

# EVALUACIÓN CUANTITATIVA DEL RIESGO OPERACIONAL DE UNA PLANTA DE PROCESO A PARTIR DE LA CONFIABILIDAD Y MANTENIBILIDAD DE SUS EQUIPOS

MSc. Ronald A. Mercado Carrasco

Phd. Edgar M. Sanchez Silva

Ecopetrol S.A.

E.mail: Ronald.mercado@ecopetrol.com.co

## Resumen:

Debido a la demandante competitividad en el mundo empresarial actual, la optimización de costos y la evaluación de riesgos se han constituido en temas de mucha importancia para el área de gestión de activos productivos. En las empresas industrializadas, y en especial las empresas de petróleo y gas, se trata de llegar a un punto óptimo a través de metodologías derivadas de la industria de aviación como el RCM -Reliability Centered Maintenance- (SAE, 1999). El RCM inicia como una evaluación de expertos en las etapas iniciales o cuando las empresas no tienen datos registrados de manera estructurada; entonces, la valoración del riesgo de falla se realiza de manera semi-cualitativa con una expectativa de revisiones anualizadas del desempeño. En este estudio se desarrolla una metodología para determinar el valor esperado del riesgo de falla de un sistema con equipos en stand by, a través del desarrollo de un modelo con Simulación de Montecarlo. Una vez obtenido el riesgo Base para cada sistema, se plantean alternativas de mejoramiento de confiabilidad y una metodología de análisis de decisión, con el objeto de reducir el riesgo a niveles aceptables por la organización.

## 1 INTRODUCCION

La industria de hoy, en especial la industria de refinación y petroquímica, sigue aplicando a los equipos las mismas estrategias originadas desde un estudio RCM y que dieron buenos resultados en el pasado; sin embargo se han encontrado con que el porcentaje de mejora en los últimos años demuestra que estas ya no son igualmente efectivas. Como es sabido, el petróleo, la principal materia prima de las refinerías, se mantiene con precios altos y cercanos a USD\$100 por barril que hacen que el margen de refinación sea cada vez más estrecho. Esta última situación viene generando un reto particular para el futuro inmediato que consiste en hallar una forma diferente y efectiva de gestionar el mejoramiento de confiabilidad de los equipos y eliminar o reducir el riesgo de no disponibilidad de las plantas de proceso, el principal generador de costos. En este trabajo se utiliza una metodología enfocada a la evaluación cuantitativa del riesgo de no-confiabilidad, demostrada a través de una aplicación en sistemas rotativos redundantes (típico de refinerías), con el objeto de plantear estrategias de mitigación de riesgo con alternativas diferentes a las desarrolladas en la metodología tradicional RCM.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 *Objetivo General*

Mejorar la confiabilidad de los equipos rotativos y reducir el riesgo operacional de apagada de plantas por falla de los sistemas en las plantas de proceso.

### 2.2 *Objetivos Específicos*

- a. Desarrollar una Metodología para definir un programa de Mejoramiento de los equipos Rotativos a través de la evaluación cuantitativa del riesgo.
- b. Crear un programa para la simulación del riesgo de no confiabilidad en sistemas redundantes con 2 equipos y 4 componentes.
- c. Aplicar la metodología completa a una planta de Cracking Catalítico.

## 3 MARCO TEORICO

### 3.1 *Perfil de funcionalidad de un equipo*

La falla de un ítem se define como la pérdida total o parcial de la función principal para la que fue instalado. Se pueden definir varios estados operativos, pero los estados básicos se resumen en dos que son mutuamente excluyentes: El ítem opera (SoFu) o está en falla (SoFa). La vida útil de

cualquier elemento esta alternando entre “SoFu” y “SoFa”. Los diferentes estados del equipo durante el tiempo de misión se denominan perfil de funcionalidad (MORA, 2009).

### 3.2 RCM Estándar

De acuerdo con la norma SAE JA1011, Evaluation Criteria for RCM Processes, el proceso debe cumplir unas condiciones mínimas para ser considerado dentro del estándar. En general, un RCM debe responder las siguientes preguntas en el orden que se lista a continuación:

1. ¿Cuál es la función que debe cumplir el ítem (componente, equipo o sistema) dentro de la planta?
2. ¿En qué formas o modos puede fallar el ítem en su misión de proveer la función requerida?
3. ¿Cuáles son los eventos que causan cada falla?
4. ¿Qué pasa cuando ocurre cada falla? ¿Cuáles son las consecuencias?
5. ¿De qué manera preocupa cada falla?
6. ¿Qué tarea sistemática y proactiva puede implementarse para prevenir o reducir a un satisfactorio nivel, las consecuencias de la falla?
7. ¿Qué se debe hacer, en caso de que no se haya encontrado una tarea preventiva que logre bajar los niveles de riesgo a un valor aceptable?

### 3.3 Premisas del S-RCM:

Las siguientes son premisas del análisis S-RCM. Estas premisas son idealizaciones que distan de la realidad en la refinería de Barrancabermeja y se convirtieron en el objetivo principal del presente trabajo para proponer el nuevo modelo:

- Los equipos auxiliares están disponibles.
- No se analizan fallas múltiples.
- Se planea y programa oportunamente.
- El cálculo económico de pérdidas por falla se estima con el tiempo óptimo de reparación.
- Las demoras en planeación no están incluidas.
- Los repuestos esenciales están disponibles.
- Las fallas en la ejecución de procedimientos de mantenimiento y montaje no se tienen en cuenta.

### 3.4 Distribuciones de probabilidad

En este documento utilizaremos especialmente distribuciones continuas de probabilidad. Cuando la variable aleatoria toma valores en el conjunto de los números reales, la distribución de probabilidad está completamente especificada por la función de distribución, cuyo valor en cada real  $x$  es la probabilidad de que la variable aleatoria sea menor o igual que  $x$ : hablamos de un intervalo en vez de un valor puntual de nuestra variable aleatoria (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2007).

A continuación describiremos en mayor detalle la distribución exponencial y la distribución lognormal, por su uso dentro de los cálculos de simulación del presente trabajo de tesis.

