

IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA TapRoot®System PARA EL
ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS ESP DEL LLANO EN PETROMINERALES

IVAN MAURICIO PAMPLONA LEMUZ
DANIEL RICARDO REALPE REALPE

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA PETRÓLEOS
NEIVA
2012

IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA TapRoot®System PARA EL
ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS ESP DEL LLANO EN PETROMINERALES

IVAN MAURICIO PAMPLONA LEMUZ
DANIEL RICARDO REALPE REALPE

Trabajo de grado presentado al Comité Evaluador de Proyectos de Grado de la
Facultad de Ingeniería, para optar al título de ingeniero de petróleos.

DIRECTOR
JOSE JOSE ROMERO SOLANO
Superintendente de completamiento
Petrominerales Colombia Ltd.

CO-DIRECTOR
ERVIN ARANDA ARANDA
INGENIERO DE PETROLÉOS

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA PETRÓLEOS
NEIVA
2012

Nota De Aceptación:

Firma Del Presidente Del Jurado

Firma Del Primer Jurado

Firma Del Segundo Jurado

Neiva, 19 de julio de 2012

A Dios, a Jesucristo y al Espíritu Santo quienes han puesto a mi lado personas maravillosas para que guíen y acompañen mi vida; a mi madre Elsa, por ser esa persona incansable y líder en todo lo que hace, por ser mi ejemplo a seguir y el motivo para no desfallecer; a mi Padre Germán, por apoyarme, aconsejarme y regalarme gratos momentos; a mis primos, a Rocío quien me enseñó que se debe luchar primero por los proyectos propios, a mis compañeros más cercanos de la universidad, que siempre me han apoyado y con los cuales he contado desde que los conocí; a los profesores que guiaron mi aprendizaje durante toda mi carrera; a todas las personas que de una u otra forma me apoyaron en esta bendición que Dios me ha entregado. A todos mil gracias y bendiciones.

Mauricio

A Dios Padre Santo, a la Santísima Virgen por permitirme la bendición de culminar satisfactoriamente los estudios universitarios; a mi padre Segundo Israel Realpe por enseñarme su sabiduría y el amor por el trabajo digno; a mi madre Odila Realpe por regalarme toda su ternura y comprensión; a cada uno de mis hermanos y hermana Julio, Lucila, Giovanni y Carlos por todo el apoyo y ánimo que me dieron en estos años; A mi abuelito Julio Cesar Realpe QEPD por todas las enseñanzas que me dejó; a todos mis amigos y compañeros que me ayudaron en momentos claves de mi carrera; A los profesores de la Universidad y en especial a los profesores de la carrera de ingeniería de Petróleos por su aprecio y dedicación.

Para todas las personas que en algún momento me dieron aliento para continuar y luchar por esta carrera.

Daniel

A Petrominerales Colombia LTD. Por su valiosa colaboración en la elaboración de este proyecto.

Al Ingeniero José José Romero, Superintendente de Completamiento, director del presente proyecto por su apoyo y adiestramiento y colaboración durante el desarrollo del mismo.

Al ingeniero Luis Felipe Moreno, asesor del proyecto por su cooperación, acompañamiento y prácticos consejos para con nosotros en este trabajo.

Al Ingeniero Fernando Forero, asesor del proyecto por su enseñanza y acompañamiento.

Al área de completamiento y Workover de Petrominerales Colombia Ltd, por brindarnos su valioso tiempo y enseñarnos el valor del trabajo en equipo.

Al Ingeniero Ervin Aranda Aranda, Co-Director del presente proyecto.

Al ingeniero Jorge Orlando Mayorga, por su pensamiento estratégico y su amistad.

A la UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA por brindarnos la formación como Ingeniero de Petróleos.

CONTENIDO

	PÁG.
INTRODUCCIÓN	
1. GENERALIDADES DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE	20.
1.1 BES COMO MEDIO DE INCREMENTO DE LA PRODUCCION	20.
1.2 OBJETIVOS DE LA BES.	20.
1.3 VENTAJAS DE LAS BES	20.
1.4 DESVENTAJAS DE LOS BES.	21.
2. COMPONENTES DE SUPERFICIE BES	22.
2.1 EQUIPO DE SUPERFICIE	23.
2.1.1 Cabezal de Pozo.	23.
2.1.2 Fuentes de Energía.	23.
2.1.3 Transformadores.	24.
2.1.4 Tipos de Transformadores.	24.
2.1.5 Controlador de frecuencia.	24.
2.1.6 Variador de frecuencia.	25.
2.1.7 Caja de venteo	26.
2.2 EQUIPO DE FONDO.	27.
2.2.1 Motor Electrosumergible.	27.
2.2.2 Sello.	30.
2.2.3 Intake.	30.
2.2.4 Bomba Centrifuga.	30.

2.2.4.1. Clasificación de las Bombas.	31.
2.2.5. Cable de potencia.	32.
2.2.6. Separador de gas rotatorio.	33.
2.2.7. Accesorios de fondo.	34.
3. METODOLOGÍA TapRoot®	36.
3.1 GENERALIDADES	36.
3.2 COMO FUNCIONA TAPROOT	37.
3.3 ROOTCAUSETREE®	37.
3.4 ORDEN DE LA INVESTIGACIÓN.	39.
3.5 DEFINICIONES	39.
4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA TapRoot	42.
4.1 POZO CORCEL A1 RUN 1	42.
4.1.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	42.
4.1.2 Análisis de falla	42.
4.2 POZO CORCEL A2 RUN 1	45.
4.2.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	45.
4.2.2 Análisis de falla	46.
4.3 POZO CORCEL A2 st1 RUN 1	50.
4.3.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	50.
4.3.2 Análisis de falla	51.
4.4 POZO CORCEL A4 RUN 2	54.
4.4.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	54.
4.4.2 Análisis de falla	54.
4.5 POZO CORCEL C1 RUN 1	56.
4.5.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	56.
4.5.2 Análisis de falla	56.

