

---

# IngeCon

Asesoría Integral en Ingeniería de Confiabilidad  
[www.confabilidadoperacional.com](http://www.confabilidadoperacional.com)

## Técnicas de Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicadas en el proceso de Gestión de Activos

### Nota técnica 5:

### Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos

Autores:

**\*\*PhD. Carlos Parra Márquez & PhD. Adolfo Crespo Márquez**

*Dept. Industrial Management. University of Seville*

*School of Engineering, University of Seville, Spain*

**\*\*Email: [parrac37@yahoo.com](mailto:parrac37@yahoo.com)**

Editado por:



[www.ingeman.net](http://www.ingeman.net)

Septiembre 2012

## RESUMEN

*Las técnicas de análisis de criticidad son herramientas que permiten identificar y jerarquizar por su importancia los activos de una instalación sobre los cuales vale la pena dirigir recursos (humanos, económicos y tecnológicos). En otras palabras, el proceso de análisis de criticidad ayuda a determinar la importancia y las consecuencias de los eventos potenciales de fallos de los sistemas de producción dentro del contexto operacional en el cual se desempeñan. En el siguiente artículo, se explican los aspectos teóricos más importantes de las técnicas de análisis de jerarquización de equipos (técnicas de análisis de criticidad). Adicionalmente, se presentan algunos modelos y ejemplos prácticos de aplicación de estas técnicas de priorización en activos de producción.*

### V.1. INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE JERARQUIZACIÓN

Tomando como referencia el Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM) de 8 fases (ver Figura 5.1), esta sección describe las técnicas de jerarquización y criticidad y se relaciona con la Fase 2 del MGM.

Las técnicas de análisis de criticidad son herramientas que permiten identificar y jerarquizar por su importancia los activos de una instalación sobre los cuales vale la pena dirigir recursos (humanos, económicos y tecnológicos). En otras palabras, el proceso de análisis de criticidad ayuda a determinar la importancia y las consecuencias de los eventos potenciales de fallos de los sistemas de producción dentro del contexto operacional en el cual se desempeñan (Woodhouse, 1994).

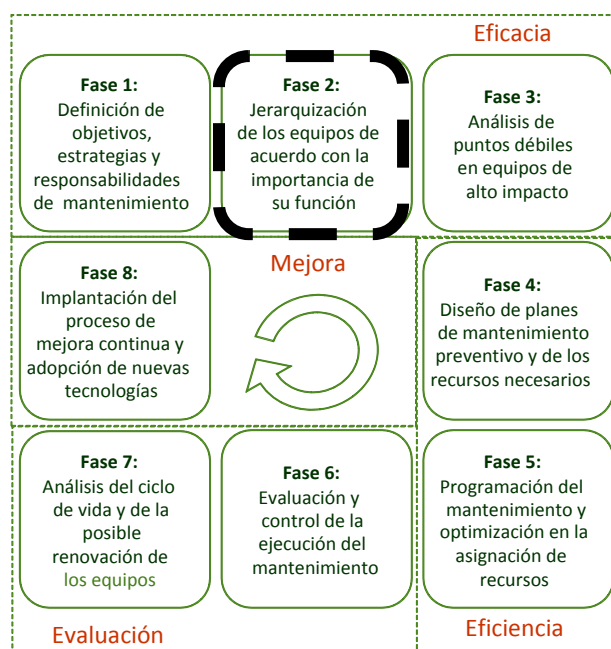


Figura 5.1. Modelo del proceso de gestión del mantenimiento (MGM)

El término “crítico” y la propia definición de criticidad pueden tener diferentes interpretaciones dependiendo del objetivo que se está tratando de jerarquizar. El objetivo de un análisis de criticidad es establecer un método que sirva de instrumento de ayuda en la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de un proceso de producción complejo, permitiendo subdividir los elementos en secciones que puedan ser manejadas de manera controlada y auditable. Desde esta óptica existe una gran diversidad de posibles criterios que permiten evaluar la criticidad de un activo de producción. Los motivos de priorización pueden variar según las oportunidades y las necesidades de la organización. A continuación se presentan algunos criterios comunes a utilizar dentro de los procesos de jerarquización:

- 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
- 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.....

Específicamente, para el desarrollo de este capítulo, varias de las metodologías de análisis de criticidad a ser evaluadas están constituidas por métodos de priorización que generan resultados de criticidad sustentados en la teoría del riesgo, concepto que mezcla el factor fiabilidad (frecuencia de fallos) y el factor severidad/consecuencia del fallo (impacto de los fallos en: seguridad, ambiente, calidad, producción, etc.) (Jones, 1995). Es importante mencionar que los resultados que se obtienen con la aplicación de las técnicas de criticidad, representan la materia prima con la cual se debe dar inicio a cualquier proceso de optimización basado en la aplicación de técnicas de Ingeniería de fiabilidad y mantenimiento. A continuación se presentan tres modelos de jerarquización basados en la evaluación del riesgo y orientados a identificar los equipos críticos de un sistema de producción (Parra, C. y Omaña, C., 2001).

## **V.2. MÉTODO DEL FLUJOGRAMA DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD (CUALITATIVO)**

En este primer método (Crespo, 2007) se presenta una técnica que hace referencia a un análisis puramente cualitativo sobre la jerarquía de equipos de producción. Como podemos observar en la Figura 5.2, el resultado del proceso es una clasificación de nuestros Equipos en tres categorías: A, B C, siendo los equipos tipo A los equipos de mayor prioridad.

Para llegar a esa clasificación final se procede de forma secuencial a realizar una serie de preguntas al equipo natural de trabajo conformado en la empresa para tal fin. La secuencia marca la importancia que da el equipo de trabajo a cada atributo que se analiza a la hora de establecer la prioridad del mismo. De alguna forma, el orden en la secuencia marca el peso que damos en nuestra gestión a cada uno de los atributos.