#### 3.4.1 Distribución exponencial

Los tiempos entre llegadas en instalaciones de servicio y los tiempos de operación antes de la falla de componentes y sistemas eléctricos a menudo quedan bien modelados por la distribución exponencial. (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2007) La variable aleatoria continua  $X$  tiene una distribución exponencial, con parámetro  $\beta$ , si su función de densidad está dada por:

$$\frac{1}{\beta} e^{-x/\beta} \quad \text{Para } x > 0 \quad (1)$$

#### 3.4.2 Distribución lognormal

La distribución log-normal es una distribución de probabilidad de cualquier variable aleatoria con su logaritmo normalmente distribuido. Si  $X$  es una variable aleatoria con una distribución normal, entonces  $\exp(X)$  tiene una distribución log-normal (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2007).

La variable aleatoria continua  $X$  tiene una distribución logarítmica normal si la variable aleatoria  $Y=\ln(X)$  tiene una distribución normal con media  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$ . La función de densidad de  $X$  que resulta es:

$$F(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma x} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} [\ln(x) - \mu]^2}, \text{ Para } x \geq 0, \\ F(x; \mu, \sigma) = 0, \text{ Para } x < 0. \quad (2)$$

## 4 METODOLOGIA

La metodología general de esta investigación se resume en el esquema de la Figura 1, donde se distinguen dos grandes bloques. En el primer bloque, el objetivo principal es obtener la evaluación cuantitativa del riesgo para cada uno de los sistemas rotativos de la planta. En el segundo bloque, se utilizan resultados del valor esperado del riesgo para definir un programa priorizado de trabajo, con el objeto de reducir el riesgo a niveles aceptables.



**Figura 1** METODOLOGIA GRISCO: Gestión De Riesgo Con Simulación De Confiabilidad

### 4.1 Modelo de Confiabilidad

Para la modelación de datos de confiabilidad la bibliografía encontrada fue muy variada y abundante. Algunos autores proponen que las variables de confiabilidad, como la tasa de falla (FR, Failure Rate) y el Tiempo Para la Falla (TTF, Time to Failure), sean modelados por medio de una función exponencial (OREDA, 2002; API, 2007). Otras fuentes importantes sugieren la aplicación de la función exponencial y la función weibull en casos especiales (MOSS, 2005). El caso más general sugiere la aplicación inicial de weibull y luego proceder con un análisis de bondad de ajuste (MORA, 2009). En nuestro caso y mientras sea posible, se seguirá un procedimiento general que evalúa cualquier distribución de las nombradas, incluso la función weibull con dos y tres parámetros (Ling & Pan, 1997).

### 4.2 Modelo de Costos

En este numeral se describe la forma para obtener el costo total de un sistema rotativo con un equipo redundante teniendo en cuenta el valor del dinero en el tiempo. El costo total es la suma del costo de los diferentes componentes en el sistema. Para cada componente (Bomba, Motor o Turbina), el costo en un tiempo de misión (M) se deriva de la suma del costo inicial  $C_i$ , más el costo de mantenimiento preventivo  $C_p$ , más el costo de mantenimiento correctivo  $C_c$ . La función total de costo para un sistema de Bombeo  $SP_i$ , compuesto por 2 bombas ( $P_1$  y  $P_2$ ) movidas por motor y turbina respectivamente (M y T), puede ser expresada así:

$$\text{Costo Total } (SP_i) = \sum((C_{iP1} + C_{pP1} + C_{cP1}) + (C_{iP2} + C_{pP2} + C_{cP2}) + C_{iM} + C_{pM} + C_{cM}) + (C_{iT} + C_{pT} + C_{cT}) \quad (3)$$

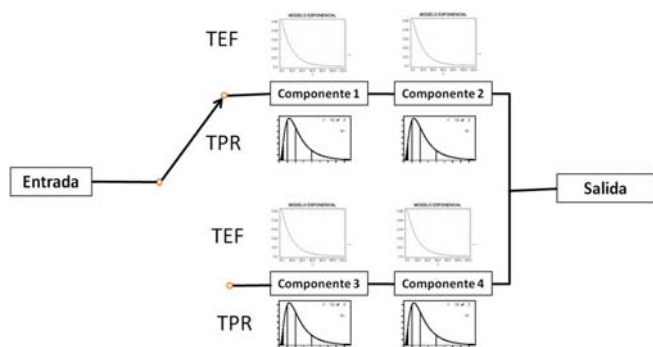
Cada uno de dichos costos se lleva a valor presente utilizando interés continuo. Por ejemplo, los costos por fallas de Turbina se obtienen con la siguiente expresión (asumiendo una tasa de retorno "r" que define el usuario para evaluar sus proyectos):

$$C_{cT} (SP_i) = \sum(C_{RT} * \exp(-r * T_n / 360)) \quad (4)$$

Evaluada desde  $n=1$  hasta  $N$ , donde  $N$  es el número de fallas en el tiempo de misión  $M$ ,  $CRT$  es el costo de reparación por falla de la turbina y  $T_n$  es cada uno de los tiempos en que ocurre cada falla.

### 4.3 Simulación del perfil de funcionamiento para un sistema típico

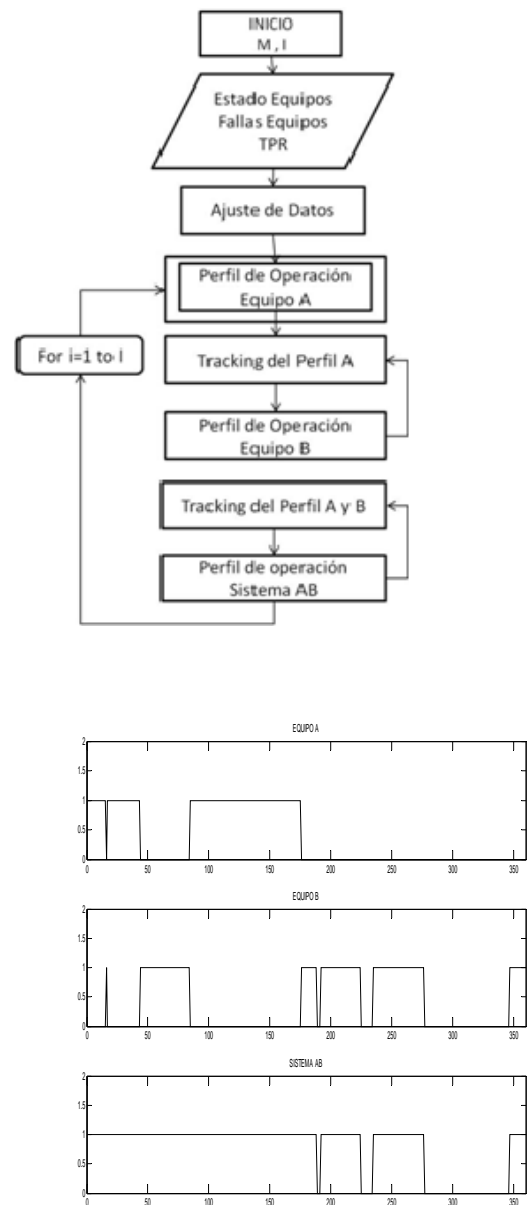
El modelo básico de simulación se realizó sobre un sistema de bombeo con dos equipos A y B, con el equipo A como el principal y el Equipo B como equipo en Standby. Cada Equipo tiene 2 componentes y el sistema consta en total de 4 componentes. Para el modelo de simulación se requieren 8 variables aleatorias por sistema, 2 por cada componente. Las variables a modelar estadísticamente son el TEF (tiempo entre fallas, con distribución exponencial) y el TPR (tiempo para reparar, con distribución lognormal) para cada uno de los cuatro componentes del sistema. Ver Figura 2.