4.6	POZO CORCEL C1 RUN 2	58.
	4.6.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	58.
	4.6.2 Análisis de falla	59.
4.7	POZO CORCEL C2 RUN 2	61.
	4.7.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	61.
	4.7.2 Análisis de falla	62.
4.8	POZO CORCEL C3 RUN 1	63.
	4.8.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	63.
	4.8.2 Análisis de falla	64.
4.9	POZO CORCEL C3 RUN 2	66.
	4.9.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	66.
	4.9.2 Análisis de falla	66.
4.10	CORCEL C3 RUN 3	68.
	4.10.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	68.
	4.10.2 Análisis de falla	68.
4.11	POZO CORCEL D1 RUN 1	71.
	4.11.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	71.
	4.11.2 Análisis de falla	71.
4.12	POZO CORCEL D1 RUN 3	73.
	4.12.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	73.
	4.12.2 Análisis de falla	74.
4.13	POZO CORCEL E1 RUN 1	76.
	4.13.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	76.
	4.13.2 Análisis de falla	76.
4.14	POZO CORCEL E1 RUN 2	78.
	4.14.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	78.
	4.14.2 Análisis de falla	78.
4.15	POZO CORCEL E1 RUN 3	80.
	4.15.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	80.
	4.15.2 Análisis de falla	81.
4.16	POZO CORCEL E1st RUN 4	83.
	4.16.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	83.
	4.16.2 Análisis de falla	83.

4.17 POZO BOA 1 RUN 2	85.
4.17.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	85.
4.17.2 Análisis de falla	86.
4.18 POZO BOA 2 RUN 1	88.
4.18.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	88.
4.18.2 Análisis de falla	88.
4.19 POZO CANDELILLA 2 RUN 1	90.
4.19.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	90.
4.19.2 Análisis de falla	91.
4.20 POZO CANDELILLA 2 RUN 3	93.
4.20.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	93.
4.20.2 Análisis de falla	93.
4.21 POZO CANDELILLA 3 RUN 1	96.
4.21.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	96.
4.21.2 Análisis de falla	96.
4.22 POZO CANDELILLA 4 RUN 1	98.
4.22.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	98.
4.22.2 Análisis de falla	99.
4.23 POZO MAPACHE 1 RUN 2	101.
4.23.1 Observaciones durante el <u>pulling</u>	101.
4.23.2 Análisis de falla	101.
5. ANALISIS DE RESULTADOS	104.
CONCLUSIONES	111.
RECOMENDACIONES	112.
BIBLIOGRAFÍA	113
GLOSARIO	115

LISTA DE FIGURAS

	PÁG.
FIGURA N. 1 “Instalación típica de bombeo electrosumergible”	22.
FIGURA N. 2 “Cabeza de Pozo Corcel A2”	23.
FIGURA N. 3 “Variador de Frecuencia “	26.
FIGURA N. 4 “Caja de Venteo”	26.
FIGURA N. 5 “Motor sumergible y sus componentes básicos”.	29.
FIGURA N. 6 “Partes Motor BES”	29.
FIGURA N. 7 “Bomba Centrifuga”	31.
FIGURA N. 8 Comportamiento bomba “DOWN THRUSH WEAR – UP THRUST WEAR”	32.
FIGURA N. 9 “Cables de potencia”	33.
FIGURA N.10 “Separador de gas rotativo dinámico”	34.
FIGURA N.11 “Diagrama de árbol de causa raíz”	37.
FIGURA N. 12 “Diagrama de factor causal”	38.
FIGURA N. 13 “Diagrama de causal básico”	38.
FIGURA N. 14 “Árbol de causa raíz”	40.
FIGURA N. 15 “Categorías de causal básico”	41.
FIGURA N. 16 “Incidencia de fallas”	104.
FIGURA N. 17 “Razón de falla”	105.
FIGURA N. 18 “Causas generales de las fallas”	106.
FIGURA N. 19 “Causa raíz de las fallas”	108.

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	PÁG.
FOTOGRAFÍA N. 1 “Pozo Corcel A1 Run # 1”	43.
Fotografía 1a Sello Superior	43.
Fotografía 1b Sello Inferior	44.
Fotografía 1c Motor Superior	45.
FOTOGRAFÍA N. 2 “Pozo Corcel A2 Run # 1”	48.
Fotografía 2a. Motor superior	48.
Fotografía 2b. Insulating Block	49.
Fotografía 2c. MLE Y Pot Head	49.
Fotografía 2d. Rotor	49.
Fotografía 2e. Sello Superior	49.
Fotografía 2f. Motor Superior	50.
Fotografía 2g. Daños Generados Por El Corto	50.
FOTOGRAFÍA N. 3 “Pozo Corcel A2ST Run # 1”	52.
Fotografía 3a. Sello Superior	52.
Fotografía 3b. Motor Inferior	53.
Fotografía 3c Zona de Corto Circuito	53.
Fotografía 3d. Conjunto de Buje Rotor	53.
FOTOGRAFÍA N. 4 “Pozo Corcel A4 Run # 2”	55.
Fotografía 4a. Corte del Eje	55.
Fotografía 4b. Fragmentos del WC	56.
FOTOGRAFÍA N. 5 “Pozo Corcel C1 Run # 1”	57.
Fotografía 5a. Brida de Acople	57.
Fotografía 5b. Perno Encontrado	58.
FOTOGRAFÍA N. 6 “Pozo Corcel C1 Run # 2”	60.
Fotografía 6a.Motor Superior	60.
Fotografía 6b Conexión Entre Motores	61.
Fotografía 6c. Motor Inferior	61.
FOTOGRAFÍA N. 7 “Pozo Corcel C2 Run # 2”	63.
Fotografía 7a. Aceite En las Cámaras	63.
Fotografía 7b Aceite en el Motor	63.

