

**ANÁLISIS DE FALLAS EN SARTAS DE BOMBEO MECÁNICO APLICADO AL  
CAMPO CEBÚ-PALOGRADE DE LA SUPERINTENDENCIA DE  
OPERACIONES HUILA-TOLIMA ECOPETROL S.A.**



**LEHA SOFÍA VALENZUELA ÁVILA  
LUZ YENCY CALDERÓN GARCÍA**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
NEIVA  
2009**

**ANÁLISIS DE FALLAS EN SARTAS DE BOMBEO MECÁNICO APLICADO AL  
CAMPO CEBÚ-PALOGRADE DE LA SUPERINTENDENCIA DE  
OPERACIONES HUILA-TOLIMA ECOPETROL S.A.**

**LEHA SOFÍA VALENZUELA ÁVILA  
LUZ YENCY CALDERÓN GARCÍA**



**Trabajo de tesis para optar el título de Ingeniero de Petróleos**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
NEIVA  
2009**

Nota de aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Al único y más puro amor que he conocido, mi Cris  
A la dueña de mi existencia y motor de lo todo lo que he hecho, mi mami  
A la compañía mas incondicional y sincera, mi papi  
A Walter, Marcela y Nicolás, porque cada uno, sin sospecharlo, con sus  
abrazos y sonrisas, me enseñó que la constancia es un paso para merecer la  
felicidad  
A Francisco, por la espontaneidad de su cariño, por ser mi sostén y demostrarme  
a mi misma y a los demás que los sueños si se cumplen.  
A Natalia y Niki, porque la Universidad es mas que cátedra, es complicidad  
A mis compañeros de tesis, Leha, Kate, Andrés y Juanca porque la amistad es  
lealtad.  
A todos los que conocieron el proyecto y lo apoyaron.

*Yency Calderón García*

Este logro de mi vida se lo dedico a mi Mamá Rosa María Ávila que sin su  
apoyo incondicional y leal no hubiese sido posible estar donde estoy, a mi  
hermana Laura mi mejor amiga, a mi abuela Marina que formo mi carácter cuando  
más lo necesitaba, a mi papa mi consejero incondicional y a mi tío Enrique a quien  
le debo estos últimos años de mi vida .  
A todos mis amigos incondicionales de la Universidad

***Leha Sofia Valenzuela***

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	
1. GENERALIDADES DEL CAMPO CEBÚ-PALOGRADE	11
1.1 RESEÑA HISTÓRICA DEL CAMPO	11
1.2 LOCALIZACIÓN	12
1.3 PROPIEDADES GENERALES DEL CAMPO	14
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
2.1 SARTA DE VARILLA DE BOMBEO MECANICO	15
2.1.1 Consideraciones y especificaciones	15
2.1.2 Varillas de acero	17
2.1.3 Varillas de Fibra de Vidrio	19
2.1.4 Partes de la varilla	22
2.1.4.1 Cuadrante	24
2.1.4.2 Hombro	24
2.1.4.3 Pin	24
2.1.4.4 Cebolla	24
2.1.4.5 Cuerpo	24
2.1.4.6 Espejo	24
2.1.5 FALLAS EN LAS VARILLAS DEL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO	25
2.1.6 Fallas por tensión	25
2.1.7 Fallas por fatiga	26
2.1.8 Fallas mecánicas	28
2.1.9 Fallas por flexión	28
2.1.10 Fallas diseño y operación	29
2.1.11 Fallas por corrosión	30

2.2	OIL FIELD MANAGER	33
2.2.1	Tipos de Información	33
2.2.1.1	Información Definida	33
2.2.1.2	Información no Definida	33
2.2.1.3	Información de Referencia	36
2.2.1.4	Relaciones entre las tablas de un proyecto OFM	36
3.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DEL CAMPO CEBÚ-PALOGRADE	37
3.1	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE FALLAS	39
3.2	ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DIFERIDA	44
3.2.1	Análisis de pérdidas	46
3.2.1.1	Pérdidas en venta de petróleo	46
3.2.1.2	Costos de servicio de ruptura de varillas	48
3.3	ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ	49
3.3.1	Análisis RCA Pozo PG-12	49
3.3.1.1	Histórico del pozo	49
3.3.1.2	Análisis de la muestra	50
3.3.1.3	Información recolectada del evento	50
3.3.1.4	Marcación de la varilla del Pozo PG-12	51
3.3.1.5	Inspección visual de la muestra	52
3.3.1.6	Clasificación del evento	54
3.3.1.7	Hipótesis descartadas	55
3.3.1.8	Hipótesis (Causas Raíces) validadas	58
3.3.1.9	Recomendaciones del pozo PG-12	60
3.3.2	Análisis RCA Pozo PG-24	63
3.3.2.1	Histórico del pozo	63
3.3.2.2	Análisis de la muestra	64

3.3.2.3 Información recolectada del evento	64
3.3.2.4 Inspección visual de la muestra	64
3.3.2.5 Clasificación del evento	66
3.3.2.6 Hipótesis descartadas	68
3.3.2.7 Hipótesis (Causas Raíces) validadas	69
3.3.2.8 Recomendaciones pozo PG-24	70
4. CONCLUSIONES	71
5. RECOMENDACIONES	72
6. BIBLIOGRAFÍA	74
7. ANEXOS	

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Porcentaje de fallas por campo	12
Figura 2. Localización del campo Cebú- Palogrande	13
Figura 3. Partes de la varilla de bombeo	22
Figura 4. Información del cuadrante	23
Figura 5. Fallas por Tensión	26
Figura 6. Identificación de planos de falla en ruptura por fatiga	27
Figura 7. Fallas por Flexión	29
Figura 8. Corrosión por Ácido	32
Figura 9. Corrosión por Cloruros	32
Figura 10. Corrosión por CO <sub>2</sub>	32
Figura 11. Corrosión por Bacterias Sulfato Reductoras	32
Figura 12. Corrosión por O <sub>2</sub>	32
Figura 13. Corrosión por Erosión	32
Figura 14. Relaciones entre tablas de un proyecto OFM.	36
Figura 15. Servicios a pozos 2006-2008	39
Figura 16. Reporte histórico de ruptura de varillas	40
Figura 17. Fallas campo CB-PG 2006-2008	42
Figura 18. Rupturas de las varillas por componente en el campo CB-PG	43
Figura 19. Diferidas totales del campo 2006-2008	44
Figura 20. Muestras recibidas para análisis, correspondiente a tres secciones de varilla del pozo PG-12	50
Figura 21. Marcación de la varilla cara 1	51
Figura 22. Marcación de la varilla cara 2	51
Figura 23. Zona de propagación de la falla	53

Figura 24. Zona de inicio de la falla	53
Figura 25. Matriz de valoración de riesgos	54
Figura 26. Diagrama Causa-Efecto pozo PG-12	56
Figura 27. Concentrador de esfuerzo de la varilla	59
Figura 28. Matriz de Priorización de Implementación de Recomendaciones	60
Figura 29. Muestra pozo PG-24	64
Figura 30. Planos de falla	65
Figura 31. Matriz de Valoración de Riesgos	66
Figura 32. Diagrama Causa-Efecto pozo PG- 24	67
Figura 33. Marcas en el pin de la varilla por bajo Torque	69

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Propiedades generales del campo Cebú – Palogrande	14
Tabla 2. Dimensiones generales para varillas de los Sistemas de Bombeo Mecánico	16
Tabla 3. Propiedades mecánicas y composición química de las varillas	21
Tabla 4. Tipos de información no definida	33
Tabla 5. Histórico de fallas por componente de la varilla de Bombeo Mecánico	41
Tabla 6. Perdidas en barriles por año del campo Cebú-Palogrande	45
Tabla 7. Pérdidas en Venta de petróleo 2006	47
Tabla 8. Costos de servicios 2006-2008	48
Tabla 9. Composición de las varillas	57

## INTRODUCCIÓN

Este estudio está orientado a determinar la causa raíz del rompimiento de varillas y plantear las posibles soluciones al problema, teniendo en cuenta que este es el componente del sistema de Bombeo Mecánico que mas fallas ha tenido durante la industria petrolera y en particular en la historia de la compañía.

La producción potencial por sistemas de levantamiento para el campo Cebú-Palagrande de la Superintendencia de Operaciones Huila-Tolima, área Neiva, en el último año está representada en un 56% por Bombeo Mecánico y un 44% por bombeo Electrosumergible

Para realizar los análisis correspondientes de los dos eventos seleccionados, se empleó la metodología RCA, con el que se evalúa toda cadena de hechos ocurridos, hasta identificar las causas raíces y las soluciones efectivas para eliminar o mitigar sus efectos.

## 1. GENERALIDADES DEL CAMPO CEBÚ-PALOGRADE

### 1.1 RESEÑA HISTÓRICA

Con el objeto de probar la formación Monserrate en la estructura Palogrande se hizo la perforación de PG-01 en 1964, el campo Cebú-Palogrande oficialmente fue descubierto en 1971 por el pozo PG-02, este pozo presentó problemas mecánicos que dificultaron el proceso. El pozo PG-02 tuvo una producción inicial de 60 BOPD con una gravedad API de 15° y fue cerrado debido a su baja productividad.

Finalmente el desarrollo del campo empezó con la perforación del pozo PG-03 en 1980, con una producción de 700 BOPD, mientras que el campo Cebú fue descubierto un año más tarde con la perforación del pozo CB-01 que tuvo una producción de 460 BOPD y una gravedad API de 18°

La historia de fallas por levantamiento artificial presentadas en éste campo es bastante representativa, solo en las dos décadas siguientes al descubrimiento del campo es decir desde 1980 al 2000 se detectaron 1137 fallas, donde el 95% de estas se presentó en el sistema de levantamiento por bombeo mecánico y solo el 5% de fallas restante representan a los otros sistemas de levantamiento. Además cabe anotar que este campo es el más recurrente en fallas en la Superintendencia de Operaciones Huila-Tolima de ECOPETROL S.A.

En estos últimos 3 años el número de fallas que se encontró en los 14 pozos productores pertenecientes al campo fue alrededor de 103, de las cuales el 66.9% de ellas correspondían a fallas ocasionadas por varillas, presentándose con mayor continuidad en los pozos PG-03 y PG-07

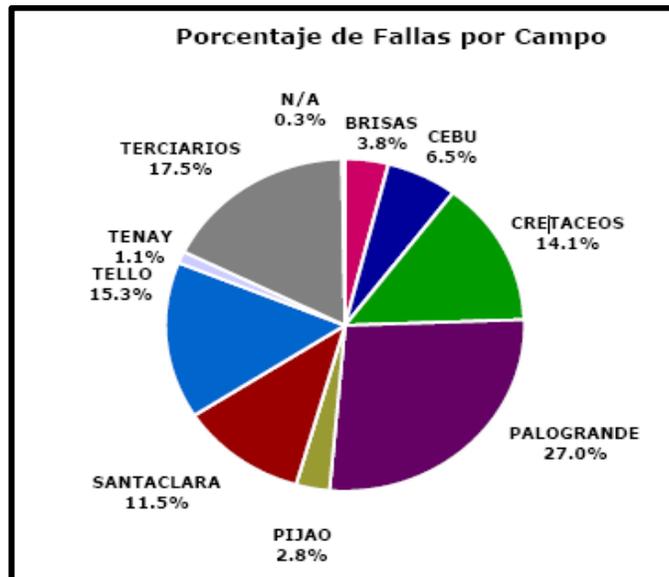


Figura 1. Porcentaje de fallas por campo  
Fuente estudio de Análisis de fallas Tenaris 2006.

## 1.2 LOCALIZACIÓN

La Superintendencia de Operaciones Huila-Tolima de ECOPETROL S.A, área Neiva, se localiza a 17 Km al norte de la ciudad, esta ubicada en el departamento del Huila - Colombia.

Esta es la responsable de la operación de el campo Cebú-Palогrande desde el 17 de noviembre del 1994 según resolución número 33 del 28 de marzo de 1994. A partir de este momento Ecopetrol constituyó el Distrito Alto Magdalena (DAM) con el objeto de operar los campos que comprendían la Concesión Neiva 540 (Dina Cretáceo, Dina Terciario, Cebú- Palогrande, Tenay, Hato Nuevo, Brisas, Pijao, Santa Clara y Loma Larga).

El campo Cebú-Palогrande está ubicado en la cuenca del Valle Superior del Magdalena, en la subcuenta de Neiva, exactamente a 10 kilómetros al norte de la

ciudad. Limita al norte y al oeste con el campo Dina Cretáceos al sur y este con el campo Pijao. (Ver figura 2)

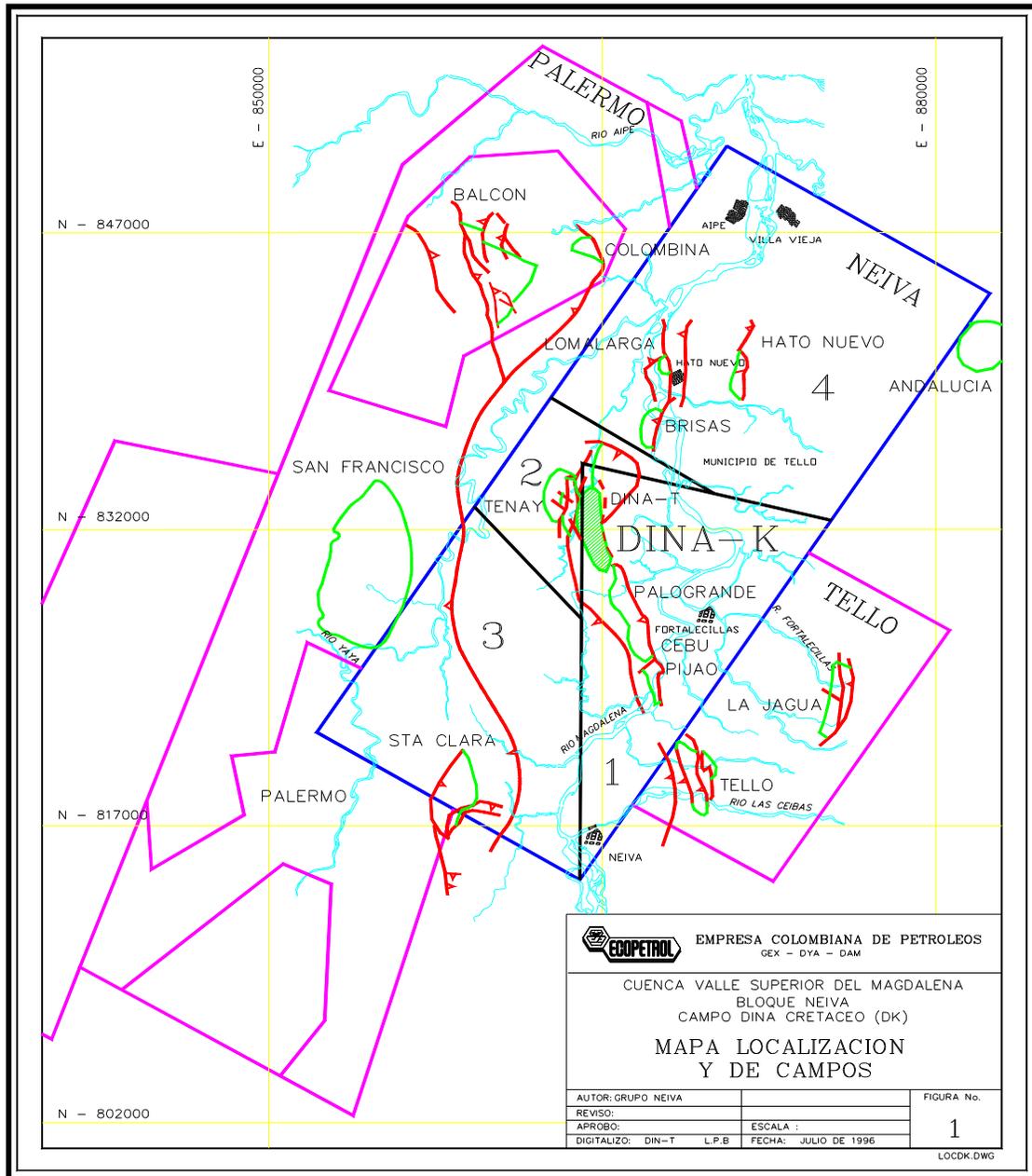


Figura 2. Localización campo Cebú – Palagrande, Fuente. Generalidades del campo Cebú- Palagrande

### 1.3 PROPIEDADES GENERALES DEL CAMPO

PROPIEDAD	DATO
Datum (pies) TVDss	4700
°API	18-21
BS&W	85
Presión de Yacimiento actual (psi)	1469
Temperatura de Yacimiento (°F)	143
Presión Inicial de Yacimiento (psi)	2620
Presión de Burbuja (psi)	790
Viscosidad del crudo a Ty (Cp)	4.5
Permeabilidad Promedio (md)	7-105
Porosidad Promedia (%)	18
Tipo de Formación	Arenisca
Espesor neto promedio (ft)	10-100
Profundidad promedio (ft)	6800
Salinidad del agua de formación (ppm Cl)	7000
Viscosidad del agua (Cp)	0.5
GOR actual	78
Factor Volumétrico del petróleo a Pb	1.104
Formación Productora	Monserate K4
Área productiva (Acres)	1140
Contenido de arcillas promedio (%)	7
Gravedad del gas	0.869

Tabla 1. Propiedades generales del campo Cebú – Palogrande, Fuente Generalidades del campo Cebú- Palogrande

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 SARTA DE VARILLAS DE BOMBEO MECÁNICO

#### 2.1.1 Consideraciones y Especificaciones

La sarta de bombeo se compone de un conjunto de varillas individuales unidas entre sí por coupling o también llamados acoples. Esta actúa como la línea de transmisión de la energía mecánica que maneja la bomba de subsuelo.

El movimiento ascendente y descendente de la unidad de bombeo es transferido a la bomba por medio de la sarta de varillas.

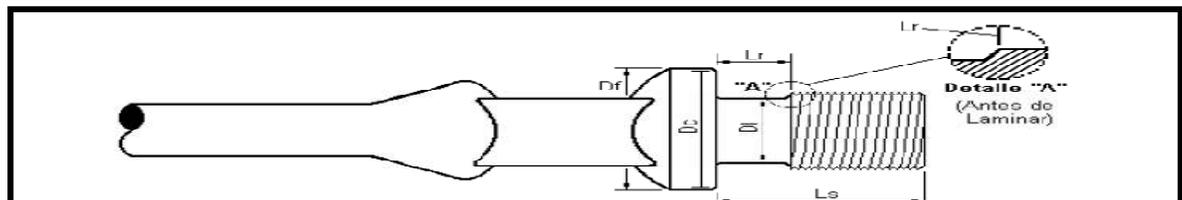
Mientras la bomba realiza su ciclo de bombeo, las varillas están sujetas a cargas fluctuantes. Durante el ascenso, la carga en las varillas es alta porque el pistón recoge la carga del fluido. Durante el descenso, la carga en las varillas es menor porque la carga del fluido se transfiere de las varillas a la tubería.

Debido a las restricciones de tamaño, ambientes de trabajo y limitaciones de esfuerzos, la sarta de varillas es considerada el enlace débil en un sistema de bombeo.

En la actualidad los tipos de varillas que más se utilizan en la industria son de dos tipos: de acero y de fibra de vidrio.

Las varillas de acero son fabricadas en longitudes de 25 y 31 pies, y diámetros de 5/8", 3/4", 7/8", 1", 1 1/8" y mientras que las de fibra de vidrio son fabricadas en longitudes de 25, 30 y 37.5 pies.

La tabla 2 muestra las dimensiones generales de los tipos de varillas.



Parámetro		5/8"	3/4"	7/8"	1"	1 1/8"
Diámetro mayor de la cara de contacto (Dc)	Min	29.9	36.25	39.42	47.37	53.59
Diámetro del desahogo de rosca (Ds)	Min	19.94	23.11	26.29	31.04	35.79
	Max	20.2	23.37	26.55	31.30	36.05
Diámetro del respaldo (Df)	Min	31.5	37.85	41.03	50.55	56.77
	Max	31.88	38.23	41.41	50.93	57.53
Longitud del pin desde el extremo hasta el espejo (Ls)	Min	31.75	36.50	41.28	47.63	53.98
	Max	33.32	38.07	42.85	49.20	55.55
Longitud del desahogo(Lr)	Min	13.11	15.09	17.07	20.24	22.23
	Max	13.90	15.88	17.86	21.03	23.02
Paralelismo de la cara de contacto(espejo)	Al entrar el calibre anillo P8 (pasa) en contacto con el espejo, una galga de 0.051 mm de espesor, no debe entrar en ningún punto entre las caras.					
Rosca mínima (filete bajo)	El calibre anillo P6 (no pasa), no debe entrar en el pin roscado más de tres vueltas					
Rosca máxima (filete alto)	El calibre anillo P8 (pasa) debe enroscar hasta hacer contacto con el espejo de la varilla.					
Diámetro Mayor de rosca	Min	23.452	26.624	29.799	34.559	39.319
	Max	23.779	26.952	30.127	34.887	39.647
Diámetro medio de la rosca	Min	21.981	25.146	28.321	33.071	37.826
	Max	22.128	25.303	28.476	33.236	37.998
Diámetro menor de la rosca	Max	20.663	23.835	27.010	31.770	36.530

Tabla 2. Dimensiones generales para varillas de los Sistemas de Bombeo Mecánico, Fuente Tenaris

## 2.1.2 Varillas de acero

Este tipo de varillas de bombeo son principalmente fabricadas siguiendo las normas API (*American Petroleum Institute*) según sus especificaciones 11B.

También los fabricantes pueden producirlas fuera de esta norma, cumpliendo con especificaciones internas o propias. En dicho caso, no es posible aplicar (utilizar) el logotipo API, por tanto las varillas de acero pueden ser de grado API y NO API.

### ✓ Varillas grado API

La norma API SPEC 11B especifica tres grados de varillas de succión de acero K, C y D.

La *Tabla 3* muestra las dimensiones de los diferentes diámetros de las varillas.