**Figura 2** Modelo básico de simulación para sistemas con stand-by (el autor)

Primero se escoge un tiempo de misión  $M$  y un Número de Simulaciones, se asume que al principio todos los equipos y componentes están disponibles. Para la Primera Simulación se generan números aleatorios de la función  $TTF1A$  y  $TTF2A$  de los componentes (1 y 2) del equipo principal (A), el menor de los dos se considera como la primera falla. Se genera un tiempo de reparación de acuerdo al componente fallado  $TTR1A$  o  $TTR2A$ . Una vez completado el tiempo de misión, se obtiene el perfil de funcionamiento del equipo principal A. Para

desarrollar el perfil de funcionamiento del equipo B, se analizan los tiempos en que el sistema A no está disponible y se procede de manera similar. El perfil de operación del sistema se obtiene sumando los perfiles de operación de los equipos A y B. Ver Figura 3.



**Figura 3** Una realización del Modelo de Simulación para un Sistema Redundante (el

#### 4.4 Modelo de Valoración de la Criticidad del Riesgo

Una vez obtenido el valor esperado del riesgo de cada sistema rotativo, se procede con la valoración de criticidad que depende de las preferencias del decisor. Ecopetrol ha definido estos criterios a través de la matriz RAM (Risk Assessment Matriz), la cual se viene trabajando a lo largo de la organización desde el año 2002 con el proyecto de optimización de la refinería de Barrancabermeja con Shell. La matriz RAM vigente se muestra en la Figura 4.

CONSECUENCIAS					PROBABILIDAD				
Personas	Económica	Ambiental	Clientes	Imagen de Empresa	A	B	C	D	E
					No ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Empresa	Sucede varias veces al año en la Empresa	Sucede varias veces al año en la Unidad.
Una o mas fatalidades	Catastrófica > \$10M	Contaminación Irreparable	Veto como proveedor	Internacional	5	M	M	H	VH
Incapacidad permanente (parcial o total)	Grave \$1M a \$10M	Contaminación Mayor	Pérdida de participación en mercado	Nacional	4	L	M	M	H
Incapacidad temporal (>1 día)	Severo \$100k a \$1M	Contaminación Localizada	Pérdida de clientes	Regional	3	N	L	M	H
Lesión menor (sin incapacidad)	Importante \$10k a \$100k	Efecto Menor	Quejas y/o reclamos	Local	2	N	N	L	M
Lesión leve (quejas o ausios)	Marginal <\$10k	Efecto Leve	Incumplir especificación	Interna	1	N	N	N	L
Ninguna lesión	Ninguna	Ningún efecto	Ningún impacto	Ningún impacto	0	N	N	N	N

Figura 4 Matriz RAM vigente (Ecopetrol S.A.)

#### 4.5 Modelo de Análisis de Decisión

En el tema de análisis de decisiones bajo riesgo se estudiaron varias metodologías, se consideró que las más apropiadas por su sencillez son las que inician por la identificación de la situación problemática, luego la definición de alternativas, la modelación del problema, luego la selección de la mejor alternativa, realización de análisis de sensibilidad y validación del modelo para finalmente proceder con la implementación de la alternativa seleccionada. Para adelantar la evaluación cuantitativa de las alternativas identificadas se pueden aplicar diferentes metodologías, como los arboles de decisión si se requiere de una secuencia y el criterio principal es de tipo económico, o la aplicación de la Técnica de la Utilidad Multiatributos en caso de utilizar múltiples criterios de decisión. Estas

herramientas también se pueden agrupar en un marco metodológico general (CASTILLO, 2006).

### 5 Trabajo práctico: PLANTA CRACKING UOP I- Refinería Barrancabermeja

#### 5.1 Generalidades del proceso Cracking Catalítico en la Refinería de Barrancabermeja

Dentro del proceso general de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB) las unidades de cracking o ruptura catalítica están ubicadas aguas debajo de las unidades de destilación atmosférica y destilación al vacío como se muestra en la Figura 5.

En general las plantas de cracking fueron construidas con el objetivo de convertir del 70 al 75% de una mezcla de Gasóleo (GAO), Crudo Reducido Cusiana (CRC) y Aceite des metalizado e Hidrogenado (DMO y DMOH) en productos más livianos y valiosos, a saber:

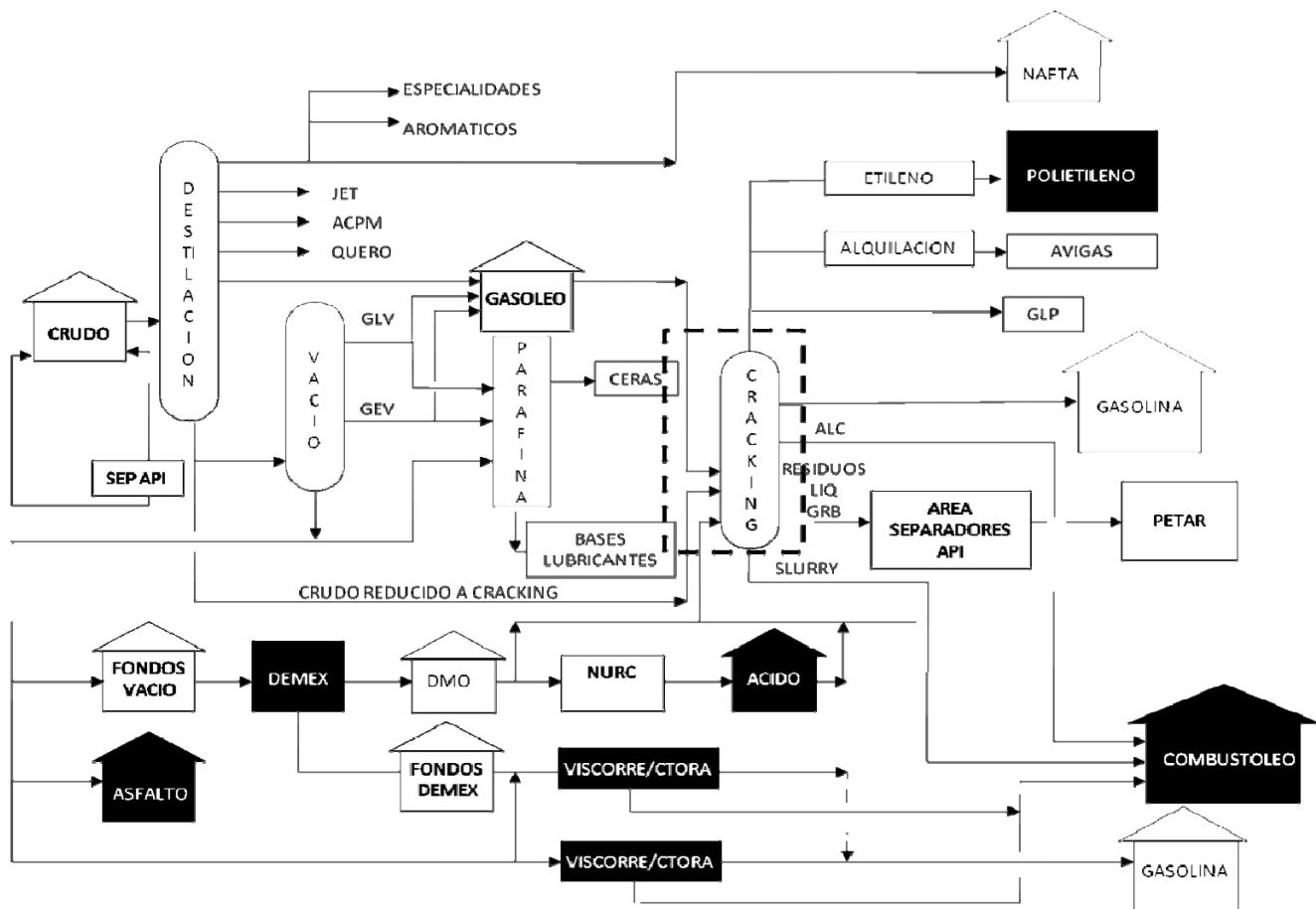
- Producción de gasolina craqueada RON 94.
- Producción de Gas Licuado de Petróleo (GLP).
- Producción de Etano-Etileno para la cadena de producción de polietileno.

#### 5.2 Descripción de la planta UOP I

La Unidad de Ruptura Catalítica UOP I (URC-UOP I) fue diseñada por la firma norteamericana de ingeniería Universal Oil Products (UOP), para procesar 28000 BPD de carga. La construcción inicio en el año de 1974 y su puesta en funcionamiento tuvo lugar en 1979. La UOP I se divide en 4 secciones, para obtener los productos de GLP, Gasolina, Etano-Etileno y Azufre, según la Figura 8, y se describe a continuación:

Sección Craking y Fraccionamiento U-2700: Su función es convertir la carga en productos valiosos (Gasolina de alto octanaje y GLP) a través de una reacción catalítica. Los equipos principales son el reactor, regenerador y la torre fraccionadora.

- Sección Unidad Recuperadora de Vapor (VRU) Lado Caliente, U-2750:



**Figura 5** Diagrama general de la Refinería de Barrancabermeja (Consultores Unidos S.A. Informe de valoración de Ecopetrol, contrato No.4021504. Año2009

El objeto es maximizar la recuperación de productos de la reacción, manteniendo cortes y especificaciones de calidad de cada producto por medio de operaciones de separación.

■ Sección Tratamientos U-2850 y U2870:

En la U2850 el objeto es “endulzar” la gasolina (absorción de H<sub>2</sub>S y oxidación de mercaptanos a disulfuros con soda, catalizador y aire) para llevarla a especificaciones.

■ U2870 (Amina): absorción de gases ácidos (H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>) de corrientes de gas esponja y GLP, aquí se

regenera la solución de amina (MEA) y libera H<sub>2</sub>S hacia planta de azufre.

■ Sección Recuperación de Etano-Etileno VRU Lado Frío U-2750:

Los gases de cima son condensados y fraccionados para producir destilado de baja presión. Los gases no condensados son convertidos en destilado de alta presión, el cual es despojado de compuestos livianos para producir gasolina debutanizada que con la nafta pesada forma la gasolina POOL. La parte liviana es separada en GLP y gas combustible.