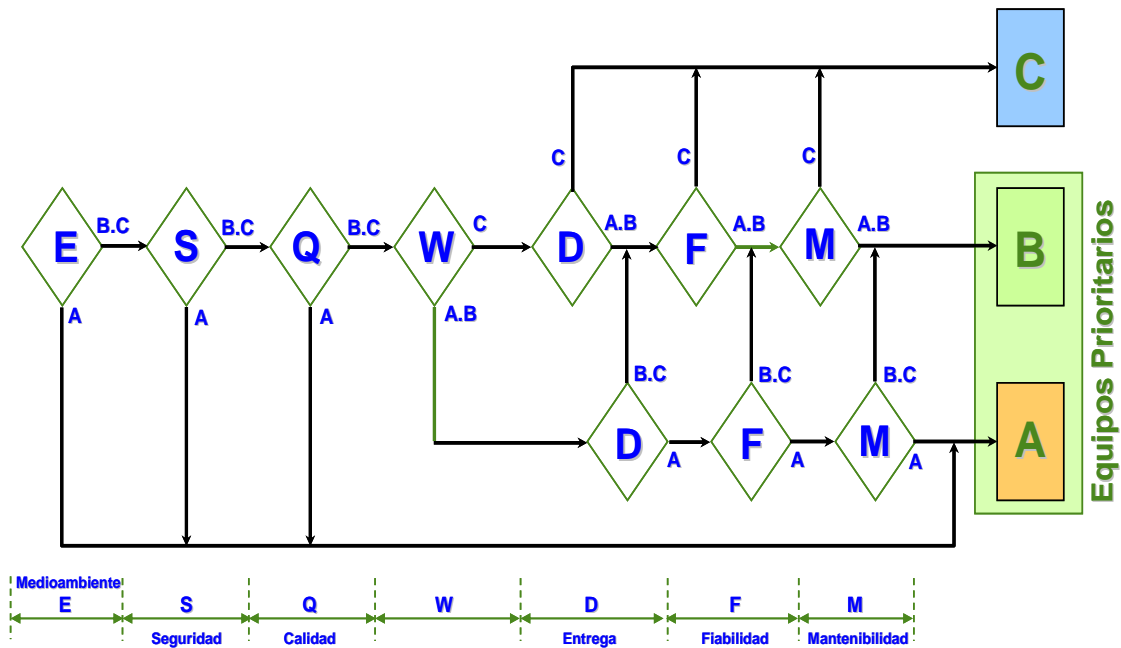


Figura 5.2. Modelo del flujograma de criticidad (Crespo, 2007)

De cada pregunta existen tres respuestas posibles A, B ó C que nos sirven para caracterizar al equipo. Por ejemplo:

- La primera pregunta hace referencia al medio ambiente (E), un equipo se podría considerar como de categoría A, si un fallo del mismo puede provocar que la empresa tenga que recurrir a dar aviso a las autoridades públicas por problemas que pudiesen afectar a la salud de las personas y del medio ambiente (por ejemplo: Una fuga de amoníaco). El equipo sería de categoría B si un fallo del mismo provocase una contaminación o afección que pudiera gestionarse en el interior de la empresa (por ejemplo, una fuga de sosa que se controla con la red de aguas de la empresa). Finalmente un equipo se podría considerar de categoría C si un fallo del mismo no produjese ningún tipo de contaminación medioambiental.
- Las cuestiones de seguridad (S) se consideran a continuación. Los activos de categoría "A" serán aquellos cuyos fallos pueden producir accidentes que provocan absentismo laboral temporal o permanente en el lugar de trabajo. Los fallos en activos de la categoría "B" podría causar daños menores a la gente en el trabajo, no producen la ausencia de trabajo. Una vez más, los activos de la categoría "C" son activos cuyos fallos no pueden crear consecuencias relacionadas con la seguridad de las personas;
- La calidad (Q) es la siguiente cuestión que debe evaluarse utilizando el flujograma. El procedimiento para esta evaluación es muy similar al que ya hemos llevado a cabo para la evaluación medio ambiental de los equipos. Los fallos de calidad también puede producir un importante impacto externo, o una imagen muy negativa de la compañía en el mercado, al detectarse un fallo después de llegar el producto al cliente final (los consumidores en nuestro caso de estudio). Categoría A se dedica ahora a los activos que pudieran sufrir este tipo de fallo. Categoría "B" y "C" sería que los activos que, cuando no se

mantiene adecuadamente, podría sufrir fallos que producen sólo una consecuencia interna o que no ocasionan ningún impacto, respectivamente;

- El tiempo de trabajo de un activo (W) también puede condicionar su criticidad. En este caso de estudio, los activos que trabajan a tres turnos serán de categoría "A". Los activos con dos turnos de trabajo estarán bajo categoría "B". Finalmente, cuando los activos de producción tienen en programación un solo turno de trabajo al día, los incluiremos en la categoría "C". En algunas ocasiones el trabajo extra que se requiere para el mantenimiento correctivo de activos, como media, también se puede considerar dentro de este criterio. Los activos que requieren una gran cantidad de horas extras para ser reparados entrarían en categoría "A", y así sucesivamente;
- La entrega (D) es un criterio relacionado con el impacto operacional de un fallo del activo. Los activos de categoría "A" son ahora los que producen un paro en toda la fábrica cuando fallan. Los activos de categoría "B" pueden dejar sólo una línea de producción parada al fallar. Por último, los activos que no producen una interrupción significativa de la producción serían de la categoría "C";
- La fiabilidad (F) se introduce como criterio igualmente en el flujograma y se relaciona con la frecuencia de fallo que pueda existir en un activo que no se mantiene correctamente. En nuestro caso de estudio, consideramos como categoría "A" los activos con frecuencia de fallo menor de 5 h. Los activos con frecuencias de las fallo mayor de 5 h y menor de 10 h se incluirán en la categoría "B". Finalmente, para activos con frecuencias de fallo superiores a 10 h, utilizaríamos la categoría "C". Es normal tener en cuenta un criterio de frecuencia que produce el 20% de los activos dentro de la categoría "A", sobre un 30% de la "B", mientras que el 50% entraría en categoría "C".
- La mantenibilidad (M), o aptitud del activo para ser mantenido, es el último criterio que debe ser tenido en cuenta. Este criterio se relaciona con el tiempo medio necesario para reparar un fallo. Los activos que requieren un tiempo medio de reparación de más de 90 minutos se catalogan como "A". Entre 45 y 90 minutos estaría en categoría "B". Por último aquellos cuyo tiempo medio de reparación es inferior a 45 minutos estarían dentro de categoría "C".

### **V.3. MODELO DE CRITICIDAD SEMICUANTITATIVO "CTR" (CRITICIDAD TOTAL POR RIESGO)**

El modelo de Criticidad Total por Riesgo (CTR) presentado a continuación, es un proceso de análisis semicuantitativo, bastante sencillo y práctico, soportado en el concepto del riesgo, entendido como la consecuencia de multiplicar la frecuencia de un fallo por la severidad del mismo (ver el concepto PRN: Probability Risk Number, en Jones, 1985). Este método ha sido ampliamente desarrollado por consultoras y empresas internacionales (Woodhouse, 1996) y adaptado a un número importante de industrias (ver ejemplo para el sector refino en Parra y Omaña, 2001).

A continuación se presentan de forma detallada, las expresiones utilizadas para jerarquizar los sistemas a partir del modelo CTR:

$$CTR = FF \times C \quad (5.1)$$

Donde:

CTR: Criticidad total por Riesgo

FF: Frecuencia de fallos (rango de fallos en un tiempo determinado (fallos/año))

C: Consecuencias de los eventos de fallos

Donde se supone además que el valor de las consecuencias (C), se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$C = (IO \times FO) + CM + SHA \quad (5.2)$$

Siendo:

IO = Factor de impacto en la producción

FO = Factor de flexibilidad operacional

CM = Factor de costes de mantenimiento

SHA = Factor de impacto en seguridad, higiene y ambiente

La expresión final del modelo de priorización de CTR será la siguiente:

$$CTR = FF \times ((IO \times FO) + CM + SHA) \quad (5.3)$$

Los factores ponderados de cada uno de los criterios a ser evaluados por la expresión del riesgo (3) se presentan a continuación:

- Factor de Frecuencia de Fallos (FF) (escala 1 - 4)
  - 4: Frecuente: mayor a 2 eventos al año
  - 3: Promedio: 1 y 2 eventos al año
  - 2: Bueno: entre 0,5 y un 1 evento al año
  - 1: Excelente: menos de 0,5 eventos al año
- Factores de Consecuencias
  - Impacto Operacional (IO) (escala 1 - 10)
    - 10: Pérdidas de producción superiores al 75%
    - 7: Pérdidas de producción entre el 50% y el 74%
    - 5: Pérdidas de producción entre el 25% y el 49%
    - 3: Pérdidas de producción entre el 10% y el 24%
    - 1: Pérdidas de producción menor al 10%
  - Impacto por Flexibilidad Operacional (FO) (escala 1 - 4)
    - 4: No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes
    - 2: Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios
    - 1: Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños
  - Impacto en Costes de Mantenimiento (CM) (escala 1 - 2)
    - 2: Costes de reparación, materiales y mano de obra superiores a 20.000 dólares
    - 1: Costes de reparación, materiales y mano de obra inferiores a 20.000 dólares

- Impacto en Seguridad, Higiene y Ambiente (SHA) (escala 1 - 8)

8: Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente ambiental mayor (catastrófico) que exceden los límites permitidos

6: Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración

3: Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud (recuperable en el corto plazo) y/o incidente ambiental menor (controlable), derrames fáciles de contener y fugas repetitivas

1: No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales

La selección de los factores ponderados se realiza en reuniones de trabajo con la participación de las distintas personas involucradas en el contexto operacional del activo en estudio (operaciones, mantenimiento, procesos, seguridad y ambiente). Posteriormente, se seleccionan los sistemas a priorizar y se genera una tormenta de ideas en la que se le asignan a cada equipo los valores correspondientes a cada uno de los factores que integran la expresión de Criticidad Total por Riesgo (expresión 3). Para obtener el nivel de criticidad de cada equipo/sistema, se toman los valores totales de cada uno de los factores principales: frecuencia y consecuencias de los fallos y se ubican en la matriz de criticidad 4x4 (ver Figura 5.2). El valor de frecuencia de fallos se ubica en el eje vertical y el valor de consecuencias se ubica en el eje horizontal (se toma el resultado final de la expresión (2):  $(IO \times FO) + CM + SHA$ ). La matriz de criticidad mostrada a continuación permite jerarquizar los sistemas en tres áreas (ver Figura 5.3):

- Área de sistemas No Críticos (NC)
- Área de sistemas de Media Criticidad (MC)
- Área de sistemas Críticos (C)

FRECUENCIA	4	MC	MC	C	C	C
	3	MC	MC	MC	C	C
	2	NC	NC	MC	C	C
	1	NC	NC	NC	MC	C
		10	20	30	40	50
		CONSECUENCIA				

**Figura 5.3.** Matriz de Criticidad propuesta por el modelo CTR

La Ecuación 5.2 puede variarse en función de las consideraciones que haga la empresa para cada instalación en particular o circunstancia temporal específica, de manera que podemos obtener diversas variaciones de la función de riesgo y por tanto

de la matriz de criticidad. Véase el siguiente ejemplo para una instalación off-shore de una empresa petrolera.

#### **V.4. MODELO DE CRITICIDAD SEMICUANTITATIVO “MCR” (MATRÍZ DE CRITICIDAD POR RIESGO)**

El siguiente modelo de criticidad toma como referencia el método MCR diseñado para los activos de producción Off-Shore del área de Magallanes, elaborada por ENAP SIPETROL, ver informe técnico: ENAP SIPETROL, 2008). El modelo propuesto está basado en la estimación del factor Riesgo a través de las siguientes expresiones:

$$\text{Riesgo} = \text{FF} \times \text{C} \quad (5.4)$$

Dónde:

FF = Frecuencia de fallos (número de fallas en un tiempo determinado)

C = Consecuencias de los fallos a la seguridad, ambiente, calidad, producción, etc. (calculado ahora conforme a Ecuación 5.5)

$$\begin{aligned} C = & (\text{Impacto en Seguridad y Medio Ambiente (SHA)} \times 0,2) & + \\ & (\text{Impacto en Calidad (IC)} \times 0,2) & + \\ & (\text{Impacto Producción (IP)} \times 0,2) & + \\ & (\text{Impacto por Baja Mantenibilidad (BM)} \times 0,2) & + \\ & (\text{Costos de Mantenimiento (CM)} \times 0,2) & (5.5) \end{aligned}$$

A continuación se presentan los factores ponderados diseñados para el proceso de jerarquización de los factores de frecuencia y consecuencias de fallos:

- Factor de frecuencia de fallos (FF) (escala 1 - 5)
  - 1: Sumamente improbable: menos de 1 evento en 5 años
  - 2: Improbable: 1 evento en 5 años
  - 3: Posible: 1 evento en 3 años
  - 4: Probable: entre 1 y 3 eventos al año
  - 5: Frecuente: más de 3 eventos por año
- Factores de Consecuencias (escala 1 - 5)
  - Impacto Seguridad y Medio Ambiente (SHA)
    - 5: Alto riesgo de vida del personal, daños graves a la salud del personal y/ó incidente ambiental mayor (catastrófico), derrames y fugas que exceden los límites permitidos
    - 3: Riesgo de vida del personal o daños menores a la salud del personal y/ó incidente ambiental menor, derrames fáciles de contener y fugas repetitivas
    - 1: No existe ningún riesgo de salud ni de daños ambientales
  - Impacto en Producción (IP)
    - 5: Pérdidas de producción superiores al 75% (no hay unidades de reserva)
    - 4: Pérdidas de producción entre el 50% y el 74% (unidades de reserva)



parcial)

5: Pérdidas de producción entre el 25% y el 49%

2: Pérdidas de producción entre el 10% y el 24%

1: Pérdidas de producción menor al 10%

○ Impacto por Baja Mantenibilidad (BM)

5. No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes

3. Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios

1. Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños

○ Impacto en Costos de Mantenimiento (CM)

5: Daños irreversibles al sistema, costos de reparación incluyendo materiales y HH supera en un 75% el valor del equipo

4: Costos de reposición incluyendo materiales y HH se ubican entre un 50% y el 74% del valor del equipo

3: Costos de reparación incluyendo materiales y HH, se ubican entre un 25% y el 49% del valor del equipo

2: Costos de reparación incluyendo materiales y HH, se ubican entre un 10% y el 24% del valor del equipo

1: Costos de reparación incluyendo materiales y HH, se ubican por debajo del 10% del valor del equipo

Los resultados de la evaluación de los factores anteriores, se presentan en una matriz de criticidad 5 x 5 (ver Figura 5.4), donde el eje vertical está formado por cinco niveles de frecuencia de fallos, mientras que el eje horizontal está formado por cinco niveles de consecuencias de fallos. La matriz está dividida en cuatro zonas que representan cuatro niveles de criticidad:

Zonas de criticidad:

B = Baja criticidad

M = Media criticidad

A = Alta criticidad

MA = Muy Alta criticidad

Frecuencia	5	A	MA	MA	MA	MA
	4	A	A	A	A	MA
	3	M	M	M	A	MA
	2	B	B	B	M	M
	1	B	B	B	M	M
		1	2	3	4	5
Consecuencias						