- Varillas de Bombeo: API Grado C (acero AISI 1530)

Diseñada para su utilización con cargas bajas y medianas en pozos no corrosivos o efectivamente inhibidos.

- Varillas de Bombeo: API Grado K : (acero AISI 4621)

Diseñada para su utilización con cargas bajas y medianas en pozos corrosivos a los que se recomienda inhibir.

- Varillas de Bombeo: API Grado D Carbón

Diseñada para su utilización con cargas moderadas en pozos no corrosivos o efectivamente inhibidos.

- Varillas de Bombeo: API Grado D Alloy (acero AISI 4142)

Diseñada para su utilización con cargas altas, pozos no corrosivos efectivamente inhibidos – Identificación: “D”

- Varillas de Bombeo: API Grado KD: (acero AISI 4320)

Diseñada para su utilización con cargas altas en pozos corrosivos a los que se recomienda inhibir – Identificación: “DS”

✓ Varillas no API

- Varillas *Ultra High Strength* (UHS – NR acero AISI 4330 )

La varilla de bombeo UHS - NR es una de las alternativas disponibles, fabricada en acero aleado AISI 4330 Mod.

Se logran sus propiedades mecánicas a través de un tratamiento térmico de normalizado y revenido, permitiendo alcanzar propiedades de fluencia y rotura superiores a los estándares API. Debido a su mayor resistencia a la fatiga permite incrementar de manera confiable las profundidades y caudales de extracción.

Se recomienda para pozos no corrosivos con cargas muy elevadas

- Varilla Alta Resistencia Critical Service (MMS – NR acero AISI 4138)

Se trata de un acero especialmente desarrollado para otorgar la alta resistencia mecánica requerida, pero disminuyendo la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno (SSC). Este es un fenómeno cada vez más presente en pozos bajo recuperación secundaria por inyección de agua. Es un acero aleado al cromo-molibdeno, pero sin presencia de níquel. Su tratamiento térmico es normalizado y revenido. Se recomienda para servicio en pozos profundos con altas cargas, y para mejorar su performance se recomienda la inhibición.

- Varillas Plus: (acero AISI 1530)

La varilla Plus es otra de las alternativas para altas cargas.

Es un producto que recibe un tratamiento térmico superficial de templado por inducción. Este proceso genera una estructura binaria, en la que la superficie externa está templada y el núcleo permanece sin templar. Como la capa externa tiene menor densidad (martensita) que el núcleo, se produce un estado permanente de compresión la periferia, que es el factor determinante de alta resistencia a la fatiga. Se recomienda para servicios en pozos profundos y con grandes caudales efectivamente inhibidos.

- Varillas de Bombeo MMKD (Acero AISI 4320)

Las varillas MMKD es una alternativa en el rango de varillas de bombeo API Grado "D". Esta varilla de bombeo tiene las propiedades mecánicas de las varillas API Grado "D" combinadas con composición química similar a las API Grado "K", lo cual las hace útiles en pozos corrosivos efectivamente inhibidos. Ver tabla 3

### 2.1.3 Varillas de Fibra de Vidrio

Las varillas de fibra de vidrio se introdujeron por primera vez en el 1970 para solucionar las altas tasas de falla de las varillas de acero en pozos con ambiente corrosivo. Las varillas de fibra de vidrio están hechas con fibras individuales de vidrio sujetas con una resina de poliéster curada para cambiarla a sólido. Luego se le colocan extremos de acero.

Las varillas de fibra de vidrio o plástico reforzado, como también se les llama, tienen ventajas y desventajas al compararlas con las varillas de acero. Las sartas de varillas de fibra de vidrio típicamente consisten de 50% a 80% fibra de vidrio arriba y 20% a 50% acero abajo.

El cuerpo de las varillas de fibra de vidrio es totalmente resistente a la corrosión. Las conexiones de los extremos son susceptibles a la corrosión pero debido a que están ligeramente cargada y usualmente se hacen con acero de alto grado, tienen pocos problemas de corrosión. Al usar varillas de fibra de vidrio, aun se debe usar un programa efectivo de inhibición química para proteger los extremos, las varillas de acero, tubería y la bomba.

Las varillas de fibra de vidrio son casi tres veces y media más livianas que las de acero. Su módulo de elasticidad va de 6 a 8 millones comparado con los 30.5 millones de lpc del acero. Esto significa que se estiran unas cuatro veces más que el acero. Debido a sus características únicas, las varillas de fibra de vidrio pueden superar a las de acero o causar problemas severos. La diferencia es saber cómo diseñar la sarta de varillas que más convenga.

La tabla tres (3) nos muestra las propiedades mecánicas y composición química de los tipos de varilla de Grado API y Grado Premium fabricados por la empresa TENARIS S.A. Es importante conocer estas especificaciones, ya que esta compañía es la encargada del suministro de las varillas a Ecopetrol S.A, empresa en la que se lleva acabo nuestro estudio.

	GRADOS API						GRADOS PREMIUM		
	grado C	grado K	grado D				Varillas de alta resistencia		
			D.Carbón	D.Alloy	KD. Special	D.Special	Plus	UHS-NR	MMS-NR
Acero	1530M	4621M	1530	4142M	4320M	4330	1530	4330M	4138M
C	0.31-0.36	0.18-0.25	0.31-0.36	0.40-0.45	0.18-0.25	0.30-0.37	0.31-0.36	0.3-0.37	0.38-0.43
Mn	1.40-1.60	0.70-1	1.40-1.60	0.75-1.00	0.8-1.00	0.7-0.95	1.40-1.60	0.7-0.95	1.1-1.4
S	0.025Mx	0.025Mx	0.025 Mx	0.025Mx	0.025Mx	0.025Mx	0.025Mx	0.025Mx	0.025Mx
P	0.025Mx	0.025Mx	0.025 Mx	0.025Mx	0.025Mx	0.025Mx	0.025Mx	0.025Mx	0.025Mx
Si	0.25-0.40	0.15-0.30	0.25-0.40	0.15-0.35	0.15-0.35	0.15-0.35	0.25-0.40	0.15-0.35	0.2-0.4
Ni	0.15Mx	1.65-2.00	0.15 Mx	0.25Mx	1.15-1.50	1.65-2.00	0.15Mx	1.65-2	0.30Mx
Cr	0.2Mx	0.3Mx	0.2Mx	0.8-1.1	0.7-0.9	0.8-1.10	0.2Mx	0.8-1.1	0.5-0.9
Mo	0.05Mx	0.02-0.3	0.05Mx	0.15-0.25	0.20-0.30	0.2-0.3	0.05Mx	0.2-0.3	0.25-0.35
V	0.10-0.15	-	0.1-0.15	-	0.03-0.07	0.035-0.1	0.1-0.15	0.035-0.1	0.04-0.07
Nb	-	-	-	-	-	-	-	-	0.025-0.045
Al	0.01-0.04	0.01-0.04	0.01-0.04	0.01-0.04	0.01-0.05	0.01-0.06	0.01-0.04	0.01-0.06	0.01-0.07
Cu	0.25	0.25Mx	0.25Mx	0.25Mx	0.25Mx	0.25Mx	0.25Mx	0.25Mx	0.25Mx
Propiedades mecánicas									
Ys (Ksi)	60 Min	60 Min	85Min	100	100	100	115Min	115Min	115Min
UTS (Ksi)	90-115	90-115	115-140	120-140	125-140	125-140	140-160	140-160	138-155
Tratamiento térmico									
NORMALIZADO									

Tabla 3. Propiedades mecánicas y composición química de las varillas, Fuente Tenaris

## 2.1.4 Partes de la varilla

### 2.1.4.1 Cuadrante

Como su nombre lo indica es la parte cuadrada de los terminales de la varilla, está localizada entre el hombro y la cebolla. En el podemos obtener toda la información de la varilla, desde el grado de esta, hasta la fecha de fabricación.

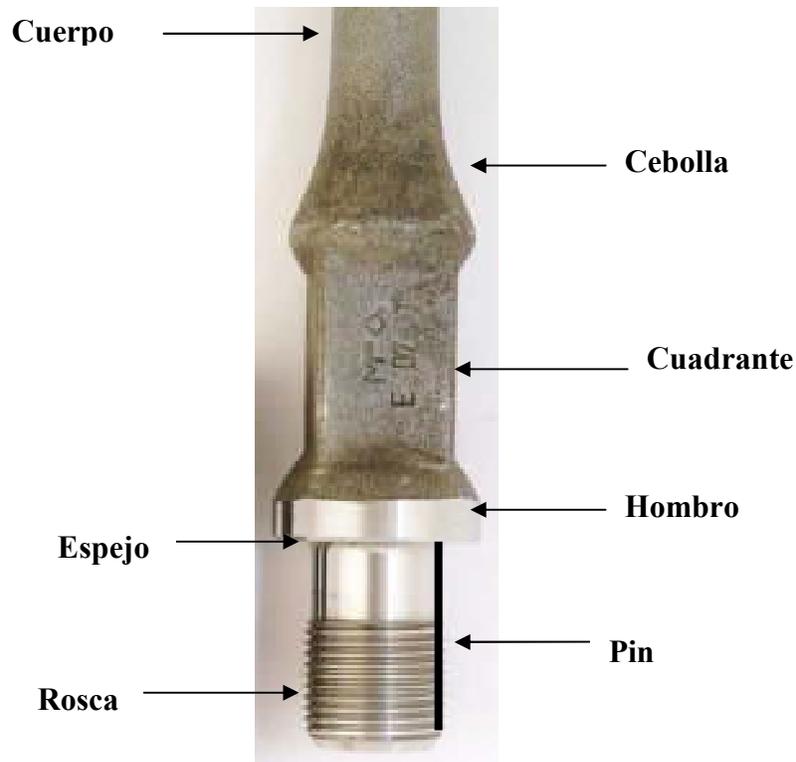


Figura 3. Partes de la varilla de los Sistemas de Bombeo Mecánico, Fuente presentación de análisis de fallas Tenaris

De igual modo el cuadrante permite la colocación de la llave para aplicar el torque necesario durante el roscado de la conexión. Ver figura 4 El cuadrante proporciona la siguiente información:

- ✓ Fabricante.
- ✓ Código de Forja: Identifica la persona que forja la varilla.
- ✓ Código de Colada: Identifica la materia prima antes de comenzar el proceso de fabricación.
- ✓ Fecha de Fabricación.
- ✓ Logotipo API: Identifica las varillas de bombeo fabricadas bajo la norma API 11B.
- ✓ Tarjeta de Línea: Identifica la varilla en el proceso de fabricación (Temperatura, propiedades mecánicas, etc.)
- ✓ Diámetro: 1", 7/8", 3/4", 5/8", 1½", etc.
- ✓ Grado: Especifica el tipo de varilla, el acero y sus propiedades mecánicas (D, C, K, UHS-NR, PL, etc.) así como la plantilla necesaria para el torque.

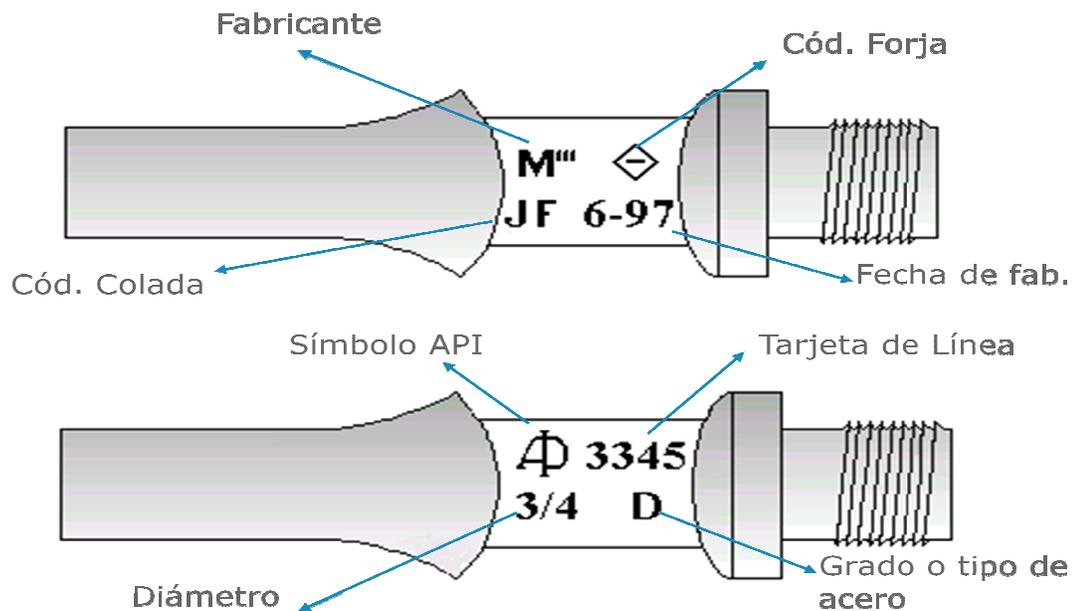


Figura 4. Información del cuadrante, Fuente Tenaris

#### 2.1.4.2 Hombro

Es la sección localizada en la parte superior del cuadrante y es de mayor área transversal que este y que el pin.

#### 2.1.4.3 Pin

La función principal de el Pin es permitir la conexión entre una varilla y otra por medio del acople de parte roscada y la unión de la varilla.

#### 2.1.4.4 Cebolla

Es la sección de mayor área transversal de la varilla y sirve para enganchar la varilla a los elevadores durante las operaciones de sacada y corrida de una sarta de varillas.

#### 2.1.4.5 Cuerpo

Es la sección de mayor longitud y más delgada de la varilla. El cuerpo es totalmente liso, en el no puede haber ningún tipo de imperfecciones (entallas, muescas entre otros) o pandeo, estos fenómenos aumentarían el riesgo de falla de la varilla.

Toda varilla posee un recubrimiento que consiste de acero o hierro de bajo contenido de carbón el cual protege las varillas contra la corrosión.

#### 2.1.4.6 Espejo

Es la superficie pulida del hombro, la cual después del roscado debe permanecer en contacto con la cara de la unión para evitar que la conexión se afloje.

## 2.2 FALLAS EN LAS VARILLAS DE SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO

La mayoría de las fallas asociadas con los sistemas de levantamiento artificial pueden atribuirse a cualquiera de los tres componentes principales del fondo del pozo: la bomba, varilla de bombeo o sarta de la tubería de producción. Una falla de la bomba del subsuelo, de la varilla de bombeo o de los tubos es definida como cualquier evento catastrófico que requiere que el personal de servicio extraiga o reemplace uno o más de estos componentes de forma inmediata.

Además si existe una buena manipulación de las varillas, siguiendo las recomendaciones del fabricante, y se tiene en cuenta las características más relevantes del pozo para el diseño de la varilla de bombeo, se está asegurando una vida útil prolongada y una reducción de costos en el mantenimiento de pozo por fallas en sarta de varillas.

### 2.2.1 Fallas por tensión.

Las fallas por tensión se presentan cuando la carga aplicada excede la resistencia a la tensión de la varilla.

La carga se concentra en algún punto de la sarta de varillas, y crea una apariencia de estrechamiento alrededor de la circunferencia de la varilla, y la fractura ocurre donde se reduce la sección transversal.

Este mecanismo de fallas, sólo ocurre cuando se aplica demasiada carga en la sarta de varillas, como al intentar sacar de su asentamiento una bomba atascada. Debido a que la carga aplicada es distribuida casi igualmente sobre el área de la sección transversal de la sarta de las varillas de bombeo, cualquier daño que

reduzca el área de la sección transversal, aumenta la carga o el esfuerzo en ese punto, y es un elevador de esfuerzo. (Ver figura 5)



Figura 5. Fallas por Tensión

Fuente, Fundamento Teórico para el Análisis de fallas Norris

### 2.2.2 Fallas por Fatiga

Las fallas por fatiga son progresivas y comienzan como pequeñas grietas por esfuerzo que crecen bajo la acción de los esfuerzos cíclicos.

Debido a que la carga aplicada es distribuida casi igualmente sobre el área de la sección transversal de la sarta de las varillas de bombeo, cualquier daño que reduzca el área de la sección transversal, aumenta la carga o el esfuerzo en ese punto, y es un elevador de esfuerzo.

Una pequeña grieta por fatiga por esfuerzo se forma en la base del elevador de esfuerzo y se propaga perpendicular a la línea de esfuerzo o del eje del cuerpo de la varilla. A medida que la grieta por fatiga debido al esfuerzo avanza gradualmente, las superficies de la fractura que casan, opuestas a la cara de la

fractura que avanza, tratan de separarse bajo la carga y estas superficies se vuelven lisas y pulidas por la fricción.

A medida que progresa la grieta por fatiga, reduce el área efectiva de la sección transversal de la varilla de bombeo, hasta que no queda metal suficiente para sostener la carga y la varilla de bombeo, simplemente se fractura en dos.

Las superficies de la fractura de una típica falla por fatiga, tienen una parte por fatiga, una parte de desgarramiento por tensión y un desgarramiento final por esfuerzo cortante.

Las fallas por fatiga son iniciadas por una multitud de elevadores de esfuerzo. Los elevadores de esfuerzo son discontinuidades visibles o microscópicas que causan un aumento del esfuerzo local en la sarta de varillas durante la carga. Los elevadores de esfuerzo visibles típicos, en las varillas de bombeo, varillas cortas y acoples son inflexiones, corrosión, grietas, daños mecánicos, roscas y desgaste o cualquier combinación de lo anterior.

Las características de falla por fatiga se observan sobre la cara de la fractura. Una de ellas es que la cara presenta una superficie fina y rugosa.

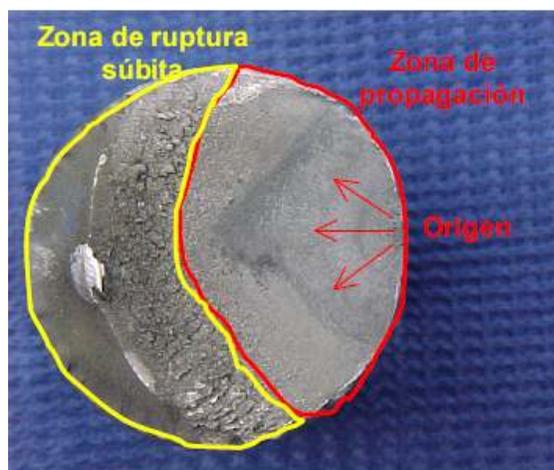


Figura 6. Identificación de planos de falla en ruptura por fatiga

Fuente, Ecopetrol S.A

### 2.2.3 Fallas Mecánicas

Las fallas mecánicas son responsables de un gran porcentaje del número total de todas las fallas de las sargas de varillas. Las fallas mecánicas incluyen todos los tipos de fallas, excepto las fallas por corrosión y los defectos de fabricación.

El daño mecánico a la sarga de varillas contribuye a un elevador de esfuerzo, el cual causará las fallas de las varillas de bombeo. El momento de la falla estará motivado por muchas variables, de las cuales, el esfuerzo máximo, el ambiente de la operación, la orientación del daño, la química de la varilla de bombeo, el tipo de tratamiento con calor de la varilla de bombeo, el margen del esfuerzo y el tipo de daño, serán los más importantes. El daño mecánico puede ser causado por el diseño ineficaz del elevador artificial, procedimientos inadecuados de cuidado y manipulación, procedimientos descuidados de montaje y desconexión, prácticas de operación discontinuadas o cualquier combinación de estos elementos.

### 2.2.4 Fallas por Flexión

Las fallas de fatiga por flexión son responsables de un considerable número de todas las fallas mecánicas. Es un hecho que todas las varillas de bombeo dobladas, eventualmente fallan. Cualquier grado de flexión causará un aumento del esfuerzo local en el punto de flexión, durante la carga aplicada.

La flexión de la varilla se puede deber a condiciones como, velocidades de bombeo rápidas o inadecuadas, diámetros de las bombas mayores en relación con las varillas, choque de cargas por golpe fluido, interferencia de gas o algún movimiento de la sarga de varillas que no permita a esta mantenerse recta.

Cuando el cuerpo de la varilla doblada es halado en forma recta durante la carga, se alcanza rápidamente la resistencia a la rotura del material. El ciclo de exceder continuamente la resistencia de rotura del material, es repetida durante el ciclo de bombeo y causa fisuras de fatiga por esfuerzo en el lado cóncavo de la flexión. Estas fisuras de fatiga por esfuerzo progresan a través de la barra durante la carga, hasta que no quede suficiente metal en la barra, para sostener la carga y ocurre la fractura. Las fallas de fatiga por flexión pueden ser identificadas por la superficie angular de la fractura, la cual estará a un ángulo distinto a  $90^\circ$ , al eje del cuerpo de la varilla. (Ver figura 7)



Figura 7. Fallas por flexión

Fuente, Fundamento Teórico para el Análisis de fallas Norris

### 2.2.5 Fallas de Diseño y Operación

La prevención de las fallas de la varilla de bombeo comienza con el diseño.

Es posible que las sartas de varillas deficientemente diseñadas contribuyan a las fallas de otros componentes del sistema de levantamiento artificial, tales como el corte de los tubos de la varilla, como resultado de cargas compresoras de la varilla.

Un buen diseño inicial puede convertirse en un diseño deficiente si cambian las condiciones del pozo. Los cambios en el volumen de los fluidos, el nivel de los fluidos, la longitud de la carrera, las carreras por minuto o el tamaño de la bomba, impactan con severidad el sistema total de extracción artificial.

Los cambios en la capacidad de corrosión pueden afectar la vida de tolerancia a la fatiga de las varillas de bombeo y puede conducir a fallas prematuras.

Cuando una de las condiciones precedentes cambia, el diseño del sistema de extracción artificial debe ser nuevamente evaluado.

#### 2.2.6 Fallas por Corrosión

La corrosión es uno de los mayores problemas que se encuentran en los fluidos producidos y es responsable por casi dos tercios de todas las fallas de las varillas de bombeo.