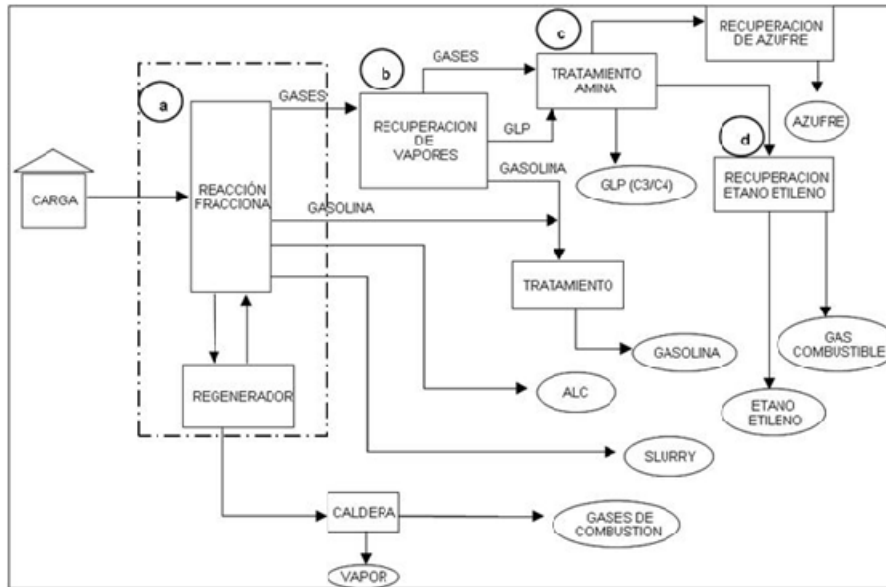


Figura 6 Diagrama esquemático de la planta UOP I

### 5.3 Determinación del impacto económico por falla de cada Sistema Rotativo

El primer paso para determinar el riesgo operativo por falla de un sistema rotativo es la identificación de la consecuencia operacional. En la UOP1 fueron necesarias varias sesiones de trabajo con ingenieros de procesos y supervisores operativos. En estas sesiones se analizaron consecuencias por no disponibilidad de cada uno de los sistemas rotativos de la planta.

La Tabla 1 muestra una selección del resultado final de este ejercicio. Se filtraron los equipos que producen apagada general de la planta, es decir las secciones de cracking y VRU, un total de 16 equipos que pertenecen a 8 sistemas rotativos. Un ejercicio similar se hizo con el resto de equipos rotativos de la planta, para identificar los sistemas que producen apagada del lado frío de UOP1, los que producen degradación de productos y los que alcanzan a impactar la planta Unibon. Una vez identificada la consecuencia operativa, el siguiente paso es determinar el valor en dólares de los potenciales económicos por lucro cesante de plantas, información oficial que emite la coordinación de economía de la GRB.

Se modelaron los datos de 29 meses entre los años 2009 y 2011, para hallar la carga típica de la planta (24000BPD-Barriles Por Día) y el valor económico de la pérdida potencial diaria (moda) de consecuencias operativas identificadas. El impacto de los sistemas rotativos en la planta UOP1 se puede

agrupar en siete consecuencias operativas, el costo económico diario se muestra en la Tabla 2.

### 5.4 Modelos de confiabilidad para TMEF

Para alimentar el modelo de cuantificación de riesgo, se requiere ajustar distribuciones de probabilidad a los datos históricos de tiempo entre fallas (TEF) y tiempo para reparar (TPR). En el primer intento para calcular la mejor distribución de la variable aleatoria TEF, se creó un programa en Matlab 2010 tomando los datos de RIS (Refinery Information System) en el reporte de Estado de equipos de Bombeo para UOP1: pero la cantidad de datos obtenidos fue < 10 en todos los casos y por tanto no se obtuvo mayor precisión con este método.

El problema de pocos datos ha sido documentado anteriormente (MOSS, 2005) y la comunidad científica lo resuelve asumiendo comportamiento Poisson Homogéneo (HPP<sup>1</sup>) cuya tasa de falla se modela con distribución exponencial. Este supuesto fue el que finalmente prevaleció en el presente trabajo. Siendo así, para caracterizar la distribución exponencial solo se requiere determinar un parámetro  $\lambda$  que es la tasa de falla en un tiempo "t". El tiempo entre fallas TMEF se obtiene con el inverso de  $\lambda$ , es decir, dividiendo el tiempo operativo real entre el número de fallas del periodo. En nuestro caso, el tiempo operativo real se tomo del RIS como valor acumulado de los días operativos para cada equipo en el periodo comprendido entre los años 2006 a 2011.

<sup>1</sup> HPP=Homogeneous Poisson Process

**Tabla 1** Análisis de consecuencias operativas por no disponibilidad de sistemas rotativos

Seccion	Sistema Rotativo	Producto	Impacto
Carga	SP2712A	GAO+DMOH	Apagada UOP1
Carga	SP2712B	GAO+DMOH	Apagada UOP1
Cracking	SP2713A	Condensado	Apagada UOP1
Cracking	SP2713B	Condensado	Apagada UOP1
Cracking	SP2722A	Lube Oil	Apagada UOP1
Cracking	SP2722B	Lube Oil	Apagada UOP1
Cracking	SP2762A	Oil Control	Apagada UOP1
Cracking	SP2762B	Oil Control	Apagada UOP1
Enfriamiento gases	SP2701A	Gases Combustion	Apagada UOP1
Enfriamiento gases	SP2701B	Gases Combustion	Apagada UOP1
Fraccionamiento	SP2702A	Slurry	Apagada UOP1
Fraccionamiento	SP2702B	Slurry	Apagada UOP1
Recuperadora VRU	SP2752A	Destilado HP a T2753	Apagada UOP1
Recuperadora VRU	SP2752B	Destilado HP a T2753	Apagada UOP1
VRU Gas esponja	SP2753A	Gasolina+GLP	Apagada UOP1
VRU Gas esponja	SP2753B	Gasolina+GLP	Apagada UOP1

Los datos de fallas se obtuvieron de la base de datos “Elipse” de MINCOM, que utiliza actualmente Ecopetrol. El conteo de fallas se realizó entre los años 2006 a 2011.

### 5.5 Modelos de confiabilidad para TPR

La otra variable aleatoria para simular el perfil de funcionalidad de un sistema, es el tiempo para reparar (TPR) de cada uno de los componentes (Bombas, Turbinas y Motores).

**Tabla 2** Potencial de consecuencias (datos alterados por confidencialidad)

Afectacion	USD\$/dia	Equipos	Sistemas
Lado frio+unibon	\$317.000	2	1
UOP1	\$250.000	19	10
Lado frio	\$ 89.000	18	9
Carga a 20KBPD	\$ 48.000	16	8
Degradar GLP	\$ 57.929	2	1
PGR a GLP	\$ 19.920	4	2
Sin Impacto	\$ -----	37	19
	<b>TOTAL</b>	<b>98</b>	<b>50</b>

Este tiempo para reparar es un resultado del comportamiento del proceso de mantenimiento dentro de la GRB y es dependiente del impacto de la planta dentro del esquema general de la refinería. Los datos para análisis fueron tomados del reporte TPR (tiempo para reparar, RIS) con los datos del año 2009. Utilizando el programa Crystal Ball, se obtuvo como mejor ajuste una lognormal, con parámetros “mu” de 3.8909 y “sigma” de 0.98633, para representar los tiempos de reparación de bombas. Los parámetros estimados de la función lognormal para las turbinas fueron  $\mu=3.983$  y  $\sigma=1.233$ ; mientras para los motores se obtuvieron valores de  $\mu=3.864$  y  $\sigma=1.0325$ .