**Figura 5.4.** Matriz de Criticidad propuesta por el modelo MCR

## **V.5. MODELO DE CRITICIDAD CUANTITATIVO “AHP” (ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO))**

La metodología AHP (Saaty, 1980,1990) es una poderosa y flexible herramienta de toma de decisiones multicriterio, utilizada en problemas en los cuales necesitan evaluarse aspectos tanto cualitativos como cuantitativos. La técnica AHP ayuda a los analistas a organizar los aspectos críticos de un problema en una estructura jerárquica similar a la estructura de un árbol familiar, reduciendo las decisiones complejas a una serie de comparaciones que permiten la jerarquización de los diferentes aspectos (criterios) evaluados. En esta sección se propone el uso de la técnica AHP para priorizar sistemas y optimizar el proceso de toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento de estos sistemas, en otras palabras, dentro del proceso de gestión del mantenimiento, se tienen que tomar decisiones que permitan orientar los recursos financieros, humanos y tecnológicos, con el fin de poder desarrollar planes eficientes de mantenimiento, para lo cual es necesario tomar en cuenta el nivel de criticidad de los distintos sistemas/equipos que participan en el proceso de producción. Esta situación no es sencilla de resolver, ya que existen una gran cantidad de factores involucrados que generan una gran incertidumbre en el proceso de jerarquización de los sistemas/equipos, por tal motivo, la aplicación de la técnica AHP, puede ayudar a identificar específicamente el nivel de criticidad de los sistemas/equipos, permitiendo de esta forma, optimizar la distribución efectiva de los recursos de mantenimiento en función del nivel de importancia(criticidad) que tiene cada sistema/equipo dentro del proceso de producción.

### **V.5.1. PROCEDIMIENTO GENERAL DE APLICACIÓN DEL MODELO AHP**

El proceso de análisis jerárquico propone ejecutar los siguientes pasos (Saaty, 1980):

1. Definir los criterios de decisión en forma de objetivos jerárquicos. La jerarquización se estructura en diferentes niveles: iniciándose en el tope con la definición del objetivo principal del proceso de jerarquización, luego se definen los niveles intermedios (criterios y sub-criterios a evaluar) y finalmente, en el nivel más bajo se describen las alternativas a ser comparadas.
2. Evaluar (pesar) los diferentes criterios, sub-criterios y alternativas en función de su importancia correspondiente en cada nivel. Criterios cualitativos y cuantitativos pueden ser comparados usando juicios informales para obtener los pesos y las prioridades. Para criterios cualitativos, la técnica AHP utiliza simples comparaciones (apareadas - pairwise) para determinar los pesos y evaluarlos. De esta forma el analista puede concentrarse en sólo dos criterios al mismo tiempo. De hecho, la técnica AHP está basada en la suposición de que el analista (decisor) puede de forma más fácil elegir un valor de comparación que un valor absoluto. Los juicios verbales son trasladados a una escala de puntuación (ver Tabla 1).

Posteriormente, en una matriz de juicios, un vector de prioridad es calculado y usado para pesar (comparar) los elementos de la matriz. Saaty (1980,1990), demostró matemáticamente que el autovector normalizado calculado a partir de la matriz es la mejor aproximación de evaluación de los criterios analizados. En el caso de criterios cuantitativos, es necesario diseñar

un método de priorización que permita cuantificar de forma consistente el peso de cada criterio a ser analizado (Wind y Saaty, 1980).

Juicios	Puntuación ( Score)
Igual	1
	2
Moderado	3
	4
Fuerte	5
	6
Muy	7
	8
Extremo	9

**Tabla 5.1.** Valoración de los juicios (Saaty, 1980)

- La técnica AHP permite al analista evaluar la congruencia de los juicios con el radio de inconsistencia (IR). Antes de determinar una inconsistencia, es necesario estimar el índice de consistencia (CI) de una n x n matriz de juicios, donde CI viene definido por:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5.6)$$

Dónde  $\lambda_{\max}$  es el máximo autovalor de la matriz. De esta forma IR es definido por:

$$I_R = \frac{CI}{RI} \quad (5.7)$$

Dónde RI es el valor aleatorio promedio de CI para una n x n matriz. Los valores de RI son mostrados en la Tabla 5.2.

N	1	2	3	4	5	6	7
RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35

**Tabla 5.2.** Valores de RI para matrices de diferentes órdenes (Saaty, 1980)

Los juicios pueden ser considerados aceptables si  $IR \leq 0,1$ . En casos de inconsistencia, el proceso de evaluación para la matriz evaluada es inmediatamente repetido. Inconsistencias superiores a 0,1 o más justifican una mayor investigación de los criterios evaluados.

- Jerarquizar las alternativas y tomar las decisiones correspondientes. Para cada alternativa (opciones a jerarquizar), se calcula el nivel de preferencia (jerarquización) sobre una escala entre 0.0000 – 1.000, obteniéndose como resultado alternativas jerarquizadas en función de los criterios de decisión evaluados, ver detalles en (Saaty, 1980).

## V.5.2. CASO DE ESTUDIO. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA AHP PARA JERARQUIZAR SISTEMAS DE UNA PLANTA DE REFINERÍA DE PETRÓLEO

En las plantas de procesos de refinación de la industria petrolera, es común que se tomen una gran cantidad de decisiones de mantenimiento, teniendo en cuenta la importancia que tienen los diferentes sistemas dentro del contexto operacional específico de cada refinería. Normalmente, la jerarquización de los diferentes sistemas/equipos, se realiza de forma totalmente cualitativa, basada sólo en la experiencia y el “feeling” del recurso humano que labora en las plantas. El escenario planteado, es propicio para que se tomen decisiones con una alta incertidumbre, por tal motivo, se propone el uso de la técnica de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), con el fin de poder jerarquizar de forma cuantitativa los activos petroleros a partir de criterios relacionados con la confiabilidad, el mantenimiento, la calidad, la producción, la seguridad, el ambiente, entre otros.

El caso de estudio propuesto, consiste en jerarquizar los principales sistemas que componen la Planta de FCC (Fluid Catalytic Cracking) de la Refinería REP-TOL. Los equipos a considerar dentro de la evaluación son los siguientes: Reactor(Ra1-A), Regenerador(Rg1-A), Separador de Tercera Etapa (Sp1-A/B), Tren Recuperador de Potencia (Tr1-A), Compresor de gas húmedo (Cg1-A), Tren de precalentamiento (Th1-A/B/C), Válvulas de control de presión (Vr1-A/B), Caldera (Ca1-A). En la actualidad, la Refinería cuenta con una jerarquización realizada en base a criterios totalmente cualitativos. Esta jerarquización está sustentada específicamente en la opinión y las experiencias del personal de mantenimiento y operaciones de la planta. A continuación se presenta la jerarquización cualitativa existente:

Sistemas	Jerarquización cualitativa
Reactor(Ra1-A)	1
Regenerador (Rg1-A),	2
Compresor de gas húmedo (Cg1-A)	3
Tren Recuperador de Potencia (Tr1-A)	4
Caldera (Ca1-A)	5
Válvulas de control de presión (Vr1-A/B)	6
Separador de Tercera Etapa (Sp1-A/B)	7
Tren de precalentamiento (Th1-A/B/C)	8

