la sección de catalítica.

b) Sección Catalítica. Es la parte principal del proceso donde se controla el balance másico y térmico de la unidad FCC.

En esta etapa del proceso se recibe la carga precalentada y se pone en contacto con el catalizador para producir la reacción de craqueo catalítico, consta de los siguientes equipos principales: ***Elevador, Reactor y Regenerador.***

- **Elevador del Reactor:** La carga y el catalizador regenerado fluyen por el elevador al reactor donde se encuentra con el catalizador regenerado. La carga se rompe en moléculas más pequeñas y de mayor valor con la ayuda del catalizador y calor. Al salir en la cima del elevador del reactor, el catalizador y los vapores craqueados se separan.
 - **Reactor.** En el reactor se lleva a cabo la reacción de craqueo catalítico y se inyecta vapor para separar el catalizador de los vapores de hidrocarburo producidos durante la reacción, estos fluyen por la cima del reactor a la sección de fraccionamiento y el catalizador usado cae por gravedad al regenerador.
 - **Regenerador.** Este proceso provee el calor requerido para mantener la temperatura del reactor y elimina el carbón depositado en catalizador gastado después de la reacción catalítica. El catalizador gastado entra en contacto con aire suministrado por el Soplador en un ambiente a altas temperaturas, esto causa que el carbón se auto-encienda y haga combustión para convertirse en gas de chimenea. El catalizador regenerado regresa entonces al elevador del reactor para ser usarse nuevamente en las reacciones catalíticas.
- c) Sistema de Enfriamiento de Gases.** Implica generación de vapor de agua usando los gases generados en la sección catalítica.

Consiste en el tratamiento realizado al gas de chimenea que sale del regenerador, debido a que este contiene gran cantidad de calor, se conduce al sistema de enfriamiento de gases para que al perder temperatura genere vapor.

- **Gases de Combustión.** El gas de combustión pasa por calentadores, luego continúa a través de una válvula de corredera, una cámara de orificios de reducción de presión y por último se descarga a la atmósfera.
- **Generación de Vapor.** Agua des-aireada del sistema de agua de calderas, combinada con vapor húmedo del Generador de Vapor, fluyen al Tambor de Vapor. Desde el tambor, el agua se envía por medio de bombas al Generador de Vapor, donde la temperatura del vapor es elevada al utilizar el calor sensible del gas de combustión (gas de chimenea) proveniente del Regenerador. La temperatura del vapor se controla con agua tratada que se inyecta en la Estación Decalentadora. Se genera vapor de alta presión que va al cabezal de vapor.

d) Sección de Fraccionamiento. Se enfoca en los productos y corrientes que se obtienen en la fraccionadora principal.

En esta sección se separa el efluente del reactor en corrientes de Slurry, APC, ALC, nafta y gases (gasolina principalmente).

e) Sección de Compresión: Como su nombre lo indica se relaciona con la compresión de los gases de cima obtenidos en la sección de fraccionamiento.

En esta etapa se trata el gas que no se condensa en el tambor de cima y lo envía a un tambor de succión, en este punto se separa el líquido de la carga y se conduce al tambor de condensado. El compresor de gas húmedo incrementa la presión de la corriente de vapor también se encuentran unos condensadores que remueven el calor de esta corriente.

f) **Sección de Recuperación de Vapores:** Es el tratamiento realizado a los productos gaseosos.

La sección de recuperación de vapores recibe carga de los vapores de hidrocarburos de la sección de compresión y los separa en productos de más valor, los equipos usados en esta sección son absorbedoras, despojadoras, debutanizadora y secadoras de propano.⁶

La gran complejidad de la operación de estas unidades se debe fundamentalmente a la estrecha interdependencia que poseen las variables del proceso, lo anterior hace casi imposible en términos prácticos modificar una variable sin tener una inmediata respuesta en el resto del sistema, estos efectos deben ser manejados en forma continua.

Las variables de operación se dividen en ***independientes y dependientes***.

- Las variables operativas independientes son:
 - ***Temperatura de reacción:*** Es la temperatura de la mezcla catalizador y carga en el punto donde se considera han finalizado las reacciones.
 - ***Temperatura de pre-calentamiento de carga:*** Es la temperatura a que se levanta la carga previamente al ingreso al Reactor.
 - ***Relación de recicló:*** Es la cantidad de producto ya craqueado (recicló) que se incorpora a la carga fresca.
 - ***Actividad de Catalizador:*** Es la capacidad que tiene el catalizador para convertir una carga determinada en productos de menor peso molecular.

⁶ SADEGHBEIGI, R. Fluid Catalytic Cracking Handbook Design, Operation and Troubleshooting of FCC facilities, 2Ed, Gulf Professional Publishing, Houston (2000) 2Ed.

- **Modo de combustión:** Mide el grado de conversión de monóxido de carbono a dióxido de carbono, y por ende modifica la cantidad calor que se libera en el regenerador.
- **Calidad de la carga:** Composición fisicoquímica de la carga a la unidad.
- **Velocidad espacial:** Se define como el cociente entre el caudal de carga total y la cantidad de catalizador existente en el reactor.

○ Las variables operativas dependientes son:

- **Temperatura del Regenerador:** Es la temperatura existente en el lecho denso del regenerador.
- **Velocidad de Circulación:** Se define como el caudal de catalizador que circula vs. el área media del reactor.
- **Conversión:** Es el porcentaje de volumen de carga fresca que se convierte en nafta (de punto seco pre-determinado) y productos más livianos.
- **Requerimiento de aire:** Es la cantidad de aire requerida para realizar la combustión del carbón depositado sobre el catalizador.
- **C/O:** Es la relación entre el régimen de circulación del catalizador (ton/h) y el de la carga combinada (fresca + reciclo) expresada también en ton/ h.

Las modificaciones de variables deben realizarse teniendo en cuenta que se mantengan en equilibrio los tres balances que influyen en la estabilidad del convertidor:

- Balance térmico.
- Balance de presión.
- Balance de coque o de carbón.

➤ **Balance Térmico.**

El convertidor está en balance térmico cuando la energía generada por la quema de coque es igual a la energía requerida por el proceso, es decir:

$$\textit{Energía de Entrada} = \textit{Energía de Salida}$$

El balance térmico específicamente es alcanzado en el Regenerador en función de la producción de coque, asociado a la interacción de las variables independientes y dependientes antes mencionadas, el coque finalmente se calcula:

$$\textit{Coque} = C_{CG} - C_{CR} = \frac{\%K}{C/A}$$

Donde:

C_{CG} = Coque en el Catalizador Gastado (%peso).

C_{CR} = Coque en el Catalizador Regenerado (%peso).

$\%K$ = Rendimiento de Coque (%peso de la carga).

C/A = Relación Catalizador vs. Carga a la unidad (ton).

➤ **Balance de Presión.**

El balance de presiones gobierna la circulación del catalizador y permite la operación de la unidad.

Además, se debe controlar estrictamente por la seguridad de la operación ya que si se produce una inversión de flujo el equipo puede explotar por ingreso de aire y catalizador al reactor o ingreso de carga al regenerador.

El equilibrio significa mantener un diferencial de presión positivo para permitir transportar el catalizador hasta el reactor venciendo la presión del reactor.

$$\Delta(P_{\text{Regenerado}} - P_{\text{Reactor}}) > 0$$

La presión en el regenerador es generada por la descarga de los gases producidos en la combustión y se controla a través de un controlador diferencial de presión.

La presión en el Reactor se controla en el acumulador de cabeza de la torre fraccionadora.

➤ **Balance de Carbón.**

El balance de carbón relaciona todas las fuentes de generación de carbón de la unidad y está íntimamente vinculado con el balance de calor.

El carbón formado en el proceso responde a la siguiente ecuación:

$$C_T = C_{\text{Cat}} + C_{\text{Carga}} + C_{\text{Circulación}} + C_{\text{Contaminante}}$$

C_T = Coque Total formado.

C_{Cat} = Coque producido por las reacciones de Cracking.

C_{Carga} = Coque residual debido a la naturaleza de la carga.

$C_{\text{Circulación}}$ = Coque que se transporta entre el reactor y regenerador función del régimen de circulación.

$C_{\text{Contaminante}}$ = Coque producido por la presencia de contaminantes en la carga.

2.10.1 Descripción y Tipos del Proceso.

La carga a la unidad pasa a través de intercambiadores donde es precalentada antes de ser inyectada en el elevador del reactor donde se craquea por acción del catalizador a alta temperatura, dando lugar a una mezcla gaseosa con productos valiosos, gases, slurry y coque.

Este último se deposita en la superficie del catalizador, disminuyendo su actividad, en este punto el catalizador se denomina gastado y se separa de los gases de craqueo en los ciclones próximos al reactor.

Las partículas sólidas descienden hacia el regenerador donde el coque depositado es quemado por inyección de aire. El catalizador con la actividad restablecida, llamado regenerado, es conducido nuevamente al elevador para empezar de nuevo el proceso.

Los gases de la cima del reactor son enviados a la fraccionadora principal donde son comprimidos, enfriados y condensados para producir gas combustible, GLP (Gas Licuado del Petróleo), nafta liviana, nafta pesada, slurry, y aceite liviano de ciclo (ALC).

El GLP pasa a la sección de recuperación de gases y después a un tratamiento con amina para retirar los compuestos corrosivos (H_2S y mercaptanos); después sus componentes son separados en dos corrientes diferentes butanos ($C_4/C_4=$) y propanos ($C_3/C_3=$).

En la Figura 3, se presenta un diagrama de bloques del proceso para esclarecer la descripción del proceso desarrollada.

Figura 3. Diagrama de bloques proceso de Craqueo Catalítico.

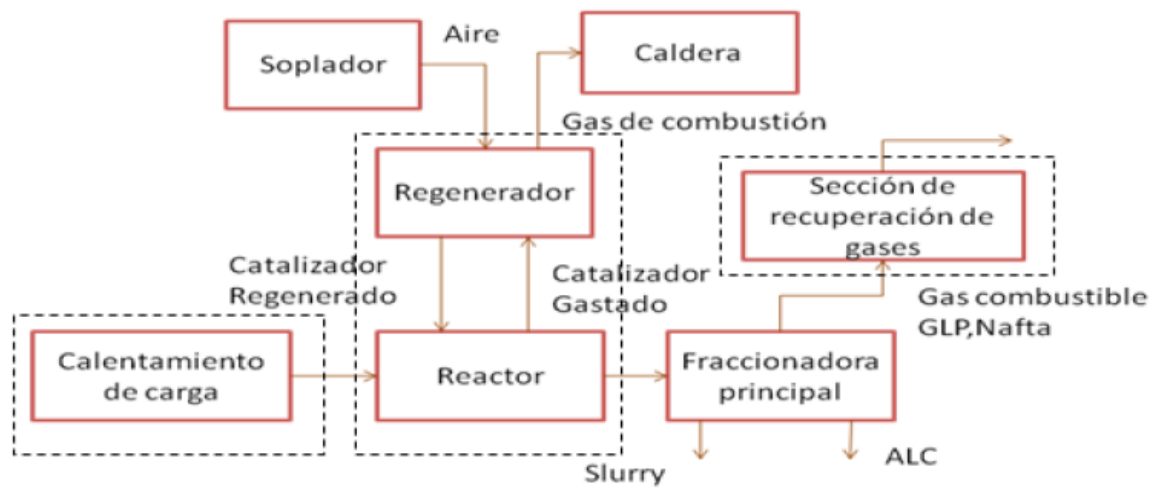
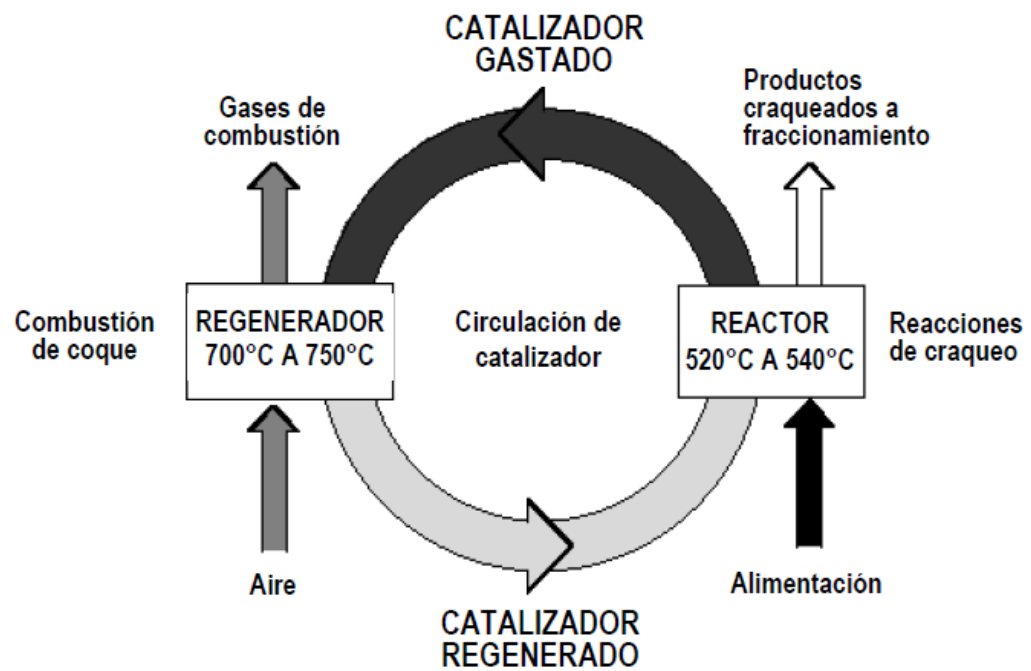


Figura 4. Diagrama descripción del proceso de Craqueo Catalítico.



Fuente. Cracking Catalítico Fluido. Universidad de Oriente. Núcleo Anzoátegui. Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Venezuela.

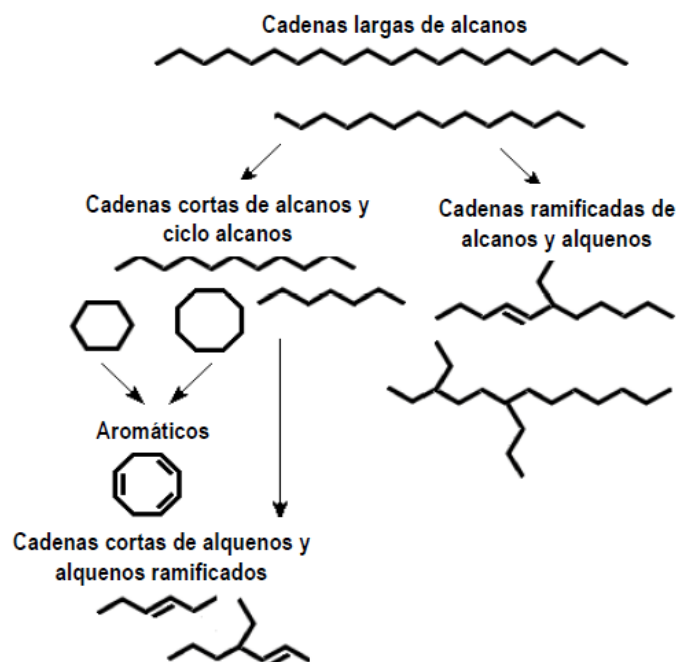
El proceso evolucionó con los desarrollos alcanzados en los catalizadores así como el proceso de regeneración de catalizador.

- **Lecho Fijo (Houdry):** Primeros pasos del proceso, poca utilización por desactivación del catalizador.
- **Lecho Móvil (CCT):** Utiliza un lecho sólido continuo y móvil de catalizador que gravita a través de la unidad en una masa compacta. El regenerador de catalizador es un horno ubicado debajo del reactor.
- **Lecho Fluidizado (CCF):** El catalizador fluidizado circula continuamente entre la zona de reacción y la zona de regeneración y actúa como vehículo para transferir calor desde el regenerador hasta el reactor.

2.10.2 Química del Proceso.

Principales reacciones en el proceso de Craqueo Catalítico:

Figura 5. Diagrama descripción del proceso de Craqueo Catalítico.



Fuente. Reactores FCC. Universidad de Oriente. Núcleo Anzoátegui. Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Venezuela.

2.10.3 Catalizadores.

El catalizador de FCC es un polvo fino y poroso compuesto de óxidos de silicio y aluminio. Otros elementos pueden estar presentes en pequeñas cantidades.

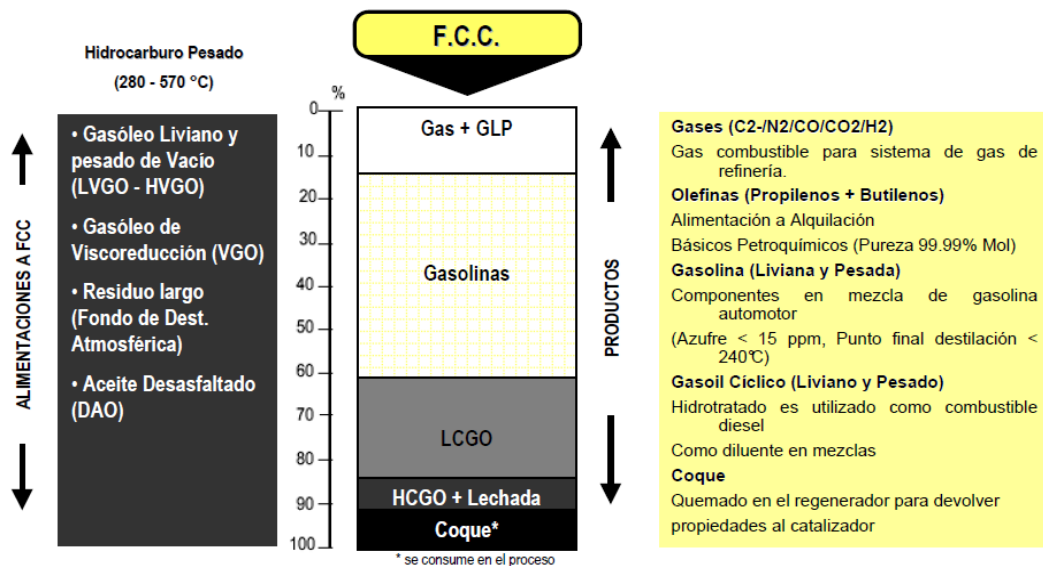
Este catalizador posee propiedades ácidas requeridas para las reacciones de craqueo catalítico.

Pueden dividirse en tres clases:

- Aluminosilicatos naturales tratados con ácido.
- Combinaciones de alúmina-silicio sintéticas y amorfas.
- Alúmina - silicio sintéticos cristalinos o zeolitas.

2.10.4 Materias Primas, Productos y Variables Principales.

Figura 6. Materias Primas y Productos del proceso de Craqueo Catalítico.

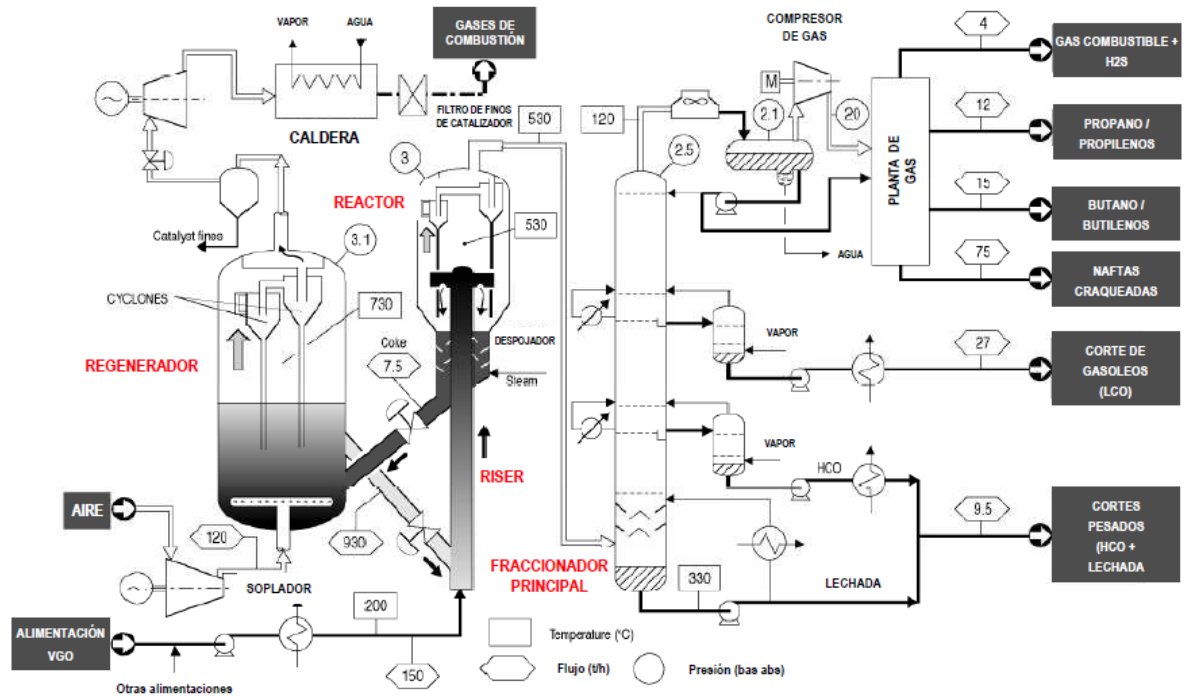


Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

HCGO = Heavy Coker Gas Oil.