FOTOGRAFÍA N. 8 “Pozo Corcel C3 Run # 1”	65.
Fotografía 8a. Motor Superior	65.
Fotografía 8b Quemaduras Debido al Corto	65.
FOTOGRAFÍA N. 9 “Pozo Corcel C3 Run # 2”	67.
Fotografía 9a. Eje Y Coupling Afectada	67.
Fotografía 9b. Sello Inferior	67.
FOTOGRAFÍA N. 10 “Pozo Corcel C3 Run# 3”	69.
Fotografía 10a. Sello Superior	69.
Fotografía 10b. Fluidos Contaminantes	70.
Fotografía 10c. Sólidos en bolsa Aflas y Sellos Mecánicos	70.
Fotografía 10d. Desgaste de Zapata	70.
Fotografía 10e. Fuelles, Bujes Y Eje Del BES	70.
FOTOGRAFÍA N. 11 “Pozo Corcel D1 Run # 1”	72.
Fotografía 11a. Bolsa Superior Y Evidencia De Contaminantes en la Cámara	72.
Fotografía 11b. Anillos Y Sleeves Desgastados	73.
FOTOGRAFÍA N. 12 “Pozo Corcel D1 Run # 3”	75.
Fotografía 12a.Cámara, Bolsa Y Sello Mecánico En Buenas Condiciones	75.
Fotografía 12b. Muestras De Corto Eléctrico	75.
FOTOGRAFÍA N. 13 “Pozo Corcel E1 Run # 1”	77.
Fotografía 13a. Muestra de Daños	77.
Fotografía 13b. Daños Internos	77.
FOTOGRAFÍA N. 14 “Pozo Corcel E1 Run # 2”	79.
Fotografía 14a. Condiciones del Eje	79.
Fotografía 14b. Daños a Causa de Fatiga	80.
FOTOGRAFÍA N. 15 “Pozo Corcel E1 Run # 3”	82.
Fotografía 15a. Motor Inferior	82.
Fotografía 15b. Daños Causados Por La Falla	82.

FOTOGRAFÍA N. 16 “Pozo Corcel E1ST Run # 4”	84.
Fotografía 16a. Muestras de Falla	84.
Fotografía 16b. Muestras Daños Causados Por La Falla	85.
FOTOGRAFÍA N. 17 “Pozo Boa 1 Run # 2”	87.
Fotografía 17a. Sello Superior	87.
Fotografía 17b. Señales de Corto Circuito	88.
FOTOGRAFÍA N. 18 “Pozo Boa 2 Run # 1”	89.
Fotografía 18a. Bomba Inferior	89.
Fotografía 18b. Daños En Los Aflas	89.
Fotografía 18c. Daños en los Difusores	90.
FOTOGRAFÍA N. 19 “Pozo Candelilla 2 Run # 1”	92.
Fotografía 19a. Revisión Cámara, Bolsa Aflas Y Fuelle	92.
Fotografía 19b. Problemas Causados por los Sólidos	92.
FOTOGRAFÍA N. 20 “Pozo Candelilla 2 Run #3”	95.
Fotografía 20a. Bolsa y Cámaras Contaminadas	95.
Fotografía 20b. Sello Mecánico.	95.
FOTOGRAFÍA N. 21 “Pozo Candelilla 3 Run # 1”	97.
Fotografía 21a. Contaminantes Sobre Sellos, Fuelles y Aflas	97.
Fotografía 21b. Daños Sobre Rotor.	98.
FOTOGRAFÍA N. 22 “Pozo Candelilla 4 Run # 1”	100.
Fotografía 22a. Daños en el Difusor y el Buje	100.
Fotografía 22b. Presencia y Acumulación de Sólidos	100.
FOTOGRAFÍA N. 23 “Pozo Mapache 1 Run # 2”	102.
Fotografía 23a. Daños Sobre el Plato Base	102.
Fotografía 23b. Evidencia de Daños y Deterioro a Raíz del Corto Eléctrico.	103.