**Tabla 5.3.** Jerarquización cualitativa

Para el este caso específico, se diseño un modelo AHP, tomando como base el proceso de evaluación del Riesgo propuesto por (Woodhouse, 2000). En términos generales el modelo AHP basado en el concepto del Riesgo lo que busca es jerarquizar por su importancia los equipos de una instalación petrolera sobre los cuales se van a dirigir recursos de mantenimiento (humanos, económicos y tecnológicos). Como resultado, el método propuesto generará una lista de equipos críticos en función de los factores básicos de riesgo a ser evaluados: frecuencia de fallos, niveles de detección o control de los fallos, niveles de severidad y costes de los fallos dentro del contexto operacional. Por otra parte, es importante aclarar el término “crítico” y la definición de criticidad, ya que estos pueden tener diferentes interpretaciones y van a depender del objetivo que se está tratando de jerarquizar. En nuestro caso en

particular, la jerarquización de los equipos nos permitirá orientar los recursos de mantenimiento hacia los equipos evaluados como críticos.

En la Figura 5.5 se presenta el esquema general de Modelo AHP desarrollado para jerarquizar los equipos dentro de la planta de FCC:

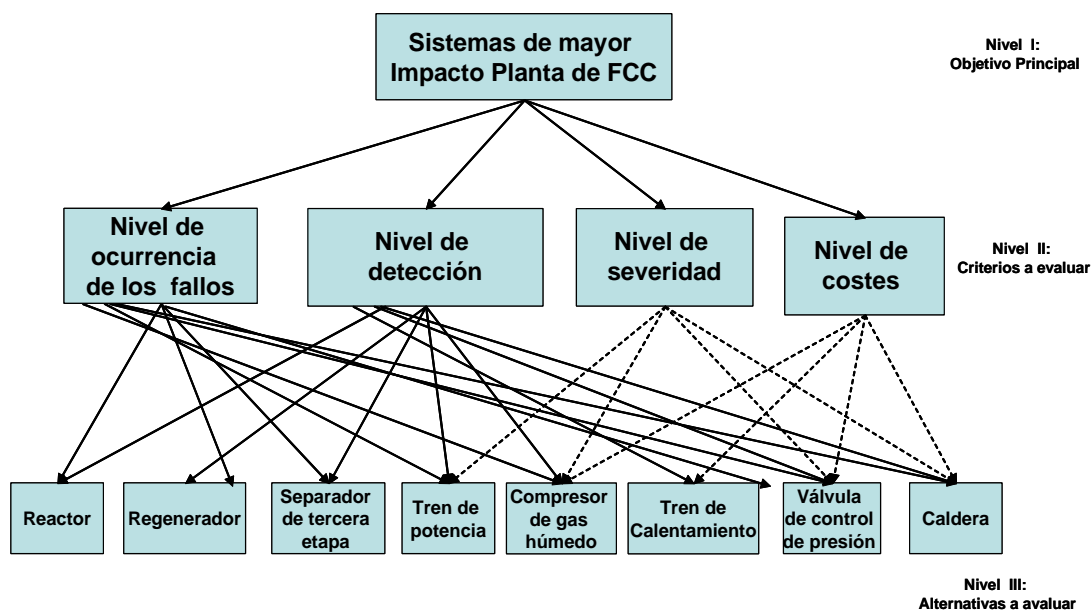


Figura 5.5. Modelo AHP diseñado para jerarquizar los sistemas de la Planta FCC

A continuación se siguen cada uno de los pasos explicados en la sección anterior (II.4.1.), con el fin de implantar el Modelo AHP propuesto.

#### V.5.2.1. CRITERIOS DE DECISIÓN EN FORMA DE OBJETIVOS JERÁRQUICOS

**Paso 1.** Se identifican los tres niveles de jerarquización (ver Figura 5.5):

- Nivel 1. Definición del Objetivo Principal.  
Jerarquizar los 8 sistemas principales que conforman la Planta de FCC de la Refinería REP-TOL.
- Nivel 2. Definición de los Criterios de evaluación  
La base teórica del proceso de evaluación de Riesgo fue tomada de (Woodhouse, 2000). El modelo AHP diseñado, propone jerarquizar los sistemas evaluando criterios relacionados con los fallos de los sistemas:
  - Frecuencia de Ocurrencia de fallos (FF)
  - Detección de fallos (DF)
  - Severidad de los fallos (SF)
  - Costes de los fallos (CF)

En esta etapa del proceso de aplicación de la técnica AHP, se procede a evaluar el nivel de importancia de cada uno de los criterios seleccionados (frecuencia de fallos, detección de fallos, severidad de fallos y costes de fallos). La importancia entre cada uno de los criterios se calcula a partir de una comparación cualitativa entre criterios de forma apareada (*pairwise*). Esta comparación cualitativa entre criterios se hace de esta forma, debido principalmente a la falta de acuerdo entre el personal de operaciones, mantenimiento y procesos para generar una tabla de

niveles que permite evaluar de forma precisa cada uno de los cuatro criterios. La actividad de comparación apareada se realizó en una reunión de trabajo en la cual participó el siguiente personal de la Planta de FCC: ingeniero de procesos, ingeniero de instalaciones, supervisor de operaciones, supervisor de mantenimiento, supervisor de instrumentación y control, supervisor de seguridad y ambiente y el operador de turno. A continuación se presentan los resultados obtenidos en la comparación apareada realizada para los cuatro criterios considerados en el proceso de jerarquización de los sistemas de la Planta FCC (la escala de valoración de juicios utilizada para realizar la comparación entre los criterios evaluados es la mostrada en la Tabla 5.1):

Criterios	Frecuencia de fallos	Detección de fallos	Severidad de fallos	Costes de fallos
Frecuencia de fallos	-	3	1	1
Detección de fallos	1/3	-	½	1/3
Severidad de fallos	1	2	-	½
Costes de fallos	1	3	2	-

**Tabla 5.4.** Comparación apareada de los criterios de jerarquización

- Nivel 3. Descripción de las alternativas a ser jerarquizadas.  
 Sistemas de la Planta FCC a ser evaluados: Reactor(Ra1-A), Regenerador(Rg1-A), Separador de Tercera Etapa (Sp1-A/B), Tren Recuperador de Potencia (Tr1-A), Compresor de gas húmedo (Cg1-A), Tren de precalentamiento (Th1-A/B/C), Válvulas de control de presión (Vr1-A/B), Caldera (Ca1-A).

#### **V.5.2.2. PESOS DE LAS ALTERNATIVAS PARA CADA CRITERIO SELECCIONADO**

**Paso 2.** Se procede a evaluar cada criterio de forma cuantitativa. Se define un proceso basado en el análisis de una serie de factores ponderados que permiten cuantificar cada criterio por cada alternativa a jerarquizar. De forma particular, cada criterio es dividido en varias clases a las cuales se les asigna diferentes niveles de criticidad (intervalo del 1 al 10). Las puntuaciones para cada criterio se asignan de forma cuantitativa en reuniones de trabajo con el personal de mantenimiento, operaciones, procesos y seguridad. Una breve descripción del método de evaluación de los criterios se presenta a continuación.