LCGO = Light Catalytic Gas Oil.

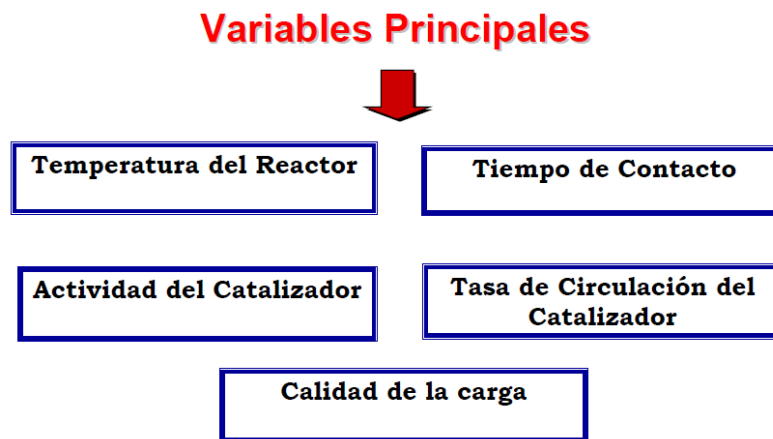
Figura 7. FCC – Diagrama Simplificado



Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

➤ Variables Principales del Proceso FCC.

Figura 8. Variables principales del proceso FCC.



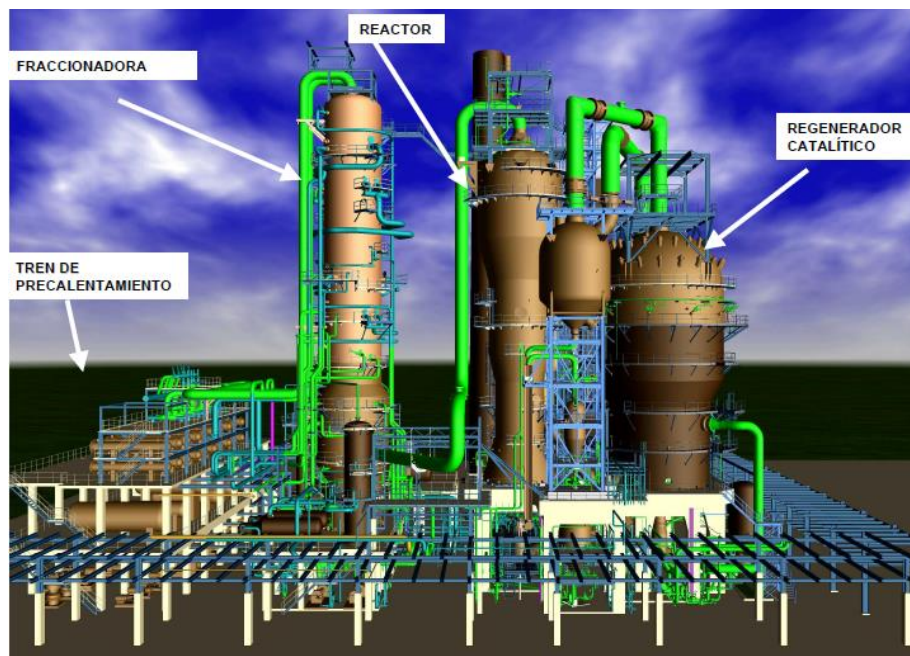
Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

Tabla 1. Variables principales del proceso FCC.

Variables	Típico operacional	unidad
Carga	103	KBD
% DVGO	100	%
T horno	730-740	°F
T reacción	965-970	°F
Circulación Cat	40-45	ton/d
% Conv	65-70	%
V ciclón RX	50-55	ft/s
Presión RX	35	psig
Inventario cat RX-RG	270	ton
ΔP RX-RG	0,5	psi
T fase diluida RG	1350	°F
T fase densa RG	1320	°F
% O ₂ gas del RG	1,5	%
V ciclón RG	70-75	ft/s
Retiro cat	2,9	ton/d
Adición cat	7,5	ton/d
Coque cat	475-490	ton/d

Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

Figura 9. Craqueo Catalítico - FCC.



Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

3. REVISIÓN DE TÉCNICAS Y METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN DE REDUCCIÓN DEL RIESGO POR EL USO DE TECNOLOGÍAS DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLOS.

3.1 ANÁLISIS DE RIESGOS.

Como se ha visto reflejado sobre determinados accidentes de origen industrial ocurridos, parece claro que las personas, los bienes materiales y el medio ambiente que se encuentran próximos a un establecimiento industrial en el que se encuentren sustancias peligrosas, están sometidos a unos riesgos por la sola presencia de dicha instalación industrial y de las sustancias que se utilizan. La cuestión clave está en decidir qué tipo y nivel de riesgos estamos dispuestos a admitir en contrapartida a los beneficios que suponen la utilización de muchos productos fabricados en este tipo de industrias.

Por tanto, para poder decidir si este tipo de riesgos es aceptable, se requiere estimar su magnitud, por lo que se hace necesario realizar un análisis sistemático y lo más completo posible de todos los aspectos que implica para la población, el medio ambiente y los bienes materiales, la presencia de un determinado establecimiento, las sustancias que utiliza, los equipos, los procedimientos, etc.

Se hace inevitable analizar estos riesgos y valorar si su presencia es o no admisible. Es lo que se denomina análisis de riesgos. Se trata de estimar el nivel de peligro potencial de una actividad industrial para las personas, el medio ambiente y los bienes materiales, en términos de cuantificar la magnitud del daño y de la probabilidad de ocurrencia.

Los análisis de riesgos, por tanto, tratan de estudiar, evaluar, medir y prevenir los fallos y las averías de los sistemas técnicos y de los procedimientos operativos que

pueden iniciar y desencadenar sucesos no deseados (accidentes) que afecten a las personas, los bienes y el medio ambiente.

3.2 ASPECTOS A TRATAR EN LOS ANÁLISIS DE RIESGOS.

Los aspectos de un análisis sistemático de los riesgos que implica un determinado establecimiento industrial, desde el punto de vista de la prevención de accidentes, están íntimamente relacionados con los objetivos que se persiguen.

Son los siguientes:

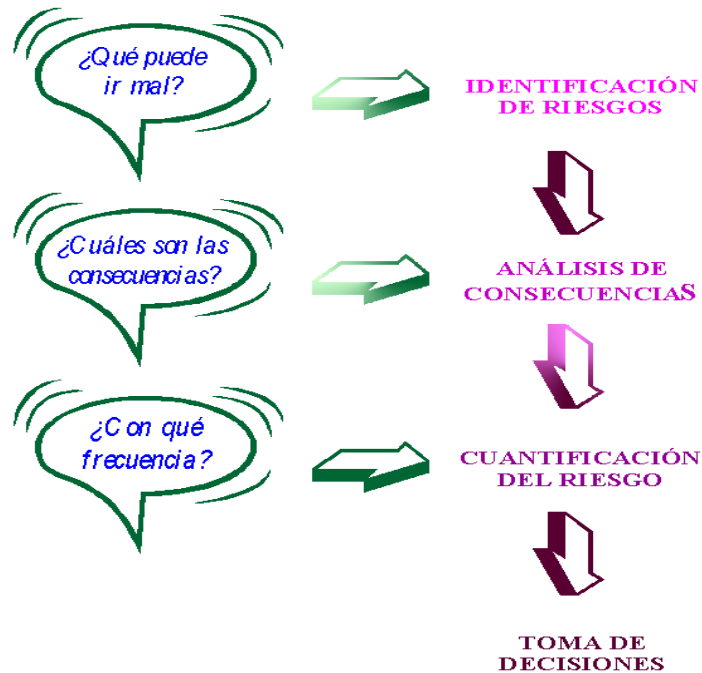
- a) Identificación de sucesos no deseados, que pueden conducir a la materialización de un peligro.
- b) Análisis de las causas por las que estos sucesos tienen lugar.
- c) Valoración de las consecuencias y de la frecuencia con que estos sucesos pueden producirse.

Cada uno de estos aspectos fija su atención en cuestiones importantes sobre los análisis de los peligros de un determinado establecimiento industrial.

El primer aspecto trata de contestar a la pregunta siguiente: *¿Qué puede ocurrir?*, es propiamente la identificación de los riesgos mediante técnicas adecuadas.

La siguiente cuestión trata de contestar a la siguiente pregunta: *¿Cuáles son las consecuencias?*, se trata de aplicar métodos matemáticos de análisis de consecuencias.

Figura 10. Aspectos a tratar en los Análisis de Riesgos.



Fuente: http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/An_riesgo.htm. Teoría Análisis del Riesgo. GUIAR, Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos. . Universidad de Zaragoza – España.

Por último, otra de las cuestiones a resolver es: **¿Cuál es la frecuencia de que ocurra?**, se trata de aplicar métodos que puedan determinar la frecuencia de ocurrencia mediante métodos semi-cualitativos o bien mediante análisis cuantitativos de riesgo (ACR) que implican aspectos cualitativos y cuantitativos junto con análisis de consecuencias.⁷

En la práctica, cuando se analiza desde el punto de vista de la seguridad una determinada instalación lo que se hace es combinar un conjunto de métodos, desde los análisis históricos, combinados con listas de comprobación para después realizar un análisis sistemático mediante HAZOP (Hazard and Operability Analysis) análisis de peligros y operabilidad, conocido también como Análisis de riesgo y operabilidad.

⁷ http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/An_riesgo.htm. Teoría Análisis del Riesgo. GUIAR, Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos. . Universidad de Zaragoza – España.

En determinados casos también se realizan métodos de estimación de frecuencias.

3.3 METODOLOGÍAS MÁS USADAS EN CONFIABILIDAD INDUSTRIAL.

3.3.1 Análisis de Criticidad.

Es una técnica que permite identificar y jerarquizar, en función de su impacto global e importancia, los equipos dentro de una planta con el objetivo de priorizarlos.

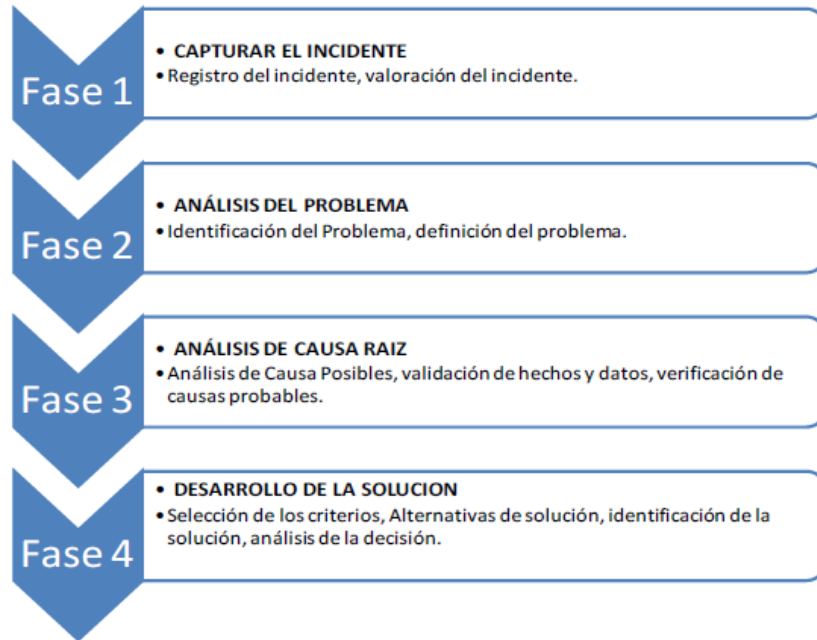
Una posible aplicación de esta técnica es por ejemplo el momento de planificar el mantenimiento preventivo basado en el tiempo, basado en condición y el correctivo. Además, ésta técnica permite optimizar los recursos humanos, económicos y tecnológicos con el fin de definir el continuo funcionamiento de la producción y el buen estado de las máquinas y equipos.

3.3.2 RCA. Análisis de Causa Raíz (del inglés Root Cause Analysis).

Es un método riguroso de solución de problemas, para cualquier tipo de fallas, que utiliza la lógica sistémica y el árbol de causa raíz de fallas, usando la deducción y prueba de los hechos que conducen a las causas reales. Esta técnica de análisis permite aprender de las fallas y eliminar las causas, en lugar de corregir los síntomas.⁸ El método escogido por el Instituto Colombiano del Petróleo para la realización de un RCA sigue las siguientes Fases mostradas en la Figura 11.

⁸ Amendola, Luis J. *Gestión de Proyectos de Activos Industriales – Gestión de Activos/Asset Management*. Editorial Universitat Politècnica de València. 2010.

Figura 11. Metodología de aplicación de un RCA.



Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

3.3.3 HAZOP – Hazard and Operability Analysis. (Análisis de Peligros y Operabilidad).

El HAZOP es una técnica de identificación de riesgos inductiva basada en la premisa de que los riesgos, los accidentes o los problemas de operatividad, se producen como consecuencia de una desviación de las variables de proceso con respecto a los parámetros normales de operación en un sistema dado y en una etapa determinada. Por tanto, ya se aplique en la etapa de diseño, como en la etapa de operación, la sistemática consiste en evaluar, en todas las líneas y en todos los sistemas las consecuencias de posibles desviaciones en todas las unidades de proceso, tanto si es continuo como discontinuo.

La técnica consiste en analizar sistemáticamente las causas y las consecuencias de unas desviaciones de las variables de proceso, planteadas a través de unas "palabras guía".

El análisis HAZOP consiste en una metodología sistemática desarrollada por un grupo multidisciplinario que permite identificar todos los escenarios de riesgo y analizar sus consecuencias, cubriendo todo el proceso/planta/procedimiento bajo análisis.

Para ello se separa el proceso en nodos, y a cada uno de ellos se los analiza utilizando un conjunto de palabras guías (entre ellas: nada de, más de, menos de, otro de, etc.) aplicadas a parámetros fundamentales del proceso (por ejemplo: temperatura, caudal, presión, etc.), a los efectos de generar desviaciones sobre el comportamiento normal (como puede ser: más caudal, menos temperatura, nada de flujo, etc.).⁹

La técnica de análisis HAZOP requiere que el diagrama de proceso o procedimiento sea dividido en nodos de estudio, secciones de proceso o pasos operativos y que los riesgos de los procesos sean direccionados usando las palabras guía mencionadas anteriormente.

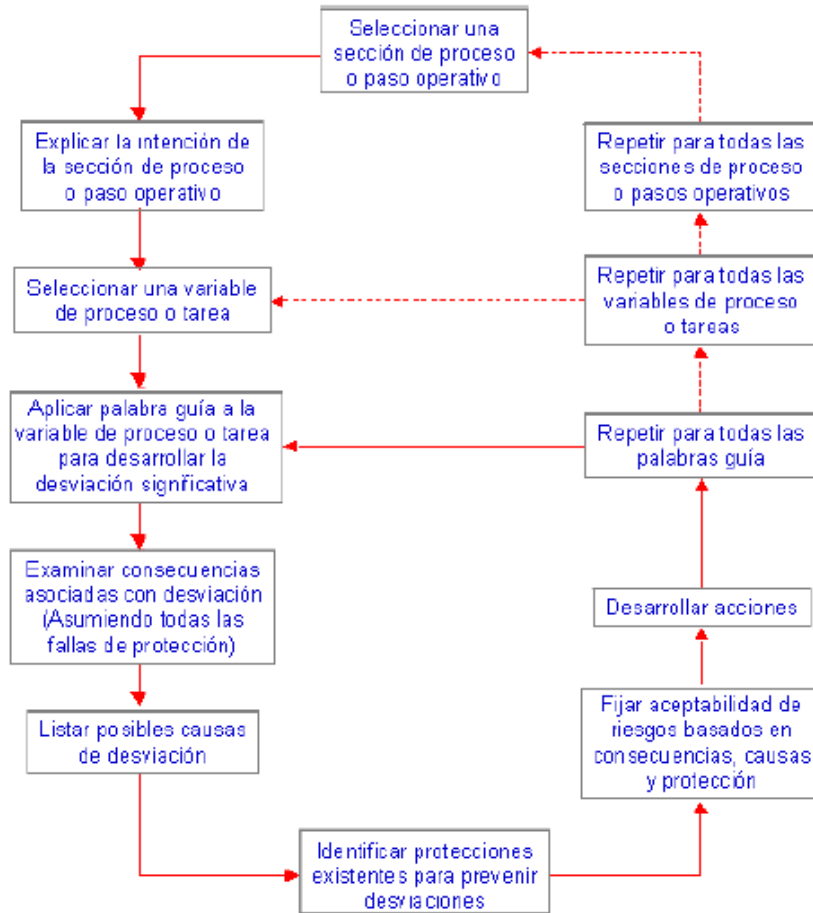
La Figura 12, muestra el flujo de actividades típico en un análisis HAZOP.

El método surgió en 1963 en la compañía Imperial Chemical Industries, ICI, que utilizaba técnicas de análisis crítico en otras áreas. Posteriormente, se generalizó y formalizó, y actualmente es una de las herramientas más utilizadas internacionalmente en la identificación de riesgos en una instalación industrial.

La realización de un análisis HAZOP consta de las etapas que se describen a continuación.

⁹ A Hazard and Operability Studies, Process Safety Report 2, Imperial Chemical Industries Limited, London, 1974.

Figura 12. Diagrama de Flujo de la Técnica Hazop.



Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

➤ **Etapas HAZOP.**

a) Definición del área de estudio.

Consiste en delimitar las áreas a las cuales se aplica la técnica. En una determinada instalación de proceso, considerada como el área objeto de estudio, se definirán para mayor comodidad una serie de subsistemas o líneas de proceso que corresponden a entidades funcionales propias: línea de carga a un depósito, separación de disolventes, reactores, etc.

b) Definición de los nudos.

En cada uno de estos sub-sistemas o líneas se deberán identificar una serie de nudos o puntos claramente localizados en el proceso. Por ejemplo, tubería de alimentación de una materia prima a un reactor, impulsión de una bomba, depósito de almacenamiento, etc.

Cada nudo deberá ser identificado y numerado correlativamente dentro de cada subsistema y en el sentido del proceso para mejor comprensión y comodidad. La técnica HAZOP se aplica a cada uno de estos puntos. Cada nudo vendrá caracterizado por variables de proceso: presión, temperatura, caudal, nivel, composición, viscosidad, etc.

La facilidad de utilización de esta técnica requiere reflejar en esquemas simplificados de diagramas de flujo todos los subsistemas considerados y su posición exacta.

El documento que actúa como soporte principal del método es el diagrama de flujo de proceso, o de tuberías e instrumentos, P&ID.¹⁰

A medida que se aplican todas las palabras guías relevantes a cada sección o etapa de proceso, se obtiene y documenta la desviación con sus causas, consecuencias, protecciones, y acciones, o la necesidad de información más completa para evaluar la desviación.

Cuando las situaciones de riesgo son detectadas, el líder del equipo ejecutor del análisis HAZOP debe asegurarse que todos las entiendan. Es importante controlar el grado de solución de problemas que ocurren durante el desarrollo de la metodología para minimizar la solución de problemas inapropiados.

Se recomienda básicamente para el desarrollo de esta metodología:

¹⁰ American Institution of Chemical Engineers. Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, 1985.

- Completar el estudio de una desviación de proceso y las acciones asociadas sugeridas antes de proceder con la siguiente desviación.
- Evaluar todos los riesgos asociados con una sección de proceso antes de considerar acciones sugeridas para mejorar la seguridad.¹¹

3.3.4 RCM - Reliability Centred Maintenance (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad).

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad es una metodología utilizada para determinar sistemáticamente, qué debe hacerse para asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo requerido por el usuario en el contexto operacional presente. Un aspecto clave en la metodología RCM es reconocer que el mantenimiento asegura que un activo continúe cumpliendo su misión de forma eficiente en el contexto operacional. La definición de este concepto se refiere a cuando el valor del estándar de funcionamiento deseado sea igual, o se encuentre dentro de los límites del estándar de ejecución asociado a su capacidad inherente (de diseño) o a su confiabilidad inherente (de diseño).

