

# MODELO DE JERARQUIZACIÓN HOLÍSTICA DE ACTIVOS POR CRITICIDAD BASADO EN CONFIABILIDAD OPERACIONAL

César Augusto Torrez Porras

Ing. Mantenimiento Mecánico, MSc. en Mantenimiento Industrial, MSc Ingeniería de Confiabilidad y Riesgo.

E-mail: [torrezcat@gmail.com](mailto:torrezcat@gmail.com), [torrezca@pdvsa.com](mailto:torrezca@pdvsa.com)

## **Resumen**

El análisis de criticidad y la definición del contexto operacional constituyen las primeras acciones cuando se desea implantar un modelo basado en confiabilidad, el objeto del análisis de criticidad es la jerarquización de los activos para direccionar los recursos de acuerdo al grado en que estos afecten el proceso productivo; cabe destacar que esta criticidad se ha basado tradicionalmente en el riesgo, es decir, en la relación de las fallas y sus consecuencias en la seguridad, el ambiente y el proceso productivo.

Por otra parte, la metodología Análisis Causa Raíz, establece que el origen de las fallas son: físicas, humanas y organizacionales. Ahora bien, el modelo de jerarquización propuesto considera dos aspectos, el primero es la relación del origen de la falla según el Análisis Causa Raíz y el segundo la relación de las fallas con la confiabilidad operacional, y sus cuatro pilares: confiabilidad humana, confiabilidad de los equipos, confiabilidad del diseño y de los procesos, así como también las consecuencias de dichas fallas.

La holística del modelo se debe a la identificación del origen de la falla enmarcada en los pilares de confiabilidad, que persigue, no solo determinar los activos críticos por las fallas ocurridas, sino las fallas potenciales y a su vez identificar el área de atención en donde se deben desarrollar las acciones u otros estudios encaminados a reducir la criticidad de los activos.

## **Introducción**

El Análisis de Criticidad es una herramienta que permite establecer la jerarquía o

prioridades de procesos, sistemas y equipos, facilitando la toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionando el esfuerzo y los recursos en áreas donde sea necesario mejorar la confiabilidad operacional, basado en la realidad actual.

El mejoramiento de la confiabilidad operacional de cualquier instalación, está asociado con cuatro aspectos fundamentales: confiabilidad humana, confiabilidad del proceso, confiabilidad del diseño y la confiabilidad del mantenimiento.

Por tanto, el modelo que se presenta tiene como objetivo determinar la criticidad de los de la Instalación, Sistema, Equipo y Dispositivo (ISED), considerando los pilares fundamentales de la confiabilidad operacional.

## **Antecedentes.**

Se han desarrollado gran cantidad de métodos para el calculo de jerarquización de activos por criticidad o riesgo, entre los que destacan: el método del flujograma de análisis de criticidad, proceso de análisis jerárquico (AHP) Metodología de los puntos, método de criticidad de Ciliberti, mantenimiento basado en criticidad (CBM), análisis de criticidad basada en API 1160, análisis de Criticidad Integral de Activos, criticidad del Estándar militar MIL-STD-882D.

La selección de uno u otro vendrá determinada, principalmente, por el objeto del análisis, la Información disponible y el tiempo y personal disponible.

De las metodologías antes señaladas, la gran mayoría, se basan en determinar la probabilidad de falla, frecuencia de fallas y las consecuencias de estas fallas, requiriendo un esfuerzo adicional identificar las causas de las fallas, que si se logran identificar y minimizar, se traducirá por consiguiente en una disminución del riesgo de los activos, de allí que surgió la inquietud de desarrollar un nuevo enfoque de jerarquización basado en un concepto más amplio del origen de la falla basado en confiabilidad operacional, de forma integrada.

### Fundamentos del modelo

Con el fin de determinar los aspectos que debe contemplar un modelo holístico de jerarquización basado en confiabilidad y riesgo, es necesario definir y entender los conceptos básicos que contempla el modelo.