- Criterio de Frecuencia de Fallos (FF). El criterio de frecuencia de fallos es evaluado en función del número de fallos por período de tiempo (Tabla 5). Para la definición del nivel de frecuencia de fallos de cada alternativa (sistema) a ser evaluado se necesita recopilar información del historial de fallos de cada sistema. En la Tabla 5.5 se presentan los diferentes niveles de frecuencia de fallos disponibles.

FF	Nivel de frecuencia de ocurrencia fallos	Definición del nivel de Frecuencia de ocurrencia de fallos
10	Muy alta: fallo que es casi inevitable	Una ocurrencia por semana
9		Una ocurrencia por mes
8	Alta: continuamente	Una ocurrencia cada tres meses
7		Una ocurrencia cada seis meses
6	Moderada: ocasionalmente	Una ocurrencia cada nueve meses
5		Una ocurrencia al año
4	Baja: fallo ocurre muy poco	Una ocurrencia entre dos y tres años
3		Una ocurrencia entre cuatro y seis años
2		Una ocurrencia entre siete y nueve años
1	Remota: no es probable que ocurra el fall	Una ocurrencia en más de 10 años

**Tabla 5.5.** Escala que permite definir el criterio de frecuencia de fallos (FF)

- Criterio de Detección de Fallos (DF). El criterio de detección de fallos está relacionado con los sistemas de protección, control y alerta disponibles para detectar de forma segura la ocurrencia de los eventos de fallos. Para la definición del nivel de detección de fallos de cada alternativa (sistema) a ser evaluado se necesita recopilar información sobre todos aquellos aspectos de instrumentación, control y protección existentes en cada uno de los sistemas a ser evaluados. En la Tabla 5.6 se presentan los diferentes niveles de detección de fallos disponibles.

DF	Nivel de Detección (grado de control) de fallos	Definición del nivel de Detección de fallos
10	Absolutamente incierto	El sistema no es controlado o inspeccionado, las anomalías por fallos no son detectados
9		
8		
7	Bajo	Sólo se inspecciona el sistema de forma visual durante todo el proceso (no hay ayuda de equipos modernos de control)
6		
5	Moderado	El sistema se controla bajo técnicas estadísticas de control de fallos, y el producto es inspeccionado al final del proceso en la línea de producción (25 % automatización)
4		
3	Alto	El sistema se controla bajo técnicas estadísticas de control de fallos, y el producto es inspeccionado en más de dos puntos del proceso en la línea de producción (75 % automatización)
2	Muy alto	El sistema se controla bajo técnicas estadísticas de control de fallos, y el producto es inspeccionado durante todo el proceso en la línea de producción (100 % automatización)
1	Totalmente controlado	El sistema se controla bajo técnicas estadísticas de control de fallos, y el producto es inspeccionado durante todo el proceso de la línea de producción (100 % automatización con calibración continua y preventivo de los equipos utilizados para controlar e inspeccionar el estado operacional del sistema)

**Tabla 5.6.** Escala que permite definir el criterio de Detección de fallos (DF)

- Criterio de Severidad de Fallos (SF). El criterio de severidad de fallos está relacionado con el impacto de los fallos sobre la seguridad, el ambiente y las operaciones. Para la definición del criterio de severidad de fallos, es necesario conocer cuáles son los efectos que pueden traer consigo los fallos una vez que estos ocurren dentro de un contexto operacional específico. En la Tabla 5.7 se presentan los diferentes niveles de severidad de fallos disponibles.

SF	Nivel de Severidad de fallos	Definición del nivel de severidad de la falla.
10	Peligrosamente alto	Fallos que pueden causar pérdidas humanas
9		Fallos que pueden crear complicaciones con regulaciones federales (leyes)
8		Fallos que hacen inoperables los equipos y provocan la pérdida de función para la que fueron diseñados.
7	Alto	Fallos que causan un alto grado de insatisfacción al cliente que recibe el servicio
6		Fallos que afectan un subsistema y originan un mal funcionamiento de los equipos disminuyendo la calidad del servicio
5	Bajo	Fallos que provocan la pérdida de eficiencia y causan que el cliente se queje.
4		Fallos que pueden ser mejoradas con pequeñas modificaciones y su impacto sobre la eficiencia de los equipos es pequeña
3	Menor	Fallos que podrían crear mínimas molestias al cliente, molestias que el mismo cliente podría corregir en el proceso sin necesidad de perder eficiencia
2		Fallos que son difíciles de reconocer por el cliente y cuyos efectos serán insignificantes para el proceso
1	Ninguno	Fallos que no son identificables por el cliente y no afectan la eficiencia del proceso

**Tabla 5.7.** Escala que permite definir el criterio de severidad de fallos (SF)

- Criterio de Costes de fallos (CF). El criterio de costes de fallos está relacionado con las posibles consecuencias económicas de los fallos sobre la seguridad, el ambiente y las operaciones. Para la definición del criterio de severidad de fallos, es necesario estimar cuales son los costes que pueden traer consigo los fallos una vez que estos ocurren dentro de un contexto operacional específico. En la Tabla 5.8 se presentan los diferentes niveles de severidad de fallos disponibles.

CF	Nivel de Costes de fallos	Definición del nivel de costes de los fallos.
10	Peligrosamente alto	Fallos que provocan altos costes por aspectos de seguridad y ambiente (indemnizaciones)
9		
8	Muy alto	Fallos que provocan altos costes por pérdida total de producción
7		
6	Alto	Fallos que generan altos costes por reparaciones correctivas
5		
4	Moderado	Fallos que generan costes sginifactivos de producción y/o reparación
3		
2		
1	Muy bajos	Fallos que generan costes insignificantes - no afectan el proceso de producción

**Tabla 5.8.** Escala que permite definir el criterio de costes de fallos (CF)

- Resultados de la evaluación de las alternativas (sistemas) para cada uno de los criterios seleccionados. A continuación se presentan los resultados obtenidos en la evaluación realizada a los 8 sistemas de la Planta de FCC, en función de cada uno de los cuatro criterios explicados anteriormente (Frecuencia de Ocurrencia de fallos (FF), Detección de fallos (DF), Severidad de los fallos (SF) y Costes de los fallos (CF)).