- La capacidad inherente (de diseño) y la confiabilidad inherente (de diseño) limita las funciones de cada activo.
- El mantenimiento, la confiabilidad operacional y la capacidad del activo no pueden aumentar más allá de su nivel inherente (de diseño).
- El mantenimiento solo puede lograr mejorar el funcionamiento de un activo cuando el estándar de ejecución esperado de una determinada función del activo está dentro de los límites de la capacidad de diseño o de la confiabilidad de diseño del mismo.

¹¹ Use of Hazard and Operability Studies in Process Analysis, AIChE Today Series, American Institute of Chemical Engineers, New York, 1989.

Desde este punto de vista, el RCM, no es más que una herramienta de gestión del mantenimiento, que permitirá maximizar la confiabilidad operacional de los activos en su contexto operacional, a partir de la determinación de los requerimientos reales de mantenimiento.¹²

RCM es una metodología cuyo objetivo principal es el de cumplir los requisitos de disponibilidad y fiabilidad del sistema a lo largo de su vida operativa con el menor costo posible, manteniendo la seguridad del sistema dentro de unos límites aceptables. Para ello se identifica y se define la política del mantenimiento, para ser utilizada en la gestión de los modos de fallos que pueden conducir al fallo funcional del sistema objeto del estudio, en un contexto operativo dado.

Permite identificar y definir políticas de mantenimiento para gestión de modos de fallo, clasificar los equipos por categorías y criticidad definiendo con esto estrategias para mejoramiento de la confiabilidad de la planta y cumplimiento de requisitos de disponibilidad de la vida operativa con menor costo posible y alta seguridad.

Cuando se desarrolla un RCM se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- El concepto de fallo funcional, es subjetivo y vinculado a la apreciación del operador. Se presenta casos en los cuales dos operadores no coincidan en criterios.
- Gestionar implica decidir la solución de mayor eficacia y eficiencia para los requisitos especificados.
- Todo está vinculado al contexto operativo. Lo anterior se relaciona con el desempeño en entornos diferentes.
- Una vez definidos los objetivos de todo análisis RCM, puede definirse el proceso general:

¹² Amendola, Luis J. **Gestión de Proyectos de Activos Industriales – Gestión de Activos/Asset Management**. Editorial Universitat Politècnica de València. Cap. 3. 2010.

- a) Definir las funciones de cada sistema/equipo/componente en su contexto operacional.
- b) Definir los parámetros de funcionamiento deseado, tanto de sus funciones primarias como secundarias.
- c) Identificar los fallos que pueden ocurrir. Estos fallos reciben el nombre de funcionales y están definidos por la no disponibilidad de alguna de las funciones especificadas.
- d) Estudiar cuáles son las circunstancias o eventos que producen el fallo anterior. A estos hechos se les llama modos de fallo.
- e) Analizar los efectos del fallo describiendo lo qué ocurre y cuándo ocurre para cada modo de fallo. Se realiza un listado de los fallos con toda la información que sea necesaria para el paso siguiente: la evaluación de las consecuencias del fallo.
- f) *Análisis de las consecuencias del fallo.* Esta evaluación se realiza desde varios puntos de vista: de seguridad, de medio ambiente, operacional, de calidad y de coste (teniendo en cuenta no sólo los efectos del fallo sino también los costos de reparación). Este estudio se completa con un análisis de riesgo de cada modo de fallo formando la matriz de criticidad y frecuencia.
- g) Una vez realizado todo lo anterior se buscan las tareas y periodicidades de las mismas para que el sistema mantenga los criterios de fiabilidad establecidos como requisitos con el menor coste posible. Esta selección de tareas se realiza usando la metodología del “árbol de decisiones lógicas”.
- h) Para completar el proceso es esencial que una vez definidas las tareas, los repuestos necesarios para apoyar dichas tareas de mantenimiento puedan estar disponibles en los tiempos adecuados. Por lo tanto, para completar el análisis de RCM, se debe realizar un Análisis de Repuestos Centrados en la Fiabilidad (RCS) y determinar el stock óptimo necesario para conseguir la Disponibilidad Operativa del Sistema.
- i) Puede ser que un primer paso por el proceso de análisis de repuestos pueda sugerir modificaciones a la estrategia de mantenimiento propuesta antes de

alcanzar una solución óptima. El proceso para desarrollar una estrategia de mantenimiento completa, que incluya el mantenimiento y los repuestos es, por lo tanto, un proceso iterativo.

Tabla 2. Evolución Análisis RCM.

Correctivo		Preventivo		Predictivo		RCM	
1ª Generación		2ª Generación		3ª Generación		4ª Generación	
Reactivo: Reparar cuando falla.		Reparación programada.		Mantenimiento predictivo basado en calendario de utilización.		Mantenimiento y diseño basado en confiabilidad.	
1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010

Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

Como se observa en la Tabla 2, un análisis RCM se basa en criterios de confiabilidad y está catalogado como la evolución de cuarta generación con mantenimiento y diseño basado en estrategias de Confiabilidad.¹³

3.3.5 Listas de Comprobación: Safety Check Lists.

Se utilizan para determinar la adecuación de los equipos, procedimientos, materiales, etc. a un determinado procedimiento o reglamento establecido por la propia organización industrial basado en experiencia y en los códigos de diseño y

¹³ Yañez, M., Joglar F., Modarres M. Generalized Renewal Process for analysis of Repairable Systems with limited failure experience – Reliability Engineering and System Safety Analysis Journal. USA, 2002.

operación. Se pueden aplicar en cualquier fase de un proyecto o modificación de la planta: diseño, construcción, puesta en marcha, operación y paradas.

Permite comprobar con cierto detalle la adecuación de las instalaciones y constituye una buena base de partida para complementarlas con otros métodos de identificación que tienen un alcance superior al cubierto por los reglamentos e instrucciones técnicas.

3.3.6 Manuales Técnicos, Códigos y Normas de Diseño.

Consisten en la elaboración de manuales internos de carácter técnico que especifiquen las características de diseño, instalación, operación y utilización de los equipos existentes en un determinado establecimiento. Estos manuales se deben basar en las normas y los códigos internacionales y nacionales de diseño. Para completar el análisis, se deben realizar periódicamente **auditorías de seguridad** que permitan juzgar el estado de los materiales, procedimientos, operaciones, emergencias que se han establecido.

Las normas y los códigos de diseño son elaboradas por organismos internacionales de reconocido prestigio en el campo de la normalización.

A nivel mundial, la organización internacional más importante es la International Organization for Standardization, **ISO**.

En Europa, cada país ha establecido un sistema de normalización de carácter oficial o semioficial. Las más importantes son las siguientes:

- España: Asociación Española de Normalización y Certificación, **AENOR**.
Elabora las normas UNE a partir de las ISO u otras.
- Alemania: Normas DIN. Normas VDI/VDE, Verein Deutscher Ingenieure.
- Reino Unido: British Standards, **BS**.

En Estados Unidos de América, existen varias organizaciones gubernamentales y privadas que se dedican a la elaboración de normas:

- American National Standards Institute, **ANSI**.
- American Society for Testing and Materials, **ASTM**.
- American Petroleum Institute, **API**.
- National Fire Protection Association, **NFPA**.
- American Society of Mechanical Engineers, **ASME**.

3.3.7 Análisis Preliminar de Riesgos (APR): Preliminary Hazard Analysis (PHA).

Desarrollado inicialmente por las Fuerzas Armadas de Estados Unidos, fue el precursor de análisis más complejos y es utilizado únicamente en la fase de desarrollo de las instalaciones y para casos en los que no existen experiencias anteriores, sea del proceso o del tipo de instalación.

Selecciona los productos peligrosos existentes y los equipos principales de la planta y revisa los puntos en los que se piensa que se pueda liberar energía de forma incontrolada en: materias, equipos de planta, componentes de sistemas, procesos, operaciones, instalaciones, equipos de seguridad, etc.

Los resultados del análisis incluyen recomendaciones para reducir o eliminar estos peligros, siempre de forma cualitativa.

Requiere relativamente poca inversión en su realización (2 ó 3 personas con experiencia en seguridad, códigos de diseño, especificaciones de equipos y materiales), por lo que es adecuado para examinar los proyectos de modificaciones o plantas nuevas en una etapa inicial.

Se incluye una parte de un APR de un posible almacenamiento de sulfuro de hidrógeno (H₂S) para utilización en proceso:¹⁴

Tabla 3. APR para almacenamiento de Sulfuro de Hidrógeno para utilización en proceso.

Descripción del riesgo	Causa	Consecuencia	Medidas preventivas o correctivas
Fuga tóxica	1) Pérdida en depósito de almacenamiento	Peligro de muerte si la fuga es importante	a) Colocar sistemas de detección y alerta b) Minimizar la cantidad almacenada c) Desarrollar un procedimiento de inspección de los depósitos

Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

3.3.8 Análisis "¿What if...?": ¿Qué pasaría si...?.

Consiste en el planteamiento de las posibles desviaciones en el diseño, construcción, modificaciones y operación de una determinada instalación industrial, utilizando la pregunta que da origen al nombre del procedimiento: "*¿Qué pasaría si?*".

Requiere un conocimiento básico del sistema y cierta disposición mental para combinar o sintetizar las desviaciones posibles, por lo que normalmente es necesaria la presencia de personal con amplia experiencia para poder llevarlo a cabo.

Se puede aplicar a cualquier instalación o área o proceso: instrumentación de un equipo, seguridad eléctrica, protección contra incendios, almacenamientos, sustancias peligrosas, etc.

Las preguntas se formulan y aplican tanto a proyectos como a plantas en operación, siendo muy común ante cambios en instalaciones ya existentes.

¹⁴ Lees, Frank P. *Loss Prevention in the Process Industries*. 1995.

El equipo de trabajo lo forman 2 ó 3 personas especialistas en el área a analizar con documentación detallada de la planta, proceso, equipos, procedimientos, seguridad, etc.

El resultado es un listado de posibles escenarios o sucesos incidentales, sus consecuencias y las posibles soluciones para la reducción o eliminación del riesgo. Se presenta un ejemplo aplicado a un proceso continuo de fabricación de fosfato diamónico, (PAD) mediante la reacción de ácido fosfórico con amoníaco.

El PAD es inofensivo, sin embargo, si se reduce la proporción de fosfórico, la reacción no es completa y se desprende amoníaco, mientras que si se reduce el amoníaco, se desprende un producto seguro pero indeseable.¹⁵

Tabla 4. Ejemplo Análisis "¿What if...?": ¿Qué pasaría si...?.

¿Qué pasaría si...?	Consecuencia	Recomendaciones
¿... se suministra un producto de mala calidad?	No identificada	--
¿... la concentración de fosfórico es incorrecta?	No se consume todo el amoníaco y hay una fuga en la zona de reacción	Verificar la concentración de fosfórico antes de la operación
¿... el fosfórico está contaminado?	No identificada	--
¿... no llega fosfórico al reactor?	El amoníaco no reacciona. Fuga en la zona de reacción	Alarma/corte del amoníaco por señal de falta de flujo en la línea de fosfórico al reactor
¿... demasiado amoníaco en el reactor?	Exceso de amoníaco. Fuga en la zona de reacción	Alarma/corte del amoníaco por señal de falta de flujo en la línea de fosfórico al reactor

Fuente: http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/An_riesgo.htm. Teoría Análisis del Riesgo. GUIAR, Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos. . Universidad de Zaragoza – España.

¹⁵ http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/An_riesgo.htm. Teoría Análisis del Riesgo. GUIAR, Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos. . Universidad de Zaragoza – España.

3.3.9 Análisis por Árboles de Sucesos (AAS). Event Tree Analysis (ETA).

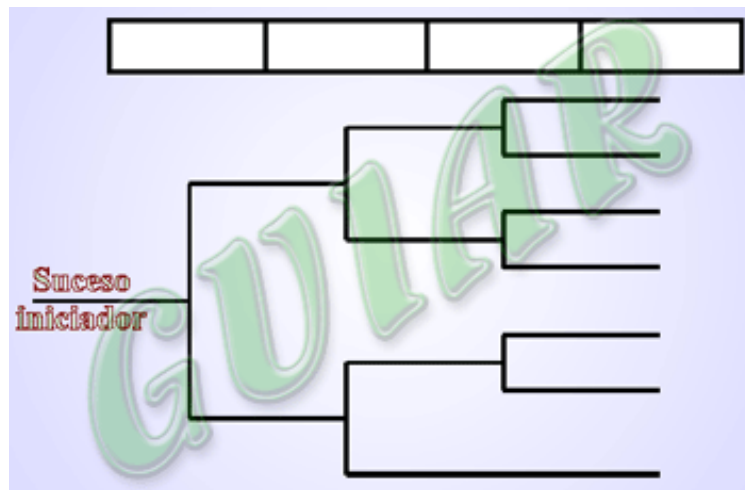
La técnica de análisis por árboles de sucesos consiste en evaluar las consecuencias de posibles accidentes resultantes del fallo específico de un sistema, equipo, suceso o error humano, considerándose como sucesos iniciadores y/o sucesos o sistemas intermedios de mitigación, desde el punto de vista de la atenuación de las consecuencias.

Las conclusiones de los árboles de sucesos son consecuencias de accidentes, es decir, conjunto de sucesos cronológicos de fallos o errores que definen un determinado accidente.

Partiendo del suceso iniciador, se plantean sistemáticamente dos bifurcaciones: en la parte superior se refleja el éxito o la ocurrencia del suceso condicionante y en la parte inferior se representa el fallo o no ocurrencia del mismo.

Un ejemplo se presenta en el esquema inferior.

Figura 13. Metodología Análisis por Árboles de Sucesos - AAS.



Fuente: http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/An_riesgo.htm. Teoría Análisis del Riesgo. GUIAR, Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos. . Universidad de Zaragoza – España.

El suceso iniciador puede ser cualquier desviación importante, provocada por un fallo de un equipo, error de operación o error humano.

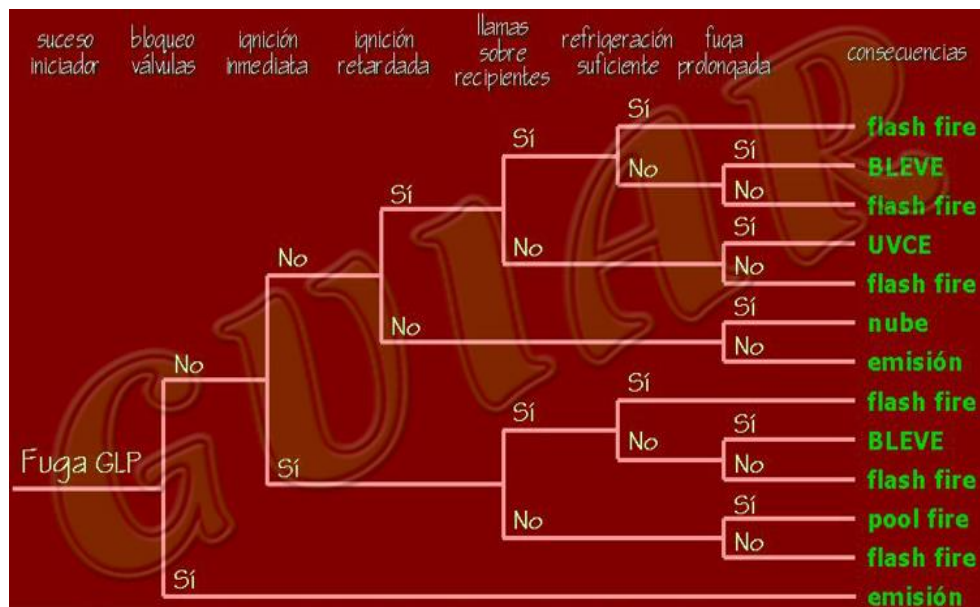
Dependiendo de las salvaguardias tecnológicas del sistema, de las circunstancias y de la reacción de los operadores, las consecuencias pueden ser muy diferentes.

Por esta razón, un AAS, está recomendado para sistemas que tienen establecidos procedimientos de seguridad y emergencia para responder a sucesos iniciadores específicos.

A continuación, se presenta un árbol de sucesos correspondiente a un suceso iniciador denominado "fuga de GLP en zona próxima a depósitos de almacenamiento".

Se estudian las distintas secuencias accidentales y las consecuencias posibles de cada una de ellas. Algunas de estas consecuencias no conllevan un peligro especial, pero otras representan sucesos verdaderamente peligrosos, como BLEVE, UVCE o incendios de charco.

Figura 14. Árbol de Sucesos para fuga de GLP en zona próxima a depósitos de almacenamiento.



Fuente: http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/An_riesgo.htm. Teoría Análisis del Riesgo. GUIAR, Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos. . Universidad de Zaragoza – España.

Posteriormente a este análisis Cualitativo, la estimación de la magnitud de cada suceso requiere de un análisis de consecuencias mediante modelos de cálculo adecuados, capaces de estimar los efectos del suceso contemplado.

El método se puede usar además para estimar las probabilidades de ocurrencia del suceso final, asignando valores de probabilidad al suceso incidental y valores sucesivos de probabilidad para cada acción enumerada en el árbol.¹⁶

3.3.10 Análisis de Modos de Fallo y Efectos (AMFE): Failure Modes and Effects Analysis (FMEA).

El método consiste en la elaboración de tablas o listas con los posibles fallos de componentes individuales, los modos de fallo, la detección y los efectos de cada fallo.

Un fallo se puede identificar como una función anormal de un componente, una función fuera del rango del componente, función prematura, etc.

Los fallos que se pueden considerar son típicamente situaciones de anormalidad tales como:

- a) *Abierto, cuando normalmente debería estar cerrado.*
- b) *Cerrado, cuando normalmente debería estar abierto.*
- c) *Marcha, cuando normalmente debería estar parado.*
- d) *Fugas, cuando normalmente deba ser estanco.*

Los efectos son el resultado de la consideración de cada uno de los fallos identificados individualmente sobre el conjunto de los sistemas de la planta o instalación.

¹⁶ http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/An_riesgo.htm. Teoría Análisis del Riesgo. GUIAR, Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos. . Universidad de Zaragoza – España.

El método FMEA establece finalmente qué fallos individuales pueden afectar directamente o contribuir de una forma destacada al desarrollo de accidentes de una cierta importancia en la planta.

Es un método válido en las etapas de diseño, construcción y operación y se usa habitualmente como fase previa a la elaboración de *árboles de fallos*, ya que permite un buen conocimiento del sistema. Con ciertas limitaciones se puede usar como método alternativo al *HAZOP*.

El equipo necesario suele ser de dos personas perfectamente conocedoras de las funciones de cada equipo o sistema así como de la influencia de estas funciones en el resto de la línea de proceso.

Es necesario para la correcta ejecución del método disponer de listas de equipos y sistemas, conocimiento de las funciones de cada equipo, junto al conocimiento de las funciones de los sistemas en su conjunto dentro de la planta.

Es posible incluir en la última columna de la tabla de trabajo lo que se denomina índice de gravedad, que representa mediante una escala del 1 al 4 un valor que describe la gravedad de los posibles efectos detectados.

El valor 1 representaría un suceso sin efectos adversos; el 2 efectos que no requieren parada del sistema; el 3 riesgos de cierta importancia que requieran parada normal y el 4 peligro inmediato para el personal e instalaciones, por lo que se requiere parada de emergencia.

En este caso, el análisis se denomina Análisis del Modo de Fallos, Efectos y Criticidad, **FMECA (AMFEC)**.¹⁷

¹⁷ http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/An_riesgo.htm. Teoría Análisis del Riesgo. GUIAR, Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos. . Universidad de Zaragoza – España.

En la Tabla 5 se presenta un ejemplo de formulario de trabajo para el análisis FMECA aplicado a un sistema de descarga de cisternas para tanques.

Tabla 5. Ejemplo de formulario de trabajo para el análisis FMECA aplicado a un sistema de descarga de cisternas para tanques.

Fecha:		Página:		De:	
Planta:			Analista:		
Sistema:			Referencia:		
Identificación del elemento	Designación	Modo de fallo	Detección	Efectos	Índice de gravedad
1	Manguera flexible	Agujereada	Visual	Derrame ¿incendio?	4
		Taponada-aplastada	Visual	Falta o reducción de caudal	2
		Tipo equivocado	Visual (marcas)	Corrosión, rotura o contaminación	3

Fuente: http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/An_riesgo.htm. Teoría Análisis del Riesgo. GUIAR, Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos. . Universidad de Zaragoza – España.

3.4 METODOLOGÍAS DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLOS.

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:¹⁸

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.