### 5.6 Simulación del Riesgo Operativo de Sistemas Rotativos

Para aplicar el modelo explicado en el numeral 4.3 y obtener el valor esperado de riesgo, se desarrolló el programa “SIMULARVPN.m” en el programa comercial Matlab 2010 para un tiempo de misión “m” y un número de iteraciones “I”. Para estandarizar el procedimiento se trabajó con 10 años de misión y 3000 iteraciones, que resultaron



suficientes para obtener repetibilidad del resultado. Los datos de entrada del programa son:

Tasa de descuento r.

Los parámetros “mu” y “sigma” para simular el TPR de bombas, motores y turbinas

TMEF para las bombas, motor y turbina del sistema de bombeo bajo análisis

Costos de reparación: bomba, motor y turbina.

Impacto económico por No-disponibilidad.

Luego de correr el programa “SIMULARVPN.m” para cada uno de los equipos rotativos se obtuvo el riesgo base (valor esperado) para cada uno de los 50 sistemas rotativos de UOP1. Ver detalle en tabla 3.

### 5.7 Identificación del problema de decisión.

Los datos del riesgo base y el ranking por criticidad de los equipos de la planta UOP1 son el resultado de la estrategia actual de mantenimiento (S-RCM). Este riesgo se obtiene de la interrelación de las variables aleatorias de TEF y TPR de cada componente del sistema rotativo en la planta: motores, bombas y turbinas. El paso siguiente es la

definición de un plan de trabajo que involucre nuevas estrategias, con el objeto de reducir el riesgo actual a niveles aceptables por la organización. Esto, lógicamente, se logra aumentando el TMEF (tiempo medio entre fallas) de los equipos o reduciendo los tiempos TPR. En este estudio nos concentramos en definir estrategias para obtener mayores TMEF, mientras que el TPR se asume que continúa de acuerdo con el comportamiento histórico.

En una consulta sobre como aumentar el TMEF de los equipos, los expertos de Ecopetrol consideraron varias alternativas:

Alternativa 1, Equipo Nuevo

Alternativa 2, Re-manufacturado

Alternativa 3, Reparado por Ecopetrol

Alternativa 4, Repara + Control de Cambios.

La alternativa 4 se considera igual en costo a la alternativa 3, pero con TMEF serán mejores debido a que el control de cambios supone una mejora.

**Tabla 3** Clasificación del Riesgo Base Potencial para los sistemas Rotativos de UOP1(datos alterados por confidencialidad)

SISTEMA	IMPACTO	VPN/ ANO	RAM	Fallas bombas	Fallas turbinas	Fallas motores	TMEF bomba	TMEF turbina	TMEF motor
SP2872	LADO FRIO+UNIBON	\$ 12,640,000	VH	9	5	3	205	142	388
SP2713	APAGADA CK1 Y VRU	\$ 4,744,000	H	3	0	5	569	431	283
SP2702	APAGADA CK1 Y VRU	\$ 4,350,000	H	2	6	0	922	307	NA
SP2722	APAGADA CK1 Y VRU	\$ 3,840,000	H	1	0	3	924	253	532
SP2766	APAGADA LADO FRIO	\$ 2,847,000	H	8	4	0	207	169	978
SP2701	APAGADA CK1 Y VRU	\$ 2,840,000	H	2	2	0	607	291	1265
SP2765	APAGADA LADO FRIO	\$ 2,480,000	H	5	4	0	496	207	831
SP2767	APAGADA LADO FRIO	\$ 2,225,000	H	7	3	0	251	169	978
SP2756	APAGADA LADO FRIO	\$ 2,036,000	H	8	2	1	229	401	1027
SP2707	BAJAR CARGA 20KBPD	\$ 1,640,000	H	4	3	2	324	121	427
SP2763/68	APAGADA LADO FRIO	\$ 1,575,000	H	3	0	0	331	NA	626
SP2704	BAJAR CARGA 20KBPD	\$ 1,490,000	H	7	5	0	446	141	1133
SP2774	APAGADA LADO FRIO	\$ 1,400,000	H	5	4	0	407	213	1061
SP2777	APAGADA LADO FRIO	\$ 791,500	M	2	4	0	915	501	NA
SP2708	BAJAR CARGA 20KBPD	\$ 748,000	M	5	2	1	497	367	1038
SP2710	BAJAR CARGA 20KBPD	\$ 682,000	M	3	4	0	584	124	1346
SP2757	DEGRADAR GLP O PGR	\$ 514,500	M	1	3	1	917	121	1471
SP2762	APAGADA LADO FRIO	\$ 491,000	M	0	1	0	835	954	715
SP2755	APAGADA LADO FRIO	\$ 467,000	M	2	1	0	920	428	1411
SP2711	BAJAR CARGA 20KBPD	\$ 456,600	M	3	1	1	538	309	1532
SP2712	APAGADA CK1 Y VRU	\$ 450,100	M	3	3	0	436	129	1458

### 5.7.1 Secuencia del proceso de decisión

Ecopetrol puede decidir iniciar el proceso de reducción de riesgo de inmediato, escogiendo entre las alternativas mencionadas, o puede realizar primero un estudio de Análisis de Causa Raíz (RCA) previo al programa de mejoramiento. Hacer o no el RCA es una decisión importante para definir el plan de reducción de riesgos, sobre todo teniendo en cuenta que las probabilidades de éxito son diferentes para cada alternativa con relación a si se hace o no, de manera previa, el estudio de RCA.

### 5.7.2 Identificación de variables aleatorias

La cuantificación de las consecuencias de cada alternativa se puede realizar de diferentes formas, en este estudio se trabajó con el VPN (valor presente neto) de la reducción esperada del riesgo operativo. Para cada alternativa se calcula el riesgo residual realizando la simulación con los nuevos TMEF que se pueden obtener con cada una de ellas. Algunos datos se podrían tomar del desempeño promedio de la industria, como los tabulados por OREDA (OREDA, 2002), pero dado que existe una experiencia importante con cada una de las alternativas dentro de Ecopetrol, los datos de TMEF de cada alternativa fueron obtenidos a través de una consulta de expertos.