Al respecto, el manual de mantenimiento de la empresa Petróleos de Venezuela, S.A (PDVSA), define la confiabilidad como la probabilidad de que un equipo o sistema desempeñe en forma satisfactoria la función para la que fue seleccionado (no falle), bajo condiciones de operación establecidas y durante un intervalo de tiempo determinado. [1]

En su acepción más general la confiabilidad es el complemento de la probabilidad de falla.

$$\text{Confiabilidad } (C(t)) = 1 - \text{Probabilidad de falla } (F(t))$$

$$\text{donde, } F(t) = \int f(t)$$

$F(t)$ : Probabilidad de ocurrencia de un evento (Falla) acumulada

$f(t)$ : Función de densidad de probabilidad (tiempo para la falla)

Por otra parte, el riesgo se define como el producto de la probabilidad de falla y su consecuencia. [1]

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad de ocurrencia de falla} \times \text{Consecuencias}$$

Como se observa de las definiciones anteriores, la determinación de la

confiabilidad como del riesgo de un activo, depende de la probabilidad de falla de este.

Hasta este punto se circunscriben la mayoría de los métodos de jerarquización de activos de mayor uso en la actualidad. Donde las consecuencias dependen del proceso productivo de la organización que lo aplica, pero generalmente se agrupan en impacto en la seguridad, ambiente y/o producción.

En este sentido, la concepción de jerarquizar por riesgo dependerá de la data de fallas disponible por la organización, de allí surge la definición de criticidad usada por muchas organizaciones para jerarquizar, entendiéndose esta como una medida del riesgo asociado a la falla de un activo, expresada como el producto de la frecuencia de ocurrencia de la falla o índice de probabilidad de falla y su consecuencia.

Por otra parte, la ocurrencia de las fallas está influenciada en menor o mayor medida, por factores como: las condiciones de operacionales, calidad del mantenimiento, frecuencia del mantenimiento, condiciones de diseño, entre otros.

Estos elementos que tienen relación directa con las fallas y por ende en el riesgo o criticidad de los activos, no están expresados en los diversos métodos existentes, a excepción de la norma API 1160 aplicada para establecer la criticidad en tuberías (hidrocarburos líquidos) que considera elementos adicionales para determinar la probabilidad de falla.

Donde el riesgo esta determinada por la **susceptibilidad** de la tubería a sufrir daños y la **severidad** con que estos daños puedan presentarse ante la condición mecánica existente, [2]

La citada norma evalúa, al menos 22 categorías de amenaza a la integridad de la tubería que inciden en el riesgo, que van desde Corrosión externa, Corrosión interna, Fatiga, Corrosión bajo tensión (SSC), Defectos por manufactura/construcción., Fuerzas externas, Daños mecánicos, Intervención de terceros, vandalismo,

inundaciones, movimientos telúricos entre otros.

Esta norma y los elementos que considera en las diversas categorías aplicada a equipos estáticos, son parte del fundamento del modelo de jerarquización propuesto.

Hasta ahora, se ha indicado la relación de la confiabilidad y el riesgo. Sin embargo, el concepto de confiabilidad relacionada con los equipos, se ha extendido a un concepto más amplio, que no solo abarca la confiabilidad de los equipos, sino la organización, conocido como confiabilidad operacional.

La confiabilidad operacional surge como una dimensión integradora de las diferentes funciones que se relacionan con la gestión de los activos, que busca que los procesos, las tecnologías y las personas se integren para cumplir con su propósito dentro de los límites del diseño y de las condiciones operacionales establecidas.

La Confiabilidad Operacional, cuenta con cuatro parámetros operativos: confiabilidad humana, confiabilidad de los procesos, mantenibilidad y confianza de los equipos. [1] Algunos autores incluyen un parámetro más, denominado confiabilidad de los suministros. [3]

Del concepto anterior, se desprenden los cuatro aspectos fundamentales a considerar en el modelo propuesto, es decir estos quedan definidos por los cuatro pilares operativos en la que se basa la confiabilidad operacional.