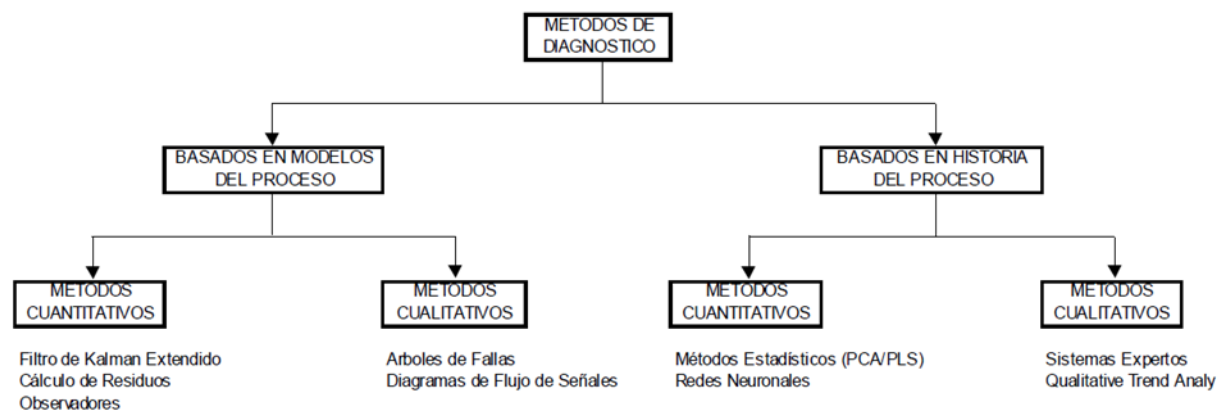
La falla puede ser tratada como un estado interno que cambia, un parámetro del proceso que cambia, o una entrada desconocida (perturbación). Cuando se calcula

¹⁸ Venkatasubramanian, V. et al. A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods. Computers and Chemical Engineering 27 (2003).

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), o modelos no-lineales basados en los principios físico-químicos subyacentes. La diferencia entre el modelo y el proceso real (denominada residuo) causará falsas alarmas si los umbrales son muy bajos, o fallas no detectadas si son muy altos.

Figura 15. Clasificación de los métodos de detección y diagnóstico de fallos¹⁹



Fuente: Agudelo C., Morant F.; Quiles E., García E. integración de técnicas para la detección temprana y el diagnóstico de fallo para mejorar la seguridad de proceso: Aplicación en un proceso de refinería del petróleo. 2012.

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.

Otra técnica muy utilizada ha sido la de los sistemas basados en conocimiento, 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

¹⁹ Agudelo C., Morant F.; Quiles E., García E. integración de técnicas para la detección temprana y el diagnóstico de fallo para mejorar la seguridad de proceso: Aplicación en un proceso de refinería del petróleo. 2012.

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.

Debido a la amplia aplicación de situaciones de diagnóstico de fallos al proceso y las dificultades de su solución en tiempo real, se han desarrollado a lo largo del tiempo enfoques que cubren una amplia variedad de técnicas tales como: clasificadores estadísticos, enfoque analítico y sistemas basados en conocimiento experto o redes neuronales en los estudios más recientes. Desde la perspectiva del modelado existen métodos que requieren modelos de proceso precisos, modelos semi-cuantitativos o cualitativos.

Por otro lado, hay métodos que no asumen ningún tipo de modelo de la información y se basan únicamente en información de la historia de los procesos.

Venkatasubramanian, V.²⁰, considera que el conocimiento a priori (*previo a - en algún sentido importante, es independiente de la experiencia*) es la característica distintiva más importante para elegir un sistema de diagnóstico.

El conocimiento básico a priori que se necesita para el diagnóstico de fallos es el conjunto de fallos y la relación entre las observaciones (síntomas) y los fallos.

Con base en lo anterior clasificó los métodos en: *Cualitativos, Cuantitativos y basados en la Data Histórica del Proceso, (Figura 16).*

Los sistemas de diagnóstico basados en modelo pueden ser ampliamente clasificados como Cualitativos o Cuantitativos. Los modelos se desarrollan sobre la base de una comprensión fundamental de la física y química del proceso. En los

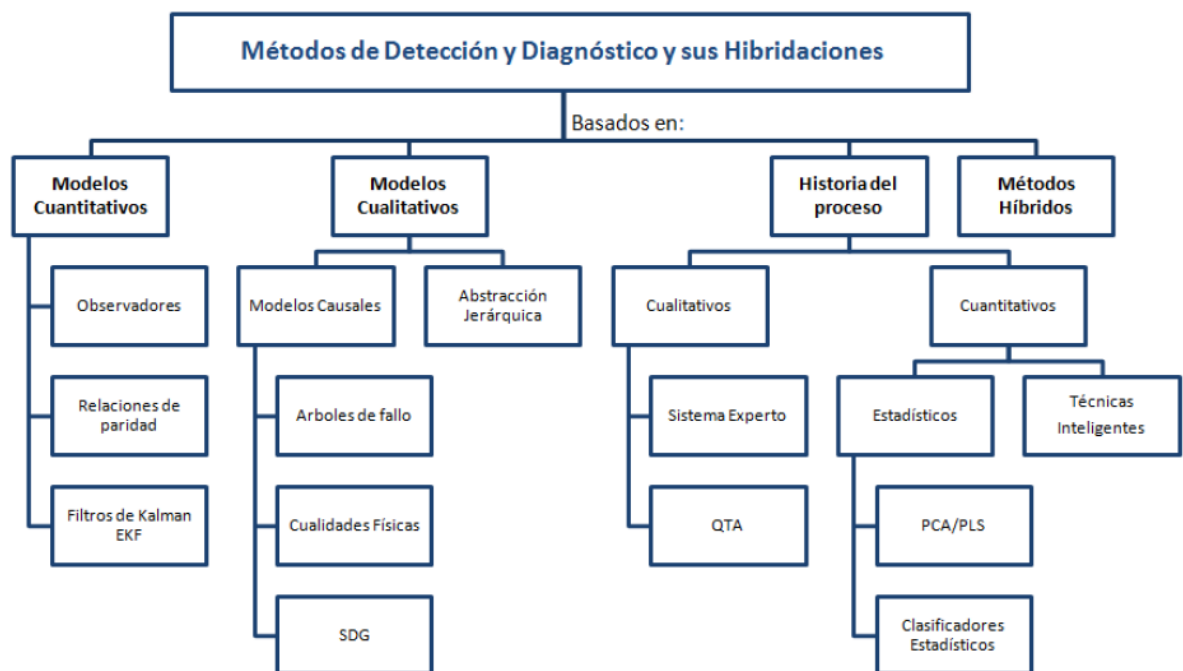
²⁰ Venkatasubramanian, V. (2003). Abnormal events managements in complex process plants: challenges and opportunities in intelligent supervisory control, 4th International Conference on Foundation of Computer-Aided Process Operations, FOCAPO 2003, Coral Springs-FL, USA.

modelos Cuantitativos este entendimiento se expresa en términos de relaciones de funciones matemáticas entre las entradas y salidas del sistema.

En contraste, los modelos Cualitativos expresan estas relaciones en términos de funciones Cualitativas Centradas en torno a diferentes unidades en un proceso.

Un sistema de diagnóstico puede contener el conocimiento a priori en forma explícita o puede deducirlo de alguna fuente o dominio del conocimiento, es decir, puede desarrollarse a partir de una comprensión fundamental del proceso utilizando principios fundamentales, tal conocimiento es el basado en modelos.

Figura 16. Clasificación de Técnicas de Detección y Diagnóstico de Fallos. 21



Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

²¹ Venkatasubramanian, V. (2003). Abnormal events managements in complex process plants: challenges and opportunities in intelligent supervisory control, 4th International Conference on Foundation of Computer-Aided Process Operations. 2003. Coral Springs-FL, USA.

Por otra parte, puede extraerse de la experiencia pasada del proceso, este conocimiento se conoce como superficial, compilado, evidencial, o conocimiento basado en la historia de procesos.

En el caso de los métodos basados en la historia del proceso se asume la disponibilidad de grandes cantidades de datos históricos del proceso.

Existen diferentes formas en que estos datos pueden ser transformados y presentados como un conocimiento a priori a un sistema de diagnóstico.

Esto se conoce como el proceso de extracción de características del proceso de datos de la historia, y se hace para facilitar el posterior diagnóstico.

3.4.1 Métodos de Diagnóstico basados en Modelos Cuantitativos.

Estos métodos se desarrollan con base en un conocimiento a priori y usualmente se fundamentan en leyes básicas de la física y química del proceso, obteniendo modelos matemáticos de espacio estado entre las entradas y salidas del sistema.

El proceso de detección y diagnóstico se realiza en dos pasos, primero se generan señales que contienen sólo información sobre las fallas (llamadas residuales) y el segundo paso consiste en la evaluación y análisis de dichos residuos.

En términos de las transformaciones en el espacio medido, en este enfoque, el residual de las ecuaciones actúa como espacio característico, es decir, como las características que son sensibles a una sola falla en algún momento. La evaluación residual usa mapas lógicos para transformar el espacio de características dependiendo del tipo de diseño de observador.

Si las fallas están disociadas, entonces el espacio de clase y espacio de decisión son los mismos. En cada aproximación basada en modelos cuantitativos el objetivo

es obtener un buen diseño de observador, aunque se presentan limitaciones debido a que existen espacios de observabilidad nula y con fallas en su interior.²²

Los sistemas industriales automatizados complejos son vulnerables a fallas en instrumentación como sensores, actuadores o componentes. La detección y localización de fallas (FDI), ha sido desarrollada tradicionalmente con un enfoque basado en modelos lineales. FDI es generar una alarma cuando ocurre una falla y de ser posible aislarla y estimar la magnitud de la falla e indicar el sensor o actuador con falla.

Diversos trabajos desarrollados han conducido a métodos robustos, a incertidumbres paramétricas y a errores de modelado del sistema, cuando el ruido está o no presente. Estos enfoques analíticos se limitan a manejar modelos lineales y en algunos casos modelos no lineales muy específicos.

Para un modelo no lineal, generalmente las aproximaciones lineales pueden llegar a ser pobres y por lo tanto la eficacia de estos métodos podría ser muy reducida. Otro problema en este enfoque es la aproximación simplista de los disturbios que incluye errores de modelado. En la mayoría de los casos, la matriz de perturbación incluye sólo la incertidumbre aditiva.

Sin embargo, en la práctica, se producen graves incertidumbres de modelado como consecuencia derivada de parámetros que se presentan en forma de incertidumbres multiplicativas.

Esta es una limitación general de todos los enfoques basados en modelo que se han desarrollado. Además de las dificultades relacionadas con la elaboración de modelos, estos no proporcionan una explicación con facilidad, debido a su carácter procedimental.

²² V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. Kavuri, and K. Yin, "A review of process fault detection and diagnosis Part III: Process history based methods," *COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING*, vol. 27. MAR 15 2003.

Además, no puede proporcionar una estimación a priori de la clasificación de los errores.

Otra desventaja de estos métodos es que si un fallo no es específicamente modelado (novedad, identificabilidad), no hay garantía de que los residuos sean capaces de detectarlo.

La adaptación de estos enfoques a las condiciones variantes del proceso no se considera.

Cuando se estudia un proceso a gran escala, el tamaño del banco de filtros puede ser muy grande, lo que aumenta la complejidad computacional; sin embargo, con el reciente aumento de potencia de cálculo y la naturaleza lineal esencial de estos problemas, esto no debería ser un cuello de botella serio.

3.4.1.1 Observadores.

El objetivo principal del observador basado en FDI es la generación de un conjunto de residuos que detectan e identifican de forma exclusiva fallas diferentes. Estos residuos deben ser robustos en el sentido de que las decisiones no deben ser alteradas por algún tipo de entrada desconocida como incertidumbres no estructuradas del proceso y la medición del ruido y las incertidumbres de modelado.

El método desarrolla un conjunto de observadores, cada uno de los cuales es sensible a un subconjunto de fallas, mientras es insensible a las faltas restantes y a las entradas desconocidas. Los grados de libertad adicionales resultantes de la edición y la redundancia del modelo hacen que sea posible la construcción de estos observadores.

La idea básica es que en un caso de falla libre, los observadores sigan el proceso de cerca y los residuos de las entradas que se desconocen sean pequeños. Si

ocurre una falla todos los observadores que se hagan insensibles a la falla por diseño deben continuar desarrollando residuos pequeños que sólo reflejen las entradas desconocidas.

Por otra parte, los observadores que sean sensibles a la falla se deben desviar de manera significativa del proceso y dar lugar a los residuos de gran magnitud.

El conjunto de observadores son diseñados de forma que los residuos de estos observadores resulten en un modelo residual distinto para cada fallo, lo que hace posible aislar la falla, de esta manera una falla asignada única se guarda por diseño y los observadores muestran completamente su disociación y la invariancia de las perturbaciones desconocidas mientras que se mantiene independiente de los modos de fallo y de la naturaleza de las perturbaciones.²³

Otros investigadores han analizado el problema de diseño de observadores no lineales para una clase restringida de sistemas no lineales. Diseño de observadores bilineales no lineales y basados en métodos de geometría diferencial (*Yang y Saif, 1995*).

Otro enfoque que puede ser utilizado en el diseño de observadores no-lineales consiste en el desarrollo de los *Filtros de Kalman* para la estimación de estado.

En este enfoque, la matriz de ganancia del observador se convierte en la variable tiempo y se linealiza la matriz de ganancia alrededor de un punto actual de operación. Estos observadores trabajan bien para fallas que varía lentamente, pero podría tener dificultades en la identificación de fallas con fluctuaciones.

La mayoría de los trabajos de diseño de observadores se centra en la generación de residuos para los sistemas dinámicos con propiedades de desvinculación satisfactoria.

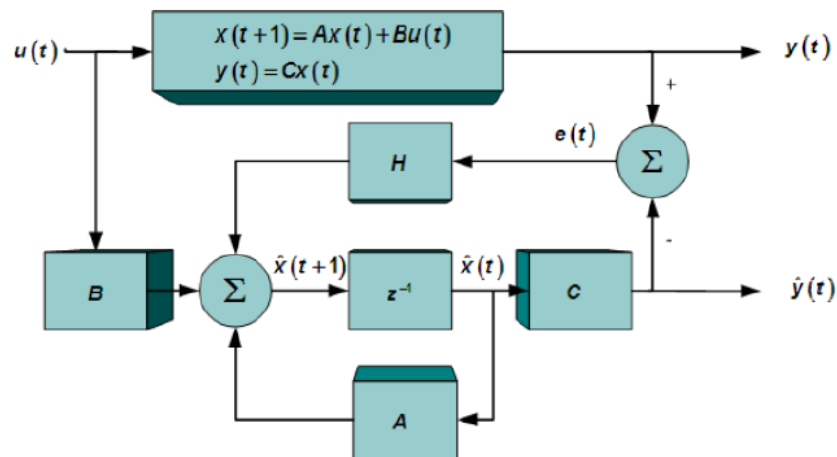
²³ Frank, P. M. (1994). On-line fault detection in uncertain nonlinear systems using diagnostic observers: a survey. *International Journal Systems Science*.

La evaluación residual también desempeña un papel importante en la detección de fallos posteriores y el diagnóstico. Parte de la evaluación residual considera el trade-off entre la detección rápida y fiable.

En la mayoría de los trabajos en el diseño de observador, se usa funciones simples para la evaluación residual, también pueden usarse clasificadores estadísticos. Existen adicionalmente enfoques basados en redes neuronales para la evaluación residual.²⁴

En la Figura 17, se presenta un esquema típico de un Observador.

Figura 17. Modelo de un Observador.



Fuente: Willsky A., Chow Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. IEEE Transaction Automatic Control. Vol. AC 29, 1984.

3.4.1.2 Relaciones de paridad.

Las ecuaciones de paridad re-organizan y transforman los modelos de entrada/salida o de espacio/estado de la planta. La esencia es comprobar la paridad

²⁴ Willsky A., Chow Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. IEEE Transaction Automatic Control. Vol. AC 29, 1984.

(coherencia) de los modelos de la planta con salidas de los sensores (mediciones) y entradas conocidas del proceso.

En el caso de estado estable ideal de operación, el valor del residual o de las ecuaciones de paridad es cero.

En situaciones reales, el residuo no es cero, debido a la medición y el ruido generado en el proceso, falta de precisión del modelo, graves errores en los sensores y los actuadores, y fallas en la planta.

La idea de este enfoque es la de re-organizar la estructura del modelo a fin de obtener el mejor aislamiento de la falla. Las relaciones de paridad dinámica fueron introducidas por *Willsky (1976)*.

Vaclavek (1984), sugirió el uso de medias de corto plazo de las ecuaciones residuales de balance de estado de estacionario.

Almasy y Sztano (1975), utilizaron los residuos para identificar el sesgo de las fallas.

La redundancia proporciona la libertad en el diseño de ecuaciones de generación de residuales de modo que se pueda alcanzar el aislamiento de las fallas, el cual requiere la capacidad de generar vectores residuales que son ortogonales entre sí por las diferentes fallas.

Ben-Haim (1980), utilizó la redundancia en las ecuaciones de equilibrio para la generación de residuales ortogonales para diferentes las clases de falla. También extendió el enfoque (*Ben-Haim, 1983*) a los sistemas dinámicos para garantizar aislabilidad en condiciones ideales.

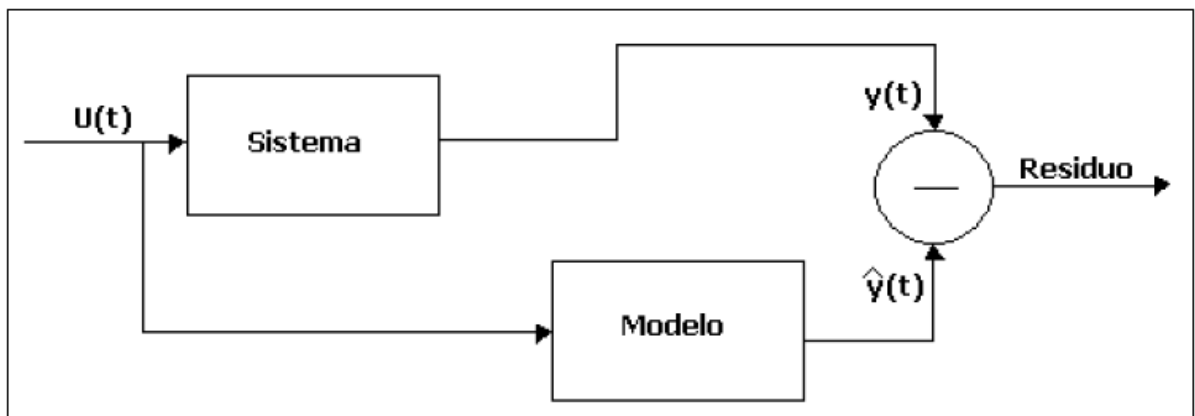
Chow y Willsky (1984), proponen un procedimiento para generar ecuaciones de paridad con representaciones de espacio/estado de un sistema dinámico. Al definir los tamaños marginales de las alarmas de fallo.

Gertler y Singer (1990), extendieron la aislabilidad estadística en condiciones de ruido y generalizaron los criterios aislabilidad por reducción simultánea de la sensibilidad de los residuos de pequeñas desviaciones en los casos que la planta sólo tienen fallas aditivas.

Son alternativas atractivas debido a su capacidad para determinar, a priori, aislabilidad de diferentes fallas; sin embargo, debe señalarse que todos estos métodos se limitan a las fallas que no incluyen parámetros derivados del proceso neto y ninguno de aborda el grado significativo de incertidumbre en fallas paramétricas multiplicativas.²⁵

En la Figura 18, se observa un esquema general del modelo de relaciones de paridad.

Figura 18. Esquema Relaciones de Paridad.



Fuente: Celse,B. Cauvin,S. Heim,B. Gentil,S. Travé-Massuyès,L. Modelo basado en un módulo de diagnóstico para una planta piloto de FCC. Oil & Gas Science and Technology, Vol. 60 (2005).

3.4.1.3 Filtros de Kalman.

Los disturbios que se presentan generalmente en planta son fluctuaciones aleatorias y muchas veces sólo se conocen parámetros estadísticos.

Una solución al problema de diagnóstico de fallas en estos sistemas implica una supervisión del proceso de innovación o predicción de errores.

²⁵ Celse,B. Cauvin,S. Heim,B. Gentil,S. Travé-Massuyès,L. Modelo basado en un módulo de diagnóstico para una planta piloto de FCC. Oil & Gas Science and Technology, Vol. 60 (2005).

El objetivo es diseñar un estimador de estado con un mínimo de error de estimación. Se trata de la estimación de estado óptimo, por ejemplo, el filtro de Kalman, está diseñado sobre la base del modelo del sistema en su modo de funcionamiento normal.