La corrosión es el resultado destructor de una reacción electroquímica entre el acero utilizado para hacer varillas de bombeo y el medio ambiente de la operación al cual están sometidas. Simplemente, la corrosión es la forma en que la naturaleza revierte un material de un estado de energía más alto (acero), hecho por el hombre, a su condición básica (mineral natural), tal como fue hallado en la naturaleza.

El elemento hierro del acero, se combina con la humedad o los ácidos, para formar otros compuestos, tales como, óxido, sulfato, carbonato, de hierro, etc.

Alguna forma y concentración de agua está presente en todos los pozos considerados corrosivos y la mayoría contienen cantidades considerables de impurezas y gases disueltos. Por ejemplo, los gases ácidos de dióxido de carbono (anhídrido carbónico – CO<sub>2</sub>) y el sulfato de hidrógeno (ácido sulfhídrico – H<sub>2</sub>S), comunes en la mayoría de los pozos, son altamente solubles y se disuelven rápidamente en el agua, la cual tiende a bajar su pH. La capacidad de corrosión

del agua es una función de la cantidad de estos dos gases que están contenidos en solución. Toda el agua con valores bajos de pH es considerada corrosiva al acero, con valores más bajos que representan mayor acidez, o capacidad de corrosión. Todos los ambientes del fondo del pozo son corrosivos hasta cierto grado. Algunos fluidos corrosivos pueden ser considerados no corrosivos si la tasa de penetración de la corrosión, registrada en mm (milímetros) de pérdida de espesor por año (mpy), es lo suficientemente baja, que no causará problemas. Sin embargo, la mayoría de los pozos en producción están plagados con problemas de corrosión y ninguna varilla de bombeo fabricada en la actualidad puede soportar con éxito, sola, los efectos de esta corrosión.

A pesar que la corrosión no puede ser eliminada completamente, es posible controlar su reacción. Todos los grados de las varillas de bombeo deben ser protegidos adecuadamente, mediante el uso de programas eficaces de inhibición química.

Algunos grados de varillas de bombeo, debido a las diferentes combinaciones de elementos de aleación, microestructuras y niveles de dureza, son capaces de tener una vida más larga de servicio en los pozos con corrosión inhibida, que las de otros grados de alta o baja resistencia a la tensión.



Figura 8. Corrosión por ácido



Figura 9. Corrosión por cloruros



Figura 10. Corrosión por CO<sub>2</sub>



Figura 11. Corrosión por Bacterias  
Sulfato reductora



Figura 12. Corrosión por O<sub>2</sub>

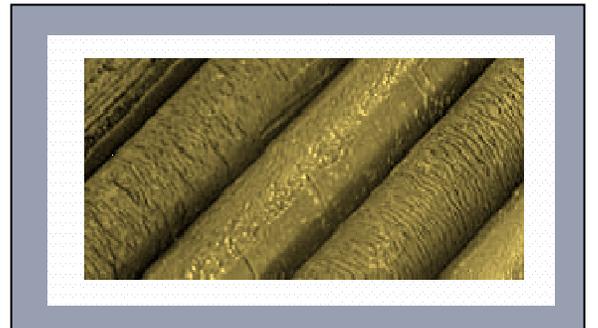


Figura 13. Corrosión por Erosión

Fuente, Fundamento Teórico para el Análisis de fallas Norris

## **2.3 OIL FIELD MANAGER**

OFM es un software de análisis de yacimiento y pozo que ayuda a mejorar la gerencia de producción y el seguimiento de las reservas con una avanzada vista de vigilancia y poderosas herramientas de pronósticos. Este software está diseñado para entregar un método eficiente de visión, relación y análisis de información de producción y yacimiento en una variedad de volumen de trabajo de ingeniería establecido.

Las extensas herramientas del software automatizado OFM (tales como mapas de bases interactivos con tendencia de la producción, presiones de burbuja, análisis de curvas de declinación, y análisis de curvas tipo) reducen el tiempo que gastará el ingeniero analizando dicha información, dándole así más tiempo para orientar su información para un buen uso.

### **2.3.1 Tipos de información**

La información a cargar en la base de datos OFM se puede clasificar en tres categorías:

#### **2.3.1.1 Información Definida**

Este tipo de información requiere que se especifique la estructura de la tabla en la cual se va a almacenar, antes de que pueda cargarse en la base de datos. Esta definición puede hacerse interactivamente a través de la interfase grafica de usuario de OFM, o por medio de un archivo de definición en donde se especifica el tipo de tabla y todos los atributos de sus variables (nombre, tipo, unidades,

formato para reportes y graficas, etc.), lo cual se hace usando palabras claves (keywords) en una sintaxis preestablecida.

### 2.3.1.2 Información no Definida

La información no definida se puede cargar directamente en la base de datos, en tablas cuya estructura esta preestablecida por el OFM y no puede ser modificada por el usuario, de modo que no es necesario crear un archivo de definición para ellas. En la tabla 13 se presentan los tipos de información no definida que se manejan en la base de datos OF

TIPO DE INFORMACIÓN	DESCRIPCIÓN
Desviación (Deviation) (*.dev)	Información dependiente de profundidad que indica desviación en un pozo a partir de la localización de superficie. Esta información requiere el uso de palabras claves especificas (ej. tvd, depth, xdelt, ydelt).
Fallas (Fault) (*flt)	Contiene información sobre los atributos de profundidad y tiro de la falla. Un máximo de 30 nombres de falla pueden usarse en un proyecto.
Anotaciones de Mapa (Map Annotations) (*.ano)	Información adicionada a un mapa base para mejorar su presentación (ej. líneas de recolección) y requiere de un formato especifico de los archivos de entrada. Cuando se incluye en el proceso de carga, esta información se referencia automáticamente y se despliega cuando se accesa la base de datos.
Marcadores (Markers) (*.mrk)	Información dependiente de profundidad que registra un valor a un profundidad especifica por entidad wellbore (ej.

	topes de formación, niveles de fluido) y requiere del uso de la palabra clave *Depth. Los nombres de los marcadores son definidos por el usuario.
VARIABLES CALCULADAS (Parser) (*.par)	Información definida por el usuario, variables calculadas que desarrollan cálculos sobre variables de entrada u otras variables calculadas.
PATRONES (Pattern) (*.pat)	Información utilizada para identificar un grupo de entidades que forman una relación y la magnitud en que se relacionan (ej. pozos inyectoros influyendo sobre los volúmenes de producción de pozos productores).
CATEGORÍAS DE CLASIFICACIÓN (*.srt)	Información dependiente de una entidad que se utiliza para crear subconjuntos del proyecto para facilitar el análisis (ej. operador, campo, región PVT). Esta información definida por el usuario requiere que las palabras claves sean introducidas y definidas entre las palabras clave específicas *Define y *End_Define.
SÍMBOLOS DE POZO (Well Symbols) (*.sym)	Define los símbolos del mapa base, etiquetas y colores.
ESTADOS MECÁNICOS (Wellbore) (*.wbd)	Archivos de carga de información de estados mecánicos de pozo. Lista el equipo de fondo de pozo (tubing, casing, liner, packers, cement, plugo) y eventos, tales como tratamientos. Requiere de un formato específico de los archivos de entrada.

Tabla 4. Tipos de información no definida, Fuente manual OFM.

### 2.3.1.3 Información de Referencia

La información de referencia no se carga pero puede ser modificada. Entre este tipo de información se encuentran: unidades, ecuaciones de conversión de información y multiplicadores.

### 2.3.2 Relaciones entre las tablas de un proyecto OFM

Casi todos los datos que se pueden manejar en un proyecto OFM pertenecen a alguna entidad de diferente nivel; los datos de producción pertenecen a un completamiento o a un pozo, los datos de registros pertenecen a un pozo, los datos PVT y/o permeabilidades relativas pertenecen a una unidad de flujo

La figura 28. Resume la mayoría de los tipos de tabla mencionadas y la manera en que ellas se relacionan con la tabla estática maestra.

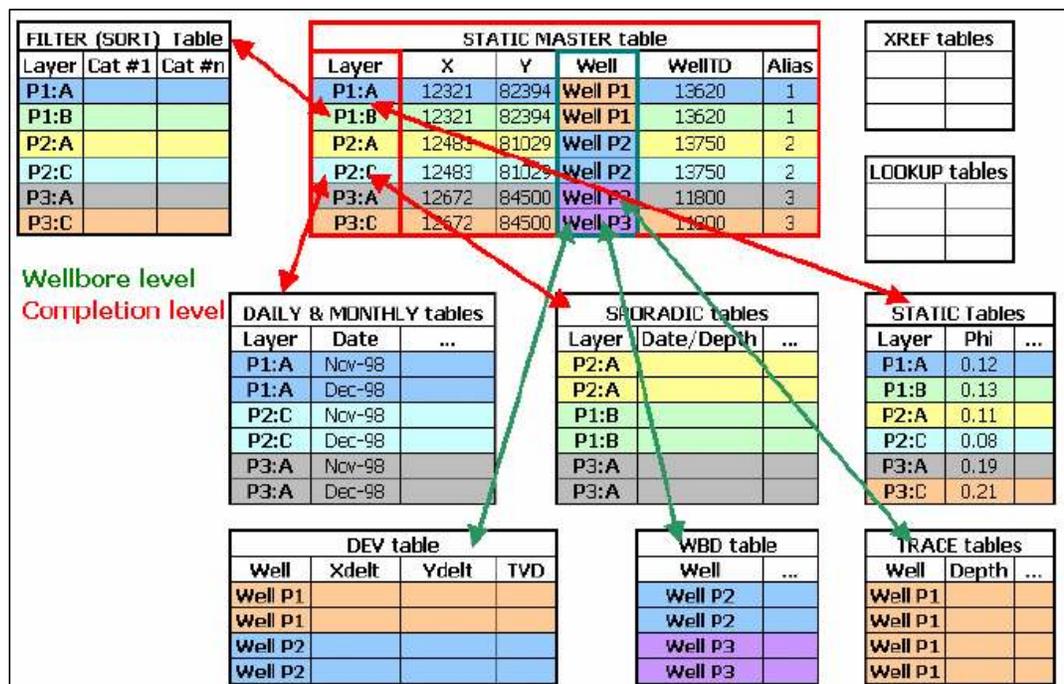


Figura 14. Relaciones entre tablas de un proyecto OFM, Fuente manual OFM.

### **3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

Este estudio está orientado a determinar la Causa Raíz del rompimiento de varillas y plantear las posibles soluciones al problema, teniendo en cuenta que este es el componente del Sistema de Bombeo Mecánico que mas fallas ha presentado durante la industria petrolera y en particular en la historia de la compañía ECOPETROL S.A.

La producción potencial por sistemas de levantamiento para el campo Cebú-Palogrande de la Superintendencia de Operaciones Huila-Tolima, área Neiva, en el último año está representada en un 56% por Bombeo Mecánico y un 44% por bombeo Electrosumergible.

De acuerdo a la información adquirida, desde el 2006 a Diciembre de 2008 el campo Cebú-Palogrande cuenta con la segunda producción acumulada de aceite más alta de todos los campos de la Superintendencia de Operaciones Huila-Tolima y el primero en servicios a pozos con un total de 165, de los cuales 145 involucran al Bombeo Mecánico.

En cuanto al trabajo de campo, este consistió en la asistencia a los servicios de varilleo y bodega de materiales, para observar los procedimientos de corrida y sacada de varillas, supervisión e inspección del estado de las varillas tanto en bodega como en pozo, supervisión del manejo, almacenamiento y transporte de varillas.

Por esta razón se hace necesario evaluar las posibles causas que originan este problema, utilizando las diferentes técnicas que dispone la industria petrolera, a fin de tomar las medidas correctivas que conduzcan a la eliminación o disminución de los costos de las pérdidas de producción por servicios a los pozos.

Teniendo en cuenta toda la información recolectada y la importancia económica que implica la solución del problema, se analizaron dos eventos específicamente, de donde se sacaron las posibles causas que pueden contribuir al problema de ruptura de las varillas de los pozos del campo Cebú-Palogrande.

Para realizar los análisis correspondientes de los dos eventos seleccionados, se empleó la metodología RCA, con el que se evalúa toda cadena de hechos ocurridos, hasta identificar las causas raíces y las soluciones efectivas para eliminar o mitigar sus efectos.

Debido a la falta de una guía para la aplicación del RCA en ECOPETROL S.A. elaboramos un manual de procedimiento para la realización de análisis RCA utilizando la metodología causa efecto, en los departamentos de Producción e Ingeniería y Confiabilidad de la Superintendencia de Operaciones Huila-Tolima de ECOPETROL S.A. ( Ver anexo 4)

En este procedimiento se halla la importancia de recurrir a la metodología causa efecto como herramienta indispensable en el análisis de fallas, se hace referencia también a la forma como el Ingeniero de Operaciones debe reportar la falla luego de diligenciar la información en la plantilla de muestras falladas (Ver anexo 1), en la cual se recopila toda la información encontrada acerca del evento en el momento que ocurrió la falla y permita al profesional identificar de forma rápida el modo de falla (tensión, fatiga, corrosión entre otras), el reporte se debe entregar a los Ingenieros de Confiabilidad en un periodo no mayor de 24 horas adjuntando el elemento fallado.

Dentro de este procedimiento se ejecuta un formato de reporte de falla que se diseñó con el fin de recopilar de forma ordenada toda la información de análisis de causa raíz para el pozo seleccionado.

El formato contiene unos sub-formatos, en él se puede encontrar: Generalidades, Reporte de falla 24h, Evidencias de falla, Diagrama causa-efecto, Hipótesis descartadas, Causas raíces validadas, Recomendaciones y Acciones de verificación.

### 3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE FALLAS

Teniendo en cuenta la información encontrada acerca de las fallas en bombeo mecánico de la Superintendencia, el campo Cebú-Palgrande se ha convertido en uno de los más recurrentes en cuanto falla se refiere, generando altos costos de mantenimiento y un aumento significativo en la producción diferida.

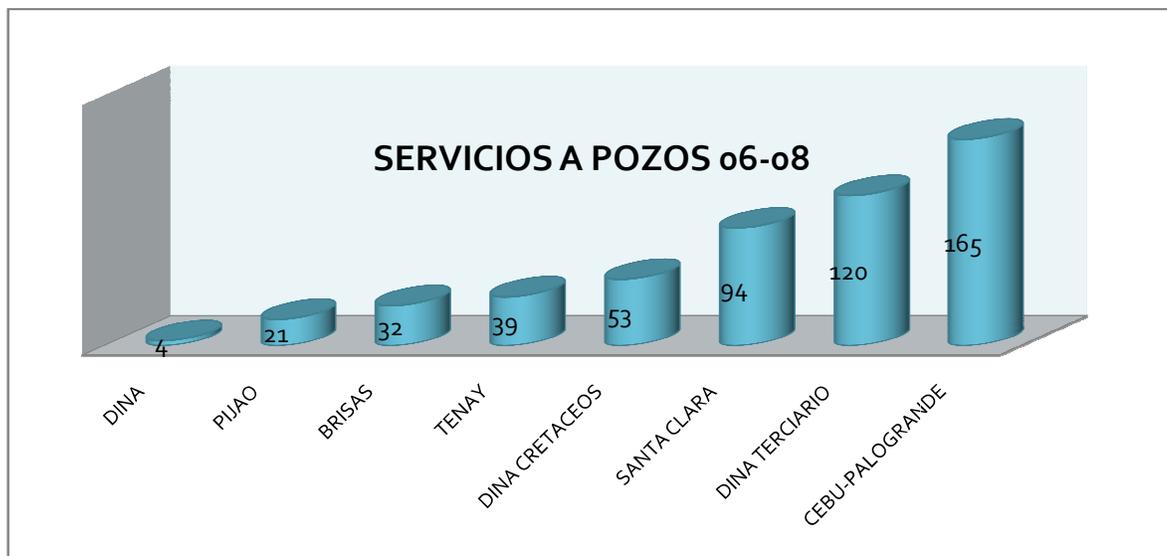


Figura 15. Servicios a pozos 2006-2008, Fuente Autor

La información recolectada para la investigación se obtuvo directamente de dos bases de datos (WESEMS, OPENWELLS), donde se recopila toda la información de los servicios de cada pozo, como informes diarios de operaciones, informes de potencial y pruebas de producción e informes estadísticos.

Se utilizaron los informes diarios de operaciones para recopilar las fallas históricas del campo desde marzo de 1980 hasta diciembre del 2008, esta información se maneja para elaborar un reporte histórico de ruptura de varillas por pozo, donde en cada evento de falla se puede observar las diferidas de producción, componente fallado, diámetro del componente, profundidad de la falla, modo de falla, fecha inicial, fecha de intervención y final del servicio.

DATE_interv	START_BAT	END_DATE	Horas_espe	Horas_en	Producción	Diferida_tot	SLA	Equipo_que_falla	Tipo_de_Varilla	Componente_suj
05/03/2001		05/03/2001					BN	Varilla		Coupling
25/10/2001		25/10/2001					BN	Varilla		Pin
30/10/2001		01/11/2001					BN	Varilla		Pin
31/10/2001		01/11/2001					BN	Tubería		Cuerpo
26/11/2001		26/11/2001					BN	Varilla		Pin
20/12/2002		24/12/2002					BN	Varilla		Pin
21/12/2002		24/12/2002					BN	Bomba		Podón
24/01/2003		24/01/2003					BN	Barras_jea		
05/02/2003		05/02/2003					BN	Bomba		Podón
14/04/2003		15/04/2003					BN	Tubería		Pinzas
13/05/2003		14/05/2003					BN	Varilla		Coupling
28/11/2003		30/11/2003					BN	Bomba		Podón
25/03/2004		25/03/2004					BN	Varilla		Pin
06/03/2004		06/03/2004					BN	Varilla		Pin
27/03/2004		29/03/2004					BN	Varilla		Pin
19/03/2004		21/03/2004					BN	Varilla		Pin
05/12/2004		05/12/2004					BN	Bomba		Podón
02/01/2005	01/01/2005	02/01/2005	20	14	151	214	BN	Varilla		Cuerpo
12/01/2005	11/01/2005	13/01/2005	15	34	151	309	BN	Varilla		Cuerpo
27/01/2005	25/01/2005	28/01/2005	28	30	151	365	BN	Varilla		Cuerpo
26/01/2005	26/01/2005	26/01/2005	6	38	151	277	BN	Bomba		Podón
05/03/2005	05/03/2005	05/03/2005	0	34	161	226	BN	Varilla	N-27	Cuadrante
26/05/2005	26/05/2005	01/07/2005	22	72	217	850	BN	Varilla		Cuerpo
07/10/2005	01/10/2005	10/10/2005	24	120	153	910	BN	Bomba		
17/04/2006	17/04/2006	18/04/2006	0	29	122	147	BN	Bomba		Válvula
05/04/2007	05/04/2007	06/04/2007	0	75	116	363	BN	Bomba		Válvula
21/07/2007	21/07/2007	21/07/2007	0	7	147	43	BN	Barras_jea		
26/02/2007	26/02/2007	29/02/2007	0	74	135	415	BN	Varilla		Cuadrante

Figura 16. Reporte histórico de ruptura de varillas OFM, Fuente Autor

El número histórico de fallas del campo Cebú–Palogrande en bombeo mecánico es de 1589, generando una producción diferida alrededor 25000 barriles de

petróleo. Las varillas representan el 74% de las fallas seguida por la bomba con un 16%, tubería 8% y barra lisa con solo el 2%, de donde se infiere que la varilla es el componente con mayor número de fallas, las cuales están históricamente distribuidas de la siguiente forma.

HISTÓRICO DE FALLAS POR COMPONENTE DE LA VARILLA DE BOMBEO MECÁNICO	
PIN	705
COUPLING	272
CUERPO	158
HOMBRO	2
CENTRALIZADOR	9
CEBOLLA	22
TOTAL DE FALLAS	1175

Tabla 5. Histórico de fallas por componente de la varilla de Bombeo Mecánico, Fuente Autor.

Se observa que el pin es la parte de la varilla que más ha fallado en toda la historia del campo, seguido por el coupling, cuerpo, hombro, centralizador y cebolla. Sin embargo entre los años 2006 y el 2008, la superintendencia ha venido reduciendo la recurrencia de fallas por pin, posesionándose en primer lugar la fallas de varilla por cuerpo. Ver figura 24.

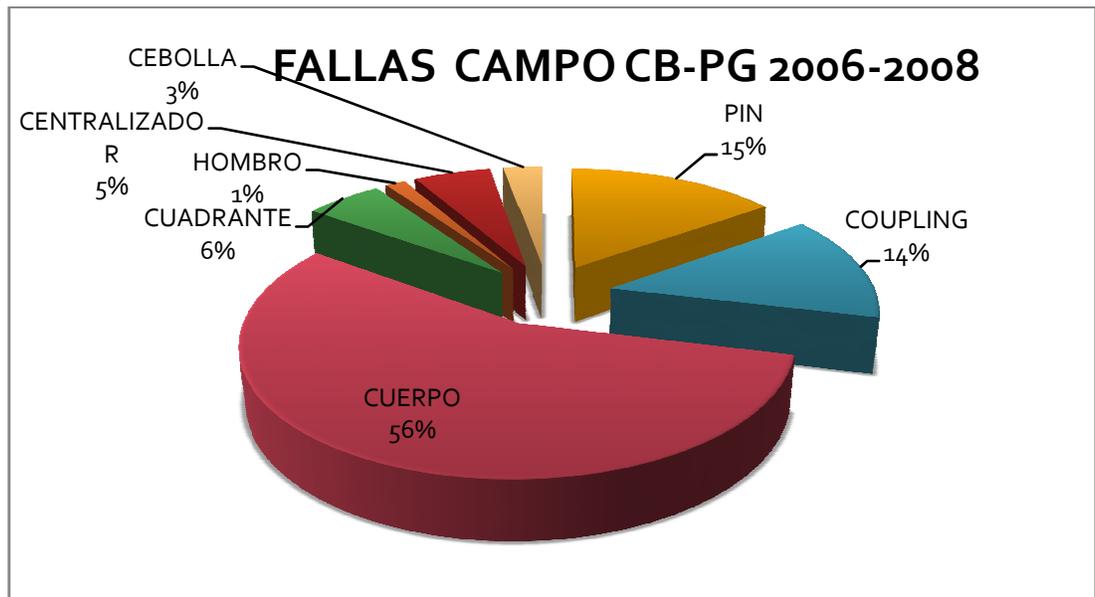


Fig. 17 Fallas campo CB-PG 2006-2008, Fuente Autor

En el campo Cebú-Palgrande los pozos que más han presentado recurrencia de fallas en los últimos tres años son PG-07 Y PG-03, con un número fallas de 13 y 9 respectivamente, la ruptura por Cuerpo es la falla más evidente en estos pozos, y han sido en total cuarenta y una (41) falla por este tipo de mecanismo en once (11) pozos de todo el campo. (Ver figura).