LISTA DE TABLAS

	PÁG.
TABLA N. 1 "Pozo Corcel A1 Run #1"	45.
TABLA N. 2 "Pozo Corcel A2 Run # 1"	50.
TABLA N. 3 "PozoCorcel A2ST Run # 1"	54.
TABLA N. 4 "Pozo Corcel A4 Run # 2"	56.
TABLA N. 5 "Pozo Corcel C1 Run # 1"	58.
TABLA N. 6 "Pozo Corcel C1 Run # 2"	61.
TABLA N. 7 "Pozo Corcel C2 Run # 2"	63.
TABLA N. 8 "Pozo Corcel C3 Run # 1"	65.
TABLA N. 9 "Pozo Corcel C3 Run # 2"	67.
TABLA N. 10 "Pozo Corcel C3 Run # 3"	71.
TABLA N. 11 "Pozo Corcel D1 Run # 1"	73.
TABLA N. 12 "Pozo Corcel D1 Run # 3"	75.
TABLA N. 13 "Pozo Corcel E1 Run # 1"	77.
TABLA N. 14 "Pozo Corcel E1 Run # 2"	80.
TABLA N. 15 "Pozo Corcel E1 Run # 3"	82.
TABLA N. 16 "Pozo Corcel E1ST Run # 4"	85.
TABLA N. 17 "Pozo Boa 1 Run # 2"	87.
TABLA N. 18 "Pozo Boa 2 Run # 1"	90.
TABLA N. 19 "Pozo Candelilla 2 Run # 1"	92.
TABLA N. 20 "Pozo Candelilla 2 Run #3"	95.
TABLA N. 21 "Pozo Candelilla 3 Run # 1"	98.

TABLA N. 22 “Pozo Candelilla 4 Run # 1”	100.
TABLA N. 23 “Pozo Mapache 1 Run # 2”	103.
TABLA N. 24 “Incidencia de fallas”	104.
TABLA N. 25 “Razón de falla”	105.
TABLA N. 26 “Causas generales de las fallas”	106.
TABLA N. 27 “Causa raíz de las fallas”	107.

RESUMEN

TITULO: “IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA TapRoot®System PARA EL ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS ESP DEL LLANO EN PETROMINERALES”. *

AUTOR: IVAN MAURICIO PAMPLONA LEMUZ
DANIEL RICARDO REALPE REALPE

PALABRAS CLAVES: bombeoelectrosumergible, causa raíz, snapchart, TapRoot, pulling.

DESCRIPCIÓN:

Existen diversos aspectos que deben ser analizados e implementados al ver los fallos en las bombas, ya que de esto dependen las acciones correctivas y decisiones de continuar o no con la contratación de prestación del servicio de suministro de bombas por parte de la empresa prestadora del servicio.

En el presente trabajo se elaboró este análisis mediante la metodología TapRoot de las fallas en bombas BES (Bombeo Electrosumergible) en el llano en los campos Corcel y Guaitiquía en Petrominerales. Con el ánimo de colaborar con la resolución de los problemas para ubicar la causa raíz de estos fallos y suministrar una visión externa de ellas y tener una observación de la tendencia primaria de las mismas y su influencia en el trabajo de campo.

ABSTRACT

TITLE: "IMPLEMENTATION OF TapRoot®System METHODOLOGY FOR THE ANALYSIS OF THE ESP SYSTEMS IN PETROMINERALES"*

AUTOR: IVAN MAURICIO PAMPLONA LEMUZ
DANIEL RICARDO REALPE REALPE

KEY WORDS: root cause, electric-submersible pump, taproot, snapchart, teardown, pulling.

DESCRIPTION

There are several issues that must be analyzed to review the pump failures, the corrective actions and decisions as to continue or not hiring to the service companies are depending of the accurate evaluation of the quality of services and products. This paper was developed the ESP's (Electrosubmersible Pumping) failures analysis by TapRoot Methodology in the fields of Corcel and Guaitiquia in Llanos basin of Petrominerales. In order to encourage with the problems identification searching the rootcause and providing some recommendations to allowto solve or minimize the failure events.

INTRODUCCIÓN

PETROMINERALES COLOMBIA LTD es una empresa que cotiza en las bolsas de valores de Toronto (TSX) y Colombia (BVC), por lo tanto sus resultados financieros impactan en el valor de la acción (PMG). Es una exigencia de la vicepresidencia de operaciones de PETROMINERALES, el optimizar los recursos procurando maximizar el ingreso neto por cada barril producido.

Actualmente, PETROMINERALES COLOMBIA LTD produce 36000 BOPD, de los cuales en el área del Llano se producen 31000 BOPD. Toda la producción de petróleo de la región del Llano se obtiene mediante sistemas Bombeo Electrosumergible (BES) de alto volumen. Así mismo, la compañía tiene 15 áreas de exploración, en los que en caso de éxito, muy probablemente el sistema de levantamiento artificial sea por BES.

La experiencia de la compañía en sistemas de bombeo electro-sumergible de alto volumen inicia con el descubrimiento del campo Corcel en 2007, desde esa fecha hasta entonces, el volumen de instalación de BES ha aumentado así como también ha aumentado el número de fallas de los sistemas BES.

Si bien, la mayoría de las aplicaciones de BES son “extremas”, ya que el área de estudios se encuentra en ambientes de alta temperatura ($T > 250^{\circ}\text{F}$), alto volumen de producción por bomba ($Q > 10000$ BFPD), crudos de diferentes calidades (API 14° - 40°), con tendencia incrustante del agua, gases corrosivos (CO_2 , H_2S); se han presentado no menos de 5 tipos de fallas cada una con una causa raíz diferente, lo que el presente estudio pretende identificar mediante la metodología TapRoot.

TapRoot es la metodología que PETROMINERALES utiliza para investigar la causa raíz de los incidentes en personas, fallas de equipos. Básicamente es un software que ayuda a organizar las responsabilidades de un equipo, a realizar un seguimiento a cada etapa del proceso de investigación y permite la aprobación de informes y seguimiento de acciones correctivas.