El filtro de Kalman es un algoritmo recursivo para la estimación del estado aplicado ampliamente en procesos industriales. El filtro de Kalman en un modelo de espacio estado es equivalente a un factor de predicción óptimo para un sistema lineal estocásticos en un modelo de entrada /salida.

Se puede ver que una de las principales ventajas de utilizar el enfoque de los modelos Cuantitativos es que tendrán algún control sobre el comportamiento de los residuos. Sin embargo, varios factores, tales como complejidad del sistema, alta dimensionalidad, no linealidad proceso y/o falta de buenos datos a menudo hacen que sea muy difícil incluso poco práctico, desarrollar una matemática exacta del modelo de un sistema. Esto, por supuesto, limita la utilidad de este enfoque en procesos industriales reales.

La evaluación de los residuos implica generalmente un umbral de pruebas. Se han usado pruebas estadísticas para la generación de residuales de relaciones de paridad, así como para diseños basados en observadores. Los residuos de diagnóstico están correlacionados, por medio de procedimientos complicados de diseño y ejecución (*Gertler y Yin, 1996*).

Para manejar mejor la correlación, la distribución de la probabilidad de los residuos correlacionados, así como la derivación de los movimientos de sus medias se aplica la prueba de relación de promedio generalizada a los residuales correlacionados para la detección y el aislamiento.

3.4.1.4 Técnicas de Monitoreo de Condición.

Son técnicas diseñadas para realizar una evaluación de criticidad de los equipos, teniendo en cuenta, el impacto de una falla en la seguridad de las personas e

instalaciones, en el medio ambiente y en la operación. Cada técnica de Monitoreo de Condición posee un área de aplicación, donde su sensibilidad es máxima. Muchas veces se utilizan en forma combinada con técnicas de diagnósticos formales o inteligentes para complementar e incrementar su poder de detección. Estas técnicas son aproximaciones muy buenas del sentido humano, sin embargo, la limitación de estos dispositivos, es que están diseñados para monitorear solamente una condición de acuerdo a los efectos de fallos.

➤ **Mantenimiento Predictivo.**

Se enfoca en los síntomas de falla, utilizando distintas técnicas, como por ejemplo, análisis de lubricantes, análisis de vibraciones, ensayos no destructivos.

➤ **El Monitoreo de Condición.**

De forma similar que el Mantenimiento Predictivo, se enfoca también a los efectos o síntomas de las fallas, utilizando distintas técnicas para monitorear la eficiencia de un equipo, a través de la medida y seguimiento de determinados parámetros físicos, para lograr anticiparse a la falla, por ejemplo,

- Inspecciones de la maquinaria con los sentidos: Inspección visual, olor, ruidos anormales, vibraciones, temperatura.
- Inspecciones de la maquinaria a través de Ensayos No Destructivos: Inspección visual, inspección por ultrasonido, partículas magnéticas radiografías.
- Monitoreo de las condiciones dinámicas de la maquinaria: Vibraciones, monitoreo de la temperatura inspección mediante termografía infrarroja, monitoreo de espesores, mediante ultrasonido, monitoreo de partículas de desgaste en los aceites, monitoreo de la condición del lubricante, análisis de corrientes en máquinas eléctricas.
- Medición del desempeño de equipos: Presión, Caudal, Potencia entregada, Consumo eléctrico, Consumo de combustible.

Cada técnica posee su campo de aplicación, donde es mayor su poder de detección, así como también la aplicación combinada de varias técnicas puede potenciar y complementar su eficacia.

Ejemplos de Técnicas por clase de equipos:

Compresores: Inspección con los sentidos, Análisis de aceite, análisis de vibraciones, termografía. Monitoreo del performance, detección de fugas por ultrasonido. **Motores eléctricos:** Análisis de vibraciones, tomografía, condiciones eléctricas, etc.

Motores diesel: Inspecciones con los sentidos, Análisis de aceite, Monitoreo del desempeño La inspección con los sentidos, combinada con instrumentos de detección simple, puede convertirse en una herramienta muy poderosa de un Plan de Monitoreo de Condición, con mejor relación costo- beneficio.

➤ **Mantenimiento Proactivo.**

Se enfoca en disminuir las consecuencias de las fallas, y maximizar la vida útil de las máquinas, buscando las causas de falla, para lo que utiliza las mismas herramientas que el Monitoreo de Condición, cuando a través del Monitoreo, se detectan magnitudes fuera de sus límites condonatorios, es necesario Programar y Planificar una Acción Correctiva, para reparar la falla El Plan de Monitoreo, debe diseñarse sin olvidar, cómo afecta a la Confiabilidad Operacional, la Confiabilidad Humana y la Confiabilidad del Proceso. Además el Plan de Monitoreo, puede ayudar a detectar fallas prácticas operativas, las cuales deben ser corregidas de inmediato. La sobre exigencia de los equipos, ocasiona un deterioro acelerado e incremento de fallas en los mismos.²⁶

²⁶ Woodhouse J. "Mantenimiento Centrado en Confiabilidad". The Woodhouse Partnership. 2000.

3.4.2 Métodos de Diagnóstico basados en Modelos Cualitativos.

Estos métodos se desarrollan con base en un conocimiento a priori, obteniendo funciones cualitativas que relacionan las entradas y salidas del sistema y proporcionan estrategias de detección y diagnóstico de fallos. La base de un conocimiento cualitativo a priori sólido es un buen conjunto de fallos y la correcta relación entre las observaciones (síntomas) y los fallos encontrados.

Un SDDF basado en modelos cualitativos se puede obtener en forma explícita (como en una tabla look-up) o puede deducirse de alguna fuente de conocimiento del dominio a priori, el cual puede ser desarrollado también a partir de una comprensión fundamental del proceso.

Los modelos cualitativos pueden desarrollarse como modelos causales o jerarquías de abstracción. Existen fundamentalmente dos enfoques diferentes para la búsqueda del diagnóstico de fallos topográficos y sintomáticos.

El enfoque topográfico realiza búsquedas de análisis de fallos utilizando un modelo de funcionamiento normal, mientras que el enfoque sintomático dirige la búsqueda a la ubicación del fallo.

El desarrollo de sistemas basados en conocimientos de expertos fue el primer intento de capturar el conocimiento para obtener conclusiones en una metodología formal.

La desventaja con este tipo de representación del conocimiento es que no tiene mucha comprensión de la física del sistema, y por lo tanto en los casos en que se encuentra una nueva condición no se define en la base de conocimientos.

3.4.2.1 Modelos causales basados en Grafos.

Esta técnica proporciona una forma muy eficiente de representar modelos cualitativos gráficamente.

El diagnóstico, se refiere a la deducción de la estructura del comportamiento, deducido sobre las relaciones de causa y efecto en el proceso que se traducen en el mal funcionamiento del sistema. Las relaciones de causa-efecto pueden ser representadas en forma de dígrafos, la técnica es llamada SDG (Sistema de Detección por Grafos).

El grafo es un gráfico dirigido con arcos entre nodos con una dirección positiva o negativa asociada. Cada nodo corresponde a la desviación de una variable respecto a la constante estado.

Vaidhyathan y Venkatasubramanian²⁷, utilizaron modelos basados dígrafo para realizar análisis HAZOP. (Hazard and Operability, que traduce Análisis de Riesgos y Operabilidad). Además del proceso de nodos variables, los arcos correspondientes contienen los conocimientos necesarios para la identificación de peligros en el análisis HAZOP.

Estos nodos se pueden unir a las variables del proceso y se realiza para generar desviaciones en las variables de proceso utilizando palabras apropiadas de guía como MENOS DE, MÁS DE etc. y encontrar todas las posibles consecuencias adversas que se propagan. Los resultados muestran que tal enfoque mejora la exactitud de la resolución.

²⁷ Venkatasubramanian, V. (2003). Abnormal events managements in complex process plants: challenges and opportunities in intelligent supervisory control, 4th International Conference on Foundation of Computer-Aided Process Operations. 2003. Coral Springs-FL, USA.

3.4.2.2 Análisis por Árboles de Fallos (AAF). Fault Tree Analysis, FTA.

Los árboles de fallos se utilizan en el análisis de la fiabilidad y seguridad del sistema. La técnica consiste en un árbol lógico que propaga eventos primarios o fallas a un evento de nivel superior o cualquier riesgo y permite establecer un primer conjunto de hipótesis de fallas. En cada nodo o capa se desarrollan diferentes operaciones lógicas como AND y O donde se lleva a cabo para la propagación.

Un análisis general de árbol de fallas se compone de los siguientes pasos:

- a) Definición del sistema.
- b) La construcción de árbol de fallas.
- c) La evaluación cualitativa.
- d) La evaluación cuantitativa.

El Análisis por Árboles de Fallos (AAF), es una técnica deductiva que se centra en un suceso accidental particular (accidente) y proporciona un método para determinar las causas que han producido dicho accidente.

El hecho de su gran utilización se basa en que puede proporcionar resultados tanto cualitativos mediante la búsqueda de caminos críticos, como cuantitativos, en términos de probabilidad de fallos de componentes.

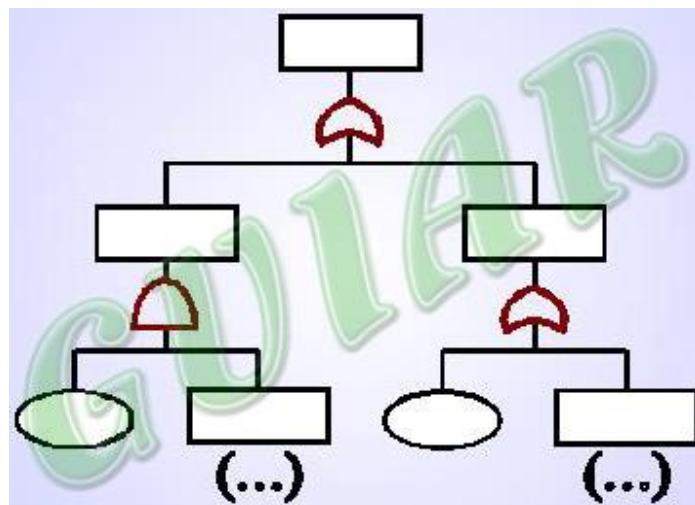
Para el tratamiento del problema se utiliza un modelo gráfico que muestra las distintas combinaciones de fallos de componentes y/o errores humanos cuya ocurrencia simultánea es suficiente para desembocar en un suceso accidental.

La técnica consiste en un proceso deductivo basado en las leyes del Álgebra de Boole, que permite determinar la expresión de sucesos complejos estudiados en función de los fallos básicos de los elementos que intervienen en él.

Consiste en descomponer sistemáticamente un suceso complejo (por ejemplo rotura de un depósito de almacenamiento de amoniaco) en sucesos intermedios hasta llegar a sucesos básicos, ligados normalmente a fallos de componentes, errores humanos, errores operativos, etc.

Este proceso se realiza enlazando dichos tipos de sucesos mediante lo que se denomina puertas lógicas que representan los operadores del álgebra de sucesos. Cada uno de estos aspectos se representa gráficamente durante la elaboración del árbol mediante diferentes símbolos que representan los tipos de sucesos, las puertas lógicas y las transferencias o desarrollos posteriores del árbol.²⁸

Figura 19. Ejemplo de Árbol de Fallos.



Fuente: http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/An_riesgo.htm. Teoría Análisis del Riesgo. GUIAR, Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos. . Universidad de Zaragoza – España.

Los símbolos representan tanto sucesos, puertas lógicas y transferencias. Los más importantes son los siguientes:

²⁸ http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/An_riesgo.htm. Teoría Análisis del Riesgo. GUIAR, Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos. . Universidad de Zaragoza – España.

Figura 20. Simbología construcción Árbol de Fallos. Fuente: GUIAR, Universidad de Zaragoza - España.



Fuente: http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/An_riesgo.htm. Teoría Análisis del Riesgo. GUIAR, Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos. . Universidad de Zaragoza – España.

Con esta simbología, el árbol de fallos se va desarrollando, partiendo como se ha comentado de un suceso no deseado o accidental que ocupa la cúspide del árbol. A partir de este suceso, se van estableciendo de forma sistemática todas las causas inmediatas que contribuyen a su ocurrencia definiendo así los sucesos intermedios unidos mediante las puertas lógicas.

Es una metodología que se puede aplicar a sucesos relativamente complejos para los cuales intervienen muchos elementos y que se pueden descomponer en sucesos más sencillos. Requiere de uno o dos analistas con amplia experiencia y conocimiento del sistema a analizar, frecuentes consultas a técnicos, operadores y personal experimentado en el funcionamiento del sistema y la documentación necesaria consiste en diagramas de flujos, instrumentación, tuberías, junto con procedimientos de operación/mantenimiento.²⁹

²⁹ http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/An_riesgo.htm. Teoría Análisis del Riesgo. GUIAR, Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos. . Universidad de Zaragoza – España.

Antes de su construcción el analista debe poseer una comprensión completa del sistema. De hecho, una descripción del sistema es también una parte de la documentación de análisis (*Bennetts, 1974*).

El árbol de fallas se construye haciendo preguntas sobre que podría causar un evento de primer nivel. Para responder a esta cuestión, genera otros eventos conectados por la lógica de nodos. El árbol se expande de esta manera hasta que encuentra eventos primarios, los cuales no necesariamente se desarrollan.

Una vez que el árbol de fallas es construido, el siguiente paso en el análisis es la evaluación basada en el desarrollo del mínimo set de corte, que se define como "una colección de todos los fallos primarios que son necesarios y suficientes para provocar que el sistema falle por el límite mínimo fijado en cuestión". Un mínimo set de corte establecido identifica el componente crítico de la falla. En la evaluación cuantitativa, el conocimiento sobre la probabilidad de ocurrencia de eventos primarios se utiliza para calcular la probabilidad de fracaso del evento del nivel superior.

La evaluación intermedia que se utiliza aquí es la evaluación de la probabilidad de ocurrencia de nivel superior eventos y no la exactitud del árbol de fallas. Lo anterior promueve la reducción de las soluciones falsas y representaciones concisas del sistema. El problema más grande con esta técnica es que el desarrollo es propenso a los errores en las diferentes etapas. El árbol de fallas construido es tan bueno como el modelo mental concebido por el desarrollador. Para realizar un buen diagnóstico debe representar la relaciones del proceso causal (explicar todos los escenarios de fallo). No existen métodos formales para verificar la exactitud de esta técnica.

El proceso de información se presenta en forma de modelos de unidad y la topología de proceso que muestra la información de conectividad entre las unidades. La Unidad de modelos representa la forma y como las variables están relacionadas tanto con la unidad de trabajo y cuando no.

El problema de la síntesis de árbol de fallos puede formularse como una búsqueda de espacio de estado finito. Dado un estado inicial, el algoritmo se aplica como "operadores" que pueden transformar el estado inicial a un estado objetivo. Estos operadores como "Y", "O" y "XOR" utilizan esta transformación. El estado inicial es el evento principal. El estado final es el árbol de fallo que conecta el evento superior a todos los posibles eventos primarios.³⁰

3.4.3 Métodos basados en la Historia del Proceso.

En estos métodos solo se requiere la disponibilidad de una cantidad de información relacionada con datos históricos del proceso. La forma como son transformados estos datos en conocimiento a priori es llamado extracción de características. Para su estudio se clasifican en ***Cualitativos y Cuantitativos***.

3.4.3.1 Métodos Cualitativos basados en la Historia del Proceso.

Estos métodos aunque están basados en la historia del proceso se desarrollan con base en características Cualitativas del proceso, este conocimiento se fundamenta en la experticia de expertos que han adquirido su experiencia a través varios años de trabajo en el área.

3.4.3.1.1 Sistema Experto.

Un Sistema Experto generalmente es un sistema de extracción de características muy especializado que resuelve problemas en un estrecho dominio del conocimiento. Los principales componentes de un sistema experto son:

- Adquisición de conocimientos.
- Elección de la representación del conocimiento.
- Codificación del conocimiento en una base de conocimientos.

³⁰ Fussell, J. B. (1974). Fault tree analysis state of the art. IEEE Transactions on Reliability.

- Desarrollo de procedimientos de inferencia para el razonamiento diagnóstico y el desarrollo de la interface entrada/ salida.

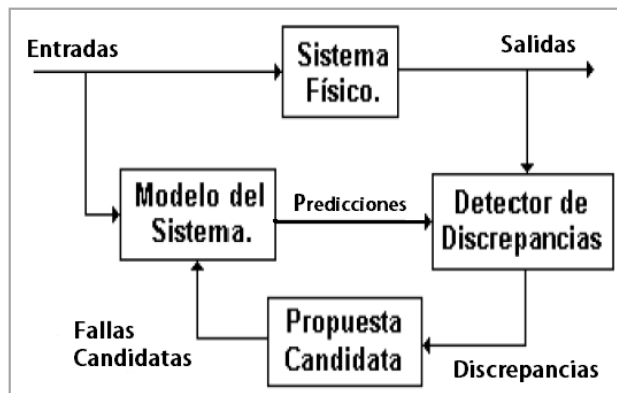
Las principales ventajas al desarrollar sistemas expertos de diagnóstico de problemas son la facilidad de desarrollo, razonamiento transparente, capacidad de razonamiento bajo incertidumbre y capacidad de proporcionar explicaciones de las soluciones previstas.

3.4.3.1.2 Inteligencia Artificial.

Es usada bastante en las industrias de procesos químicos; ya son conocidas aplicaciones de sistemas expertos, redes neuronales, lógica difusa y algoritmos genéticos.

Estas tecnologías tienen aplicaciones en la simulación, optimización y diseño de procesos, en sistemas de entrenamiento de personal, en programación de producción y personal, en gerencia de proyectos, en sistemas soportes para el mejoramiento de la calidad o para ayudar a operadores y técnicos en la toma de mejores decisiones para el desempeño de la planta, en sistemas de diagnóstico de problemas en equipos y plantas, y en sistemas de control más riguroso y eficiente.³¹

Figura 21. Esquema de SDDF de un método basado en Inteligencia Artificial.



³¹ Sacks D., E. Qualitative analysis of piecewise linear approximation. Journal of Artificial Intelligence in Engineering 3. 1988.

3.4.3.1.3 Conocimiento Experto.

Los sistemas basados en conocimientos se crean usando conocimientos de expertos humanos, así como de las ciencias básicas y la ingeniería.

La base de conocimientos se puede mejorar continuamente con la entrada continua de información por las personas que usan el sistema o por el conocimiento adicional ganado por inferencia que hace el sistema a través de su propia "experiencia".

Estos sistemas son útiles, por ejemplo, en la síntesis y diseño de procesos, en el que proveen no sólo información sino herramientas para hacer mejores juicios.

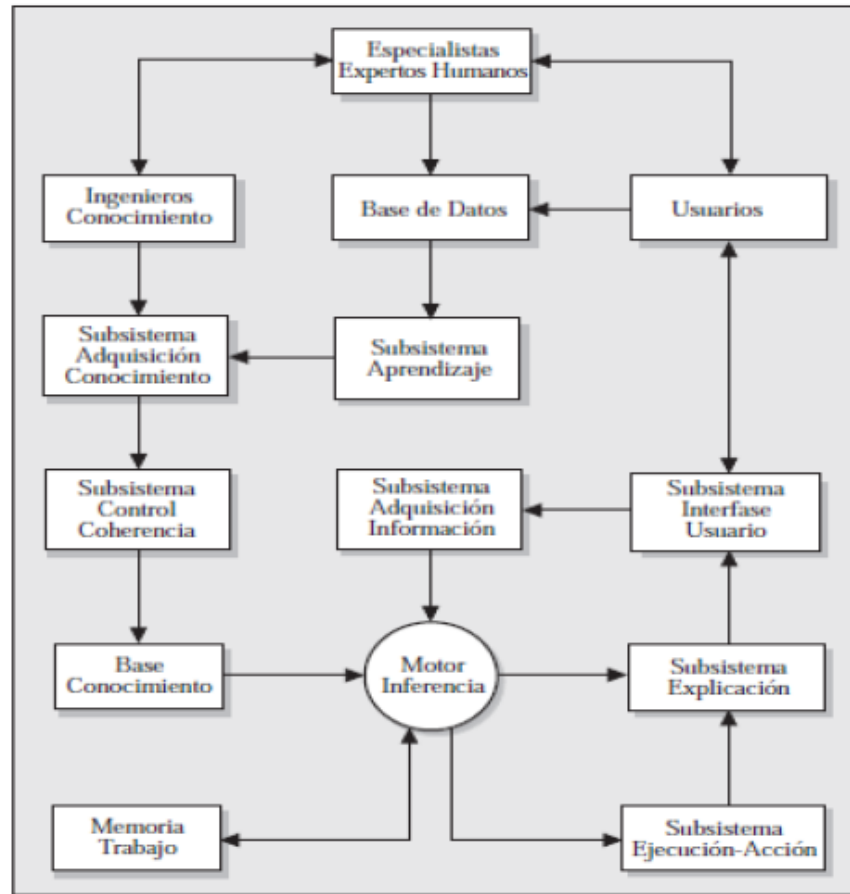
Otra aplicación está en el análisis de alarma y manejo de situaciones anormales de operación en planta.