Según los informes de operaciones encontrados en la base de datos del año inmediatamente anterior (2008) el número de fallas por varillas del campo Cebú-Palgrande fue de treinta, (30) siendo los pozos CB-04, PG-07, PG-12 y PG-24 con los de mayor índice de fallas, considerándose a los pozos PG-12 y PG-24 como pozos críticos ya que tuvieron un promedio igual o superior a cuatro (4) rupturas y además presentaron altos volúmenes de producción de petróleo es decir una producción mayor a 200 BOPD.

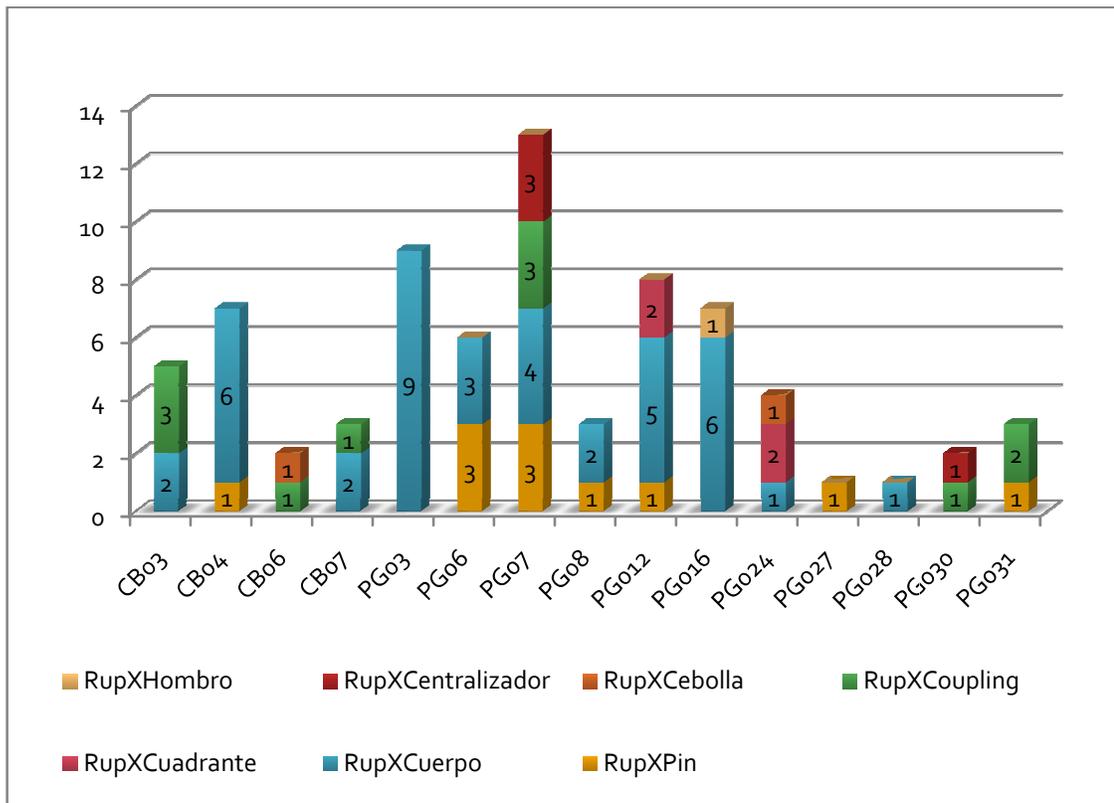


Fig. 18 Rupturas de las varillas por componente en el campo CB-PG, Fuente Autor

Analizando los diámetros que más han fallado desde el 2006 hasta el 2008, se observa que el 46% de las fallas están en 3/4", mientras que el 38% está en 7/8" y sólo el 14% en 1". Un escaso 2% se produce en varillas de 1 1/8". Es de resaltar que en el 2008 las fallas de varillas de diámetro de 1" aumentaron nueve (9) veces más que en el 2007.

### 3.2 ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DIFERIDA

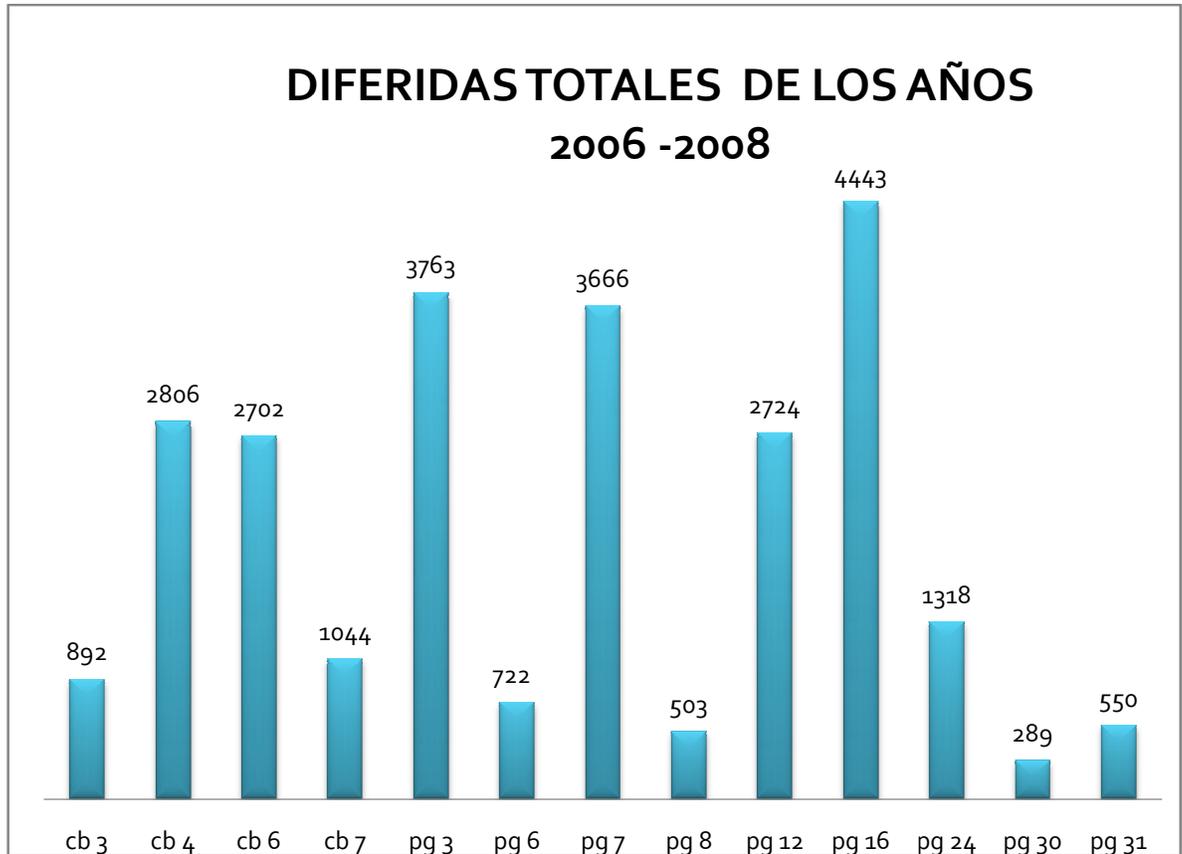


Fig. 19 Diferidas totales del campo 2006-2008, Fuente Autor

La figura 26 representa las pérdidas de producción por rompimiento de varillas en todos los pozos del campo Cebú –Palogrande, el volumen total de petróleo dejado de producir en estos tres años asciende a los 25423 barriles, siendo los pozos con más impacto negativo, PG- 16 seguido por PG -03 , PG7 y PG- 12 .

En la tabla 6 se muestra como el 2007, en comparación con los demás años fue el más crítico, generando un 45% de las pérdidas totales de producción en estos tres años, también se puede observar como PG-12 ha tenido una incidencia significativa en el aumento de la producción diferida especialmente en el 2007 y 2008.

Es de resaltar que aunque la pérdida de producción de petróleo disminuyó en el 2008 estas siguen siendo significativas para la producción total de la superintendencia.

<b>Pozo</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
<i>CB 3</i>	0	0	178
<i>CB 4</i>	289	1317	716
<i>CB 6</i>	1425	300	82
<i>CB 7</i>	140	0	336
<i>PG 3</i>	161	3109	252
<i>PG 6</i>	382	340	0
<i>PG 7</i>	1397	1067	891
<i>PG 8</i>	405	97	0
<i>PG 12</i>	173	1573	605
<i>PG 16</i>	3138	915	234
<i>PG 24</i>	0	416	504
<i>PG 30</i>	0	132	82
<i>PG 31</i>	64	4	7
<b>TOTAL</b>	<b>7574</b>	<b>9270</b>	<b>3887</b>

Tabla 6. Pérdidas en barriles por año del campo Cebú-Palogrande, Fuente Autor

### 3.2.1 Análisis de Pérdidas

#### 3.2.1.1 Pérdidas en venta de petróleo.

La producción diferida de petróleo representa pérdidas en ventas, especialmente en estos últimos tres años cuando el precio del crudo tuvo su máximo valor de venta al llegar a los 150 dólares el barril.

Los datos de la tabla 7 que resumen las pérdidas de la producción diferida por pozo, muestra que la compañía ha dejado de recibir alrededor de US\$ 829,240 (Ochocientos veinte nueve mil doscientos cuarenta) dólares, esta cifra representa una pérdida económica de grandes proporciones teniendo en cuenta que se generó por el campo Cebú Palogrande uno de los más importantes en el aporte de la producción total de aceite en la superintendencia.

<i>Pozo</i>	<i>Pérdidas en Venta de petróleo (dólares) 2006</i>	<i>Pérdidas en Venta de petróleo (dólares) 2007</i>	<i>Pérdidas en Venta de petróleo (dólares) 2008</i>
<i>CB 3</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>7120</i>
<i>CB 4</i>	<i>11560</i>	<i>52680</i>	<i>28640</i>
<i>CB 6</i>	<i>57000</i>	<i>12000</i>	<i>3280</i>
<i>CB 7</i>	<i>5600</i>	<i>0</i>	<i>13440</i>
<i>PG 3</i>	<i>6440</i>	<i>124360</i>	<i>10080</i>
<i>PG 6</i>	<i>15280</i>	<i>13600</i>	<i>0</i>
<i>PG 7</i>	<i>55880</i>	<i>42680</i>	<i>35640</i>
<i>PG 8</i>	<i>16200</i>	<i>3880</i>	<i>0</i>
<i>PG 12</i>	<i>6920</i>	<i>62920</i>	<i>24200</i>
<i>PG 16</i>	<i>125520</i>	<i>36600</i>	<i>9360</i>
<i>PG 24</i>	<i>0</i>	<i>16640</i>	<i>20160</i>
<i>PG 30</i>	<i>0</i>	<i>5280</i>	<i>3280</i>
<i>PG 31</i>	<i>2560</i>	<i>160</i>	<i>280</i>
<b><i>TOTAL</i></b>	<b><i>302960</i></b>	<b><i>370800</i></b>	<b><i>155480</i></b>

Tabla 7. Pérdidas en Venta de petróleo 2006, Fuente Autor

### 3.2.1.2 Costo de servicio por ruptura de varillas

AÑO	Costo por Mantenimiento en dólares
2008	296.374,78
2007	315.672,11
2006	212.270,60
TOTAL	824317,4967

Tabla 8. Costos de servicios 2006-2008, Fuente Autor

En la tabla se muestran los costos generados por el mantenimiento de los pozos a causa del rompimiento de varillas, para calcularlos se tomó un promedio del pago por horas de los equipos utilizados en los últimos tres años, y se observa que el 2007 fue el año con mayor costo de mantenimiento, esto se justifica por el gran número de fallas por varilla que hubo en este periodo de tiempo.

El total de los gastos por mantenimiento para la compañía fue alrededor de US \$ 824 317 (ocho cientos veinticuatro mil trescientos diecisiete) que sumados a lo que se ha dejado de recibir por pérdida de producción, da un total de 1, 653,557 dólares, esta cifra es una prueba real de la gravedad y magnitud del problema y del costo del mismo, lo cual hace necesario minimizar la recurrencia de fallas identificando la causa real del problema a través de el análisis de causa raíz RCA.

### **3.3 ANÁLISIS CAUSA RAÍZ (RCA)**

#### **3.3.1 ANÁLISIS RCA POZO PG-12**

##### **3.3.1.1 Histórico del pozo**

El pozo Palogrande 12 fue perforado el 22 de octubre de 1980, a lo largo de su historia ha tenido alrededor de 64 fallas de las cuales 53 han sido por ruptura de varilla, esto representa un 90% del total de las fallas en la historia del pozo.

El componente de la varilla que más ha fallado en este pozo es el pin, seguido por el cuerpo y el coupling. En los últimos años se observó la reducción de fallas por pin y el aumento significativo de fallas por cuerpo.

Entre los años 2006-2008 el cuerpo fue el componente que más presentó fallas en el campo Cebú-Palogrande, este pozo se posiciona en el tercer lugar por este mecanismo de falla y en el cuarto lugar de la producción diferida con un total de 784 barriles por año, y es uno de los pocos pozos de los que se ha tenido evidencia física, por esto se dice que el pozo PG-12 es un fuerte candidato para ser evaluado y lograr un completo análisis RCA.

### 3.3.1.2 Análisis de la muestra:

Como material de estudio se recibieron tres secciones de varillas del pozo PG-12, dos secciones corresponden a las superficies de fractura (zona del cuerpo) y la tercera sección trae la información completa de la varilla (zona de cuadrante)  
En la Figura 27 se muestra el estado de recepción de las secciones para estudio.



Figura 20. Muestras recibidas para análisis, correspondiente a tres secciones de varilla del pozo PG-12

### 3.3.1.3 Información recolectada del evento.

El reporte del evento de la falla ocurrió el 17 de enero de 2009 realizado por el recorridor en turno, el pozo se encontraba en el proceso de extracción de crudo, se interrumpió la producción por varilla partida por cuerpo a 2534 pies, con una vida útil de 700 días es decir se instaló por primera vez el 29 de marzo del 2007, el evento finalizó el 18 de Enero de 2009 a las 23:50.

#### 3.3.1.4 Marcación de la Varilla del pozo PG-12



Figura 21. Marcación de la varilla cara 1



Figura 22. Marcación de la varilla cara 2

El cuadrante de la muestra presenta estampado en bajo relieve la siguiente información:

Cara 1: **2913**

**7/8 M''' S**

Cara 2: **A W**

**X 10-06**

De acuerdo con la marcación observada la varilla es grado 4138 Special M<sup>3</sup> S Diseñada para su utilización con cargas extremadamente altas en pozos no corrosivos o efectivamente inhibidos, diámetro 7/8" y fabricada por Confab Hastes de Bombeo empresa Tenaris de Brasil, en Octubre del año 2006.

#### 3.3.1.5 Inspección visual para la varilla del pozo PG-12.

Las secciones de varilla recibidas del pozo PG-12 presentan ruptura total, la ruptura de la misma se presentó en dos eventos principalmente.

##### ✓ Evento 1

En este evento se presentó el crecimiento y propagación de grietas, generando una zona plana y lisa, característica de una superficie que presenta agrietamiento progresivo bajo condiciones de fatiga. La zona generada en este evento abarca aproximadamente un 80% del área total de la superficie de fractura.

Las flechas de color negro en la Figura indican la dirección de propagación y el sitio donde inició agrietamiento.

##### ✓ Evento 2

En este evento se presentó la ruptura final de la varilla, generando una zona de aspecto ligeramente rugoso, propagando rápidamente, este aspecto es similar al dejado por un desgarramiento por sobrecarga. Esta zona abarca aproximadamente un 20% de la superficie de fractura, ver figura.



Figura 23. Zona de propagación de la falla



Figura 24. Zona de inicio de la falla

### 3.3.1.6 Clasificación del evento

Se clasificó el evento como nivel Medio de acuerdo a la matriz de valoración de riesgos, teniendo en cuenta que la ruptura de varillas sucede varias veces por año en la Superintendencia de Operaciones y que el costo generado por el servicio estuvo entre 10 y 100 mil dólares ver tabla. El pozo

PG-12 en los últimos dos años ha presentado 5 fallas por cuerpo de diámetro 3/4” y de todas se desconoce la causa raíz de la falla, es importante destacar que estas fallas ocurrieron en la parte inferior de la sección de la varilla.

Para identificar la causa raíz de la falla en el pozo PG-12, se emplea la metodología causa-efecto teniendo en cuenta que esta metodología involucra definición del problema, creación del diagrama causa-efecto e implementación de soluciones donde se exponen todas las posibles hipótesis involucradas en la ruptura de varilla. Ver figura 32

CONCECUENCIAS POTENCIALES				PROBABILIDAD					
SEVERIDAD				No ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en Ecopetrol	Sucede varias veces por año en Ecopetrol	Sucede varias veces por año en la superintendencia	
Personas	Economicas en Dolares	Ambiental	Imagen Corporativa						
Una o mas fatalidades	Catastrofica > 10 millones	Masiva	Internacional	M	M	H	H	VH	5
Incapacidad permanente parcial o total	Grave 1-10 millones	Mayor	Nacional	L	M	M	H	H	4
Incapacidad temporal > 1 día	Severo 100 mil - 1 millón	Localizado	Regional	N	L	M	M	H	3
Lesion menor sin incapacidad	Importante 10 mil - 100 mil	Menor	Local	N	N	L	L	M	2
Lesión leve primeros auxilios	Marginal < 10 mil	Leve	Interna	N	N	N	L	L	1
Ninguna lesión	Ninguna	Ningún Efecto	Ningún impacto	N	N	N	N	N	0
				A	B	C	D	E	

Figura 25. Matriz de valoración de riesgos

### 3.3.1.7 Hipótesis descartadas:

- ✓ Sobrecarga por desbalance de la Unidad de Bombeo

Se hizo el análisis de tres Dinagramas del pozo Palogrande 12 (PG-12) cuya fecha de reporte fueron las siguientes: 17 de enero del 2009 a las 11:01AM (antes de la falla), 17 de enero 2009 a las 2:58 AM (hora exacta de la falla) y 17 de enero de 2009 a las 3:16 AM (después de la falla). En los tres Dinagramas se pudo observar claramente que no hubo sobrecarga en la unidad de bombeo, por tanto esta hipótesis queda descartada. Ver anexo 2

- ✓ Fricción o erosión de la varilla

En el cuerpo de la varilla no se evidencia reducción del área transversal y tampoco se observa una remoción considerable del metal de ésta, lo que comprueba que no hubo fricción ni erosión en la varilla.

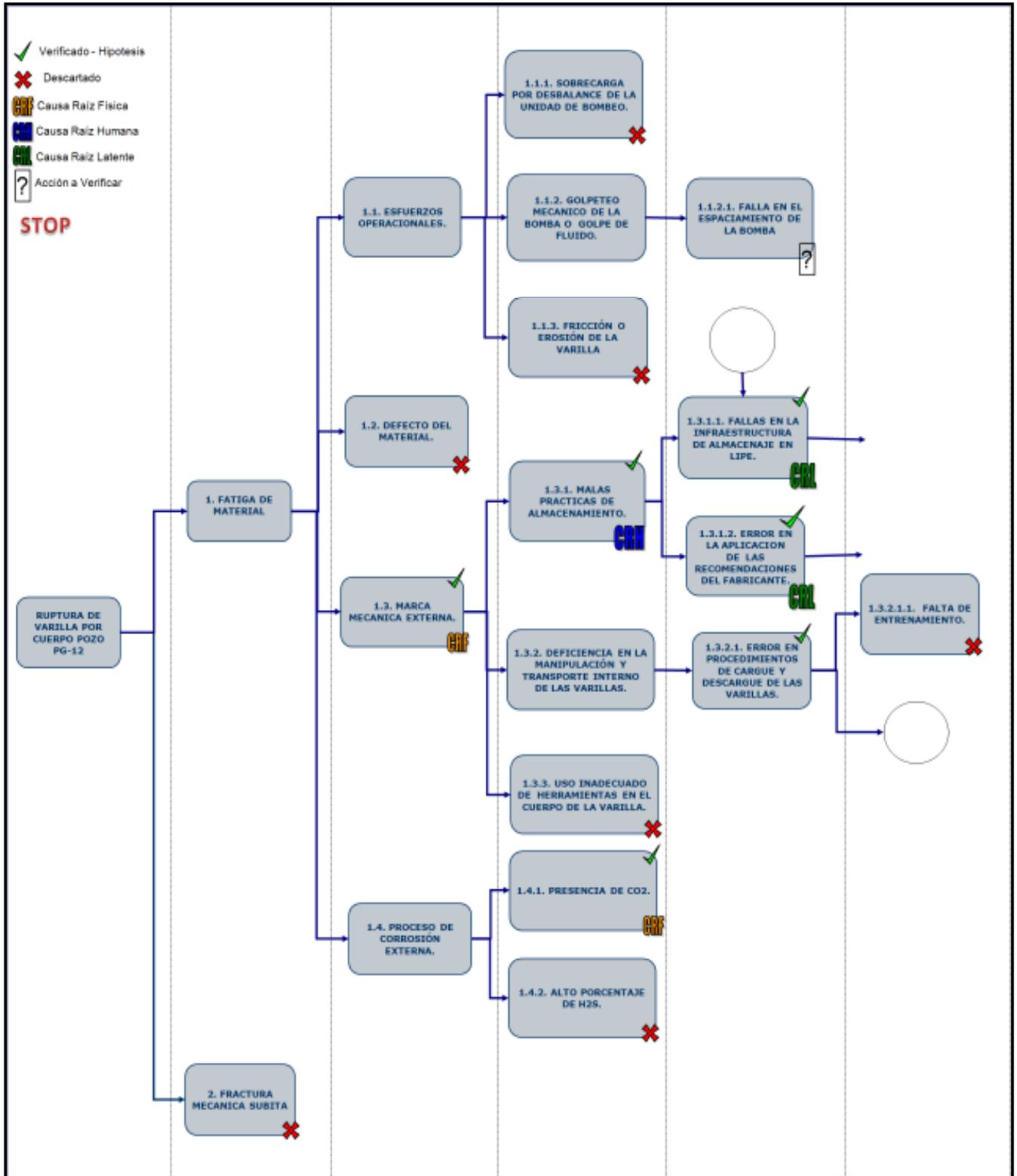


Figura 26. Diagrama Causa-Efecto pozo PG-12, Fuente Autor

- ✓ Defecto del material

Al comparar las propiedades del acero de las varillas (AISI 4138) dadas por el fabricante, con el análisis metalúrgico de la varilla, se concluye que su composición es muy similar, esto indica que el proceso de fabricación fue correcto y es improbable que la varilla no haya fallado por defecto de fabricación ver tabla 9.