Figura 1. Pilares de la confiabilidad Operacional.

Ahora bien, surge la siguiente inquietud:

*¿Cómo se relacionan los pilares de la confiabilidad operacional con el estudio de jerarquización de activos por criticidad?*

Para responder a esta pregunta es necesario, primero definir cada uno de los pilares de la confiabilidad operacional.

Los cuatro parámetros de confiabilidad operacional son definidos como:

1.- **Confiabilidad humana:** Es la probabilidad de que un ser humano alcance de forma exitosa su misión bajo un tiempo y en unas condiciones específicas [1]. Esta compuesta por un conjunto de factores, propios de las competencias laborales, que se relacionan con la predicción, análisis y reducción del error humano, focalizándose sobre el rol de la persona en el diseño, operación, mantenimiento y gestión de un sistema. Son parte de ella elementos como la gestión del conocimiento, la formación profesional, el trabajo en equipo y la gestión del desempeño. [4]

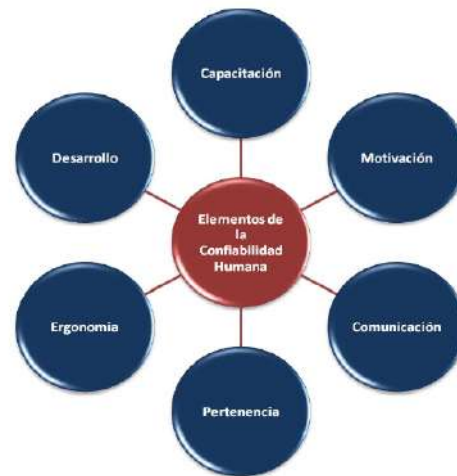


Figura 2. Elementos de la confiabilidad humana [2]

2.- **Confiabilidad de los equipos:** es la probabilidad de que un activo cumpla su función durante un tiempo determinado bajo un contexto específico [1]. Se relaciona con las estrategias de operaciones y mantenimiento para el aumento de su tiempo entre detenciones de los equipos y su impacto

sobre el sistema durante todo el ciclo de vida de los equipos y las instalaciones, dentro de su contexto operacional [4]

**3.- Confiabilidad del diseño (Mantenibilidad):** Se vincula con la confiabilidad concebida en la etapa del diseño de los equipos y los sistemas, así como las facilidades para ejecutar el mantenimiento, relacionado con la mantenibilidad, en la etapa de operación del activo, con la gestión y el apoyo logístico para la disminución de los tiempos necesarios para intervenir los equipos de forma de reducir los impactos sobre la operación.

**4.- Confiabilidad de los procesos:** es la probabilidad de que un proceso entregue lo requerido en un tiempo determinado y bajo ciertas especificaciones de calidad, cantidad y seguridad. Se asocia con la sintonía que existe entre el proceso y los procedimientos utilizados para operar las instalaciones, entre los parámetros operacionales definidos, de manera de respetar las condiciones establecidas en el diseño y cumplir con los procedimientos especificados. [4]

Con base a las definiciones antes dadas para cada pilar de la confiabilidad operacional, se observa que cada pilar de la confiabilidad operacional esta relacionado con la probabilidad.

Lo que permite afirmar que el riesgo / criticidad esta relacionado con la confiabilidad operacional como se observa a continuación:

$$\begin{aligned} \text{RIESGO} &= \text{PROBABILIDAD DE FALLA} \times \text{CONSECUENCIA} \\ \text{PROBABILIDAD DE FALLA} &= 1 - \text{CONFIABILIDAD} \\ &= 1 - \text{CONFIABILIDAD OPERACIONAL} \end{aligned}$$

Bajo este enfoque los elemento a considerar en la elaboración de una matriz para la jerarquización de activos por riesgo / criticidad, no solo esta relacionada con la confiabilidad de los activos (probabilidad de falla / frecuencia de falla), sino de los cuatro pilares de la confiabilidad operacional.