Un operario puede tomar decisiones cruciales rápidamente si está auxiliado por un sistema experto que le anticipa al operador condiciones anormales mucho antes de que suene una alarma.

El sistema le puede proveer información soporte para la decisión, tales como posibles causas del problema y opciones para su decisión. Un sistema experto también puede diseñarse para monitorear un proceso en tiempo real, interpretar las condiciones de alarma, y alertar a operarios y técnicos sobre posibles acciones de corrección.

Además, un sistema experto puede usarse para hacer control proactivo de un proceso, si está diseñado para recoger datos y calcular tendencias estadísticas, suministrar una interpretación y alertar sobre tendencias estadísticas de variables claves del proceso antes de que ocurra una perturbación en el sistema, Figura 22.

Figura 22. Modelo de Sistema Experto.



Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

3.4.3.1.4 Análisis de tendencias cualitativas (QTA).

Un enfoque para la extracción de características cualitativas basado en la captación de información sobre la tendencia. El análisis de tendencias y la predicción son componentes importantes del proceso de monitoreo y control de supervisión. La modelización de tendencias se puede utilizar para explicar los diversos acontecimientos importantes que están ocurriendo en el proceso, hacer el diagnóstico y predecir el mal funcionamiento en futuros estados.

Desde un punto de vista del proceso, se debe emplear algún tipo de filtrado con el fin de obtener una señal de la tendencia no demasiado susceptible a las variaciones momentáneas debidas al ruido. Las representaciones de series de tiempo suponen,

a priori, cierta conducta que se a identificando utilizando comportamiento conocido del proceso.

Alternativamente, se puede sólo utilizar un filtro (como un filtro auto-regresivos) con coeficientes de un filtro elegido a priori (especificando el grado de suavizado necesario). Ambos tipos de filtros no pueden distinguir bien entre una inestabilidad transitoria y una verdadera (*Gertler, 1989*). Las características cualitativas esenciales pueden ser distorsionadas por estos filtros. Evitar este problema requiere que la tendencia sea vista desde diferentes escalas de tiempo a diferentes niveles de abstracción. La abstracción cualitativa permite una representación compacta de la tendencia mediante la representación de sólo los eventos importantes. Para tareas como el diagnóstico, la representación de la tendencia cualitativa a menudo proporciona una valiosa información que facilita el razonamiento sobre el proceso de comportamiento. En la mayoría de los casos, un mal funcionamiento de proceso produce una tendencia clara en los sensores de seguimiento. Estas tendencias distintas pueden ser debidamente utilizadas en la identificación de la anomalía subyacente en el proceso. Así, una adecuada clasificación y un análisis de las tendencias del proceso se puede detectar, lo que puede conducir a un rápido control. También, la técnica QTA puede allanar el camino para compresión de datos eficiente, como construcción de marco formal para la representación de las tendencias del proceso.

3.4.3.2 Métodos Cuantitativos basados en la Historia del Proceso.

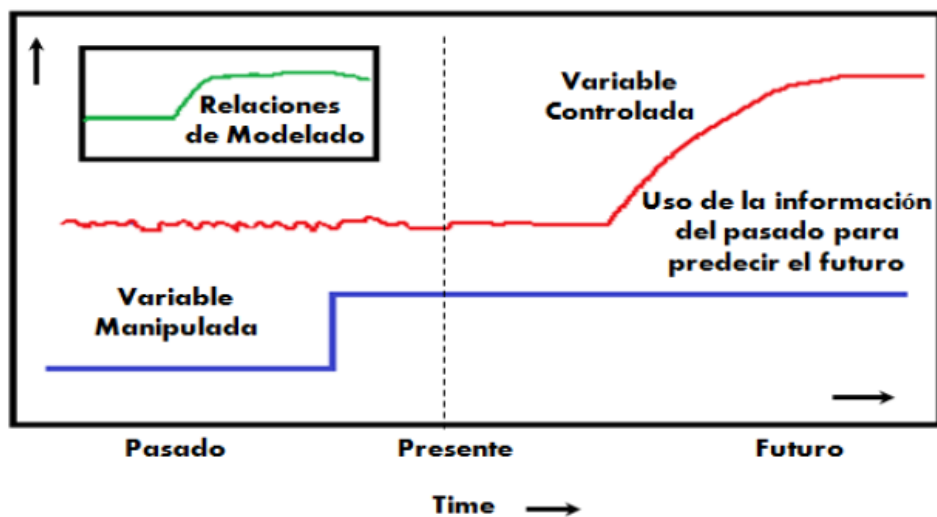
El enfoque Cuantitativo formula el problema de diagnóstico y resolución como reconocimiento de patrones. El objetivo de reconocimiento de patrones es la clasificación de los datos por puntos, en general, predeterminado clases.

Los métodos estadísticos usando conocimientos a priori de distribución de clases para realizar la clasificación. Un ejemplo, es un clasificador Bayes que utiliza las funciones de densidad de las respectivas clases.

3.4.3.2.1 Método de detección y diagnóstico de fallos basado en el Modelo Escalón Unitario.

El modelo empleado para realizar las predicciones es un modelo tipo respuesta escalón, utilizado en control multivariable predictivo (MPC) para predecir la conducta de las variables controladas a partir de los movimientos estimados para las variables manipuladas como se aprecia en la *Figura 23*.

Figura 23. Modelo tipo Escalón Unitario.



Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

El control MPC es implementado al sistema de control avanzado para las plantas de proceso.

Tiene varias ventajas sobre otras técnicas de control ya que incorpora un modelo de proceso explícito en el cálculo de control y debido a su estrecha relación con los procesos de optimización, permite hacer frente a proceso de acoplamiento multivariables, respuesta inversa, tiempo de los retrasos, limitaciones de proceso, modelado de incertidumbres y errores de medición.

Con el fin de detallar la estructura del modelo para el control de sistemas con múltiples regímenes de operación, el método presentado está basado en un trabajo de Debin Sun y Karlene Hoo.

Inicialmente se define el error como el valor absoluto puntual entre la salida del proceso y los modelos del proceso en operación normal y cada una de las fallas. Luego se halla un umbral de error permisible para considerar al proceso libre de falla, sobre la base de los históricos y el conocimiento heurístico del proceso.

El Proceso de Detección y Diagnóstico de falla se lleva a cabo en dos etapas: la primera etapa consiste en una primera verificación en línea. La detección de la falla se realiza con la medida de los valores de error. Según sea este error, se genera un código que indica si existe un desajuste del proceso. A partir de este código se verifica la existencia o no de la falla.

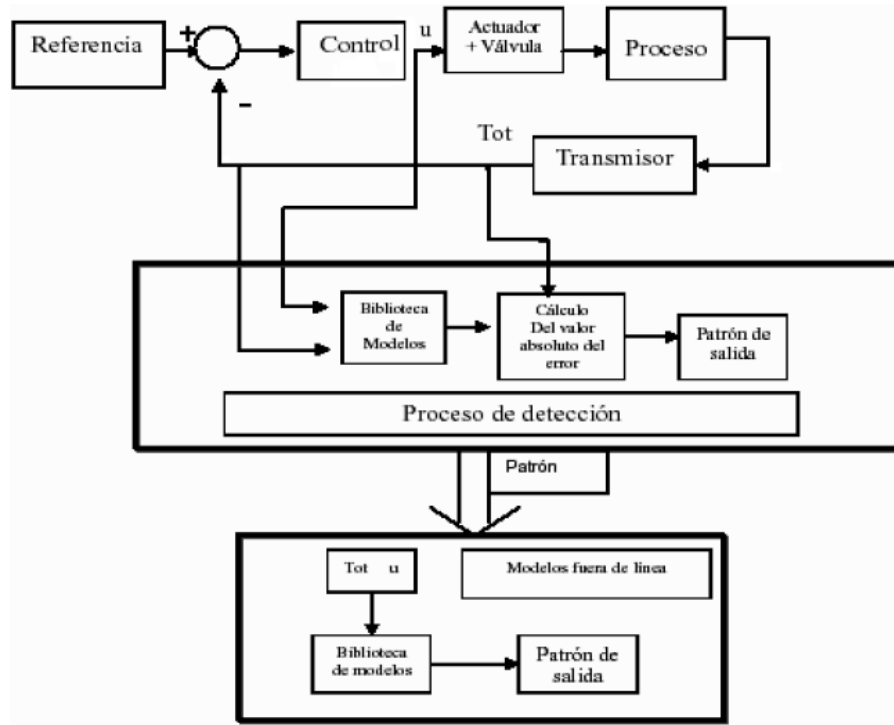
En esta segunda etapa se calculan los errores entre la salida registrada del proceso y la salida de otro banco de modelos que han sido hallados previamente en las vecindades de los distintos tipos de fallas que fueron identificadas en la primera etapa, procediéndose así al proceso exacto de detección. Cuando ocurre un cambio de referencia, es detectado antes y serán activados los modelos correspondientes a este valor de referencia.

Este sistema de detección utiliza la información proveniente del proceso, mediante el uso de medidores que permiten el flujo de datos hacia el sistema de detección según el esquema de la Figura 24.

El patrón de salida es mostrado y se toma la decisión si existe o no la anormalidad y si es necesario pasar a la segunda etapa. En ese caso se enviará una señal para

el comienzo de registro de los datos para el proceso fuera de línea ya descrito antes.³²

Figura 24. Esquema de implementación de un SDDF tipo Escalón Unitario.



Fuente: Davis, R. Diagnosis reasoning based on structure and behavior. Artificial Intelligence. 1984.

Cuando un proceso industrial presenta desviaciones en sus parámetros, sus salidas generalmente no corresponden a los valores normales dentro del rango de operación. Estas desviaciones podrían ser causadas por desperfectos o mal funcionamiento de los dispositivos implicados dentro de dicho proceso. Las salidas no deseadas son consideradas fallas, es decir, desviaciones del comportamiento normal de la planta o de su instrumentación.

³² Davis, R. Diagnosis reasoning based on structure and behavior. Artificial Intelligence. 1984.

En forma similar en este enfoque se ha planteado la técnica de estructuras de transición robusta que ha mostrado ser efectiva para el control de procesos con múltiples regímenes o puntos de operación.³³

Por lo anteriormente expuesto se propone el uso de la técnica estructura de transición robusta para la detección y diagnóstico de fallas. Por las características del método y de los sistemas a los que se aplica (cambio en el régimen de operación), las estructuras de transición se plantean como alternativa para la detección de fallas, pues en este caso también se presentan cambios en las características del proceso que son tomadas en cuenta para el diseño del método, que incluye una biblioteca de modelos representativos de las fallas, estimándose así entonces que las estructuras de transición son viables para la detección y diagnóstico de fallas.

- **Biblioteca de Modelos:** Se construyen modelos identificando los modelos lineales en cada uno de los diferentes regímenes de operación.
- **Biblioteca de controladores candidatos:** deberá ser diseñado un controlador por cada régimen de operación o cada modelo nominal.
- **Supervisión de Transición:** La función de este bloque es decidir mediante lógica cuál de los controladores candidatos es el mejor para mantener el proceso y cuando debe ser colocado en el lazo de realimentación del proceso.

³³ Davis, R. *Diagnosis reasoning based on structure and behavior. Artificial Intelligence. 1984.*

4. METODOLOGIA PROPUESTA PARA EL DESARROLLO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO BASADA EN EL ANÁLISIS DE FALLOS EN UNA UNIDAD CRACKING CATALÍTICO FLUIDIZADO – FCC.

4.1 PROCEDIMIENTO DE LA METODOLOGÍA.

Para la realización y desarrollo de la metodología propuesta se tuvo en cuenta que los sistemas de detección y diagnóstico de fallos son una estrategia para mejorar la confiabilidad operacional, la cual está definida como una serie de procesos de mejora continua, que incorporan en forma sistemática, avanzadas herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis, cálculo de riesgo y criticidad, entre otras técnicas, con el propósito de optimizar la gestión, planeación y control de la producción industrial.

4.1.1 Recopilación y Compilación de Información.

Con el propósito de realizar y ejecutar el presente trabajo se realiza una compilación, clasificación, recopilación y extracción del estado del arte de sistemas de detección y diagnóstico de fallos, estudio de los estados en general del proceso y estudio de diferentes metodologías de confiabilidad industrial.

Se realizó una revisión exhaustiva del proceso obteniendo la siguiente información:

- Manuales de Diseño, esquemáticos del sistema y Operación de los Sistemas.
- Listas de Comprobación, diagramas de bloques.
- P&ID's actualizados del proceso sistema.
- Manuales de los equipos pertenecientes al sistema, que puedan contener información valiosa sobre el diseño y la operación.
- Archivos y documentos históricos de los equipos que puedan contener la historia de fallas y mantenimientos correctivos realizados a los equipos.

Nota: Esta información se ha venido recolectando sobre las fallas presentes en la Unidad UOP1-FCC desde el año 2008 y se obtiene a través del Sistema de Información de la Refinería de Barrancabermeja - RIS (Refinery Information System) herramienta disponible on line en el sistema.

4.1.2 Cálculo del Riesgo para la Unidad de Cracking Catalítico - FCC.

El riesgo base y el riesgo remanente de la planta son calculados sólo para referencia, dado que son generados con el escenario de falla múltiple de todos los equipos, el cual es teórico.

La utilidad de este cálculo es conocer qué tan efectivas son las tareas de mantenimiento planeado para disminuir el riesgo base hasta el riesgo remanente. El riesgo es una medida de las pérdidas económicas, daños ambientales o daños ocurridos a seres humanos, y está dado en términos de la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado (frecuencia) y la magnitud de la pérdida o daño (consecuencias).

Es decir,

$$\text{Riesgo} = f(\text{Frecuencia, Consecuencia})$$

Y está definido como:

$$\text{Riesgo} = \sum_{i=1}^n P_{f_i} f_{f_i} C_{f_i}$$

Donde,

P_{f_i} : es la Probabilidad de falla del evento.

f_{f_i} : es la Frecuencia del evento.

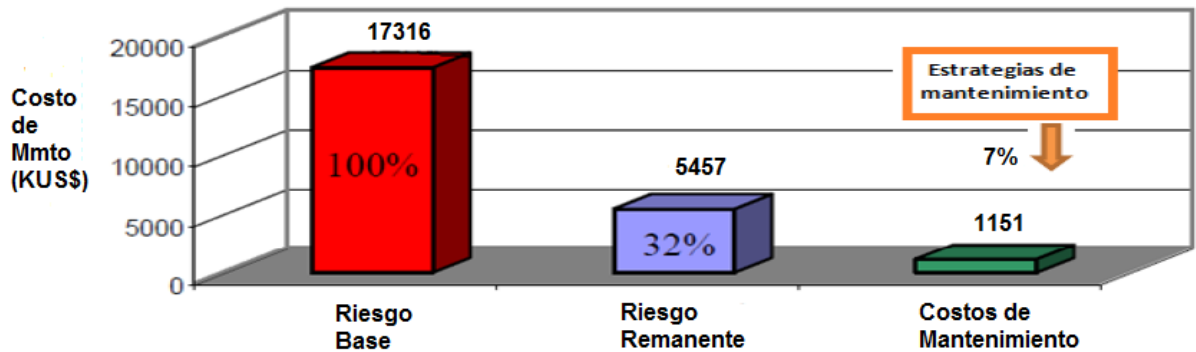
C_{f_i} : es el Costo asociado a esa falla.

El riesgo base estimado se calcula por medio de la suma del riesgo de todos los equipos bajo el escenario de “Cero Mantenimiento” y el riesgo remanente o residual (aquél que permanece después de que la dirección desarrolle sus respuestas a los riesgos) por medio de la suma del riesgo de todos los equipos mantenidos, en el escenario del mantenimiento definido.

En la Figura 25, se muestra el riesgo estimado de la planta cracking UOP1 de la Refinería de Barrancabermeja, donde al invertir en estrategias de mantenimiento un 7% del costo del riesgo base, se logra su reducción en un 68%.

De todas maneras, este riesgo remanente debería tender a Cero, razón por lo cual se generan las tareas de acción “Action List”, con el fin de reducir, mediante tareas diferentes a las de mantenimiento planeado el riesgo de falla de los equipos y así aumentar las confiabilidad de la planta.

Figura 25. Riesgo estimado de la unidad cracking UOP1.



Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo principal de diseñar un sistema de identificación y detección de fallos, consiste en llevar al sistema de cracking catalítico fluidizado a la zona de Iso-Riesgo, con lo que se logra el incremento de la confiabilidad operacional del sistema.

El riesgo se calculó mediante las expresiones matemáticas (Woodhouse, 2001):

Riesgo = Frecuencia de Fallas x Consecuencias
Frecuencia = Número de Fallas en un tiempo determinado
Consecuencia = ((Impacto Operacional x Flexibilidad) + Costos Mtto. + Impacto SAH)

El riesgo busca realizar un diagnóstico integrado para caracterizar el estado actual y predecir el comportamiento futuro de los equipos, debido a lo anterior se calcula usando la mayor cantidad posible de información, historiales de falla, datos técnicos, datos de condición, para identificar acciones correctivas y proactivas que pueda efectivamente optimizar costos y minimizar su impacto en el negocio.

4.1.3 Metodología de Cálculo y Análisis de Criticidad.

El análisis de criticidad es una herramienta que permite identificar y jerarquizar por su importancia los elementos de una instalación sobre los cuales vale la pena dirigir recursos (humanos, económicos y tecnológicos).

En otras palabras, el análisis de criticidad ayuda a determinar eventos potenciales indeseados, en el contexto de la confiabilidad operacional, entendiéndose confiabilidad operacional como: *la capacidad de una instalación (procesos, tecnología, gente), para cumplir su función o el propósito que se espera de ella, dentro de sus límites de diseño y bajo un contexto operacional específico en un tiempo determinado.*

El término “**crítico**” y la definición de criticidad pueden tener diferentes interpretaciones y van a depender del objetivo que se está tratando de jerarquizar.

Desde esta óptica existen una gran diversidad de herramientas de criticidad, según las oportunidades y las necesidades de la organización.³⁴

- *Flexibilidad operacional (disponibilidad de función alterna o de respaldo).*
- *Efecto en la continuidad operacional / capacidad de producción.*
- *Efecto en la calidad del producto.*
- *Efecto en la seguridad, ambiente e higiene (SAH).*
- *Costos de paradas y del mantenimiento.*
- *Frecuencia de fallas / confiabilidad.*
- *Condiciones de operación (temperatura, presión, fluido, caudal, velocidad).*
- *Flexibilidad / accesibilidad para inspección & mantenimiento.*
- *Requerimientos / disponibilidad de recursos para inspección y mantenimiento.*
- *Disponibilidad de repuestos.*

Para la aplicación del análisis de Criticidad en la Unidad de Craqueo Catalítico tipo UOP, primero se debe identificar todos los equipos a analizar, luego se procede a emplear los siguientes pasos:

- 1) Se realiza una tabla donde se especifica los valores de la consecuencia a considerar para uno de los equipos, así mismo la probabilidad.

El cálculo de la Criticidad de equipos es:

$$\textbf{Criticidad = Consecuencias de fallas x Probabilidad}$$

El análisis de criticidad es una herramienta que permite identificar y jerarquizar, en función de su impacto global e importancia, a los equipos dentro de una planta, con

³⁴ Woodhouse J. "Criticality Analysis Revisited", The Woodhouse Partnership Limited, Newbury, England 1994.

el objetivo de fijar prioridades en el momento de planificar el mantenimiento preventivo basado en tiempo, basado en condición, y correctivo.

Para calcular la Criticidad de un equipo dentro de una planta o sistema, se debe aplicar un criterio determinístico que transforme las características cualitativas de ese equipo (flexibilidad, impacto en producción, costos de reparación, impacto ambiental, confiabilidad operacional, etc.) en un valor numérico que permita clasificarlo objetivamente, en relación con el resto de los equipos de la planta o sistema.

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia de fallas} * \text{Consecuencia de fallas}$$

Donde:

Frecuencia: Es la cantidad de fallas dentro de un tiempo determinado.

Rango de Fallas en un tiempo determinado (Fallas/Año).