ELEMENTO %	MUESTRA PG. 12	CATÁLOGO_TENARIS 4138M
<i>C</i>	<i>0.354</i>	<i>0.38-0.43</i>
<i>Mn</i>	<i>1.12</i>	<i>1.10-1.40</i>
<i>S</i>	<i>0.011</i>	<i>0.025Max</i>
<i>P</i>	<i>0.002</i>	<i>0.025Max</i>
<i>Si</i>	<i>0.283</i>	<i>0.20-0.40</i>
<i>Ni</i>	<i>0.189</i>	<i>0.30Max</i>
<i>Cr</i>	<i>0.65</i>	<i>0.60-0.90</i>
<i>Mo</i>	<i>0.256</i>	<i>0.25-0.35</i>
<i>V</i>	<i>0.421</i>	<i>0.04-0.07</i>
<i>Nb</i>	<i>0.03</i>	<i>0.025-0.045</i>
<i>Cu</i>	<i>0.011</i>	<i>0.25Max</i>

Tabla 9. Composición de las varillas, Fuente Tenaris

- ✓ Alto porcentaje de H<sub>2</sub>S

Se descarta esta hipótesis ya que la muestra no presenta bordes biselados en la superficie de la varilla, tampoco se evidencia presencia de sulfuro de hierro, resultado principal de un proceso corrosivo por H<sub>2</sub>S.

- ✓ Fractura mecánica súbita

Tanto el análisis de los Dinagramas como la morfología misma de falla en la varilla, nos evidencian que este componente no fué sometido a cargas que excedieran el límite máximo de fluencia o deformación plástica

#### 3.3.1.8 Hipótesis (Causas Raíces) validadas:

- ✓ Causas Raíces Físicas

- Marca mecánica externa:

En el cuerpo de la varilla se puede observar claramente una marca mecánica, la cual actuó como un concentrador de esfuerzo que generó de forma progresiva la ruptura de la varilla. Esto se evidencia en las fotografías tomadas en la muestra, ver figura 34.

- Presencia de CO<sub>2</sub>

En la muestra se observa un color pardo alrededor de los planos de falla de la varilla, este es debido a la presencia CO<sub>2</sub> en el pozo. Cabe anotar que en el cuerpo de la varilla no se encontró picadura por CO<sub>2</sub>, solo se evidencia en el concentrador de esfuerzo de la misma

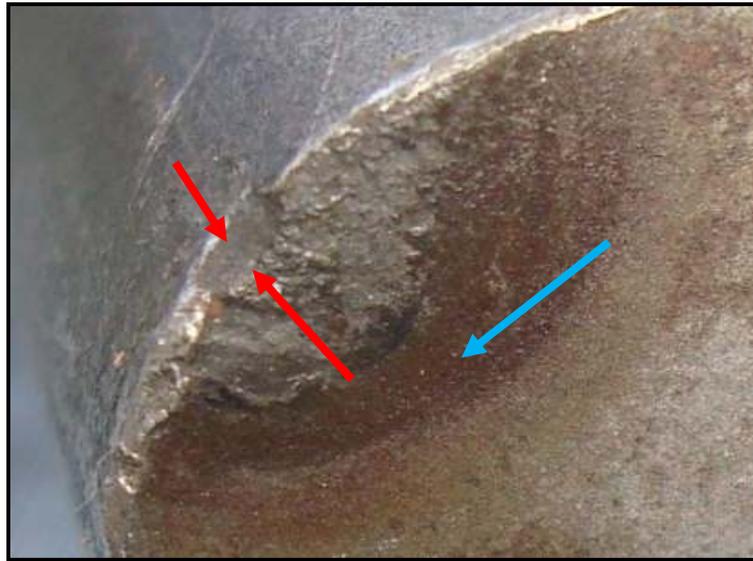


Figura 27. Concentrador de esfuerzo de la varilla

✓ Causas Raíces Humanas

- Malas prácticas de almacenamiento:

Se realizó una inspección física a la bodega de materiales allí se observó que no todas las varillas poseían protector de rosca debido a que no existe un almacenamiento de estas en bodega.

- Error en procedimientos de cargue y descargue de las varillas:

El proceso de cargue y descargue de las varillas ( 1-20 varillas) es deficiente puesto que solo lo hace una sola persona, además en la organización no se tiene cuidado para combinar varillas de diferentes fabricantes dentro del pozo, la selección se basa en el estado poco corrosivo de estas.

✓ Causas Raíces Latentes / Organizacionales:

- Fallas en la infraestructura de almacenaje en Lipe:

Se evidenció la falta de caballetes lo que implica que algunas varillas sean clasificadas sobre bloques de cemento a una altura menor de 50 cm, las varillas están al aire libre lo cual tiene un impacto negativo ya que se acelera el proceso de corrosión de las mismas.

- Error en la aplicación de las recomendaciones del fabricante:

No se aplica adecuadamente todas las recomendaciones por el fabricante por falta de infraestructura dentro de la organización

### 3.3.1.9 Recomendaciones PG-12

CONSECUENCIAS POTENCIALES				COSTO DE LA IMPLEMENTACION EN MILLES DE DOLARES				
Personas	Economicas en Dolares	Ambiental	Imagen Corporativa	< 10	Entre 10 y 50	Entre 50 y 100	Entre 100 Y 500	> 500
Una o mas fatalidades	Catastrofica > 10 millones	Masiva	Internacional	VH	H	M	M	L
Incapacidad permanente parcial o	Grave 1-10 millones	Mayor	Nacional	H	H	M	L	L
Incapacidad temporal > 1 día	Severo 100 mil - 1 millón	Localizado	Regional	M	M	L	L	N
Lesion menor sin incapacidad	Importante 10 mil - 100 mil	Menor	Local	M	L	L	N	N
Lesión leve primeros auxilios	Marginal < 10 mil	Leve	Interna	L	L	N	N	N
Ninguna lesión	Ninguna	Ningún Efecto	Ningún impacto	N	N	N	N	N

	Prioridad Muy Alta		Prioridad Alta		Prioridad Baja
	Prioridad Media		No es viable		

Figura 28. Matriz de Priorización de Implementación de Recomendaciones

Según la matriz de priorización de implementación de recomendaciones en el proceso de Análisis de Causa Raíz la necesidad de aplicar las recomendaciones sugeridas para este evento es de prioridad alta ya que afecta la imagen corporativa de la empresa y el costo de estas no asciende más de diez millones de pesos.

Las recomendaciones hechas para cada una de las causas raíces son:

✓ Causa Raíz Física

- Marca externa mecánica:

Se recomienda elaborar un procedimiento para el correcto cargue y descargue de las varillas recopilando las recomendaciones de los diferentes fabricantes.

- Presencia de CO<sub>2</sub>:

Se sugiere realizar un estudio de los fluidos para los pozos del campo Palogrande-Cebú.

✓ Causa Raíces Humanas

- Malas prácticas de almacenamiento:

- Se sugiere corregir el espaciamiento de algunos caballetes, estos deben estar a 50 cm del suelo.
- Se recomienda hacer un adecuado almacenamiento de los protectores de rosca, deben estar clasificados por diámetros, con grasa en su interior de tal forma que se asegure la protección de la varilla.

- Error en procedimientos de cargue y descargue de las varillas

Se recomienda elaborar un procedimiento para el correcto cargue y descargue de las varillas recopilando las recomendaciones de los diferentes fabricantes.

✓ Causa Raíces Latentes:

- Fallas en la infraestructura de almacenaje en Lipe (Bodega de materiales de segunda).
  - Se sugiere aumentar la cantidad de caballetes
  - Se recomienda construir un techo que proteja las varillas del sol y del agua.
- Error en la aplicación de las recomendaciones del fabricante
  - Se sugiere tener en cuenta todas las recomendaciones echas por el fabricante.
- ✓ Hallazgos
  - Inadecuada preservación de la muestra fallada.
    - Preservar las muestras debidamente marcadas

### 3.3.2 Análisis RCA Pozo PG-24

#### 3.3.2.1 Histórico del pozo

Los antecedentes que presenta este pozo relacionados con la ruptura de varilla por pin se han venido dando desde 1987, con un conteo total de 41 fallas de este tipo.

Palogrande 24 ha sido uno de los pozos con más recurrencia de fallas en el 2008 y representó el tercer lugar de pérdidas de producción del campo Cebú-Palogrande. Se observa que las fallas en las varillas no presenta un patrón específico de ruptura sino que son detectadas tres clases de modos de falla en las varillas de este pozo: cuerpo, cebolla y pin.

Por las razones expuestas y sabiendo que el pozo Palogrande 24 posee muy buena información para ser analizado, se toma como modelo. Es importante anotar que los pozos más críticos no poseen información suficiente para la realización de un RCA confiable.

#### 3.3.2.2 Análisis de la muestra

Como material de estudio se recibió la varilla del pozo PG-24, correspondiente a la superficie de fractura (zona del pin).

En la Figura 36 se muestra el estado de recepción de la sección para estudio.



Figura 29. Muestra pozo PG-24

### 3.3.2.3 Información recolectada del evento

El reporte de la falla se hizo el día 1 de febrero de 2009, el pozo se encontraba en proceso de extracción de crudo cuando se evidenció caída de presión en cabeza, se halla varilla de 1" partida por pin @ 2473 pies, no se cuenta con información concreta acerca de su vida útil en el pozo, posiblemente fue instalada por primera vez en Noviembre de 2005, se presume que fue para este tiempo debido a que se realizó el último servicio de cambio de varilla, el evento de la falla finaliza el 10 de Febrero de 2009 a las 13:00 horas.

### 3.3.2.4 Inspección visual para la varilla del pozo PG-24.

La varilla recibida del pozo PG-24 presenta ruptura total, la ruptura de la misma se presentó en dos eventos principalmente.

#### ✓ Evento 1:

La Ruptura de la varilla de 1" se presentó por la zona del Pin a través del último hilo roscado, quedando la parte restante dentro del acople de la varilla.

La ruptura de la varilla fue inducida por grietas que se propagaron con el tiempo en la dirección transversal a la dirección longitudinal de la varilla debido al fenómeno de fatiga. La Figura 37 muestra que la superficie de fractura presenta

las características típicas de una fractura por fatiga, la zona demarcada por la línea roja indica la zona de propagación de la grieta de fatiga; la zona demarcada por la línea amarilla indica la zona de ruptura súbita. La superficie de falla muestra que la grieta se propagó hasta alcanzar un 80% del área transversal del pin antes de que ocurriera la fractura. Esto indica cualitativamente, que la varilla en la zona de falla estuvo sometida a un bajo esfuerzo.

✓ Evento 2:

En este evento se presentó la ruptura final de la varilla, generando una zona de aspecto ligeramente rugoso, este aspecto es similar al dejado por un desgarramiento. Esta zona abarca aproximadamente un 20% de la superficie de fractura

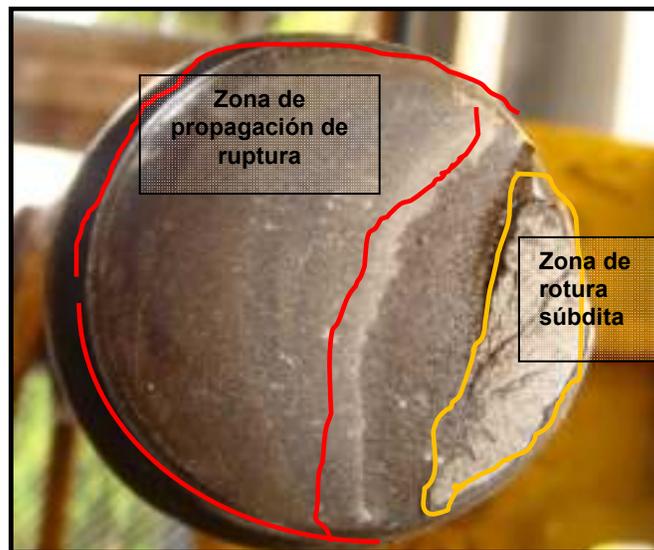


Figura 30. Planos de falla

### 3.3.2.5 Clasificación del evento

Se clasifica el evento como nivel Medio de acuerdo a la matriz de valoración de riesgos, teniendo en cuenta que la ruptura de varillas sucede varias veces por año en la Superintendencia de Operaciones Huila-Tolima y que el costo generado por el servicio estuvo entre 10 y 100 mil dólares.

CONSECUENCIAS POTENCIALES				PROBABILIDAD					
SEVERIDAD				Ha ocurrido en la industria	Ha ocurrido en la industria	Ha ocurrido en Ecopetrol	Sucede varias veces por año en Ecopetrol	Sucede varias veces por año en la superintendencia	
Personas	Economicas en Dolares	Ambiental	Imagen Corporativa						
Una o mas fatalidades	Catastrofica > 10 millones	Masiva	Internacional	M	M	H	VH	VH	5
Incapacidad permanente parcial o total	Grave 1-10 millones	Mayor	Nacional	L	M	M	H	H	4
Incapacidad temporal > 1 dia	Severo 100 mil - 1 millón	Localizado	Regional	N	L	M	M	H	3
Lesion menor sin incapacidad	Importante 10 mil - 100 mil	Menor	Local	N	N	L	M	M	2
Lesion leve primeros auxilios	Marginal < 10 mil	Leve	Interna	N	N	N	L	L	1
Ninguna lesion	Ninguna	Ningún Efecto	Ningún impacto	N	N	N	N	N	0
				A	B	C	D	E	

Figura 31. Matriz de Valoración de Riesgos.

Para identificar la causa raíz de la ruptura por pin para el pozo PG24, se emplea la metodología causa-efecto ya que es un método muy útil y muy utilizado por ser sencillo y efectivo donde se hace una búsqueda metódica de la(s) causa(s) del problema exponiendo todas las posibles hipótesis involucradas en la ruptura de varilla por pin.

Al realizar el diagrama causa-efecto (ver figura) se encontraron varios tipos de causas raíz (Causa raíz física, humana y latente), estas causas están presentes en los procesos, que de no eliminarse, es inevitable que se vuelva a presentar el evento no deseado.

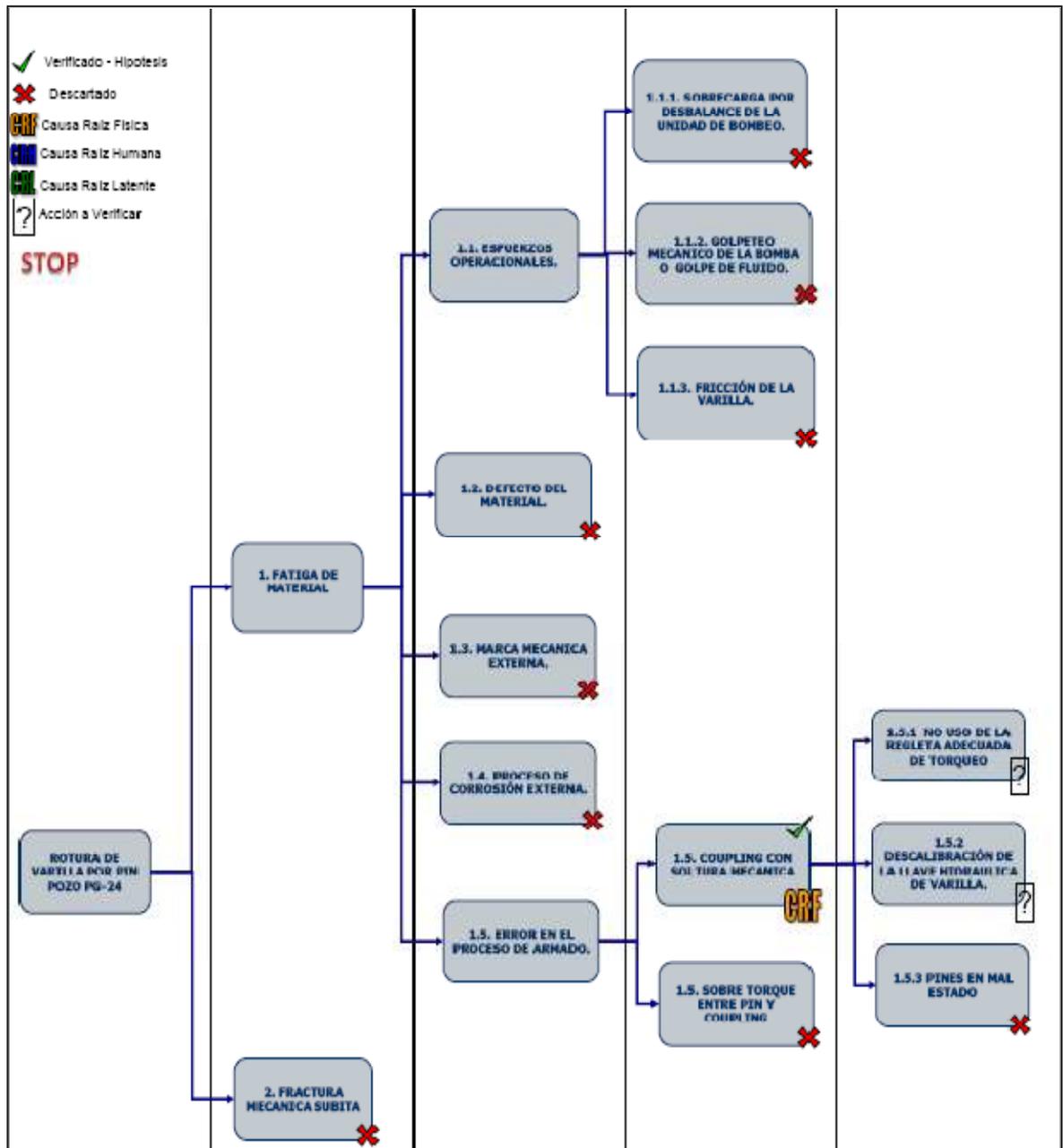


Figura 32. Diagrama Causa-Efecto pozo PG-24

### 3.3.2.6 Hipótesis descartadas:

- ✓ Sobrecarga por desbalance de la Unidad de Bombeo:  
De acuerdo a los Dinagramas analizados antes, durante y después de la falla se evidencia que no existió sobre carga en la unidad de bombeo, esto nos lleva a concluir que esta hipótesis queda descartada. Además no se encontró deformación ni Rotura en los pines y tampoco deformación de espejos, características de una ruptura por sobre torque.
  
- ✓ Golpeteo mecánico de la bomba o golpe de fluido:  
En los Dinagramas analizados, no se observa golpe de fluido ni golpe mecánico en la bomba, por tanto esta hipótesis no es validada
  
- ✓ Fricción de la varilla:  
La evidencia obtenida no presenta desgaste, ni reducción de área que pueda relacionarse con mecanismos de fricción generados en el pozo ésta hipótesis queda descartada.
  
- ✓ Defecto del material:  
Al comprar el análisis metalúrgico de la muestra con la composición química dada por el fabricante se obtiene una similitud en composición muy alta por esto esta hipótesis queda descartada.
  
- ✓ Marca mecánica externa:  
En toda la evidencia no se observó ninguna marca externa que propiciara la falla, por tanto esta hipótesis no es válida.

✓ Proceso de corrosión externa:

No se observa ninguna sustancia ni aspecto corrosivo en la evidencia lo que nos lleva a concluir de manera determinante que no existió corrosión externa en la varilla.

3.3.2.7 Hipótesis (Causa Raíz) Validadas:

✓ Causa raíz : Coupling con soldura mecánica

Tal como se aprecia en la fotografía, el pin presenta soldura mecánica dejando el 50% de la cara del espejo sin precarga de tensión inicial, (zona de color oscura), razón por la cual el pin se vio sometido a cargas cíclicas que inducen el fenómeno de fatiga.

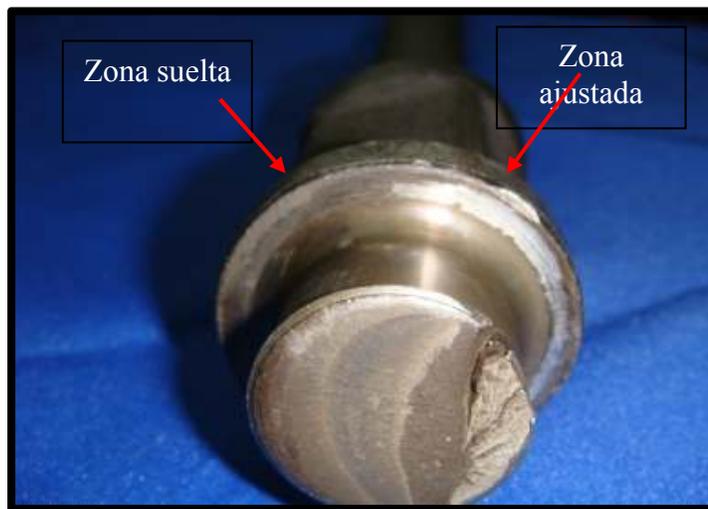


Figura 40. Marcas en el pin de la varilla por bajo Torque

### 3.3.2.8 Recomendaciones pozo PG-24

- ✓ Se recomienda verificar que se lleven a cabo los procedimientos de forma eficiente de arme y desarme de la sarta de varillas con los equipos de operación (Varisur, DWS y Petroworks)
  
- ✓ Se recomienda solicitar a los equipos de operación (Varisur, DWS y Petroworks) los registros de calibración de las herramientas de torque usadas en el proceso de arme de la sarta de varillas.