Dentro de los pozos corcel A1, Corcel A2, CorcelAST, Corcel A4, Corcel C1, Corcel C3, Corcel D1, Corcel D3, Corcel E1, Boa 1, Boa 2 A, Candelilla 1, Candelilla 2, Candelilla 3, Candelilla 4, Mantis 1, Mapache 1, se han presentado algún tipo de problemas dentro del sistema de levantamiento artificial conocido como BES, los cuales han generado sobrecostos y pérdidas en producción a la compañía

Petrominerales, actualmente propietaria de esos pozos, se presenta mediante metodología TapRoot el análisis de dichos problemas identificando la causa raíz y causas genéricas de las fallas, es decir los cómo, cuando, donde y que se debe hacer para minimizarles o erradicarles.

La estructura de desarrollo de este trabajo se hace de la siguiente forma:

El primer capítulo. Describe en forma global el problema, que consiste en la incidencia de fallos y su consecuente costo económico en las finanzas de la compañía; el objetivo general y los objetivos específicos que se llevan a cabo de manera idónea en este trabajo. Por otra parte se destacan los alcances, limitaciones y la justificación de la investigación.

El segundo capítulo. Es una revisión del marco teórico que describe las bombas electro-sumergibles las ventajas y desventajas de estas, los objetivos que se buscan al ser instaladas, sus partes constitutivas y el beneficio que su uso transmite, contiene además un marco conceptual con varias definiciones que son importantes para desarrollar este trabajo.

El Tercer Capítulo; Describe la metodología utilizada para la realización del trabajo que tiene como tipo de estudio la aplicación de la metodología TapRoot; (basándose este último en las reglas, leyes, teorías humanas y el rendimiento del equipo y la aplicación de estas normas a la mejora del rendimiento del equipo), se implementó como técnica de recolección de datos la información procesada en la compañía.

El cuarto Capítulo. Es el capítulo más relevante porque en él se logran los resultados de la investigación a través de los distintos recursos utilizados para recopilar la información necesaria, y por lo tanto se obtiene de manera clara y sencilla unas observaciones de las causas raíz que aquejan al sistema BES en los campos Corcel y Guatiquíade los llanos en Petrominerales.

En este orden de ideas se presenta las conclusiones, recomendaciones, referencia bibliográfica que contemplan el desarrollo de este Trabajo de Grado.

1. GENERALIDADES DE BOMBEO ELECTRO-SUMERGIBLE

El sistema BES se compone de una bomba de fondo de pozo, un cable eléctrico y un panel de control en la superficie. Por lo general, la bomba se encuentra suspendida de un cable de la tubería colgado desde cabeza de pozo, sumergida en el fluido de pozo. La bomba es acoplada al motor electro sumergible, el cual recibe la energía a través del cable y el panel de control ubicado en la superficie. Una BES convierte la energía provista por un motor primario (motor eléctrico) en energía dentro del líquido que se bombea. Esta energía contenida en el fluido se presenta como energía de presión.

1.1 BES COMO MEDIO DE INCREMENTO DE LA PRODUCCIÓN.

Es un sistema integrado de levantamiento artificial, es considerado como un medio económico y efectivo para levantar altos volúmenes de fluido desde grandes profundidades en una variedad de condiciones de pozo. Actualmente estos equipos han obtenido excelentes resultados en la producción de fluidos de alta viscosidad, en pozos gasíferos, en pozos con fluidos abrasivos, en pozos de altas temperaturas y de diámetro reducido , estas características lo hacen un buen sistema incremental de producción.

1.2 OBJETIVOS DE LA BES.

Disminuir los requerimientos de energía en la cara de la formación productora, con el objeto de maximizar el diferencial de presión a través del yacimiento y provocar, de esta manera, la mayor afluencia de fluidos, sin que generen problemas de producción asociados a la operación del sistema.

1.3 VENTAJAS DE LAS BES

- Puede extraer volúmenes altos, 20.000 BOPD.
- No causa problemas en zonas urbanas asociados a ruido y contaminación visual.
- Es de fácil operación.
- Es de sencilla instalación el Sensor de presión en el fondo del pozo para realizar la telemetría de presiones hacia la superficie por medio de cables.
- Es adaptable a pozos desviados sin problemas.
- Se aplican a instalaciones costa afuera.
- Se pueden aplicar tratamientos contra la corrosión y la formación de incrustaciones.

- Disponibles en diversos tamaños.
- Los costos de levantamiento son bajos para grandes volúmenes de fluido.