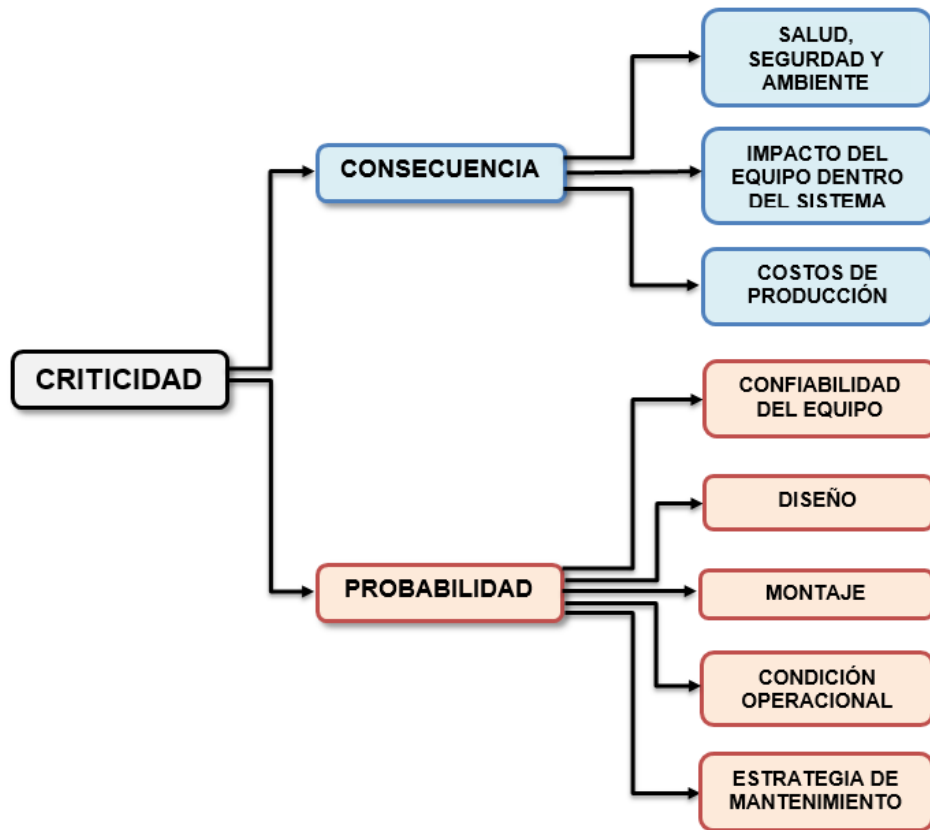
Consecuencia: {Impacto Operacional * Flexibilidad} + Costo de Reparación (Mmto) + Impacto en Seguridad, Ambiente e Higiene (SHA) (\$, \$US)

Este es un método semi-cuantitativo bastante sencillo y práctico, soportado en el concepto del **Riesgo = Frecuencia de Fallas x Consecuencias**.

Para obtener el nivel de Criticidad de cada sistema se toman los valores totales individuales de cada uno de los factores principales: Frecuencia y Consecuencias y se ubican en la Matriz de Criticidad - **valor de Frecuencia en el eje Y, valor de Consecuencias en el eje X**.

Estas variables dependen de los criterios mostrados en la Figura 26.

Figura 26. Cálculo de la Criticidad.

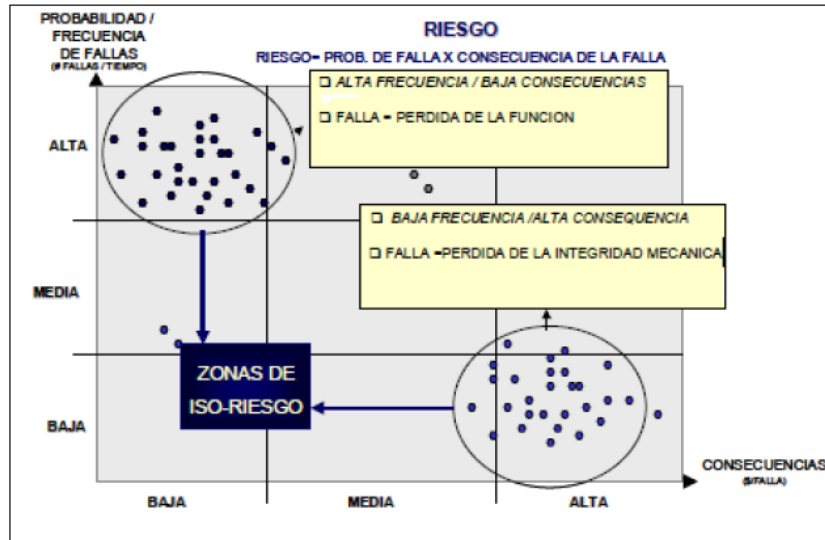


Al completar el cálculo de Criticidad para un grupo de equipos, estos se dividen en tres clases: **los de Alta Criticidad, los de Media Criticidad y los de Baja Criticidad**. Esas clases constituyen “bandas de criticidad” y los valores límites deben ser determinados por la Unidad de producción.

Como se muestra en la Figura 27, existen zonas de Iso-riesgo donde la Consecuencia y la Probabilidad son iguales; zonas de alta Frecuencia/baja Consecuencia donde la Falla es debido a la perdida de la función; y zonas de baja Frecuencia y alta Consecuencia donde la Falla es producto de la perdida de integridad mecánica.³⁵

³⁵ Woodhouse J. “Mantenimiento Centrado en Confiabilidad”. The Woodhouse Partnership. 2000.

Figura 27. Esquema de evaluación de riesgo.



Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

a) En las Tablas 6, 7 y 8, se registran los criterios de decisión para valorar la **Consecuencia**:

Tabla 6. Criterios de decisión Consecuencia - SSA.

SALUD, SEGURIDAD Y AMBIENTE (SSA)	
VALOR	DESCRIPCIÓN
5	Efecto potencial en cuanto a: <ul style="list-style-type: none"> • Fatalidades. • Contaminación Extensiva (Fugas >100 bls). • Fuego en áreas clasificadas Sistema definitivamente inoperable.
4	Efecto potencial en cuanto a: <ul style="list-style-type: none"> • Incapacidad parcial o total. • Contaminación Moderada o Extensiva (Fugas 10 a 100 bls). • Se compromete la integridad operativa de equipos, controlan directamente hidrocarburos.

3	<p>Efecto potencial en cuanto a:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento médico. • Contaminación reversible (1 a 10 bls). • Se compromete la integridad operativa a equipos de sistemas auxiliares o de apoyo a la producción.
2	<p>Efectos potenciales en cuanto a:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lesiones menores. • Contaminación fácil recuperación (< 1bl). • Efectos sobre la seguridad del sistema al que pertenece.
1	<p>Sin efectos potenciales en cuanto a:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lesiones. • Contaminación. • Efectos sobre la seguridad del sistema.

Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

Tabla 7. Criterios de decisión Consecuencia - IS.

IMPACTO DEL EQUIPO DENTRO DEL SISTEMA (IS).	
VALOR	DESCRIPCIÓN
5	Interrupción de la producción. Causa Parada del Sistema.
4	Produce gran disminución en la capacidad del sistema. No tiene equipo de stand by y el tiempo de reparación o cambio es significativo.
3	Produce mediana disminución en la capacidad del sistema. Tiene equipo de stand by y el tiempo de reparación es corto.
2	Produce poca disminución en la capacidad del sistema.

	Tiene equipo de stand by. Su funcionamiento no se requiere todo el tiempo.
1	Sin Efecto sobre la capacidad del sistema.

Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

Tabla 8. Criterios de decisión Consecuencia - CP.

COSTOS DE PRODUCCIÓN (CP)	
VALOR	DESCRIPCIÓN
5	>50.000 U\$
4	25.000 a 50.000 U\$
3	10.000 a 25.000 U\$
2	1.000 a 10.000 U\$
1	1.000 a 10.000 U\$

Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

$$\text{Consecuencia} = (\text{SSA} \cdot 0.45 + \text{IS} \cdot 0.3 + \text{CP} \cdot 0.25)$$

Donde:

SSA: Salud, Seguridad Y Ambiente.

IS: Impacto del equipo dentro del Sistema.

CP: Costos de Producción.

b) Ahora para valorar la **Probabilidad** se tiene en cuenta las Tablas 9, 10, 11, 12 y 13 presentadas a continuación:

Tabla 9. Criterios de decisión Frecuencia de Falla – Confiabilidad del Equipo.

CONFIABILIDAD DEL EQUIPO	
VALOR	DESCRIPCIÓN
1	Alta confiabilidad. Normalmente no tiene partes en movimiento y trabajo liviano.
2	Muy confiable. Pocas partes en movimiento y trabajo normal.
3	Normalmente confiable. Partes en movimiento que se pueden fatigar y condiciones de trabajo severas.
4	Algo confiable. Sistema complejo, condiciones de trabajo muy severas y sobrecargadas.
5	No ofrece ninguna confiabilidad.

Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

Tabla 10. Criterios de decisión Frecuencia de Falla - Diseño.

DISEÑO	
VALOR	DESCRIPCIÓN

1	Se cuenta con registros y copias diseño original.
2	Se cuenta con planos de diseño y/o diseños similares.
3	No se cuenta con documentación se toman de diseños similares.
4	Los parámetros de funcionamiento difieren en uno o más ítems.
5	No se cuenta realmente con documentación.

Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

Tabla 11. Criterios de decisión Frecuencia de Falla - Montaje.

MONTAJE	
VALOR	DESCRIPCIÓN
1	Se cuenta con los registros de Calidad y Aseguramiento.
2	Se efectuó pre-commissioning, registros y se realizan pruebas.
3	Evidencias de condiciones sub-estándar en montaje y fundaciones.
4	No se cuenta con registros, se cuenta con historia de fallas en fundaciones.
5	Presencia de fallas en fundaciones.

Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

Tabla 12. Criterios de decisión Frecuencia de Falla – Condición Operación.

CONDICIÓN OPERACIÓN	
VALOR	DESCRIPCIÓN
1	Registros y parámetros de operación acordes al diseño original.
2	Registros con desviaciones puntuales y leves.
3	Registros muestran fuertes desviaciones respecto a diseño original.
4	Evidencias de desviaciones operacionales pero no son evaluadas ni controladas.
5	No existen registros de operación ni acciones a tomar.

Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

Tabla 13. Criterios de decisión Frecuencia de Falla – Estrategia de Mantenimiento.

ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO	
VALOR	DESCRIPCIÓN
1	Estrategia bien definida e implementada acorde a estándares clase mundial.
2	Estrategia definida pero no implementada completamente.
3	Estrategia no definida, no existen registros formales de actividades ejecutadas.
4	Se ejecuta mantenimiento insipiente, inexperto y aleatorio buscando evitar fallas repetitivas.
5	Mantenimiento se ejecuta como reacción a fallas.

Fuente: Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

Para el cálculo de la probabilidad se toma el valor máximo entre los ítems evaluados y se compara usando la siguiente Matriz mostrada en la Figura 28.

Figura 28. Matriz de Criticidad de Equipos.

FRECUENCIA	5	5	10	15	20	25
	4	4	8	12	16	20
	3	3	6	9	12	15
	2	2	4	6	8	10
	1	1	2	3	4	5
		1	2	3	4	5
CONSECUENCIA						

Fuente: Instructivo para uso de la matriz de evaluación de riesgos – RAM. Ecopetrol S.A.

Para obtener el nivel de Criticidad de cada sistema se toman los valores totales individuales de cada uno de los factores principales: Frecuencia y Consecuencias y se ubican en la Matriz de Criticidad, **valor de Frecuencia en el eje Y, valor de Consecuencias en el eje X.**

La definición de las áreas de la Matriz está determinada por:

- **AREA COLOR ROJO** Puntaje $15 < R < 25$. (H).
- **AREA AMARILLA** Puntaje $5 < R < 15$. (M).
- **AREA VERDE** Puntaje $1 < R < 5$. (L).

Equivalencia Abreviaturas según estándar Norsok-Z008:

- **3 = Puntaje $15 < R < 25$. (Criticality Class High).**
- **2 = Puntaje $5 < R < 15$. . (Criticality Class Medium).**
- **1 = Puntaje $0 < R < 5$. . (Criticality Class Low).³⁶**

4.1.4 Análisis de Confiabilidad.

La Refinería caso de estudio Planta UOP1, definió el análisis de criticidad con base en la metodología S-RCM (Shell – Reliability Centred Maintenance) Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, que se basa en un plan de actividades para aumentar la confiabilidad de los equipos y generar estrategias de mantenimiento confiable planeado (*metodología para el desarrollo de un plan de mantenimiento basada en el análisis de fallos de la instalación*).

- Mantenimiento Proactivo (condición y programado).
- Mantenimiento a Falla.
- Cuidado básico de equipos.

En el análisis de criticidad desarrollado se tuvo en cuenta la totalidad de equipos que actualmente desarrollan una función dentro de la planta, de acuerdo con el alcance definido para este estudio y han sido distribuidos por especialidad y clase de equipos, según se muestra en la Tabla 14.

³⁶ Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

Tabla 14. Cantidad de equipos por especialidad.

Especialidad	Clase de equipo	Cantidad
Equipos estáticos (EST)	Tambores	57
	Torres	18
	Intercambiadores	103
	Reactores	2
	Hornos	2
	Silenciadores	4
	Eyectores	20
	Filtros	15
	Equipos estáticos	7
Equipos Rotatorios (ROT)	Bombas	96
	Compresores	7
	Centrifugas aceite	4
	Turbinas	37
Instrumentos (INS)	Sistema de monitoreo en línea	6
	Instrumentos	629
Equipos eléctricos (ELE)	Equipos eléctricos	88
	Total	1095

En la **Figura 29**, se muestra gráficamente la **distribución de equipos por especialidad**, donde la especialidad “Instrumentación” es la de mayor aporte, pero cuyas consecuencias, en su gran mayoría no afectan la producción.³⁷

Igual comportamiento tienen los modos de falla para el equipo estático (el proceso RBI – Inspección Basada en Riesgos cubre los modos de falla que afectan la integridad de estos equipos).

Las especialidades Rotatoria y Eléctrica, aunque son las de menor aporte en cantidad, tienen modos de falla que en su mayoría afectan la producción.

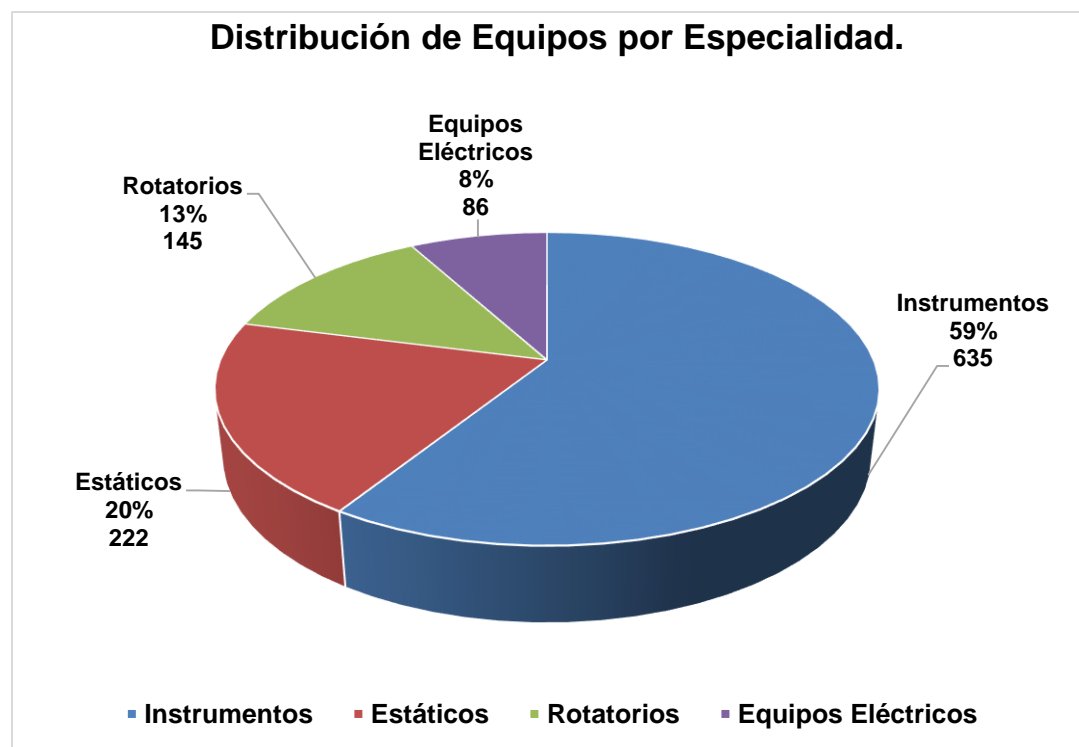
³⁷ Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

La inspección basada en el riesgo (RBI) es un proceso que sirve para identificar, evaluar y definir los riesgos industriales, que pudieran poner en peligro la integridad de los equipos, tanto presurizados como estructurales.

La RBI aborda los riesgos que se pueden controlar mediante inspecciones y análisis adecuados.

Durante el proceso de RBI, los ingenieros diseñan la estrategia a seguir en la inspección (qué, cuándo, cómo inspeccionar) que se adapte mejor a los mecanismos de degradación que se hubieran previsto u observado.

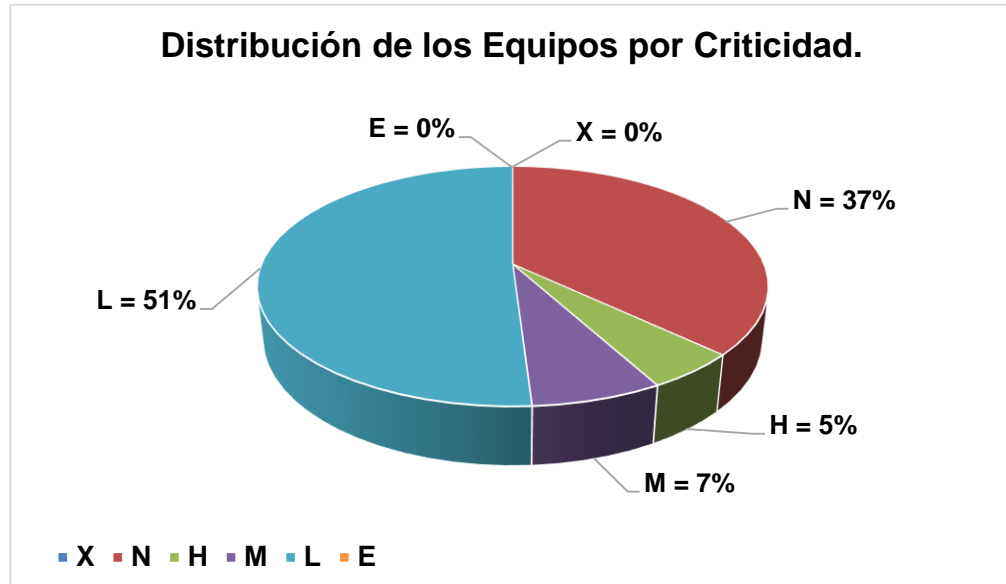
Figura 29. Distribución de equipos por Especialidad.



❖ **Distribución de los equipos por Criticidad.**

En la Figura 30, se muestra la distribución de equipos por Criticidad.

Figura 30. Distribución de los equipos por Criticidad.



Donde,

X: Unacceptable (Inaceptable) en las escalas de Probabilidad y Consecuencias.

E: Extensive (Extensiva) en las escalas de Probabilidad y Consecuencias.

H: High (Alto) en las escalas de Probabilidad y Consecuencias.

M: Médium (Medio) en las escalas de Probabilidad y Consecuencias.

L: Low (Bajo) en las escalas de Probabilidad y Consecuencias.

N: Negligible (Insignificante) en las escalas de Probabilidad y Consecuencias.