#### 4. CONCLUSIONES

- ✓ La principal causa histórica de servicios a pozo en el campo Cebú-Palogrande ha sido las fallas por rompimiento de varillas con un número de 1589, representando un 74% del total de las fallas en el campo, seguida por fallas en bombas con un 16% y fallas por tubería con un 8%.
- ✓ El Campo Cebú-Palogrande se caracteriza por tener un alto índice de servicios a pozo por varilla, situación que lo convierte en uno de los campos más problemáticos de la Superintendencia de Operaciones Huila-Tolima, teniendo en cuenta que la producción potencial representativa del campo es alrededor de 1357 BOPD, representando el 11% de toda la producción del área Neiva,
- ✓ Entre los años 2006-2008 las fallas más representativas de este campo se ha debido a la ruptura por cuerpo con un 56% del total de las fallas, seguida por el pin con un 15% y coupling con un 14% y el 15% restante se distribuye a las fallas atribuidas a los demás componentes de la varilla.
- ✓ Analizando los diámetros que más han fallado desde el 2006 hasta el 2008, se observa que el 46% de las fallas están en 3/4", mientras que el 38% está en 7/8" y sólo el 14% en 1". Un escaso 2% se produce en varillas de 1 1/8". Es de resaltar que en el 2008 las fallas de varillas de diámetro de 1" se aumentaron nueve (9) veces más que en el 2007.
- ✓ Existe una falencia en la manipulación y almacenamiento de las varillas especialmente en varillas usadas, lo que nos lleva a concluir que este factor tiene una gran probabilidad de causar el aumento de las rupturas de varillas por cuerpo en los últimos años.

## 5. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda seguir el procedimiento de análisis RCA, para la detección de la causa raíz de las fallas en los sistemas de levantamiento artificial de la Superintendencia de Operaciones Huila - Tolima de Ecopetrol S.A. Con el fin de identificar la causa raíz del problema y evitar las malas prácticas operativas que aumente la recurrencia de fallas.
- ✓ Se sugiere que se lleven acabo de forma eficiente el cargue de las varillas usadas (para una cantidad menor a veinte), es decir que se haga con un mínimo de dos personas con el objetivo de reducir de forma considerable la flexión de estas y evitar posteriormente una falla de este tipo.
- ✓ Se recomienda un adecuado almacenamiento de las varillas usadas de acuerdo a el diámetro, tipo y grado de varilla, para esto se deben considerar todas las especificaciones echas por el fabricante, con el fin de minimizar la recurrencia de fallas por marcas mecánicas y por efectos corrosivos.
- ✓ Se recomienda hacer un análisis químico que determine las características de los fluidos de yacimiento de los pozos del campo Cebú-Palgrande, con el objetivo de conocer las propiedades de estos y determinar el impacto que causarían a la composición del material de las varillas.
- ✓ Se sugiere revisar el diseño de los pozos con más recurrencia de fallas en los últimos tres años estos son Palgrande PG– 07,PG-12 y PG-03.

- ✓ Se sugiere que las varillas que evidencian problemas de corrosión y daños en la superficie, como golpes, ralladuras, roscas en mal estado y otros, se reemplacen y no sean bajadas con la sarta de producción.
  
- ✓ Se recomienda revisar los procedimientos y las prácticas operativas de ajuste y torqueado de las varillas. Se debe realizar la limpieza de las conexiones con solvente (evitar la utilización de gasoil) prestando especial atención a los espejos tanto de la varilla como del coupling.
  
- ✓ Se recomienda **EVITAR** la mezcla de materiales de diferentes fabricantes y/o grados de acero. Ello debido a las diferencias en las tolerancias de fabricación que existen, los diferentes desplazamientos recomendados para el make -up de uniones, y no menos importante, la posibilidad de ocurrencia de fenómenos de corrosión galvánica entre los distintos grados de acero.

## 6. Bibliografía

- ✓ Manual para aplicación de la metodología de Análisis de Causa Raíz para la solución de problemas ECP-ICP-GCM-M-001
- ✓ HUERTA, Rosendo. “Confiabilidad Operacional: Técnicas y Herramientas de Aplicación”. Seminario Customer Care, Datastream. Bogotá, Colombia. 2004.
- ✓ LATINO, Robert J. ROOT CAUSE ANALYSIS: Improving Performance for Bottom Line Results Reliability Center, Inc. 2001.
- ✓ Instructivo para la identificación y jerarquización de malos actores. Documento ECP-ICP-GCM-I-001
- ✓ Instructivo de aplicación de la metodología RCA para la eliminación de malos actores, documento ECP-ICP-GCM-I-002
- ✓ Guía para la aplicación de la metodología de análisis de causa raíz para la solución de problemas. Documento ECP-ICP-GCM-P-001
- ✓ Instructivo para el uso de la matriz RAM, Documento ECP-VRM-I-001
- ✓ **www.tenaris.com**
- ✓ Fundamento Teórico para el Análisis de fallas, Norris

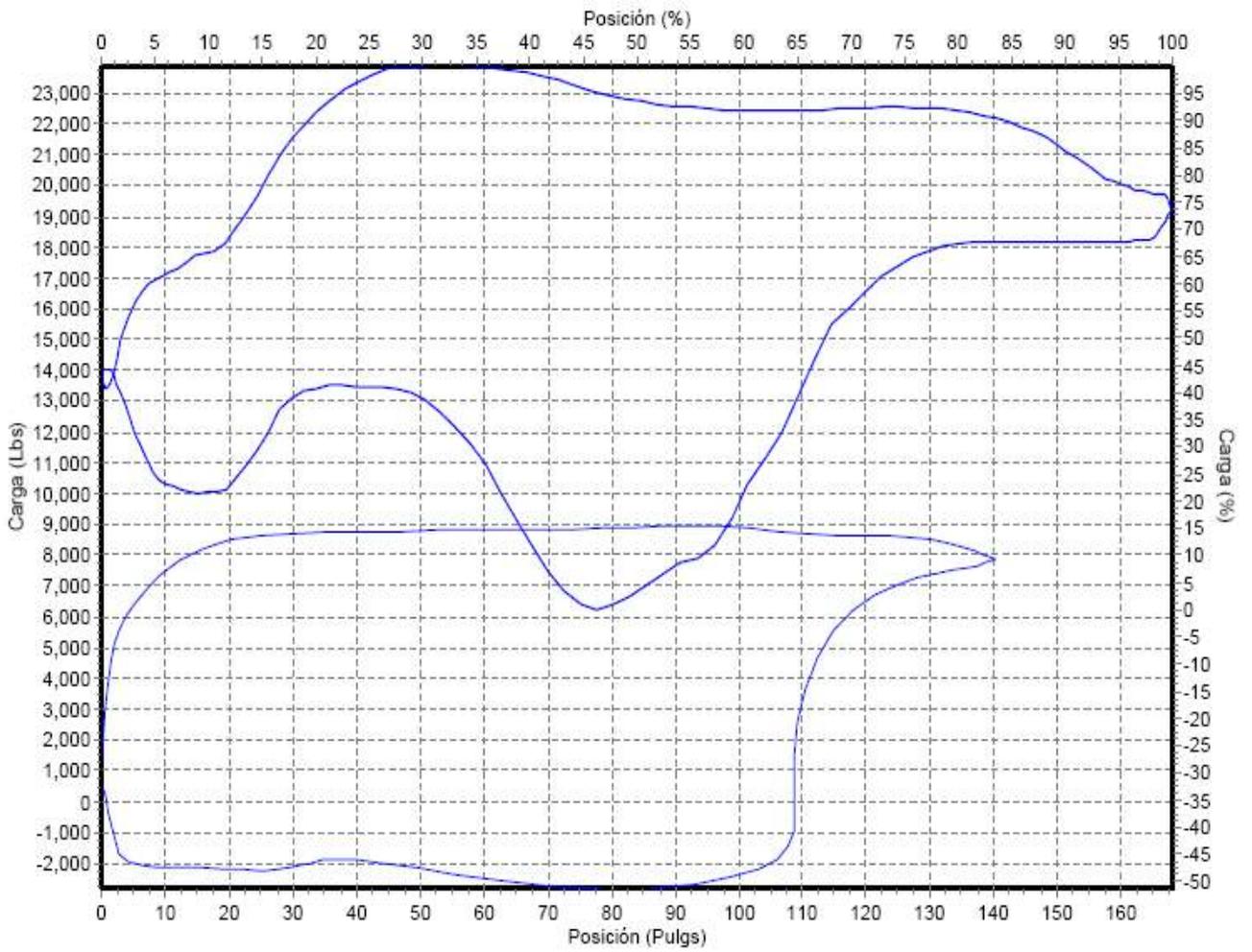
# ANEXOS

---



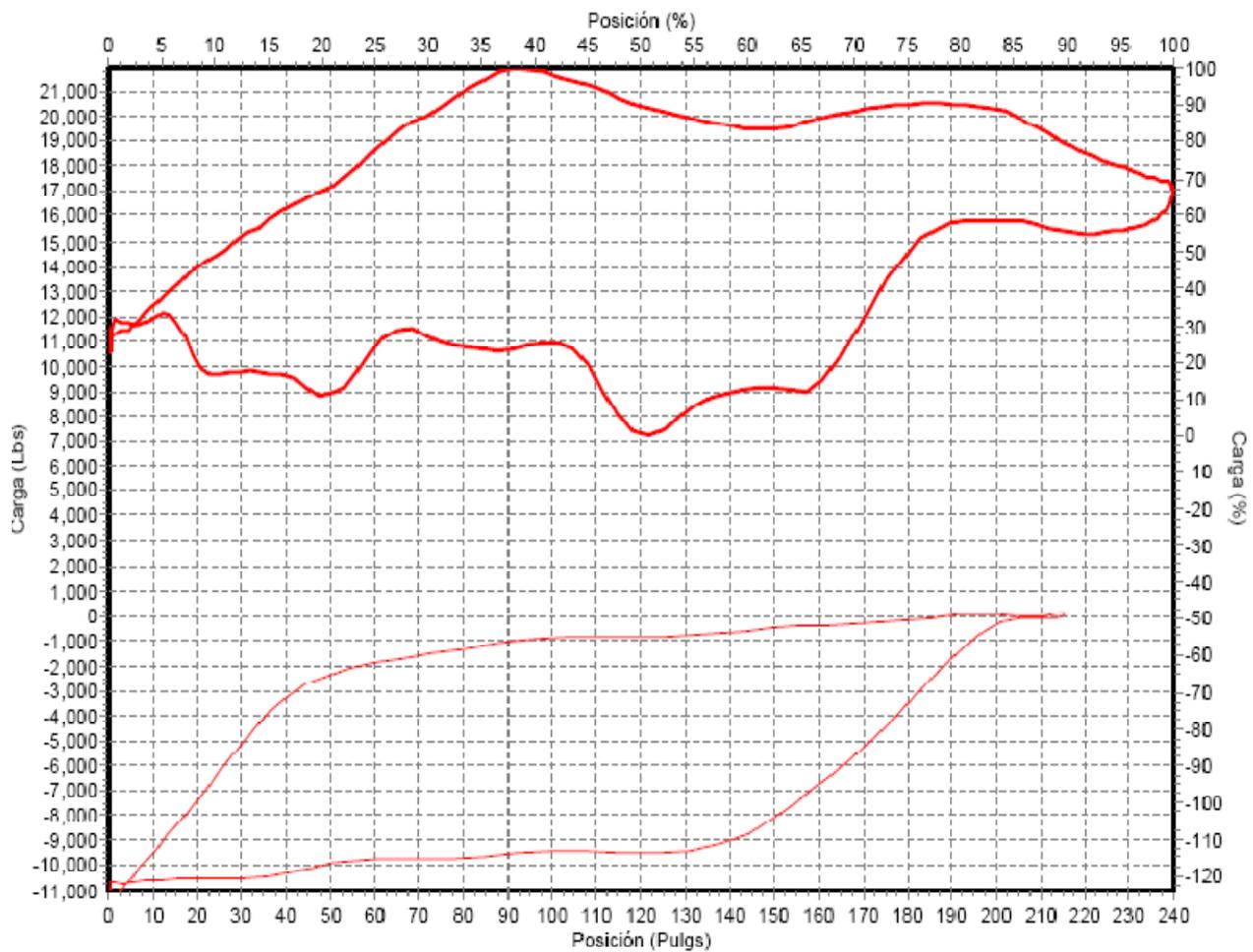
		<b>FORMATO PARA MUESTRAS FALLADAS</b>	
<b>INFORMACIÓN GENERAL</b>			
Yacimiento:		Nombre del pozo:	
Fecha:		Responsable	
Fecha de instalación:		Fecha de falla:	
<b>DETALLES DEL MATERIAL FALLADO</b>			
Producto (Varilla, Cupla, tubing):		Grado de Acero:	
Fabricante:		Diámetro:	
Fecha de Fabricación:		Profundidad de falla	
<b>INFORMACIÓN DE LA FALLA (para varillas)</b>			
Cuerpo:		Cuadrante:	
Pin:		Espejo/Hombro:	
Cupla Slim Hole:		Cupla Full Size:	
<b>INFORMACIÓN DEL POZO</b>			
Uni. De Bombeo:	Prof. Bomba :	Vel. de Bombeo (SPM/RPM):	
Bomba:	Carrera:	Presión en Bomba:	
Presión del Tubing:	Producción Bruta:	Casing:	
<b>DATOS DEL FLUIDO</b>			
Densidad (API):	Corte de Agua (%):	CO2 (en Gas):	Fe:
H2S (en Gas):	GOR:	Arena (%):	pH:
Sulfatos:	Free Gas Sep. (%):	CO2 (en agua):	Cloruros:
H2S (en agua):	Carbonatos:	Bicarbonatos:	Na
<b>Observaciones:</b>			

Anexo1 Formato para Muestras Falladas



**PG-12**

Anexo2 Dinagrama Pozo PG-12 antes de la Falla



**PG-24**

Anexo3 Dinagrama Pozo PG- 24 antes de la Falla

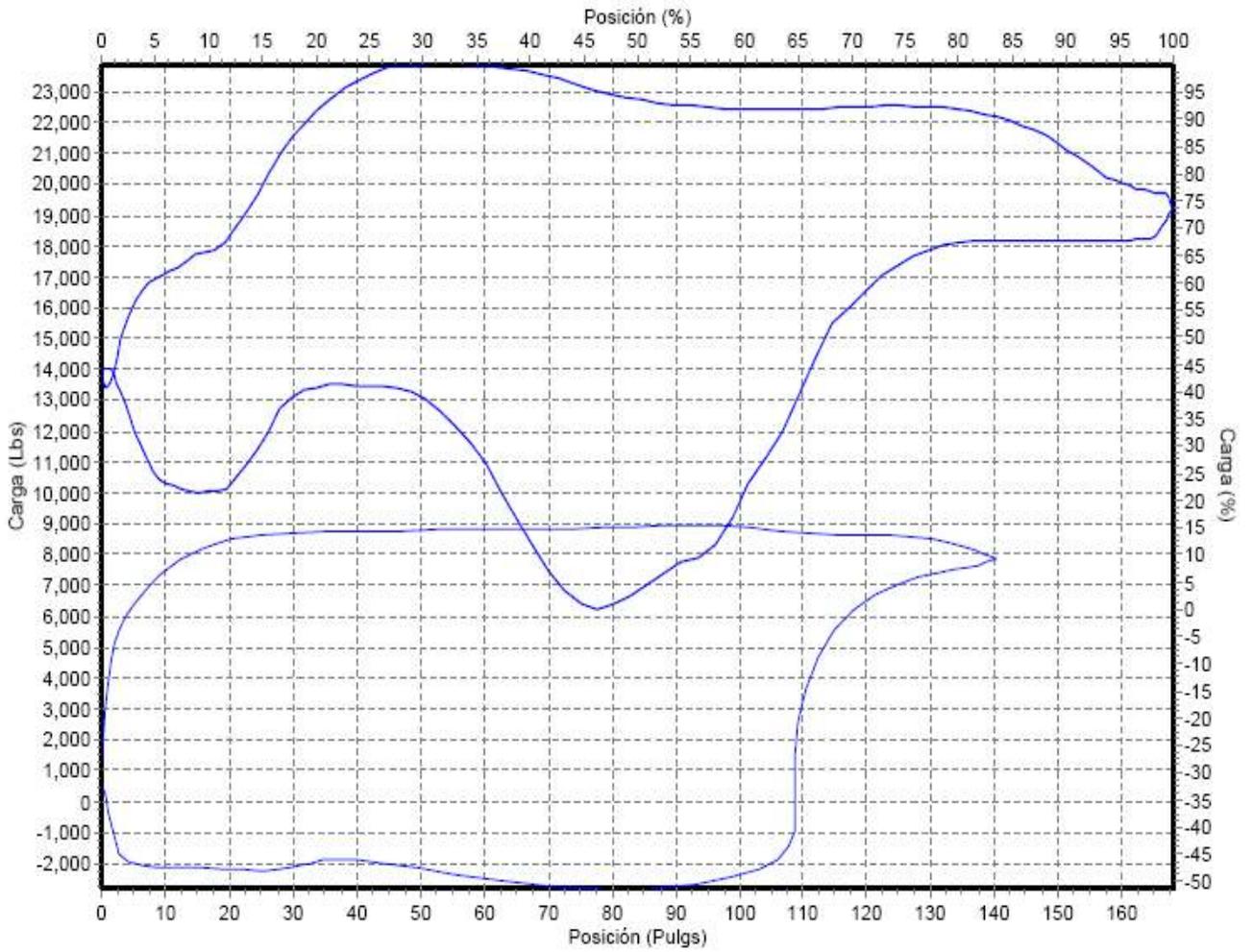


# ANEXOS



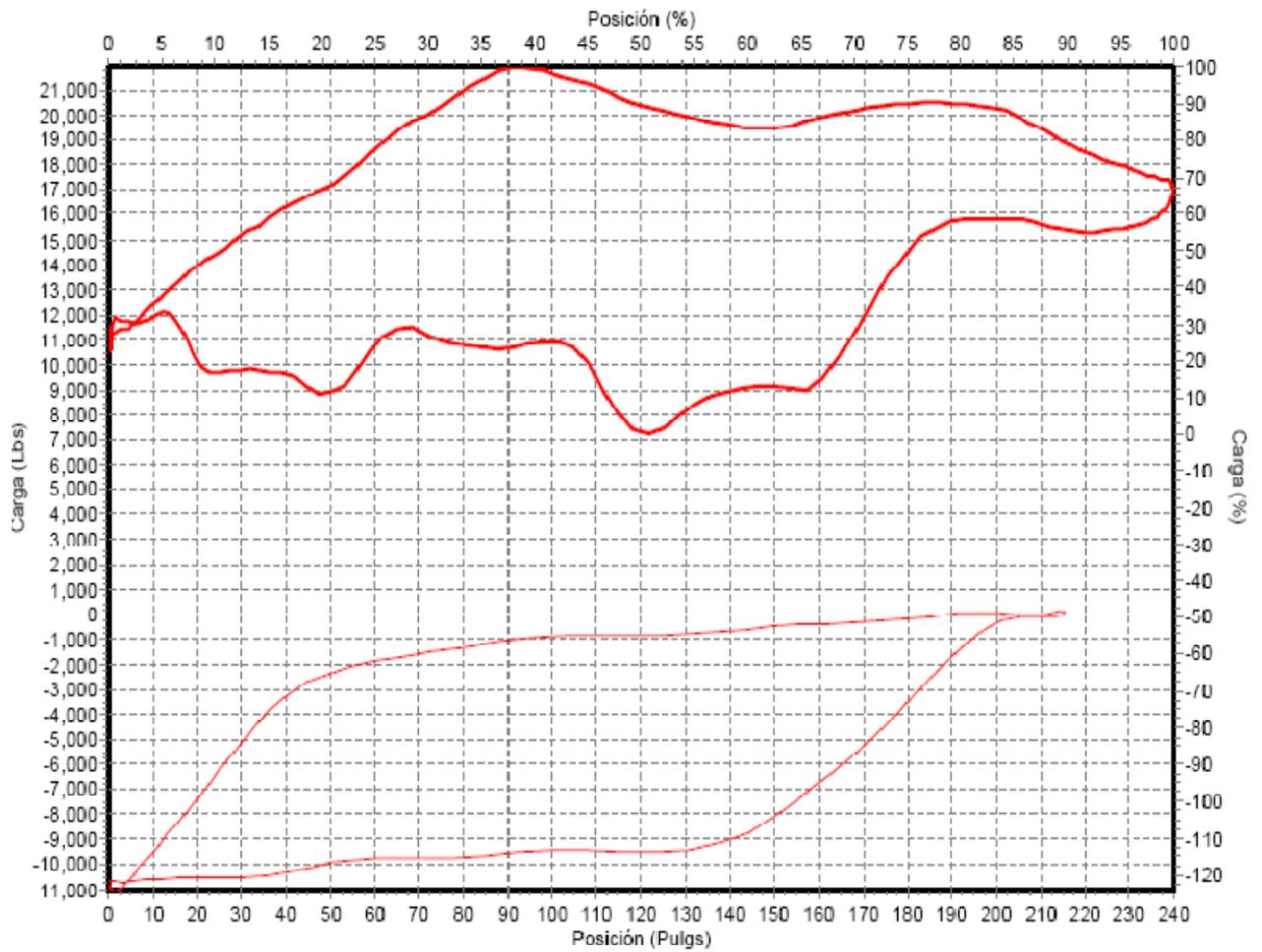
<b>FORMATO PARA MUESTRAS FALLADAS</b>			
<b>INFORMACIÓN GENERAL</b>			
Yacimiento:		Nombre del pozo:	
Fecha:		Responsable	
Fecha de instalación:		Fecha de falla:	
<b>DETALLES DEL MATERIAL FALLADO</b>			
Producto (Varilla, Cupla, tubing):		Grado de Acero:	
Fabricante:		Diámetro:	
Fecha de Fabricación:		Profundidad de falla	
<b>INFORMACIÓN DE LA FALLA (para varillas)</b>			
Cuerpo:		Cuadrante:	
Pin:		Espejo/Hombro:	
Cupla Slim Hole:		Cupla Full Size:	
<b>INFORMACIÓN DEL POZO</b>			
Uni. De Bombeo:		Prof. Bomba :	Vel. de Bombeo (SPM/RPM):
Bomba:		Carrera:	Presión en Bomba:
Presión del Tubing:		Producción Bruta:	Casing:
<b>DATOS DEL FLUIDO</b>			
Densidad (API):	Corte de Agua (%):	CO2 (en Gas):	Fe:
H2S (en Gas):	GOR:	Arena (%):	pH:
Sulfatos:	Free Gas Sep. (%):	CO2 (en agua):	Cloruros:
H2S (en agua):	Carbonatos:	Bicarbonatos:	Na
<b>Observaciones:</b>			

Anexo1 Formato para Muestras Falladas



**PG-12**

Anexo2 Dinagrama Pozo PG-12 antes de la Falla



**PG-24**

Anexo3 Dinagrama Pozo PG- 24 antes de la Falla

VERSIÓN	DESCRIPCIÓN	FECHA
1	Emisión del documento.	01-02-2009
ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ
LEHA SOFIA VALENZUELA. LUZ YENCY CALDERON.	JAVIER NEVITO GOMEZ Jefe Departamento de Ing. Y Confiabilidad.	RAFAEL LUCIANO QUINTERO. Superintendente SOH

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. OBJETO.....	3
2. ALCANCE.....	3
3. GLOSARIO.....	7
4. DOCUMENTOS RELACIONADOS.....	5
5. REFERENCIAS NORMATIVA.....	6
6. CONDICIONES GENERALES.....	23
7. DESARROLLO.....	24
9. CONTINGENCIAS.....	34
10. BIBLIOGRAFÍA.....	34
11. ANEXOS.....	35

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX-XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:</b> <b>dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 7 de 36</b>

## 1. OBJETO

Describir de forma detallada el procedimiento para la realización de Análisis de Causa Raíz (RCA), utilizando la Metodología Causa Efecto desarrollada por Apollo Associates (RCA Consultancy) y que se encuentra sugerida en el Manual para aplicación de la metodología de Análisis de Causa Raíz para la solución de problemas ECP-ICP-GCM-M-001

## 2. ALCANCE

Este procedimiento es aplicable en las áreas de producción y operación de las coordinaciones de la superintendencia de operaciones Huila – Tolima, para la detección, identificación y recomendaciones de la Causa Raíz de las fallas presentadas en los equipos y demás sistemas operativos que permitan minimizar la recurrencias de estas.