En esta etapa del modelo surgió la siguiente inquietud,

*¿Qué factores de los cuatro pilares de la confiabilidad operacional deben tomarse en cuenta para un estudio de jerarquización por criticidad y riesgo?*

Para identificar los factores relacionados con cada pilar, se consideró el fundamento de la metodología de Análisis Causa Raíz, la cual considera que la ocurrencia una falla (recurrente o no) es producto de aspectos físicos, humanos y organizacionales.

La cual se puede identificar, aplicando la técnica del árbol causal de causas, haciendo la pregunta ¿Por qué? un número de veces de manera de explicar el origen de las fallas o eventos. [5]

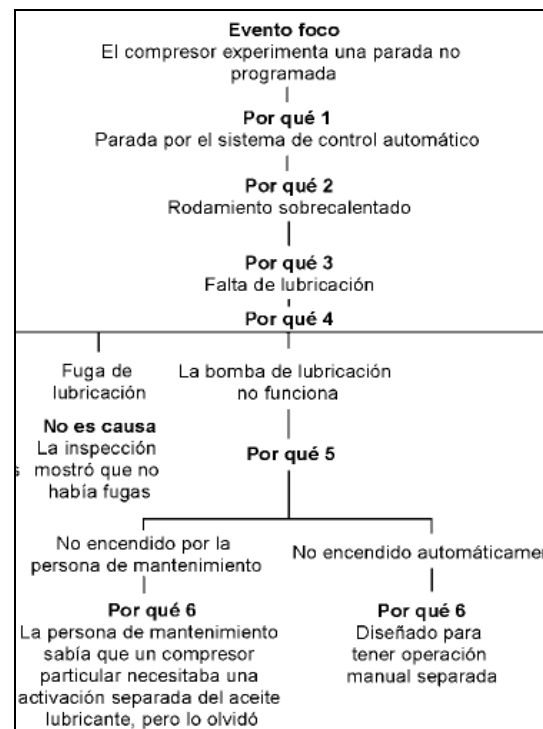


Figura 3. Ejemplo de Árbol causal de por qué [7]

El nivel de complejidad del modelo, estará determinado en el nivel de causa raíz (física, humana u organizacional) que se evalúe de cada pilar de la Confiabilidad Operacional, a modo de ejemplo en el caso del pilar de confiabilidad humana se plantea la siguiente interrogante:

¿Por qué se produce el error humano?

Considerando los estudios de confiabilidad humana, son tres los aspectos básicos que originan fallas en la persona: No puede, no sabe, no quiere [6], como se observa en la siguiente figura.



Figura 4. Origen de los eventos no deseados.

Si se reitera la pregunta, por ejemplo ¿Por qué no puede?, se tendrá como posible respuesta: que la persona no está debidamente formada para realizar la actividad.

A modo de resumen se tendrá los siguientes aspectos que producen el error de la persona, se encuentran los siguientes:

- Formación del personal
- Trabajo en equipo.
- Comunicación
- Motivación
- Sentido de pertenencia
- Sobre carga de trabajo
- Limitaciones físicas.
- Percepción del riesgo

De los estudios de ACR realizados para eventos mayores, dentro de los análisis de los eventos posteriores a la ocurrencia de estos, se ha determinado, que existen aspectos humanos relacionados con la formación del personal que influyen en la magnitud de las consecuencias ante un evento, lo que la pregunta de los factores que afectan la confiabilidad operacional, no solo se deben

centrar en los relacionados a la ocurrencia de la falla sino también a las consecuencias que estas puede generar una vez que ocurre.



Figura 5. Los factores pueden originar las fallas o reducir / incrementar las consecuencias

De esta manera se identifican los factores que inciden en la ocurrencia de las fallas y en la consecuencia de estas bajo los cuatro pilares de la confiabilidad operacional.