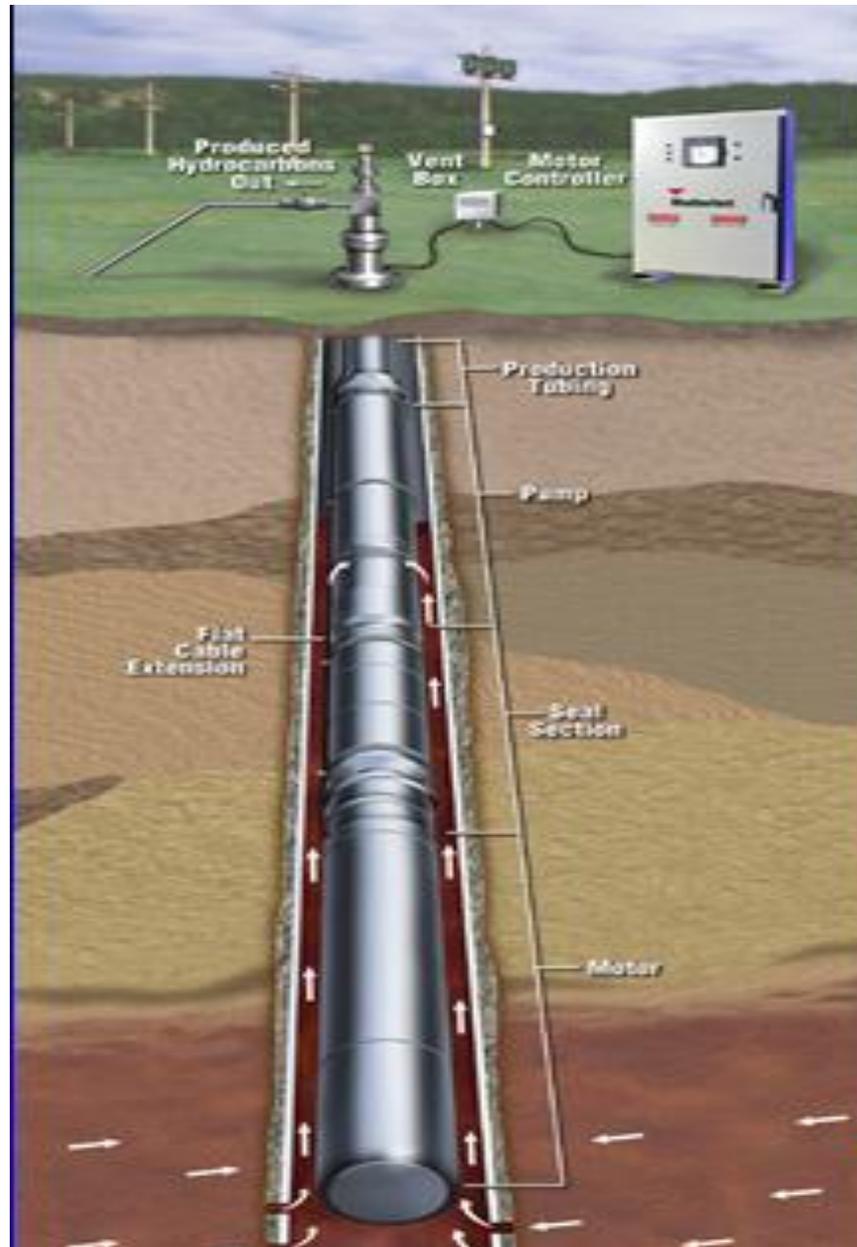
1.4 DESVENTAJAS DE LAS BES.

- Debe ser instalado arriba de las perforaciones con un anillo reforzado, para evitar que el fluido entre al motor.
- El sistema tiene limitaciones de profundidad: 10000 pies (3048 m); esto es por el costo del cable y a las complicaciones para instalar suficiente potencia.
- El cable causa problemas en el manejo de la tubería de producción y el mismo se deteriora a altas temperaturas.
- Es solamente aplicable cuando se usa energía eléctrica.
- No es práctico en pozos poco profundos con bajos volúmenes de producción.
- Carece de flexibilidad en la tasa de producción.
- La producción de gas y sólidos constituye un problema.
- El cambio de equipo, debido al agotamiento del pozo resulta costoso.

2. COMPONENTES DE SUPERFICIE BES

Un sistema de bombeo electrosumergible está dividido en dos secciones:
Un equipo de superficie y uno de fondo.

FIGURA N. 1 “Instalación típica de bombeo electrosumergible (BES)”



(Imagen tomada de Manual Centrilift Pág 18).

2.1 EQUIPO DE SUPERFICIE

Lo conforman los equipos que permiten suministrar al conjunto de fondo, la potencia eléctrica necesaria para operar de acuerdo a los parámetros de diseño.

Consta de:

2.1.1 Cabezal de Pozo: Sirve para sostener todo el equipo de fondo (motor, sello, bomba, cable), así como la tubería de producción y además permite pasar a través del mismo el conector que une el cable de superficie con el cable de subsuelo. El cabezal de boca de pozo debe estar equipado con un dispositivo penetrador que selle alrededor del cable y la tubería de producción para evitar fugas de gas o la surgencia imprevista del pozo.

FIGURA N.2“Cabeza de Pozo Corcel A2”



(Foto tomada de Campo Corcel A2).

2.1.2 Fuentes de Energía: Se debe contar con instalaciones eléctricas que satisfagan las necesidades técnicas requeridas tanto de energía como de diferencia de potencial. Para cumplir con las necesidades requeridas se debe tener:

- Disponibilidad del voltaje primario.
- Frecuencia.
- Capacidad de potencia instalada.

El principal medio para la generación de potencia eléctrica en un campo es un generador de corriente alterna (AC). Estos generadores convierten la energía

mecánica en energía eléctrica la cual es luego transmitida por el sistema de transmisión y distribución.

2.1.3 Transformadores: La distribución de la potencia eléctrica a los campos petrolíferos es generalmente en voltajes intermedios hasta los 6000 voltios. Dado que los equipos operan entre 250 y 4000 voltios, es requerida una transformación de voltaje. El transformador es un dispositivo eléctrico encargado de cambiar el voltaje de salida ya sea para elevarlo o reducirlo.

2.1.4 Tipos de Transformadores: El tipo de transformador requerido depende del sistema de potencia primario y del voltaje requerido en superficie.

- Transformador Reductor (SDT)

Se usa en caso de que la energía suministrada al sistema provenga de una línea de alta tensión. Este transformador reducirá el voltaje de la línea, al voltaje requerido a la entrada del controlador; si la energía proviene de generadores de potencia, éstos suministran directamente el voltaje requerido por el controlador de frecuencia o por el panel de control.