## 3. GLOSARIO

Diagrama Causa-efecto: Representación gráfica de la relación entre causas y efectos, partiendo del efecto primario objeto de la investigación para determinar las causas que originaron dichos efectos

Dinagrama: Es un gráfico de las tensiones que soporta la barra pulida a través de su carrera.

Evento: Suceso que ocurre en un sistema donde se existe una falla

Facilitador de RCA: Es la persona encargada de conducir al equipo en el logro de los objetivos del análisis RCA y que ojalá haya recibido entrenamiento específico en esta metodología.

Ingeniería de Confiabilidad: Marco teórico en el cual conviven las metodologías y técnicas necesarias para la optimización de procesos y procedimientos.

Matriz de valoración de riesgo/impacto: Método analítico utilizado para la detección de la criticidad de la falla teniendo en cuenta la recurrencia y el costo que este ha generado.

Matriz de implementación de recomendaciones: Método analítico que determina la prioridad en la implementación de recomendaciones teniendo en cuenta el costo en dólares.

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:  dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 8 de 36</b>

RCA: Root Cause Analysis, es un método estructurado de análisis utilizado en la solución efectiva de problemas, con el que se evalúa toda la cadena de hechos ocurridos, hasta identificar las causas raíces y las soluciones efectivas para eliminar o mitigar sus efectos

Supervisor de primera línea: Profesional encargado de la operación en el momento en que ocurre la falla.

#### 4. DOCUMENTOS RELACIONADOS

- Manual para aplicación de la metodología de Análisis de Causa Raíz para la solución de problemas ECP-ICP-GCM-M-001
- Instructivo para la identificación y jerarquización de malos actores. Documento ECP-ICP-GCM-I-001
- Instructivo de aplicación de la metodología RCA para la eliminación de malos actores, documento ECP-ICP-GCM-I-002
- Guía para la aplicación de la metodología de análisis de causa raíz para la solución de problemas. Documento ECP-ICP-GCM-P-001
- Instructivo para el uso de la matriz RAM, Documento ECP-VRM-I-001

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:</b> <b>dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 9 de 36</b>

## 5.1 CONDICIONES GENERALES

### 5.2 Análisis de Causa Raíz (RCA)

Es un método estructurado de análisis utilizado en la solución efectiva de problemas, con el que se evalúa toda cadena de hechos ocurridos, hasta identificar las causas raíces y las soluciones efectivas para eliminar o mitigar sus efectos.

El objetivo del RCA es determinar el origen de una falla, la frecuencia con que aparece y el impacto que genera, por medio de un estudio profundo de los factores, condiciones, y elementos que podrían originarla, con la finalidad de mitigarla o eliminarla por completo una vez tomadas las acciones correctivas que sugiere el análisis.

#### 5.2.1 Beneficios del RCA

Los beneficios que se obtienen al aplicar el RCA son:

- Proporciona la capacidad de reconocer un patrón de fallas y evita la repetición de las mismas.
- Aumenta la confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad de los equipos.
- Mejora las condiciones de seguridad industrial y evita tiempos improductivos innecesarios.
- Disminuye del número de incidentes, reduce los impactos ambientales y los accidentes.
- Reduce las frustraciones del personal de mantenimiento y operaciones.

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:  dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 10 de  36</b>

### 5.1.2. Causas Raíces

Existen tres tipos de causas que deber ser identificadas durante el desarrollo del RCA:

- Causa raíz física. Es la causa tangible de por qué está ocurriendo una falla. Siempre proviene de una raíz humana o latente. Son las más fáciles de tratar y siempre requieren verificación.
- Causa raíz humana. Es producto de errores humanos motivados por sus inapropiadas intervenciones. Nacen por la ausencia de decisiones acertadas, que pueden ser por convicción u omisión. Nunca utiliza nombres individuales o grupales cuando se especifica la causa.
- Causa raíz latente. Son producto de la deficiencia de los sistemas de información. Proviene de errores humanos. En ciertas ocasiones afectan más que el problema que se está estudiando, ya que pueden generar circunstancias que ocasionan nuevas fallas.

### 5.1.3. Aplicación del RCA

EL RCA se aplica generalmente en problemas puntuales para equipos críticos dentro de un proceso o cuando existe la presencia de fallas repetitivas, por lo tanto se recomienda cuando:

- Se requiera el análisis de las fallas crónicas (repetitivas) que se presentan continuamente, tales como fallas de equipos comunes.

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:</b> <b>dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 11 de  36</b>

- Se presentan fallas esporádicas (una vez), en procesos críticos, tales como paradas de emergencia, incendios, explosiones, muertes, lesiones importantes, o fallas graves poco frecuentes en los equipos.
- Es necesario un análisis del proceso de diseño de nuevos equipos, de aplicación de procedimientos operativos y de supervisión de actividades de mantenimiento.
- Son comunes los aspectos operativos tales como el congestionamiento, interrupción de las operaciones, aumento del consumo de energía, corridas más largas, defectos de calidad e incidentes ambientales.
- Es necesario identificar las deficiencias en los programas de entrenamiento y procedimientos operativos.
- Se tiene la necesidad de analizar diferencias organizacionales y programáticas.

#### **5.1.4 Metodología del RCA**

Para aplicar un RCA se debe tener una definición clara del sistema, para comprender la interrelación existente entre los diversos niveles de un proceso, lo que nos permite a la hora de realizar un estudio, considerar todos los factores, aspectos y condiciones que están presentes en un entorno, ya que cualquiera de ellos puede generar una falla.

La metodología para implementar un sistema RCA está definida por un procedimiento de trabajo de seis pasos.

Este proceso inicia preparando la investigación a realizar y termina con un reporte de los hallazgos:

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:  dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 12 de  36</b>

#### 5.1.4.1 Identificar los eventos más significativos

En este paso se recolecta la información, se definen las fallas y se calculan las pérdidas debido a las fallas ocurridas.

El objetivo es determinar cuáles son los eventos y fallas más importantes. Esta información se utiliza para analizar los costos de las fallas en una instalación y clasificar los problemas encontrados en orden de importancia económica.

Lo primero que se debe hacer es identificar los problemas específicos que dan el mejor retorno a la inversión. Hay dos tipos de problemas básicos: esporádicos y crónicos. Los problemas o eventos esporádicos son aquellos que causan una cantidad considerable de caos cuando aparecen, tienen ciertas características que son importantes y por la naturaleza del problema capturan la atención de todos; individualmente son los más costosos. Los problemas o eventos crónicos por otro lado, ocurren una y otra vez, y por las mismas razones aparentes. A diferencia de los eventuales, los problemas crónicos tienen alta frecuencia de ocurrencia y no llevan mucho tiempo para corregirse.

Cuando se consideran individualmente cada evento tiene un costo relativamente bajo. Sin embargo, cuando la frecuencia del evento se multiplica por los costos se encuentra que la pérdida total es significativa. Los problemas crónicos ocurren dentro de las situaciones normales y presentan una gran oportunidad de mejoramiento.

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:  dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 13 de  36</b>

#### 5.1.4.2 Preservar las evidencias de las fallas

Es la parte en la que se comienza a analizar un problema específico. La recolección de datos en una parte integral del Análisis Causa Raíz. Sin la información de la falla, es virtualmente imposible descubrir las causas raíz.

➤ **Partes:**

Equipo o componente que fallo. Rodamientos, tuberías, sellos, instrumentos, cables, motores, bombas, herramientas, etc.

➤ **Posiciones:**

Ubicación física del equipo o componente en falla. Posición física de las máquinas, de los equipos, de los instrumentos, nivel de presión, personal en la hora de la ocurrencia, información ambiental, etc.

➤ **Personal:**

Entrevistas al personal involucrado en la falla. Entrevistas al personal de mantenimiento, operaciones, administración, manejo, calidad, etc.

➤ **Papel:**

Todos los reportes escritos relacionados con la falla. Reportes de mantenimiento, políticas, planos, cuarto de control, procedimientos, especificaciones, entrenamientos, documentación del fabricante, históricos, etc.

➤ **Paradigmas:**

Frases comunes que el personal de operaciones usa para evitar investigaciones o desarrollar alguna actividad de mejora. “No tenemos tiempo para un RCA”, “Hemos

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:  dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 14 de  36</b>

tratado de resolverlo desde hace muchos años”, “Es un equipo viejo y por supuesto falla”, “Siempre ha funcionado así”, “Esto es imposible de resolver”, etc.

### 5.1.4.3 Ordenar el Análisis

Es la organización del equipo de trabajo y el procedimiento. La forma convencional de formar un equipo de análisis es mediante la asignación de un grupo de personas, que deben ser expertos y tener conocimientos relacionados directamente con los problemas a analizar. El RCA debe ser dirigido por un facilitador, quien tenga entrenamiento específico en la metodología RCA. El resto del equipo lo conforma un grupo multifuncional que varía entre un problema y otro.

#### El equipo RCA, por lo regular, debe incluir:

- El facilitador que dirige el proceso
- Un operador familiarizado con el proceso operativo
- Un técnico de mantenimiento (en equipos mecánicos, eléctricos, o de instrumentación)
- Un supervisor de primera línea
- Un ingeniero (mecánico, eléctrico, químico, o de otra especialidad).

El facilitador NO debe estar familiarizado con el evento que se está analizando. Lo único en lo que el analista principal debe ser un experto es en facilitar el análisis. Además, debe ser un individuo TENAZ. Los facilitador exitosos son siempre aquellos que facilitan el RCA, sin ser dominantes y sin permitir parar el proceso.

En ocasiones el equipo debe incluir especialistas tales como inspectores, especialistas de proceso, especialista de equipos rotativos, o proveedores. A menudo es necesario involucrar a los niveles altos y medios de la administración.

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:  dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 15 de  36</b>

Los expertos, vendedores y contratistas son generalmente irremplazables para generar las hipótesis. Por lo menos debe haber una persona que ignore los eventos de fallas y sirva como crítico constructivo.

#### 5.1.4.4 Determinar la Metodología a usar

La metodología de Causa y Efecto desarrollada por Apollo Associates es probablemente la herramienta RCA más útil y más utilizada por ser un método sencillo y efectivo. Es una técnica que es fácil de aprender y puede usarse virtualmente en cualquier situación.

Procedimiento para resolver la metodología causa efecto

Para tener éxito en la realización de la metodología del diagrama causa-efecto se deben seguir los siguientes pasos:

Definición del problema

Los principales inconvenientes esta en el no saber cómo definir el problema y en el no saber completar los formatos de reporte de informe.

La clave del éxito en la definición del problema está en hacerse las siguientes preguntas:

*Qué: Cuál es el problema que no desea que se repita*

Ejemplos de problemas o efectos primarios: Fallo del equipo, pérdida de producción, Accidente incapacitante, computadora no disponible, pérdida de ventas a un cliente.

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:  dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 16 de  36</b>

### *Cuándo sucedió el problema*

Se debe siempre identificar y ubicar en tiempo cronológico y tiempo relativo es decir la fecha y la hora, es necesario utilizar mucha precisión, se enfatiza y se escribe que estaba sucediendo en el momento del evento.

### *Dónde ocurrió el problema*

Se especifica el lugar donde ocurrió el evento, se tiene que evitar la utilización de dialectos y abreviaturas. Por ejemplo: sitio, sistema y componente.

### *Quien*

La meta es prevenir, no culpar

### *Por qué*

Se desvía de la definición del problema

Diagrama de causa efecto.

Es la representación gráfica de la relación entre causas y efectos, partiendo del efecto primario objeto de la investigación para determinar las causas que originaron dichos efectos.

No importa donde empezamos a preguntar por qué, siempre estamos en medio de una cadena de causas

Los elementos de un diagrama de causa y efecto son:

- **Efecto Primario:** Es un efecto singular de consecuencias que deseamos eliminar o mitigar, es el nombre del problema, el “qué” en la definición. En el efecto primario se deberá reflejar las metas y los objetivos, teniendo en cuenta la perspectiva de todas las personas.

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:  dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 17 de  36</b>

- Causas por acciones y condiciones: Ambas son causas, las acciones son momentáneas y las condiciones existen durante un periodo de tiempo. Al juntar datos, se utilizan fuentes de evidencias para evitar un análisis basado solo en las acciones. Se anotan todas las causas, no sabrá si la causa tiene valor o no hasta que construya el diagrama.
- Conexión casual: Es el punto de conexión de las causas y permite la construcción del diagrama. Obliga a que las causas vayan desde el presente hacia el pasado. Los elementos para la construcción del diagrama serian:

Trabajar sobre una superficie vertical si es posible

- Empiece con el problema o efecto primario
- Pregunte por qué y conteste con causado por
- Insista en las preguntas por que, hasta que se agoten las respuestas
- Utilice el regreso al principio para construir rápidamente el diagrama
- La relevancia (consecuencias) guiara el detalle y la complejidad del análisis
- El diagrama estará completa cuando nadie se interese en la respuesta del por que.
- Evidencias: Se aconseja construir el diagrama con un análisis inicial y añadir la evidencia posteriormente.(Ver figura 1)

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> Dependencia Responsable	<b>XXX- XXX-X-###</b>
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE ANÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:</b> dd/mm/aaaa
		Versión: 1

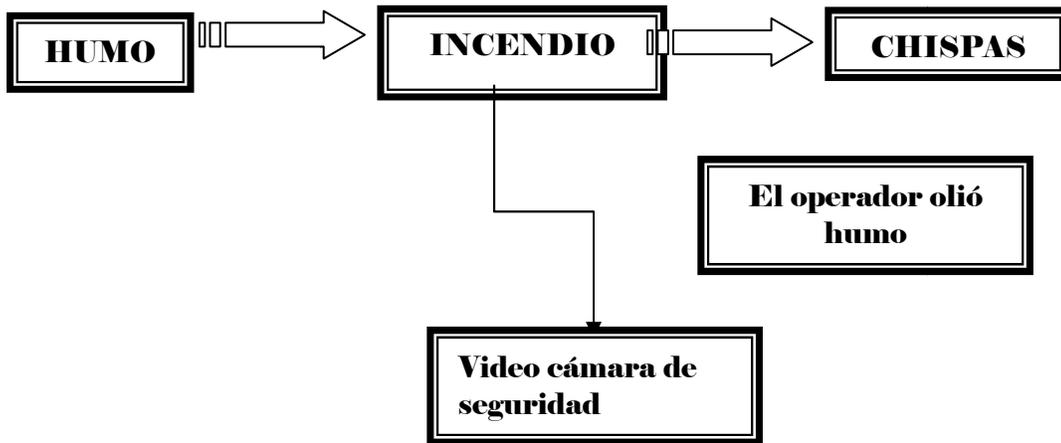


Figura 1. Diagrama causa-efecto incluyendo evidencia

➤ Método de la Escalera o Pasos Escalonados

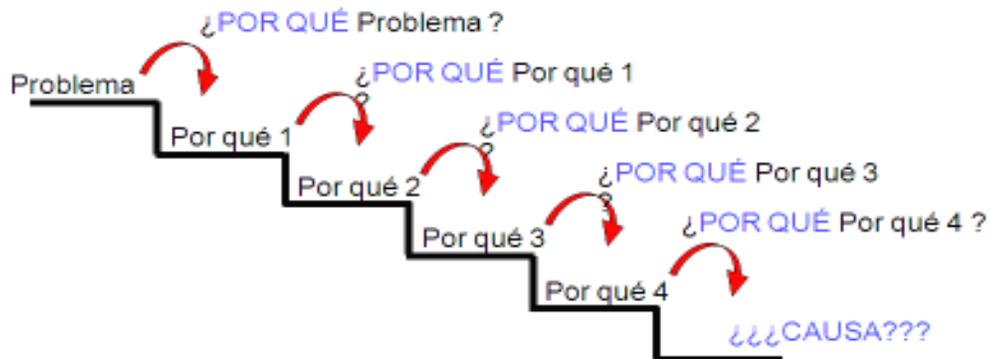


Figura 2.

Diagrama método de la escalera o pasos escalonados

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:  dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 19 de  36</b>

El Paso de Escalera es una disciplina convergente de preguntas para ayudar a descubrir las Causas Cercanas de un problema (la causa fáctica más conocida antes de adivinar), y se utiliza como un primer paso en el Análisis de Causa Raíz, Luego de completar el Planteamiento del Problema y la Descripción del Problema.

Se sugiere este método porque preguntando ¿Por qué? cinco veces, a menudo usted llegará al nivel de Causa cercana Vs una Causa superficial. (ver figura 2)

➤ **Análisis de Árbol de falla**



Figura 3. Diagrama Análisis de árbol de falla

Es una técnica deductiva que se centra en un sistema de falla o accidente. El Árbol de Fallas es un modelo gráfico que muestra una combinación de fallas de los equipos y fallas humanas/sistemas que en conjunto forman una falla de un sistema y se puede utilizar cuando se presenta una sola falla o un solo accidente que tiene múltiples causas. El método del análisis

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:  dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 20 de  36</b>

de árbol de falla es satisfactorio porque se dice que "Una imagen vale más que 1000 palabras"... con un simple vistazo se muestra la interrelación y la complejidad de la causa. Ver figura 3

➤ **Diagrama Espina de Pescado**

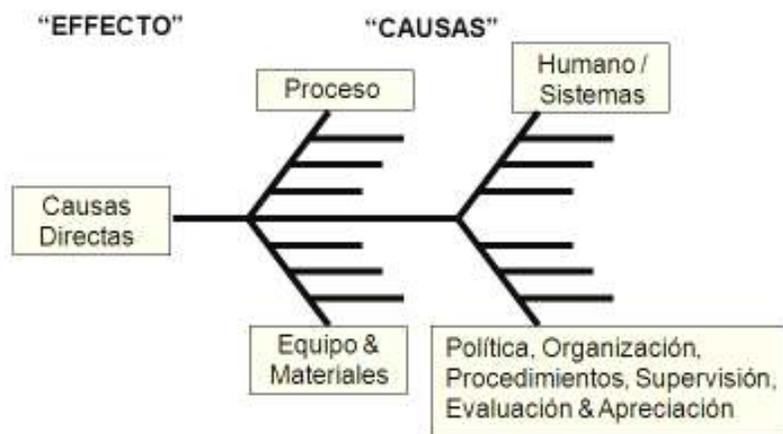


Figura 4. Diagrama Espina de pescado

Un diagrama de Espina de Pescado es un proceso estructurado para visualizar e identificar todas las causas posibles de un problema y se utiliza después de determinar las Causas Cercanas (basadas en hechos).

El completar el diagrama de Espina de Pescado estimula un pensamiento divergente. Esto ayuda a mantener un enfoque abierto y a no perder ninguna causa posible. Ver Figura 4 Hay que ser exhaustivo, no conformarse con una respuesta fácil u obvia, generalmente esto resulta muy fácil y pueden perderse asuntos importantes que deben tratarse, tal vez se desee usar esta herramienta conjuntamente con la lista de revisión de interfaz humanas/sistemas.