### Modelo propuesto.

A modo de ejemplo el modelo está representado por los 22 factores asociados por riesgo y por 12 factores asociados con las consecuencias de estos, más las consecuencias operacionales, ambiente y seguridad, que se observan en la figura 6.

Para la cuantificación de modelo propuesto, se utiliza un promedio ponderado de los factores asociados a riesgo / frecuencia de falla y sus consecuencias, determinados para los cuatro pilares de confiabilidad operacional, cuyos pesos se asignan de acuerdo al orden de importancia, de forma similar al modelo de la norma API 1160.

El “Total probabilidad de falla”, o la probabilidad de todo el sistema estará representado por el “Valor” de probabilidad más alto entre todos los valores calculados para cada pilar de confiabilidad. De esta manera la probabilidad del sistema objeto de estudio quedará supeditada a la probabilidad de la amenaza más crítica o la amenaza con mayor probabilidad de ocurrencia.

$$\begin{aligned}\text{RIESGO} &= \text{PROBABILIDAD DE FALLA} \times \text{CONSECUENCIA} \\ \text{PROBABILIDAD DE FALLA} &= 1 - \text{CONFIABILIDAD} \\ &= 1 - \text{CONFIABILIDAD OPERACIONAL}\end{aligned}$$

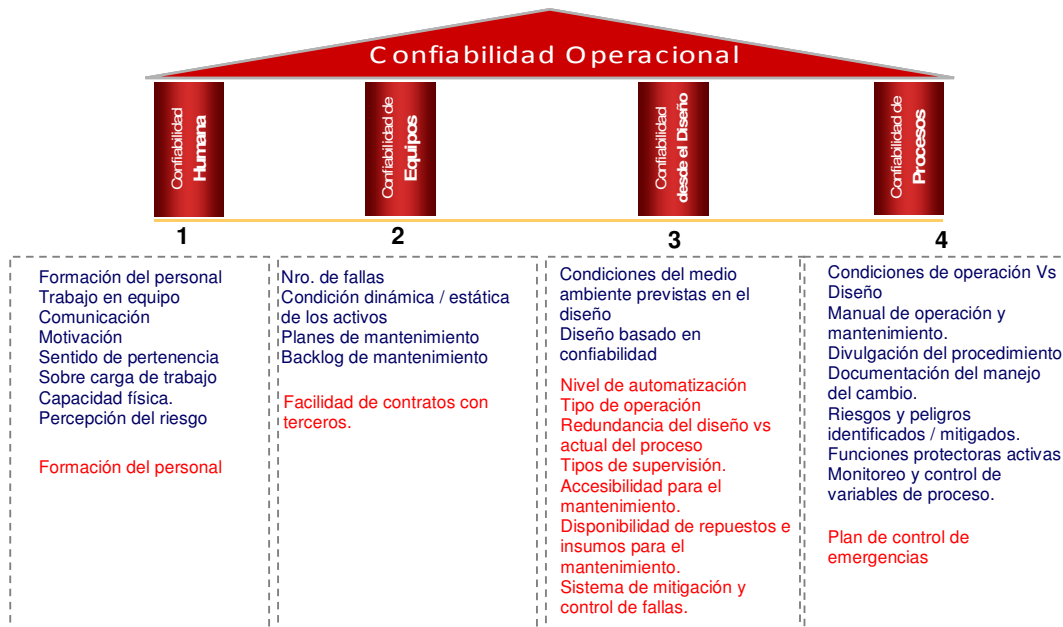


Figura 6. Factores del modelo holístico

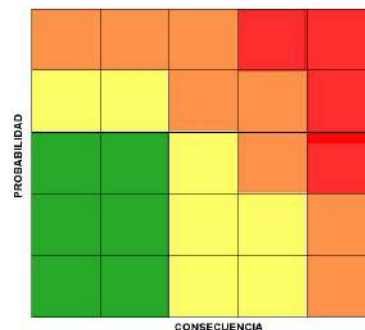
El “Total Consecuencias” es la suma de las ponderaciones de los factores que contribuyen en las consecuencias, más las consecuencias en seguridad, ambiente, producción y costos entre (5) y luego entre 100.