Criterios Sistemas	FF	Jerarquización local FF= (FF/Total)	DF	Jerarquización local DF= (DF/Total)	SF	Jerarquización local SF= (SF/Total)	CF	Jerarquización local CF= (CF/Total)
Reactor(Ra1-A)	2	0,083333333	2	0,06060606	10	0,20408163	10	0,2
Regenerador(Rg1-A)	2	0,083333333	6	0,18181818	6	0,12244898	7	0,14
Separador de Tercera Etapa (Sp1-A/B)	3	0,125	2	0,06060606	2	0,04081633	4	0,08
Tren Recuperador de Potencia (Tr1-A)	6	0,25	2	0,06060606	9	0,18367347	8	0,16
Compresor de gas húmedo (Cg1-A)	2	0,083333333	2	0,06060606	5	0,10204082	6	0,12
Tren de precalentamiento (Th1-A/B/C)	1	0,041666667	8	0,24242424	2	0,04081633	3	0,06
Válvulas de control de presión (Vr1-A/B)	5	0,208333333	5	0,15151515	6	0,12244898	4	0,08
Caldera (Ca1-A)	3	0,125	6	0,18181818	9	0,18367347	8	0,16
<b>Total</b>	<b>24</b>		<b>33</b>		<b>49</b>		<b>50</b>	

Tabla 5.9. Evaluación de los sistemas para cada uno de los criterios seleccionados

De forma similar que la comparación cualitativa apareada entre los 4 criterios, la evaluación cuantificada de cada uno de los criterios por sistema, también se realizó en una reunión de trabajo con los mismos participantes citados anteriormente, la principal diferencia en este proceso de evaluación consiste, en que el grupo de trabajo tiene que llegar a un consenso y asignarle a cada sistema (de un total de 8), un valor cuantificado por cada uno de los criterios evaluados, tomando en cuenta la escala de valores presentada para cada criterio en las Tablas 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8.

### V.5.2.3. JERARQUIZACIÓN POR NIVEL DE IMPORTANCIA Y POR CADA CRITERIO

**Paso 3.** En función de los valores de jerarquización obtenidos para cada uno de los criterios (Tabla 5.9), se procede a ordenar los sistemas por nivel de importancia (de mayor a menor) por cada uno de los 4 criterios evaluados. A continuación se presentan los resultados de jerarquización por nivel de importancia, obtenidos del software "Expert Choice":

- Criterio Frecuencia de Fallos (FF):

<b>Sistemas</b> \ <b>Criterios</b>	<b>FF</b>	<b>Criticidad FF (FF/Total)</b>
Tren Recuperador de Potencia (Tr1-A)	6	0,25
Válvulas de control de presión (Vr1-A/B)	5	0,208333333
Caldera (Ca1-A)	3	0,125
Separador de Tercera Etapa (Sp1-A/B)	3	0,125
Reactor(Ra1-A)	2	0,083333333
Regenerador(Rg1-A)	2	0,083333333
Compresor de gas húmedo (Cg1-A)	2	0,083333333
Tren de precalentamiento (Th1-A/B/C)	1	0,041666667
<b>Total</b>	<b>24</b>	

**Tabla 5.10.** Jerarquización por Criterio Frecuencia de Ocurrencia de fallos (FF)

- Criterio Detección de fallos (DF):

<b>Sistemas</b> \ <b>Criterios</b>	<b>DF</b>	<b>Criticidad DF (DF/Total)</b>
Tren de precalentamiento (Th1-A/B/C)	8	0,24242424
Regenerador(Rg1-A)	6	0,18181818
Caldera (Ca1-A)	6	0,18181818
Válvulas de control de presión (Vr1-A/B)	5	0,15151515
Separador de Tercera Etapa (Sp1-A/B)	2	0,06060606
Compresor de gas húmedo (Cg1-A)	2	0,06060606
Reactor(Ra1-A)	2	0,06060606
Tren Recuperador de Potencia (Tr1-A)	2	0,06060606
<b>Total</b>	<b>33</b>	

**Tabla 5.11.** Jerarquización por Criterio Detección de fallos (DF)

- Criterio Severidad de los fallos (SF):

<b>Sistemas</b> \ <b>Criterios</b>	<b>SF</b>	<b>Criticidad SF (SF/Total)</b>
Reactor(Ra1-A)	10	0,20408163
Tren Recuperador de Potencia (Tr1-A)	9	0,18367347
Caldera (Ca1-A)	9	0,18367347
Válvulas de control de presión (Vr1-A/B)	6	0,12244898
Regenerador(Rg1-A)	6	0,12244898
Compresor de gas húmedo (Cg1-A)	5	0,10204082
Tren de precalentamiento (Th1-A/B/C)	2	0,04081633
Separador de Tercera Etapa (Sp1-A/B)	2	0,04081633
<b>Total</b>	<b>49</b>	

**Tabla 5.12.** Jerarquización por Criterio Severidad de fallos (SF)

- Criterio Costes de los fallos (CF):

Sistemas \ Criterios	CF	Criticidad CF (CF/Total)
Reactor(Ra1-A)	10	0,2
Tren Recuperador de Potencia (Tr1-A)	8	0,16
Caldera (Ca1-A)	8	0,16
Regenerador(Rg1-A)	7	0,14
Compresor de gas húmedo (Cg1-A)	6	0,12
Válvulas de control de presión (Vr1-A/B)	4	0,08
Separador de Tercera Etapa (Sp1-A/B)	4	0,08
Tren de precalentamiento (Th1-A/B/C)	3	0,06
<b>Total</b>	<b>50</b>	

Tabla 5.13. Jerarquización por Criterio Costes de fallos (SF)

#### V.5.2.4. CONGRUENCIA DE LOS JUICIOS. RATIO DE INCONSISTENCIA (IR) Y JERARQUIZACIÓN CADA UNO DE ESTOS CRITERIOS

**Paso 4.** La estimación del (IR) y la priorización de los criterios se realizaron con la herramienta computacional denominada “Expert Choice”. A continuación se presentan los resultados:

Criterios	Frecuencia de fallos	Detección de fallos	Severidad de fallos	Costes de fallos	Jerarquización por criterio
Frecuencia de fallos	-	3	1	1	0,302
Detección de fallos	1/3	-	½	1/3	0,110
Severidad de fallos	1	2	-	½	0,230
Costes de fallos	1	3	2	-	0,358
<b>Radio de inconsistencia (IR) =</b>	<b>0,02</b>				

Tabla 5.14. Estimación del IR y jerarquización de los criterios evaluados

#### V.5.2.5. JERARQUIZACIÓN FINAL DE LOS SISTEMAS DE LA PLANTA EVALUADA

**Paso 5.** Se procede a cuantificar para cada uno de los sistemas evaluados la jerarquización final, en función de la valoración realizada a cada uno de los criterios (local/total) evaluados en los pasos 2, 3 y 4 (Tablas 5.9 y 5.14). Posteriormente, los resultados se ordenan por nivel de importancia (ranking) de mayor a menor. A continuación se presentan los resultados de la jerarquización y el ranking final obtenido con la herramienta computacional denominada “Expert Choice”:

Criterios Sistemas	Jerarquización Local x Total Criterio FF (1)	Jerarquización local x Total Criterio DF (2)	Jerarquización local x Total Criterio SF (3)	Jerarquización local x Total Criterio CF (4)	Jerarquización final = (1)+(2)+(3)+(4)
Reactor(Ra1-A)	0,083333333 x 0,302	0,06060606 x 0,11	0,20408163 x 0,23	0,2 X 0,358	0,15037211
Regenerador(Rg1-A)	0,083333333 x 0,302	0,18181818 x 0,11	0,12244898 x 0,23	0,14 X 0,358	0,12344993
Separador de Tercera Etapa (Sp1-A/B)	0,125 x 0,302	0,06060606 x 0,11	0,04081633 x 0,23	0,08 X 0,358	0,08244442
Tren Recuperador de Potencia (Tr1-A)	0,25 x 0,302	0,06060606 x 0,11	0,18367347 x 0,23	0,16 X 0,358	0,18169156
Compresor de gas húmedo (Cg1-A)	0,083333333 x 0,302	0,06060606 x 0,11	0,10204082 x 0,23	0,12 X 0,358	0,09826272
Tren de precalentamiento (Th1-A/B/C)	0,041666667 x 0,302	0,24242424 x 0,11	0,04081633 x 0,23	0,06 X 0,358	0,07011776
Válvulas de control de presión (Vr1-A/B)	0,208333333 x 0,302	0,15151515 x 0,11	0,12244898 x 0,23	0,08 X 0,358	0,1363866
Caldera (Ca1-A)	0,125 x 0,302	0,18181818 x 0,11	0,18367347 x 0,23	0,16 X 0,358	0,1572749
Índice general de inconsistencia: 0,02					

Tabla 5.15. Jerarquización Final

Sistemas	Jerarquización final	Ranking
Tren Recuperador de Potencia (Tr1-A), Caldera (Ca1-A)	0,182	1
Reactor(Ra1-A)	0,150	3
Válvulas de control de presión (Vr1-A/B)	0,136	4
Regenerador (Rg1-A)	0,123	5
Compresor de gas húmedo (Cg1-A)	0,098	6
Separador de Tercera Etapa (Sp1-A/B)	0,082	7
Tren de precalentamiento (Th1-A/B/C)	0,070	8

Tabla 5.16. Ranking Final

Los resultados obtenidos con el Modelo AHP diseñado (Tabla 16), muestran una gran diferencia con los niveles de jerarquización cualitativa existentes (Tabla 3). En la siguiente tabla se presenta una comparación entre la jerarquización obtenida con el Método AHP y la jerarquización cualitativa existente:

Sistemas	Jerarquización AHP	Sistemas	Jerarquización cualitativa
• TREN RECUPERADOR DE POTENCIA (TR1-A)	1	• REACTOR(RA1)	1
• CALDERA (CA1-A)	2	• REGENERADOR (RG1)	2
• REACTOR(RA1-A)	3	• COMPRESOR DE GAS HÚMEDO (CG1)	3
• VÁLVULAS DE CONTROL DE PRESIÓN (VR1-A/B)	4	• TREN RECUPERADOR DE POTENCIA (TR1)	4
• REGENERADOR (RG1-A)	5	• CALDERA (CA1)	5
• COMPRESOR DE GAS HÚMEDO (CG1-A)	6	• VÁLVULAS DE CONTROL DE PRESIÓN (VR1)	6
• SEPARADOR DE TERCERA ETAPA (SP1-A/B)	7	• SEPARADOR DE TERCERA ETAPA (SP1)	7
• TREN DE PRECALENTAMIENTO (TH1-A/B/C)	8	• TREN DE PRECALENTAMIENTO (TH1-A/B/C)	8

**Tabla 5.17.** Comparación entre Jerarquización AHP con Jerarquización Cualitativa

En términos generales, el sistema evaluado con el Modelo AHP que tuvo el mayor cambio de nivel de jerarquización, fue el Tren Recuperador de Potencia, que paso de la posición 4 (jerarquización cualitativa) a la posición 1(jerarquización AHP), es decir que se convirtió en el sistema más crítico de la Planta de FCC. Otros sistemas como la Caldera y las Válvulas de Control también incrementaron sus niveles de jerarquización en comparación con la jerarquización original (cualitativa). Los sistemas como el Reactor, el Regenerador y el Compresor de Gas Húmedo disminuyeron sus niveles de jerarquización pasando de los lugares 1,2 y3 a los lugares 3, 5 y 6 respectivamente. Finalmente, los sistemas Separador de Tercera Etapa y Tren de Precalentamiento mantuvieron los mismos niveles de jerarquización en ambos procesos de evaluación.

Finalmente, los resultados obtenidos de la jerarquización realizada a los 8 sistemas de la Planta de FCC, permitirán que se tomen decisiones más eficientes y con un menor grado de incertidumbre, en las actividades de asignación y distribución de recursos humanos, técnicos y económicos dentro de los procesos de Mantenimiento y Operación, ayudando de esta forma a maximizar la rentabilidad de los productos elaborados en la Planta de FCC de la refinería en estudio.

## V.6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Crespo Márquez A, 2007. The maintenance management framework. Models and methods for complex systems maintenance. London: Springer Verlag.
- ENAP SIPETROL, 2008. Matriz de Evaluación y Gestión de Riesgos para la Confiabilidad Operacional, diseñada para los Yacimientos Pampa del Castillo – La Guitarra. Editado por ENAP INF-10-2008-CONF1, Santiago de Chile, Chile.
- ENAP SIPETROL, 2008. Proceso de definición de criticidad desarrollado para los activos de producción Off-Shore, área de Magallanes. Editado por ENAP INF-10-2008-CONF2, Santiago de Chile, Chile.

- Jones Richard, 1995. Risk-Based Management: A Reliability-Centered Approach, Gulf Publishing Company, First Edition, Houston, Texas.
- PDVSA INTEVEP, 1999. Manual de Ingeniería de Confiabilidad y Riesgos Operacionales de PDVSA. Editado por INTEVEP (Instituto Tecnológico Venezolano del Petróleo), Serie X-1999-345, Caracas, Venezuela.
- Mitchell J, 1998. Physical Asset Management Handbook. Published by Clarion Technical Publishers.
- Parra Carlos, 1997. Metodología de Implantación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad en Petróleos de Venezuela (PDVSA), Universidad de los Andes, Postgrado en Ingeniería de Mantenimiento, Venezuela.
- Parra C, 2002. Aplicación de la técnica de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) en los sistemas de refinación y producción de la industria petrolera Venezolana. Curso de Doctorado en Ingeniería Industrial. Sistemas Modernos de Gestión de la Producción, Universidad de Sevilla, España.
- Parra C y Omaña C, 2001. Ponencia: Técnica cualitativa de Auditoria de la Gestión de Mantenimiento para el sector Refinación. VII Congreso de Ingeniería de Mantenimiento de Petróleos de Venezuela, Caracas, Octubre 2001.
- Saaty T.L, 1980. The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, New York, NY.
- Saaty T.L, 1982. Priority Setting in Complex. Proceedings of the Second World Conference on Mathematics at the service of Man. Las Palmas, Canary Islands.
- Saaty T.L, 1990. How to make a decision: the analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research, Vol. 48, pp.9-26.
- Wind Y. and Saaty T.L, 1980. Marketing applications of the analytic hierarchy process. Management Science, Vol. 26 No. 7, pp.641-658.
- Woodhouse Jhon, 1994. Criticality Analysis Revisited. The Woodhouse Partnership Limited, Newbury, England 1994.
- Woodhouse J, 2000. Introduction to the Operational Reliability". Manual de Adiestramiento, PDVSA – CIED, Venezuela, pp. 1-38.
- Internet: Software ExpertChoice, <http://www.expertchoice.com>. Address: 1501 Lee Highway, Suite 302, Arlington, VA 22209.