### 5.7.3 Información económica relevante

Para determinar las consecuencias de cada alternativa se revisaron datos históricos, bases de datos reconocidas y la consulta directa a fabricantes de equipos. El costo de turbinas nuevas se obtuvo de un informe del Departamento de Energía de los estados unidos (Loh, 2002). El costo de los motores eléctricos se obtuvo directamente de catálogos de los fabricantes de motores U.S. Motors y SIEMENS. Para la alternativa de Equipo Remanufacturado o reparado por un fabricante, los datos de turbinas fueron suministrados por el taller de reparación REVAK de Estados Unidos. Los datos de reparación de bombas fueron obtenidos del contrato de reparación que Ecopetrol realizó con la firma Flow-Serve en el año 2007. Los valores para reparación de motores se obtuvieron de la solicitud de contratación para el contrato 2011 solicitado por la autoridad eléctrica de la GRB. Para el caso de turbinas reparadas, se utilizó el histórico registrado en el sistema de mantenimiento de la GRB.

### 5.7.4 Estructuración del problema de decisión

Para escoger la técnica utilizar en el problema de decisión, es importante realizar una estructuración de las variables y parámetros que contiene el problema. Uno de los puntos más importantes a tener en cuenta, en nuestro caso, es la decisión de realizar un estudio de RCA antes de elegir la alternativa de reducción de riesgo. El problema contiene entonces una secuencia en el proceso de decisión, alternativas, eventos probabilísticos y consecuencias finales de las acciones; esto encaja con los elementos necesarios que permiten utilizar, apropiadamente, la técnica de arboles de decisión (CASTILLO, 2006). Con la información descrita, se construyeron arboles de decisión en el software DPL (Licenciado por Syncopation).

## 6 RESULTADOS Y ANALISIS

El primer resultado del presente trabajo es la identificación de los sistemas críticos de la planta. Al utilizar la metodología GRISCO, se obtiene una distribución de riesgo base que permite identificar claramente los sistemas rotativos críticos en la planta (VH, H). Ver Tabla 3.

El mejor plan de trabajo para un riesgo ALARP, con igual TPR, en equipos con riesgo base VH y H, debe enfocarse en el mejoramiento del TMEF de todo el sistema. Ver Tabla 4.

El análisis de los arboles de decisión arrojó que en todos los casos la mejor opción para las turbinas de la UOP1 es la reposición por nuevos equipos con un previo análisis de causa raíz (RCA).

Un ejercicio interesante para la UOP1 fue el de conocer el TMEF para llevar cada sistema rotativo a niveles de bajo riesgo (L). Se realizó primero un análisis de sensibilidad variando el TMEF para todos los componentes del sistema, manteniendo fijos los parámetros de la distribución para el TPR:

Si el Riesgo es VH, TMEF debe ser  $> 10$  años

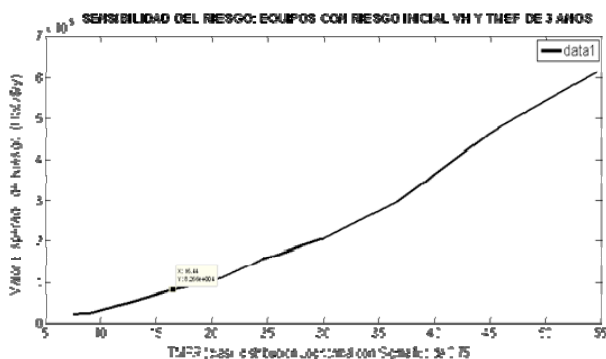
Si el Riesgo es H, TMEF debe ser  $> 8$  años

En la práctica es difícil obtener TMEF que superen 8 años: los equipos tendrían que ser nuevos y de un diseño robusto. La tabla 4, muestra la sensibilidad y evidencia la necesidad de un enfoque sistémico para la reposición de activos. Pero, si no existe una política clara de reposición, debe plantearse otro tipo de estrategias para reducir el riesgo.

**Tabla 4** Resultados de los arboles de decisión, sin mejorar tiempos de reparación. (datos alterados por confidencialidad)

SISTEMA	RIESGO INICIAL	RAM INICIAL	PRIORIDAD FINAL	ENFOQUE REPOSICION	RIESGO FINAL	RAM FINAL
SP2872	\$ 12,640,000	VH	Bomba	SISTEMA COMPLETO	\$ 343,070	M
SP2713	\$ 4,744,000	H	Motor	SISTEMA COMPLETO	\$ 297,340	M
SP2712	\$ 4,400,600	H	Turbina	SISTEMA COMPLETO	\$ 297,340	M
SP2722	\$ 3,840,000	H	Motor	SISTEMA COMPLETO	\$ 100,000	L
SP2702	\$ 4,350,000	H	Turbina	REPONER TURBINA	\$ 845,240	M
SP2701	\$ 2,840,000	H	Turbina	SISTEMA COMPLETO	\$ 100,000	L
SP2766	\$ 2,847,000	H	Bomba	SISTEMA COMPLETO	\$ 297,340	M
SP2765	\$ 2,480,000	H	Turbina	SISTEMA COMPLETO	\$ 100,000	L
SP2767	\$ 2,225,000	H	Bomba	SISTEMA COMPLETO	\$ 100,000	L
SP2756	\$ 2,036,000	H	Bomba	SISTEMA COMPLETO	\$ 59,464	L
SP2707	\$ 1,640,000	H	Turbina	SISTEMA COMPLETO	\$ 100,000	L
SP2763/68	\$ 1,575,000	H	Bomba	SISTEMA COMPLETO	\$ 59,464	L
SP2704	\$ 1,490,000	H	Turbina	SISTEMA COMPLETO	\$ 100,000	L
SP2774	\$ 1,400,000	H	Motor	SISTEMA COMPLETO	\$ 100,000	L
SP2708	\$ 748,000	M	Bomba	BOMBA	\$ 312,993	M
SP2777	\$ 791,500	M	Turbina	TURBINA	\$ 406,900	M
SP2710	\$ 682,000	M	Turbina	TURBINA	\$ 312,400	M
SP2757	\$ 514,500	M	Turbina	TURBINA	\$ 268,810	M
SP2711	\$ 456,600	M	Bomba	REMANUFACTURA BOMBA	\$ 296,893	M
SP2706	\$ 312,000	M	Motor	MOTOR	\$ 155,805	M
SP2758	\$ 201,070	M	Turbina	SEGUIR CON RCM	\$ 201,070	M

Para evaluar lo comentado en el párrafo anterior, se realizó un análisis de sensibilidad del riesgo operativo, pero esta vez variando los parámetros de la distribución del tiempo para reparar (TPR), manteniendo constante el TMEF de los componentes. El resultado para equipos con riesgo VH fue que para bajar al nivel L, la opción de reparar las bombas con recurso interno de Ecopetrol se convierte en la mejor si se logra bajar los tiempos TPR < 15 días, siempre y cuando el TMEF de los componentes sea > 3 años. Ver Figura 10.