Por último la “Criticidad” es la multiplicación del “Total probabilidad de falla” por el “Total consecuencias”.

En la tabla 1, se observa el modelo de la guía de jerarquización holística de confiabilidad operacional

Al realizarse el estudio para varios activos, la jerarquización se obtendrá luego de ordenar de manera descendente todos los valores de criticidad resultantes. El sistema con valor más alto representa el de mayor criticidad y por ende, la prioridad entre el conjunto.

Posteriormente, se procede a ubicar en la matriz 5x5 los valores de probabilidad y consecuencias obtenidos para cada el activo. Ver figura 6.



Donde:

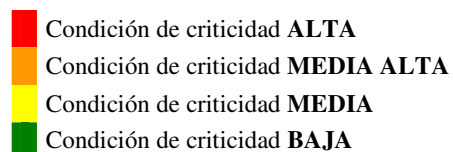


Figura 7. Matriz de riesgo.

Una vez identificada la criticidad en la matriz, se elabora un grafico radial para observar los factores de mayor contribución a la criticidad, como se observa en la figura 8.



CONFIABILIDAD	FACTORES DE FRECUENCIA PROBABILIDAD DE FALLA	ISED
		ACTIVO
HUMANA	Formación técnico / social del personal (0 - 12.5)	11,0
	Existe un plan de desarrollo de carrera (0 - 3.5)	2,0
	Se cumple el plan de desarrollo de carrera (0 - 3)	3,0
	El personal esta a acorde al cargo que desempeña (0 - 3)	3,0
	El personal esta certificado (0 - 3)	3,0
	Trabajo en equipo (0 - 12.5)	7.5
	Comunicación (0 - 12.5)	8,0
	Motivación (0 - 12.5)	7.3
	Sentido de pertenencia (0 - 12.5)	2,0
	Sobre carga de trabajo (0 - 12.5)	4,0
	Capacidad físicas (0 - 12.5)	7,0
	Percepción del riesgo (0 - 12.5)	12,0
TOTAL		44,0
EQUIPOS	Nro. de fallas (0 - 40)	40,0
	Condición dinámica / estática de los activos (0 - 30)	20,0
	Planes de mantenimiento (0 - 20)	5,0
	Backlog de mantenimiento (0 - 10)	3,0
	TOTAL	68,0
DISEÑO (MANTENIBILIDAD)	Condiciones del medio ambiente previstas en el diseño (0 - 50)	30,0
	Diseño basado en confiabilidad (0 - 50)	15,0
	TOTAL	45,0
PROCESOS	Condiciones de operación Vs Diseño (0 - 14.28)	7,0
	Manual de operación y mantenimiento (0 - 14.28).	4,0
	Divulgación del procedimiento (0 - 14.28)	7,0
	Documentación del manejo del cambio (0 - 14.28)	3,0
	Riesgos y peligros identificados / mitigados (0 - 14.28)	12,0
	Funciones protectoras activas (0 - 14.28)	10,0
	Monitoreo y control de variables de proceso (0 - 14.28)	5,0
	TOTAL	48,0
PROBABILIDAD DE FALLA		0,7
CONSECUENCIA		ISED
		ACTIVO
FACTORES CONTRIBUYENTES	Formación del personal (0-10)	10,0
	Facilidad de contratos con terceros (0-10)	10,0
	Nivel de automatización (0-10)	10,0
	Tipo de operación (0-10)	8,0
	Redundancia del diseño vs actual del proceso (0-10)	4,0
	Tipos de supervisión del proceso (0-10)	10,0
	Accesibilidad para el mantenimiento (0-10)}	1,0
	Disponibilidad repuestos e insumos para Mto.(0-10)	1,0
	Sistema de mitigación y control de fallas.(0-10)	8,0
	Plan de control de emergencias (0-10)	1,0
CONSECUENCIA	Daños a la seguridad (0-100)	20,0
	Daños al ambiente (0-100)	20,0
	Pérdidas de producción (0-100)	50,0
	Costos (0-100)	40,0
TOTAL CONSECUENCIAS		0,4
CRITICIDAD		0,26