- Transformador Elevador (SUT) – Autotransformador

Incrementa el voltaje que sale del controlador de frecuencia a los requerimientos del motor para que opere eficientemente.

Estos transformadores son trifásicos y aumentan el voltaje desde un sistema de 480 voltios a rangos de 800 a 4000 voltios.

2.1.5 Controlador de Frecuencia: La flexibilidad del sistema BES permite la aplicación de un controlador de frecuencia (VSD), el cual es un dispositivo electrónico que varía la frecuencia de la corriente que llega al motor y por lo tanto se puede aumentar o disminuir la velocidad de la bomba. Esto hace posible que sin modificar el equipo de fondo se pueda satisfacer un conjunto de condiciones de operación.

Comúnmente los rangos de operación se encuentran entre 30 y 90 Hertz; es conveniente considerar que la velocidad de la bomba es directamente proporcional a la frecuencia de operación. El caudal entregado por la bomba de acuerdo a su velocidad puede ser controlado por simple variación de la frecuencia suministrada, teniendo en cuenta los límites de carga que puede soportar el motor.

Otros beneficios que presenta el variador de frecuencia son:

Extender la vida del equipo de fondo mediante un arranque y apagado lento y controlador automático de velocidad.

2.1.6 Variador de frecuencia (VDF): El sistema de bombeo BES es inflexible cuando opera a una velocidad fija porque se limita el gasto de producción a un rango fijo y la carga de salida a un valor fijo para cada gasto.

El VDF es un controlador de motor que permite operar el sistema BES en un rango amplio de frecuencia en vez de estar limitado a la frecuencia de línea. Así el gasto de producción, la carga o ambos se pueden ajustar, dependiendo de la aplicación, al variar la velocidad de la bomba, sin modificaciones en el equipo de fondo.

La operación básica del VDF es convertir la entrada trifásica de corriente alterna a corriente directa DC, luego usando semiconductores de potencia como interruptores de estado sólido, invierte la corriente directa a una salida alterna trifásica de voltaje y frecuencia variable.

El propósito principal para usar el VDF en el sistema BES es la flexibilidad en el bombeo, pero también se obtienen otros beneficios tales como la extensión de la vida útil del equipo de fondo, arranque suave, velocidad controlada automáticamente.

El VDF aísla la carga de switches, balancea los voltios de salida para reducir el calentamiento del motor, ignora la inestabilidad de frecuencia del generador y minimiza los esfuerzos de arranque. También, dependiendo de la aplicación, el VDF puede ayudar a mejorar la eficiencia del sistema, a reducir el tamaño requerido del generador, a reducir el tamaño de la unidad de fondo.

Además el VDF provee funciones de control, que el usuario puede seleccionar para maximizar la producción. Los VDF existen en varios tipos con diferentes topologías y diferentes formas de onda asociadas con cada tipo de topología es decir asociadas a la forma como se distribuye la energía a partir de la fuente.

Un VDF se compone de tres secciones básicas: la sección convertidora, la de enlace de CD y la inversora. La sección convertidora, consiste en dispositivos rectificadores (SCR's ó diodos), reconectados en configuración de puente rectificador trifásico de onda completa. En esta sección se rectifica la potencia trifásica de entrada (480-4160VAC, 60 Hz). La sección enlace de CD, consiste en inductores y condensadores conectados al bus de corriente directa DC en serie y paralelo respectivamente.

Como se menciona anteriormente, en la sección conversora se convierten las tres fases de entrada en corriente directa, sin embargo, existe una gran cantidad de rizado (ripple) que se incrementa con la carga. El propósito de los componentes del enlace DC es filtrar el rizado del voltaje del bus DC y por ello a esta sección también se le conoce con el nombre de filtro.

FIGURA N.3 “Variador de Frecuencia “



(Imagen tomada de manual REDA Pág 37).

2.1.7 Caja de Venteo: También mencionada como la caja de conexiones eléctricas. Está localizado en la cabeza de pozo y el tablero de control por razones de seguridad. Cumple una función básica que es proveer venteo a la atmósfera del gas que pudiese haber emigrado a través del cable de potencia, provee un punto de fácil acceso para hacer pruebas y así chequear las condiciones eléctricas del equipo que se encuentra en el fondo, además es un punto de conexión entre el cable de potencia que viene del tablero de control y el cable de potencia que viene del motor.

FIGURA N.4 “Caja de Venteo”



(Imagen tomada de Manual de reda Pág 38).

2.2 EQUIPO DE FONDO.

El conjunto de subsuelo para una instalación de bombeo electrosumergible en la aplicación de producción, de abajo hacia arriba lo conforman:

2.2.1 Motor Electrosumergible: Los motores de inducción son dispositivos que transforman energía eléctrica en energía mecánica. Es también considerado como un transformador giratorio, porque induce voltajes y corrientes en el rotor. Desde el punto de vista mecánico, el motor de inducción, se compone de dos grandes conjuntos de piezas.

- Estator. Abarca todo el grupo de partes inmóviles.
- Rotor. Abarca el grupo de partes giratorias.
- Desde el punto de vista funcional, también se pueden considerar dos grupos de partes, que prácticamente coinciden con las partes de la clasificación mecánica.
- Armadura. Es la parte donde operan las fuerzas contra electromotrices, que es la parte del estator.
- Rotor. Es la contraparte de la armadura, y es un sistema polar que se excita por inducción.