**Figura 10** Valor esperado del riesgo Vs. tiempos de reparación

## 7 CONCLUSIONES

El modelo de gestión de riesgo operacional con simulación de confiabilidad (GRISCO), aplicado a equipos rotativos, demostró ser una herramienta útil para evaluar el desempeño del estudio S-RCM; definir los equipos críticos y obtener un plan balanceado de reducción de riesgo. Para implementarlo se debe medir el TMEF y TMRP por componente.

De acuerdo con el presente estudio, los análisis de causa raíz (RCA) deben utilizarse siempre, como una política de la organización, previos a la inversión de reposición de componentes rotativos.

Al plantear reposición de activos, el mejor plan para equipos con riesgo base VH, H y M, debe mejorar todo el sistema.

Si no hay plan de reposición, se debe trabajar en aumentar el TMEF de los componentes hasta 3 años y reducir los TPR a 15 días para el caso de UOP1.

## 8 TRABAJOS FUTUROS

Es recomendable adelantar un nuevo estudio, complementario al presente trabajo, para evaluar en cada planta de la GRB, la alternativa de cambiar las turbinas de vapor por motores eléctricos.

Otro estudio que se requiere desarrollar, y cuyo impacto en la GRB sería de gran importancia, es uno con el propósito de evaluar estrategias para reducir el tiempo para reparar TPR de los equipos rotativos.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

1. API, A. P. (Julio de 2007). Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment. *API 689 (ISO 14224: 2006 IDENTICA)*.
2. Associates, Solomon. (2008). *North and South American Fuels Refinery Performance Analysis*. Ecopetrol.
3. Castillo Heranandez, M. (2006). *Toma de Decisiones en las Empresas: Entre el arte y la tecnica*. Bogota, Colombia: Ediciones Uniandes.
4. Consultores Unidos S.A.; TF Auditores y Asesores LTDA. (2009). *Toma fisica y valoracion del grupo de propiedad planta y equipo de los activos de propiedad de Ecopetrol*. Bogotá: Contrato No.4021504.
5. Crystall Ball Software. Oracle (2010). Predictive modeling, forecasting, simulation, and optimization. Recuperado el 4 de Agosto de 2010 de: [Http://www.oracle.com/us/products/applications/crystalball/crystalball-066563.html](http://www.oracle.com/us/products/applications/crystalball/crystalball-066563.html)
6. Dulcey, L. A. (2004). *El empleo de la simulación en la optimización de políticas de mantenimiento. Proyecto de Magíster en Ingeniería Mecánica*. Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia: Universidad De Los Andes.
7. Goel, H., Grievink, J., Herder, P., & Weijnen, M. (2002). Integrating reliability optimization into chemical process synthesis. *Reliability Engineering and System Safety*, 247-258.
8. Hernandez, J. (2006). Impact of the pump systems availability in the plant maintenance: model development. *Dissertation for degree of master science*. Manchester, England: Manchester University.
9. Ling, J., & Pan, J. (3 de Diciembre de 1997). A new method for selection of population distribution and parameter estimation. *Reliability Engineering & System Safety*.
10. Loh, H. (2002). *Process Equipment Cost Estimation*. Pittsburgh: Departamento de Energia de los Estados Unidos.
11. Mora, A. (2007). *Mantenimiento Estrategico para Empresas Industriales o de Servicios*. Envigado, Colombia: AMG.
12. Moss, T. R. (2005). *The Reliability Data Handbook*. New York, U.S.A: ASME Press.
13. OREDA. (2002). *Offshore Reliability Data*. Norway: SINTEF.
14. Pan, J. L. (1998). A new method for selection of population distribution and parameter estimation. *Reliability Engineering and System Safety*.
15. Raussand, M., & Oien, K. (1996). The basics concepts of failure analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 73-83.
16. SAE, JA1011. (Agosto de 1999). Evaluation criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) processes. *SAE STANDARD*.
17. Silva, M. S. (2005). *Introduccion a la confiabilidad y evaluacion de riesgos*. Bogota: UNIANDES.
18. Walpole, R., Myers, R., Myers, S., & Ye, K. (2007). *Probabilidad y estadistica para ingenieria y ciencias*. Mexico: Pearson Education.
19. Wang, H., & Pham, H. (2006). *Reliability and Optimal Maintenance*. LONDON: SPRINGER.

NOTA

1. Nombre del autor(es):

MSc. Ronald Mercado Carrasco

**Cargo Actual:** Lider de Confiabilidad de la Refinería de Barrancabermeja

**Estudios y certificaciones:**

Maestria Ingenieria Industrial (Universidad de los Andes-2011)

Ingeniero Mecánico (UIS-1996)

Certificado Nivel 3 Vibraciones Mecánicas (Vibration Institute)

Certificado S-MRP

Integrante del Grupo Central de Mantenimiento Ecopetrol S.A.

Integrante de la Autoridad Tecnica de Equipos Rotativos Ecopetrol S.A.

Facilitador Estudios RCM Ecopetrol S.A.

Facilitador Estudios RCA Ecopetrol S.A.

Especialista en equipos rotativos Ecopetrol S.A.

14 años de trabajo en Ecopetrol S.A.

2. Teléfono

a. Residencia: Avenida 2 ·2<sup>a</sup>-62, Barrio Rosario

b. Oficina: Gerencia Refinería de Barrancabermeja

c. **Celular: 310 798 9774**