Tabla I. Guía de jerarquización

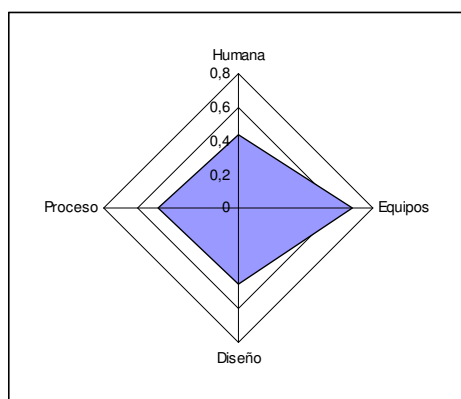


Figura 8. Grafica radial de riesgos por factores de cada pilar de la confiabilidad operacional.

### **Beneficios**

A continuación se muestran los principales beneficios del presente modelo.

1. Identificar los factores que han afectado o pueden afectar la frecuencia de fallas y sus consecuencias en la organización.
2. Análisis directo de confiabilidad, ahorrando tiempo y recursos.
3. Alcance del estudio y plan de acción adaptable, según los recursos y tiempo.
4. Plan de acción específico de los puntos que acometer para mejorar la confiabilidad.
5. Justificación en base al riesgo para reducir las brechas detectadas en la evaluación de los factores del modelo.
6. Reducción de fallas a niveles aceptables y rentables.
7. Personal motivado y formado.
8. Confiabilidad operacional: humana, procesos, activos y de diseño / Mantenibilidad.

### **Bibliografía**

- [1] Petróleos de Venezuela S.A. (2016). Manual de mantenimiento, volumen 1, Definiciones asociadas a mantenimiento y confiabilidad, Venezuela.

- [2] API -1160: Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines. Second Edition, September 2013.
- [3] Arata, Adolfo. (2009). Ingeniería y Gestión de la Confiabilidad Operacional en Planta Industriales. Editorial RIL Editores. Chile.
- [4] Gassán Primera, Abraham J. Confiabilidad Operacional, [cdimca.com/articulos/28152128857.pdf](http://cdimca.com/articulos/28152128857.pdf)
- [5] UNE-EN 62740: Análisis de causa raíz (RCA), AENOR 2015
- [6] Luis Fernández (2015). Gestión Integral de la Seguridad Basada en la Confiabilidad Humana, 7mo Congreso mundial de mantenimiento y gestión de activos, Colombia

Cesar Augusto Torrez Porras, se desempeña como Ingeniero de Confiabilidad en la Gerencia de Confiabilidad Operacional de PDVSA Occidente Es Ingeniero de Mantenimiento Mecánico egresado de la Universidad Rafael María Baralt (UNERMB), con Maestría en Mantenimiento Industrial de La Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UNEXPO) y Maestría en Ingeniería de Confiabilidad y Riesgo de la Universidad de las Palmas de la Gran Canarias, España.

1.- Nombre del autor: Cesar Torrez Porras.

2. Teléfono:

a. Oficina: +58 265 8053729

b. Celular: +58 416 2299743

3.- Dirección del autor:

a. Residencia: Calle España 36 C, Central II, Ciudad Ojeda, Estado Zulia, Venezuela

b. Oficina: Edificio el Barco, Campo Carabobo Norte, Lagunillas, Estado Zulia, Venezuela.

c. Email: [torrezca@pdvsa.com](mailto:torrezca@pdvsa.com) / [torrezcat@gmail.com](mailto:torrezcat@gmail.com)