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:</b> <b>dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 21 de  36</b>

➤ **Árbol lógico de falla**

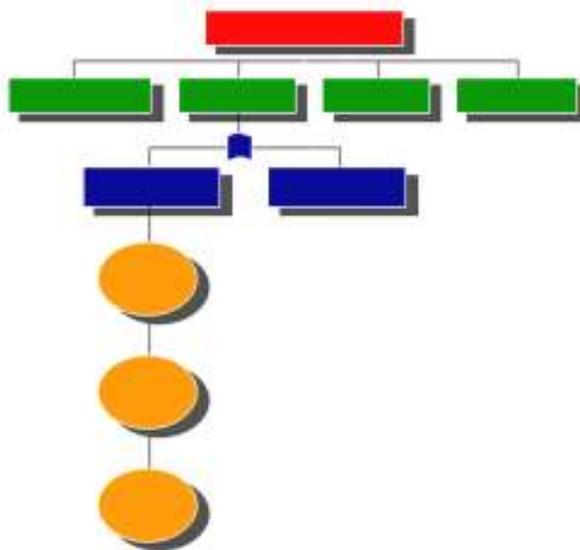


Figura 5. Diagrama Árbol lógico de fallas

La herramienta de Árbol Lógico de falla permite representar gráficamente las relaciones de causa y efecto que nos conduce a descubrir los eventos de falla y cuál fue la causa raíz del problema. Como la primera etapa del Análisis de Causa Raíz se realiza luego de terminar con el Planteamiento de un Problema y con la Descripción del Problema. El método es satisfactorio porque nos permite comprender un patrón en un “mar de caos”. Es un proceso ordenado donde las hipótesis son verificadas con base en hechos, lo cual facilita la identificación de las causas raíz Físicas, Humanas y Latentes.

Los bloques de Causas de Falla se utilizan para determinar cómo y por qué el anterior bloque de Modos de Falla pudo haberse presentado, se deben considerar todas las posibilidades e incluirlas en su totalidad, las hipótesis de cada nivel del árbol lógico requieren ser verificadas

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX-XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:  dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 22 de  36</b>

(aceptadas ó rechazadas). Sea exhaustivo, no se conforme con una respuesta fácil u obvia. Aquellas hipótesis que no pueden ser verificadas deben ser tenidas en cuenta con el fin de identificar que acciones correctivas se deben implementar para minimizar ó eliminar su efecto. Los hechos deben soportarse con observación directa, documentación y algunos conceptos técnicamente soportados. No pueden ser rumores ni suposiciones. Detener el proceso hasta identificar únicamente las causas humanas haría que el proceso de Análisis de Causa Raíz se pareciera a una “cacería de brujas”.

#### **5.1.4.5 Comunicar los resultados y las recomendaciones**

El análisis de fallas y la verificación de las causas raíces, determinan las causas raíz físicas, humanas y del sistema, para cualquier tipo de falla. Comunicar los resultados es el paso esencial para documentar los hallazgos en las investigaciones de RCA y las recomendaciones asociadas. Estos hallazgos se deben analizar con el personal apropiado y pueden requerir de reuniones con la alta gerencia.

Para que el analista tenga éxito comunicando sus resultados y haciendo recomendaciones a la administración sobre causas identificadas, primero debe darse cuenta de la posición de la administración con respecto al resultado del análisis. La administración debe ser consciente de la responsabilidad financiera de la empresa.

Un informe formal por lo general ayuda a obtener el compromiso de la gerencia para resolver las fallas centrándose en las causas raíz determinadas en la investigación. El costo de implementar los resultados se debe comparar con el costo de las fallas. Se debe tener en cuenta que las causas raíz identificadas no son negociables. Sin embargo, las recomendaciones pueden ser diseñadas para cumplir los criterios de aceptación preestablecidos.

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:</b> <b>dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 23 de  36</b>

Se debe tener en cuenta que una de las metas principales de la Confiabilidad Operacional es incorporar el RCA como una parte de la Cultura Organizacional. Esto facilitaría el análisis y la deducción lógica del porqué de los problemas. Para lograr el apoyo masivo de la organización en el proceso, se requiere que participe tanta gente como sea posible y que sean reconocidas ampliamente sus contribuciones.

#### **5.1.4.6 Hacer seguimiento a los resultados**

Parte de la responsabilidad que asume el facilitador del sistema, es analizar la implantación de las recomendaciones y realizar el seguimiento de su ejecución. Los resultados pueden ser comparados y medidos mediante la reducción en los costos de mantenimiento, el mejoramiento en las tasas de producción, la reducción de las tasas de falla, etc.

El RCA sería una actividad sin valor agregado si no se actúa sobre las recomendaciones y las soluciones no son implementadas en el tiempo establecido. Después de todo, es demasiado frustrante dar recomendaciones para la solución de problemas, asignar responsabilidades para la implementación y establecer un plan de actividades para su realización y aún así no ver el fruto de los esfuerzos.

Por lo tanto, es primordial que se tome el control de las operaciones en vez de permitir que las operaciones tomen el control de la organización. Para poder obtener los recursos necesarios para dedicar al trabajo futuro, sea trabajo de mejora, corrección, o rediseño, se debe analizar los problemas hasta las causas raíz y actuar de acuerdo con sus resultados.

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:  dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 24 de  36</b>

## 6. DESARROLLO

### 6.1 Reporte del Evento

Al ocurrir cualquier evento de falla en los sistemas de levantamiento artificial, con los que se trabaja en superintendencia, el ingeniero de turno profesional de producción o de mantenimiento, debe reportar la falla a los ingenieros de confiabilidad en un periodo no mayor de 24 horas; este se debe realizar diligenciando la información del formato de muestras falladas (VER ANEXO). De igual modo el profesional de mantenimiento está en la obligación de preservar el elemento fallado.

### 6.2 Preservar Las Evidencias de las Fallas

En el momento que se reporte el evento al custodio del proceso de RCA (Confiabilidad), este junto con el equipo de análisis RCA, están en la obligación de encontrar y preservar toda evidencia que pueda ser de gran ayuda para el análisis, como: entrevistas al personal en la hora de la ocurrencia del evento, dinagramas del pozo, reporte de fluidos del pozo o del campo, documentación del fabricante entre otros.

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:  dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 25 de  36</b>

### 6.3 Realización del Proceso RCA

#### 6.3.1 Conformación del Equipo de Análisis de RCA

Antes de realizar RCA se debe formar un equipo de análisis que facilite el proceso. El equipo estará conformado por:

- El facilitador que dirige el proceso RCA (profesional del área de confiabilidad)
- Un ingeniero (mecánico, eléctrico, químico, o de otra especialidad)
- Un ingeniero de producción (Responsable del campo o el pozo donde ocurre el evento)
- Un operador familiarizado con el proceso operativo

##### 6.3.1.1 Realización del Reporte de Falla

- Formato de Generalidades

En este formato encontramos: El nombre de la falla, fecha, hora y lugar del análisis, fecha de la próxima reunión si el análisis aún no ha sido terminado y por último se encontraran los nombres de los participantes especificando el cargo en el que se desempeñan y la empresa para la cual trabajan.



	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:  dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 27 de  36</b>

➤ **Elaboración del Reporte de falla 24h**

En este reporte se tiene que incluir el nombre de la persona quien dio el reporte de campo, el proceso que se estaba realizando al momento de la falla, las especificaciones del componente fallado, el modo o mecanismo de la falla y el modo como detectaron la falla. Clasifique la severidad del evento según el costo de la intervención, utilizando la matriz de falla.

Luego de clasificar el evento, haga una secuencia cronológica desde el inicio de la falla hasta la normalización del trabajo, se debe hacer una secuencia de acciones relacionadas con el equipo o pozo ocurridas días antes del evento como mantenimientos, por último haga un listado de evidencias que respalden todas las acciones anteriormente citadas.

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE ANÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:</b> <b>dd/mm/aaaa</b>
		<b>Versión: 1</b>

	<b>RCA No.: 003</b>
	<b>Fecha: Enero 2009</b>

	<b>MATRIZ DE PRIORIZACION DE IMPLEMENTACIÓN DE RECOMENDACIONES EN EL PROCESO DE ANALISIS DE CAUSA RAIZ</b>								
<b>CONSECUENCIAS POTENCIALES</b>				<b>COSTO DE LA IMPLEMENTACION EN MILLES DE DOLARES</b>					
Personas	Economicas en Dolares	Ambiental	Imagen Corporativa	= 10	Entre 10 y 50	Entre 50 y 100	Entre 100 Y 500	= 500	
Una o mas fatalidades	Catastrofica = 10 millones	Masiva	Internacional	VH	H	M	M	L	
Incapacidad permanente parcial o	Grave 1-10 millones	Mayor	Nacional	H	H	M	L	L	
Incapacidad temporal > 1 dia	Severo 100 mil - 1 millón	Localizado	Regional	M	M	L	L	N	
Lesion menor sin incapacidad	Importante 10 mil - 100 mil	Menor	Local	M	L	L	N	N	
Lesion leve primeros auxilios	Marginal < 10 mil	Leve	Interna	L	L	N	N	N	
Ninguna lesion	Ninguna	Ningún Efecto	Ningún impacto	N	N	N	N	N	
					Prioridad Muy Alta			Prioridad Alta	
					Prioridad Media			Prioridad Baja	
					No es viable				

RECOMENDACIONES PROPUESTAS				
----------------------------	--	--	--	--

CAUSA RAIZ FISICA.	RECOMENDACIONES	PRIORIDAD	RESPONSABLE	FECHA OBJETIVO

CAUSA RAICES HUMANAS.	RECOMENDACIONES	PRIORIDAD	RESPONSABLE	FECHA OBJETIVO

CAUSA RAICES LATENTE.	RECOMENDACIONES	PRIORIDAD	RESPONSABLE	FECHA OBJETIVO

HALLAZGOS.	RECOMENDACIONES	PRIORIDAD	RESPONSABLE	FECHA OBJETIVO

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> Dependencia Responsable	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE          ANÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA          CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE          PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD          DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES          HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:          dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 29 de          36</b>

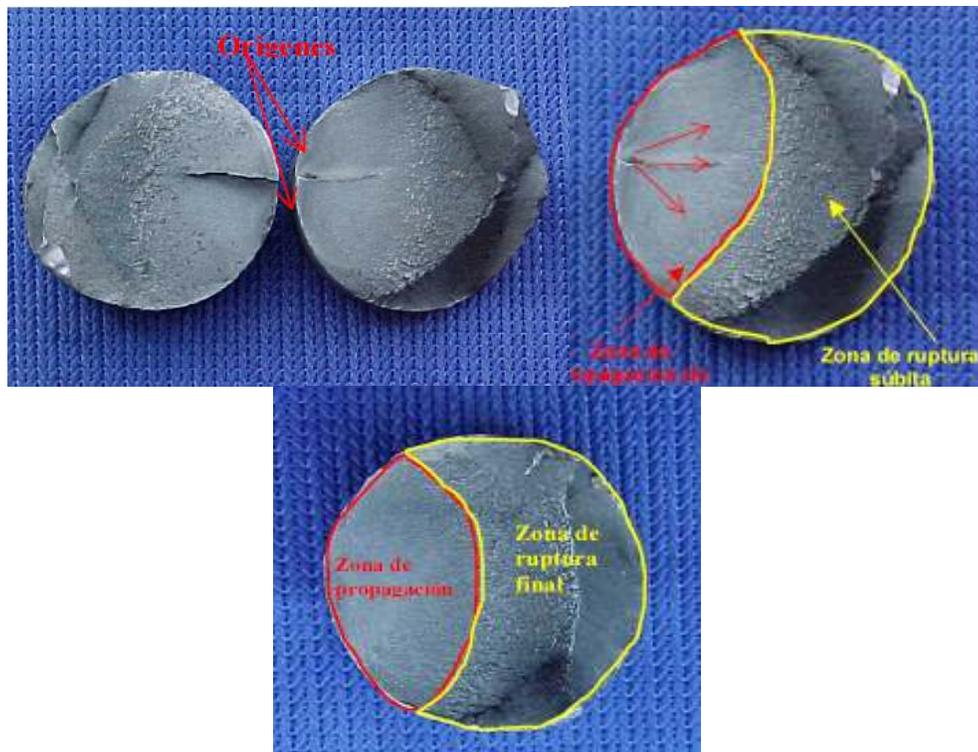
➤ **Evidencia de falla**

Todas las fotos que tome del componente fallado y del ambiente en el que se desarrolle el evento, sirven como evidencia para el Análisis de Causa Raíz.

	<b>MUESTRA 2</b>	<b>RCA No.: 003</b>
		<b>Fecha: Enero 2009</b>

**EVIDENCIAS ENCONTRADAS Y ANALIZADAS**

1. REGISTRO FOTOGRAFICO:





	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE          ANÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA          CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE          PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD          DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES          HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:          dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 31 de          36</b>

➤ **Hipótesis Descartadas**

Establezca cuales son las hipótesis que según las evidencias analizadas se descartan

	<b>PROCESO ANALISIS DE CAUSA RAZ (RCA)</b> Ruptura de Varilla por Cuerpo Pozo PG-12	<b>RCA No.: 003</b>
		<b>Fecha: Enero 2009</b>
<b>DESCRIPCIÓN DE LAS HIPOTESIS DESCARTADAS</b>		
A continuación se comentan las hipótesis que según las evidencias analizadas se descartan.		
<b>HIPOTESIS ANALIZADAS Y DESCARTADAS:</b>		
Empty space for hypotheses		

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:  dd/mm/aaaa</b>
		<b>Versión: 1</b>

➤ Causas raíces validadas

Se analizan las causas raíces físicas, humanas y latentes validadas y se hace una descripción completa de éstas.

	<b>PROCESO ANALISIS DE CAUSA RAZ (RCA)</b> Ruptura de Varilla por Cuerpo Pozo PG-12	RCA No.: 003
		Fecha: Enero 2009
<b>DESCRIPCIÓN DE CAUSAS RAICES ENCONTRADAS</b>		
A continuación se comentan las causas raíces físicas, humanas y latentes resultado del análisis.		
<b>CAUSAS RAICES FISICAS:</b>		
<b>CAUSAS RAICES HUMANAS:</b>		
<b>CAUSAS RAICES LATENTES / ORGANIZACIONALES:</b>		

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE ANÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:</b> <b>dd/mm/aaaa</b>
		<b>Versión: 1</b>

➤ **Recomendaciones**

De acuerdo a la matriz de priorización en la implementación de recomendaciones en el proceso de RCA, analice cual es la causa con mayor prioridad y plantee para cada una de ellas las recomendaciones que le darán solución a la recurrencia de la falla analizada, en cada recomendación menciones el responsable y la fecha en que se ejecutará la acción.

	RCA No.: 003 Fecha: Enero 2009																																																										
 <b>MATRIZ DE PRIORIZACION DE IMPLEMENTACION DE RECOMENDACIONES EN EL PROCESO DE ANALISIS DE CAUSA RAIZ</b>																																																											
<b>CONSECUENCIAS POTENCIALES</b>	<b>COSTO DE LA IMPLEMENTACION EN MILLES DE DOLARES</b>																																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Personas</th> <th>Economicas en Dolares</th> <th>Ambiental</th> <th>Imagen Corporativa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Una o mas fatalidades</td> <td>Catastrofica &gt; 10 millones</td> <td>Masiva</td> <td>Internacional</td> </tr> <tr> <td>Incapacidad permanente parcial o</td> <td>Grave 1-10 millones</td> <td>Mayor</td> <td>Nacional</td> </tr> <tr> <td>Incapacidad temporal &gt; 1 dia</td> <td>Severo 500 mil - 1 millón</td> <td>Localizado</td> <td>Regional</td> </tr> <tr> <td>Lesion menor sin incapacidad</td> <td>Importante 10 mil - 100 mil</td> <td>Menor</td> <td>Local</td> </tr> <tr> <td>Lesion leve primeros auxilios</td> <td>Marginal &lt; 10 mil</td> <td>Leve</td> <td>Interna</td> </tr> <tr> <td>Ninguna lesion</td> <td>Ninguna</td> <td>Ningún Efecto</td> <td>Ningún impacto</td> </tr> </tbody> </table>	Personas	Economicas en Dolares	Ambiental	Imagen Corporativa	Una o mas fatalidades	Catastrofica > 10 millones	Masiva	Internacional	Incapacidad permanente parcial o	Grave 1-10 millones	Mayor	Nacional	Incapacidad temporal > 1 dia	Severo 500 mil - 1 millón	Localizado	Regional	Lesion menor sin incapacidad	Importante 10 mil - 100 mil	Menor	Local	Lesion leve primeros auxilios	Marginal < 10 mil	Leve	Interna	Ninguna lesion	Ninguna	Ningún Efecto	Ningún impacto	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>&lt; 10</th> <th>Entre 10 y 50</th> <th>Entre 50 y 100</th> <th>Entre 100 y 500</th> <th>&gt; 500</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: red;">M</td> <td style="background-color: red;">M</td> <td style="background-color: yellow;">M</td> <td style="background-color: yellow;">M</td> <td style="background-color: green;">L</td> </tr> <tr> <td style="background-color: red;">M</td> <td style="background-color: red;">M</td> <td style="background-color: yellow;">M</td> <td style="background-color: yellow;">L</td> <td style="background-color: green;">L</td> </tr> <tr> <td style="background-color: yellow;">M</td> <td style="background-color: yellow;">L</td> <td style="background-color: green;">L</td> <td style="background-color: green;">L</td> <td style="background-color: blue;">M</td> </tr> <tr> <td style="background-color: yellow;">L</td> <td style="background-color: green;">L</td> <td style="background-color: green;">L</td> <td style="background-color: green;">L</td> <td style="background-color: blue;">M</td> </tr> <tr> <td style="background-color: yellow;">L</td> <td style="background-color: green;">L</td> <td style="background-color: green;">L</td> <td style="background-color: green;">L</td> <td style="background-color: blue;">M</td> </tr> </tbody> </table>	< 10	Entre 10 y 50	Entre 50 y 100	Entre 100 y 500	> 500	M	M	M	M	L	M	M	M	L	L	M	L	L	L	M	L	L	L	L	M	L	L	L	L	M
Personas	Economicas en Dolares	Ambiental	Imagen Corporativa																																																								
Una o mas fatalidades	Catastrofica > 10 millones	Masiva	Internacional																																																								
Incapacidad permanente parcial o	Grave 1-10 millones	Mayor	Nacional																																																								
Incapacidad temporal > 1 dia	Severo 500 mil - 1 millón	Localizado	Regional																																																								
Lesion menor sin incapacidad	Importante 10 mil - 100 mil	Menor	Local																																																								
Lesion leve primeros auxilios	Marginal < 10 mil	Leve	Interna																																																								
Ninguna lesion	Ninguna	Ningún Efecto	Ningún impacto																																																								
< 10	Entre 10 y 50	Entre 50 y 100	Entre 100 y 500	> 500																																																							
M	M	M	M	L																																																							
M	M	M	L	L																																																							
M	L	L	L	M																																																							
L	L	L	L	M																																																							
L	L	L	L	M																																																							
<span style="background-color: red; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; margin-right: 5px;"></span> Prioridad Muy Alta <span style="background-color: yellow; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; margin-right: 5px;"></span> Prioridad Alta <span style="background-color: green; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; margin-right: 5px;"></span> Prioridad Media <span style="background-color: blue; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; margin-right: 5px;"></span> Prioridad Baja <span style="background-color: lightblue; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; margin-right: 5px;"></span> No es viable																																																											
<b>RECOMENDACIONES PROPUESTAS</b>																																																											
CAUSA RAIZ FISICA.	RECOMENDACIONES	PRIORIDAD	RESPONSABLE	FECHA OBJETIVO																																																							
CAUSA RAICES HUMANAS.	RECOMENDACIONES	PRIORIDAD	RESPONSABLE	FECHA OBJETIVO																																																							
CAUSA RAICES LATENTE.	RECOMENDACIONES	PRIORIDAD	RESPONSABLE	FECHA OBJETIVO																																																							
HALLAZGOS.	RECOMENDACIONES	PRIORIDAD	RESPONSABLE	FECHA OBJETIVO																																																							



	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> <b>Dependencia Responsable</b>	<b>XXX- XXX-X-###</b>	
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE  ÁNÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA  CAUSA EFECTO, EN LOS DEPARTAMENTO DE  PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD  DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES  HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:</b> <b>dd/mm/aaaa</b>	
		<b>Versión: 1</b>	<b>Pág.: 35 de  36</b>

## 7. CONTINGENCIAS

N/A

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Manual para aplicación de la metodología de Análisis de Causa Raíz para la solución de problemas ECP-ICP-GCM-M-001
- HUERTA, Rosendo. “Confiabilidad Operacional: Técnicas y Herramientas de Aplicación”. Seminario Customer Care, Datastream. Bogotá, Colombia. 2004.
- LATINO, Robert J. ROOT CAUSE ANALYSIS: Improving Performance for Bottom Line Results Reliability Center, Inc. 2001.
- Instructivo para la identificación y jerarquización de malos actores. Documento ECP-ICP-GCM-I-001
- Instructivo de aplicación de la metodología RCA para la eliminación de malos actores, documento ECP-ICP-GCM-I-002
- Guía para la aplicación de la metodología de análisis de causa raíz para la solución de problemas. Documento ECP-ICP-GCM-P-001
- Instructivo para el uso de la matriz RAM, Documento ECP-VRM-I-001
- [www.tenaris.com](http://www.tenaris.com)

	<b>VICEPRESIDENCIA O DIRECCIÓN RESPONSABLE</b> Dependencia Responsable	<b>XXX-XXX-X-###</b>
	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE ANÁLISIS RCA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA CAUSA EFECTO, EN EL DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN E INGENIERIA Y CONFIABILIDAD DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES HUILA TOLIMA DE ECOPETROL S.A</b>	<b>Fecha aprobación:</b> dd/mm/aaaa
		Versión: 1

## 9. ANEXOS