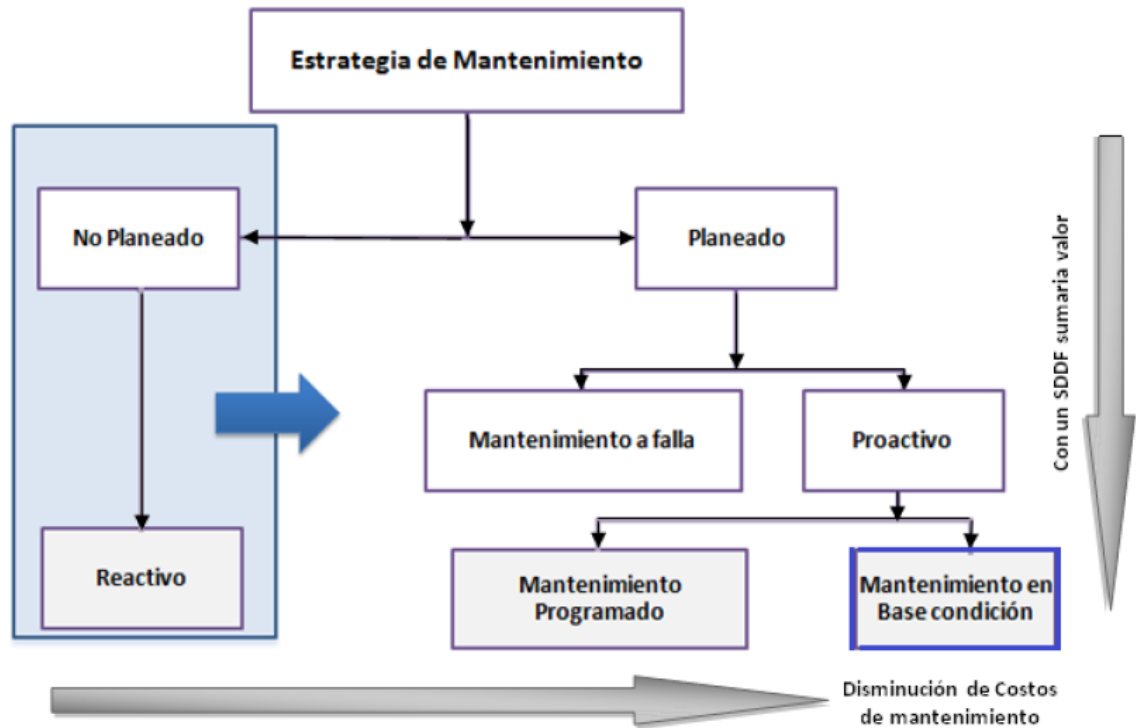
Se aprecia en la Figura 30, que el 88% de los equipos presenta una criticidad igual a “Despreciable” = N, o “baja” =L.

Ninguno está clasificado con criticidad “Inaceptable” = X.

Por lo anterior, los esfuerzos del mantenimiento proactivo deben estar centrados en el 12% de equipos restantes, los cuales fueron clasificados en “Medio” = M, “Alto” = H o “Extensivo” = E.

La estrategia de mantenimiento obtenida por el estudio de S-RCM de la Planta Cracking UOP1 se basa en la filosofía de trabajar con un mantenimiento planeado, minimizando el mantenimiento no planeado o reactivo. Figura 31.

Figura 31. Esquema de Mantenimiento en la planta UOP1.



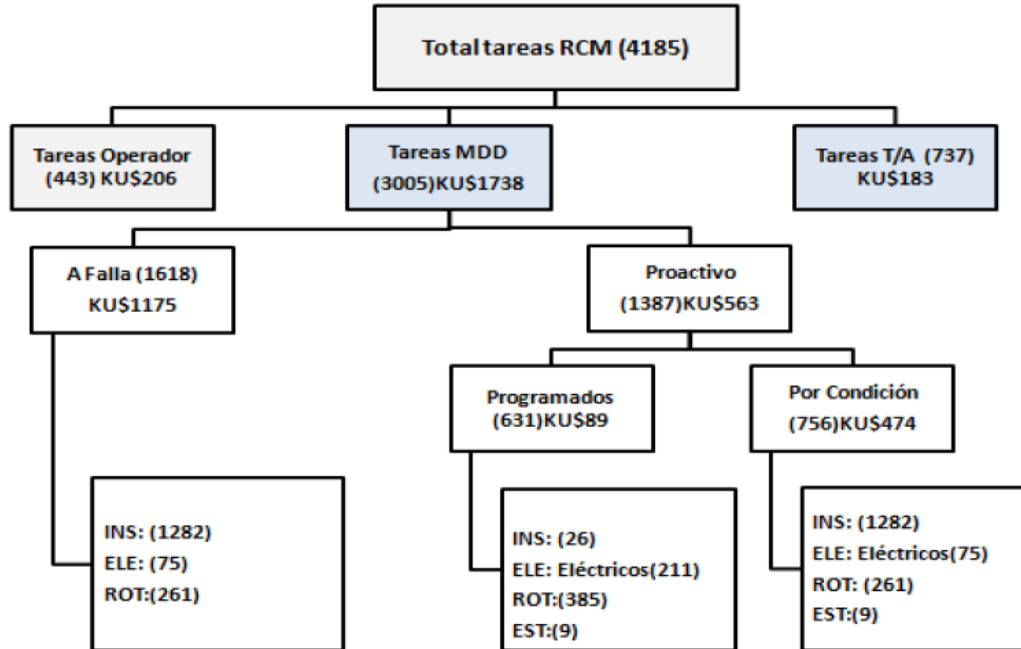
El mantenimiento planeado incluye el trabajar equipos a falla, en los casos en que el mantenimiento preventivo posible es más costoso que la reparación del equipo cuando falle.

En este análisis se incluye las pérdidas de producción (generalmente nulas) y se analiza la eficacia de las tareas preventivas propuestas.

Los resultados de seguir esta estrategia de mantenimiento, en todos los equipos de la Cracking UOP1, se resumen en la Figura 32.³⁸

³⁸ Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

Figura 32. Estrategia de mantenimiento y costos.



- *INS: Instrumentos.*
- *ROT: Equipo Rotativo.*
- *EST: Equipos Estáticos.*
- *ELE: Equipos Eléctricos.*

Según los resultados mostrados en la Figura 32, el mantenimiento planeado (MDD) constituye el mayor número de tareas y costos, valor muy por encima de las tareas que realiza el operador y las de Turnaround (T/A) (proyecto de parada de planta).

Además, se aprecia que el mantenimiento a falla es más costoso que el proactivo, aunque el mantenimiento proactivo solo constituye el 12% de la criticidad de la planta, se observa también que los equipos rotatorios (ROT) son los que presentan el mayor porcentaje criticidad haciendo parte de la clasificación extensiva y alta, pero solo aportan el 13% de la distribución de los equipos en la planta.

La mayor influencia en el mantenimiento a falla del equipo rotatorio (ROT), está representado por 19 equipos, con un riesgo total de KU\$655, las cuales corresponden a las turbinas de vapor de los compresores (falla del rotor) y a las bombas que manejan productos tóxicos o altamente inflamables (falla del sello mecánico).

Como resultado del anterior análisis RCM se logró identificar los equipos de mayor criticidad por especialidad y el modo de falla, esta información se encuentra a continuación en la Tabla 15, donde se aprecian que los equipos rotatorios son los que presentan la mayor criticidad clasificada como E (Extensiva) como se mencionó en el desarrollo del trabajo.³⁹

³⁹ Grupo de Automatización y Control – Edificio 9, Piso 2. Instituto Colombiano del Petróleo-ICP, Km. 7 Vía a Piedecuesta (Santander).

Tabla 15. Clasificación de equipos por especialidad según criticidad.

ESPECIALIDAD	RAM	MODO DE FALLA	DESCRIPCION DEL EQUIPO
Rotatorio	E	falla de chumacera	Compresor aire-soplador principal
Rotatorio	E	falla de chumacera	Turbina compresor soplador
Rotatorio	E	falla de chumacera	Turbina de compresor
Rotatorio	E	falla de chumacera/Falla sistema de vapor de sello	Compresor de wet gas
Rotatorio	E	falla de chumacera	Turbina de compresor
Estatico	H	falla de ciclones y camara plena por agrietamiento/falla lining antierosivo ciclones	Regenerador
Estatico	H	falla lining antierosivo ciclones	Reactor
Rotatorio	H	falla anillos compresion/piston	Compresor de carga lado frio ppal
Rotatorio	H	falla anillos compresion/piston	Compresor de carga lado frio aux.
Instrumentos	H	Falla en cilindro neumatico	Solenoide actuador cheque
Rotatorio	H	falla de chumacera	Compresor de propileno
Rotatorio	H	falla rodamientos/falla de sello	Bomba fondos de Torre, ppal, GLP
Rotatorio	H	falla rodamientos/falla de sello	Bomba fondos de Torre, aux, GLP
Rotatorio	H	falla rodamientos/falla de sello	Bomba fondos de Torre, ppal, GLP
Rotatorio	H	falla rodamientos/falla de sello	Bomba fondos de Torre,Aux, GLP
Rotatorio	H	falla rodamientos/ensuciamiento sistema de enfriamiento	Bomba de carga a Reactor ppal, gasoleo
Instrumentos	H	Valvula atascada	Valv. Corredera Catal. Gastado.
Instrumentos	H	Valvula atascada	Valv. Corredera Chimenea
Instrumentos	H	Valvula atascada	Valv. Corredera Chimenea
Instrumentos	H	Valvula atascada	Valv. Corredera Catal. Regenerado

ESPECIALIDAD	RAM	MODO DE FALLA	DESCRIPCION DEL EQUIPO
Rotatorio	H	falla rodamientos	Bomba cima de Torre, ppal, GLP
Rotatorio	H	falla rodamientos	Bomba cima de Torre, aux., GLP
Rotatorio	H	falla rodamientos	Bomba carga a Torre, ppal, GLP
Rotatorio	H	falla rodamientos	Bomba carga a Torre, aux, GLP
Rotatorio	H	falla rodamientos/falla de sello	Bomba reflujo inf. De Torre, GLP.
Rotatorio	H	falla rodamientos/falla de sello	Bomba reflujo sup. Torre, GLP.
Instrumentos	H	Escape por prensaempaques	H2S a Planta de azufre Drum
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba condensado ppal
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba circulación slurry
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba circulación slurry
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba APC aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba ALC aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba DBP aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba de carga aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba de nafta aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba de nafta aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Motor de bomba aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba ALC aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba aceite
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina bomba ppal aceite
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina bomba ppal aceite
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Motor de bomba aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba aux.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba ppal cond.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba ppal cond.
Rotatorio	H	falla sistema trip / valvula	Turbina de bomba slurry producto aux.
Rotatorio	H	Falla de sello de producto	Bomba restitucion absorbente pobre, ppal, Butano
Rotatorio	H	Falla de sello de producto	Bomba restitucion absorbente pobre, aux., Butano
Instrumentos	H	Falla del sensor	Opacidad Gases a Atmosfera.
	M	cierre incompleto	

ESPECIALIDAD	RAM	MODO DE FALLA	DESCRIPCION DEL EQUIPO
Rotatorio	M	falla rodamientos/erosion cuerpo-internos/ensuciamiento sistema de enfriamiento	Bomba slurry circulación ppal.
Rotatorio	M	falla rodamientos/erosion cuerpo-internos/ensuciamiento sistema de enfriamiento	Bomba slurry circulación aux..
Estatico	M	corrosion platos	Torre fraccionadora principal
Rotatorio	M	falla rodamientos/ensuciamiento sistema de enfriamiento	Bomba slurry circulación aux..
Rotatorio	M	ensuciamiento sistema de enfriamiento/falla rodamientos	Bomba restitucion absorbente pobre, ppal, Butano
Rotatorio	M	ensuciamiento sistema de enfriamiento/falla rodamientos	Bomba restitucion absorbente pobre, aux., Butano
Estatico	M	corrosion platos	Torre absorbedora primaria
Estatico	M	corrosion platos	Torre absorbedora esponja
Estatico	M	corrosion platos	Torre despojadora
Estatico	M	corrosion platos	Torre debutanizadora
Rotatorio	M	Falla en bujes	Bomba condensado ppal soplador
Rotatorio	M	Falla en bujes	Bomba condensado aux. soplador
Rotatorio	M	ensuciamiento sistema de enfriamiento/falla rodamientos	Bomba de circulación nafta ppal.
Rotatorio	M	ensuciamiento sistema de enfriamiento/falla rodamientos	Bomba de circulación nafta aux.
Rotatorio	M	falla rodamientos/falla sello	Bomba reciclo GLP. Sin efecto funcional.
Rotatorio	M	falla rodamientos/falla sello	Bomba aux. condensado compr. Gas
Rotatorio	M	falla rodamientos/falla sello	Bomba ppal condensado compr. Gas
Rotatorio	M	falla rodamientos/falla sello	Bomba MEA de Drum a despoj. Ppal
Rotatorio	M	falla rodamientos/falla sello	Bomba MEA de Drum a despoj. Aux.
Rotatorio	M	Falla en bujes	Bomba aux. condensado compr. Gas
Rotatorio	M	Falla en bujes	Bomba ppal condensado compr. Gas
Rotatorio	M	Falla en bujes	Bomba aux. condensado compr.
Rotatorio	M	Falla en bujes	Bomba ppal condensado compr.
Rotatorio	M	falla rodamientos/falla sello	Bomba de cima de Torre, ppal. Etano/etileno
Rotatorio	M	falla rodamientos/falla sello	Bomba de cima de Torre, aux.
Rotatorio	M	falla rodamientos	Bomba cima de Torre, ppal, GLP
Rotatorio	M	falla rodamientos	Bomba cima de Torre, aux., GLP
Rotatorio	M	falla rodamientos	Bomba de DBP ppal, gasol. Inestabilizada
Rotatorio	M	falla rodamientos	Bomba de DBP aux., gasolina inestabilizada
Rotatorio	M	ensuciamiento sistema de enfriamiento/falla rodamientos	Bomba de ALC despojado ppal
Rotatorio	M	ensuciamiento sistema de enfriamiento/falla rodamientos	Bomba de ALC despojado aux.

5. CONCLUSIONES.

- Se realizó un estudio y revisión del estado del arte de algunas técnicas de medición de reducción del riesgo por el uso de tecnologías de detección y diagnóstico de fallos aplicado en procesos de refinación de petróleo, para este caso se realizó en la unidad de Cracking Catalítico Fluidizado UOP1 de la Refinería de Barrancabermeja – Ecopetrol S.A.
- Se desarrolló una metodología para la implementación de un Sistema de Detección y Diagnóstico de Fallos – SDDF en una unidad FCC, es decir, la unidad de Cracking Catalítico Fluidizado UOP1 de la Refinería de Barrancabermeja – Ecopetrol S.A., teniendo en cuenta un estudio del estado del arte de algunas herramientas técnicas de Sistemas de Detección y Diagnostico de Fallos (SDDF), así como algunas metodologías a ser aplicadas en ingeniería de la confiabilidad industrial, análisis de criticidad y cálculo del riesgo.
- La detección temprana y el diagnóstico de fallos permiten asistir al personal de operaciones en una planta industrial para tomar las mejores acciones durante el estado real del proceso, evitando que los fallos incipientes (operacionales) escalen a situaciones críticas donde existe el riesgo de pérdida de vidas humanas, daños al medio ambiente y pérdidas económicas.
- Los aportes de este trabajo permitirán sentar las bases para el desarrollo de una herramienta para detectar y diagnosticar desviaciones de un proceso productivo, evitando de esta manera reducción de pérdidas de productividad, acontecimientos anormales o fuera de contexto y principalmente informar oportunamente de posibles situaciones anormales que pongan en peligro o riesgo la vida humana, el medio ambiente o la imagen e infraestructura de la empresa.

- El uso de técnicas para la detección temprana y el diagnóstico de fallos permite mejoras debido a que pueden detectar la presencia de fallos incipientes (operacionales) en los sistemas bajo estudio, mejoran la seguridad del proceso y la confiabilidad operacional. Esta información es necesaria para la planificación, mantenimiento basado en condiciones y la toma de decisiones.
- Como resultado del análisis S-RCM se logró identificar los equipos de mayor criticidad por especialidad y el modo de falla, donde se aprecian que los equipos rotatorios son los que presentan la mayor criticidad clasificada como E (Extensiva); sin embargo, el resultado de un análisis S-RCM incluye la identificación clara y precisa de los trabajos de monitorización preventiva, predictiva o de la condición, los programas y las responsabilidades. Los resultados incluyen generalmente un registro de activos y datos actualizados que pueden usarse en su sistema de gestión de mantenimiento informatizado (GMAO).
- El análisis S-RCM reduce los costos de mantenimiento, aumenta la productividad y la rentabilidad, convierte el mantenimiento de un centro de gastos a un centro de beneficios, trata el mantenimiento como un proceso estratégico, introduce cambios positivos en la cultura del mantenimiento, captura la base de conocimiento del personal de la planta y crea un programa de mantenimiento documentado basado en las metas comerciales.
- La evaluación de la confiabilidad de los sistemas de control electrónicos y el estudio a desarrollar arrojaron resultados que le permitirán a la Empresa evaluar e integrar la información de fallos y operacional en los instrumentos de control tales como sintonía, variabilidad de los lazos de control, estado manual/automático de los PI&D (Diagramas de Proceso e Instrumentación), aumento o disminución de la productividad, disminución de costos y riesgos.

- La importancia de la seguridad radica en el hecho de que no se debe de ver al trabajador como un factor de producción si no como un ser integral, que al garantizar los niveles adecuados de seguridad se verá reflejado en un mejor rendimiento laboral y una mayor productividad.
- Para llevar a cabo el concepto de seguridad, se debe realizar una evaluación de riesgos que constituye la base de la acción preventiva, ya que a partir de la información obtenida con la valoración podrán adoptarse las decisiones precisas sobre la necesidad o no de implementar acciones preventivas.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.

- A Hazard and Operability Studies, Process Safety Report 2, Imperial Chemical Industries Limited, London, 1974.
- AGUDELO C., MORANT F., QUILES E., GARCÍA E. Detección y diagnóstico temprano de fallos para mejorar la seguridad de proceso y la confiabilidad: aplicación en un proceso de refinería. Agosto 2012.
- AGUDELO C., MORANT F., QUILES E., GARCÍA E. Integración de técnicas para la detección temprana y el diagnóstico de fallo para mejorar la seguridad de proceso: Aplicación en un proceso de refinería del petróleo. 2012.
- AMENDOLA, Luis José. Gestión de Proyectos de Activos Industriales – Gestión de Activos/Asset Management. Editorial Universitat Politècnica de València. 2010.
- American Institution of Chemical Engineers. Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, 1985.
- CASAL J., PLANAS E., MONTIEL H., VÍLCHEZ J. Análisis del Riesgo en Instalaciones Industriales. Edición UPC. 1999.
- CELSE B., CAUVIN S., HEIM B., GENTIL S., Travé-Massuyès L. Modelo basado en un módulo de diagnóstico para una planta piloto de FCC. Oil & Gas Science and Technology, Vol. 60 (2005).

- DAVIS, R. Diagnosis reasoning based on structure and behavior. Artificial Intelligence. 1984.
- FRANK, P. M. (1994). On-line fault detection in uncertain nonlinear systems using diagnostic observers: a survey. International Journal Systems Science.
- FUSSELL, J. B. (1974). Fault tree analysis state of the art. IEEE Transactions on Reliability. http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/An_riesgo.htm.
- Instructivo para uso de la matriz de evaluación de riesgos – RAM. Ecopetrol S.A. Gerencia complejo de Barrancabermeja. Abril de 2002.
- LEES, FRANK P. Loss Prevention in the Process Industries. 1995.
- SACKS D., E. Qualitative analysis of piecewise linear approximation. Journal of Artificial Intelligence in Engineering 3. 1988.
- SADEGHBEIGI, REZA. Fluid Catalytic Cracking Handbook Design, Operation and Troubleshooting of FCC facilities, 2Ed, Gulf Professional Publishing, Houston (2000) 2Ed.
- SÁNCHEZ SILVA M. Introducción a la Confiabilidad y Evaluación de Riesgos: Teoría y aplicaciones en Ingeniería. Universidad de Los Andes. Bogotá D.C. 2010.
- UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA – España. Teoría Análisis del Riesgo. GUIAR, Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos.

- Use of Hazard and Operability Studies in Process Analysis, AIChE Today Series, American Institute of Chemical Engineers, New York, 1989.
- VENKATASUBRAMANIAN V. (2003). Abnormal events managements in complex process plants: challenges and opportunities in intelligent supervisory control, 4th International Conference on Foundation of Computer-Aided Process Operations, FOCAPO 2003, Coral Springs-FL, USA.
- VENKATASUBRAMANIAN V. et al. A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods. Computers and Chemical Engineering 27 (2003).
- VENKATASUBRAMANIAN V., RENGASWAMY R., KAVURI S., YIN K., “A review of process fault detection and diagnosis Part III: Process history based methods,” Computers & Chemical Engineering, vol. 27. MAR 15 2003.
- WILLISKY A., Chow Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. IEEE Transaction Automatic Control. Vol. AC 29, 1984.
- WOODHOUSE J. “Criticality Analysis Revisited”, The Woodhouse Partnership Limited, Newbury, England 1994.
- WOODHOUSE J. “Mantenimiento Centrado en Confiabilidad”. The Woodhouse Partnership. 2000.
- YAÑEZ M., JOGLAR F., MODARRES M. Generalized Renewal Process for analysis of Repairable Systems with limited failure experience – Reliability Engineering and System Safety Analysis Journal. USA, 2002.