El funcionamiento del motor de inducción se debe, al energizar el estator que produce un flujo magnético giratorio, de magnitud y velocidad constante. En el rotor se inducen polos magnéticos que siguen en su giro al flujo del estator. El voltaje que se aplica a los embobinados del estator, es un voltaje de excitación de frecuencia constante y potencial constante y el voltaje que se aplica al rotor es un voltaje inducido de frecuencia y potencial variables que se produce como consecuencia de la velocidad del rotor con respecto a la velocidad síncrona.

El voltaje alterno que se induce de frecuencia variable en su rotor, es casi del mismo modo que el que induce un voltaje de CA (corriente alterna) mediante la acción transformadora en el secundario de un transformador, donde el primario es el estator y el secundario es el rotor. No tiene un circuito de campo separado, por lo que se considera de excitación sencilla, ya que solo se aplica corriente alterna al estator.

En general, cuanto más grande sea el movimiento relativo entre los campos magnéticos del rotor y del estator, mayor será el voltaje resultante en el rotor, por lo que el mayor movimiento relativo se da cuando el rotor se encuentra en estado estacionario, condición conocida como de rotor frenado o de rotor bloqueado, alcanzando el mayor voltaje inducido en el rotor. El menor voltaje (0V) se alcanza cuando el rotor se mueve a la misma velocidad del campo magnético del estator, o sea, no hay movimiento relativo.

En la construcción del motor de inducción, el estator es el mismo que el de una máquina síncrona, pero con diferente construcción del rotor. Hay dos tipos diferentes de rotores que se pueden colocar dentro del estator.

- Rotor jaula de ardilla. Los conductores están conectados en cortocircuito en ambos extremos mediante anillos continuos. Estos conductores no siempre son paralelos a la longitud axial del rotor, si no que son desviadas a cierto ángulo del eje del rotor para evitar saltos y producir un par más uniforme, así como para reducir el zumbido magnético durante el funcionamiento del motor.
- Rotor devanado. Tiene un juego completo de embobinados trifásicos que son la imagen reflejada de los embobinados del estator. Las tres fases de los embobinados del rotor, están conectados generalmente en estrella y los extremos están conectados a los anillos de rozamiento sobre el eje del rotor, en cortocircuito por medio de escobillas montadas sobre los anillos de rozamiento.

Los motores eléctricos utilizados para la operación de las bombas sumergibles son trifásicos tipo de jaula de ardilla, de dos polos. Estos motores se llenan con un aceite mineral con alta rigidez dieléctrica. El voltaje de operación de estos motores oscila entre los 230 y los 5000 volts. El amperaje puede variar entre los 12 y los 200 Amperes.

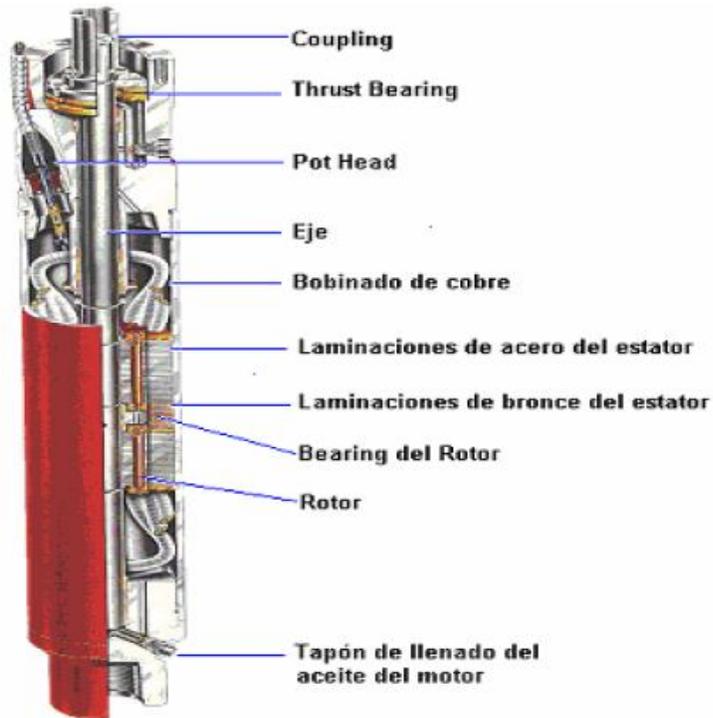
Está diseñado de acuerdo a los requerimientos de potencia de cada etapa, el gradiente de fluido y la cabeza total dinámica a levantar. Estos motores son llenados con un aceite mineral altamente refinado y con alta resistencia dieléctrica. Los voltajes de diseño y operación de éstos motores pueden ser tan bajos como 230 voltios tan altos como 4000 voltios. Los requerimientos de amperaje pueden ir desde 17 hasta 110 amperios, la potencia requerida es alcanzada al alargar o incrementar la longitud del motor.

El motor está constituido de un rotor usualmente de 12 a 18 pulgadas de largo, se encuentra dispuesto a lo largo de un eje que es recubierto por un estator que al inducirse una corriente a través de él, genera un campo magnético. Un solo motor puede alcanzar 33 pies de longitud y llega a desarrollar una potencia de 750 HP.

El estator está compuesto de un grupo de arreglos de electroimanes individuales, los cuales forman un cilindro hueco con un polo de cada electroimán hacia el centro. Cuando no hay movimiento físico del estator en su lugar se produce movimiento eléctrico creado por un cambio progresivo de polaridad de los polos del estator, de tal manera que se combina con un campo magnético rotatorio. El rotor está también compuesto por un grupo de electroimanes en un cilindro revestido por los polos del estator. El rotor rota simplemente por la atracción

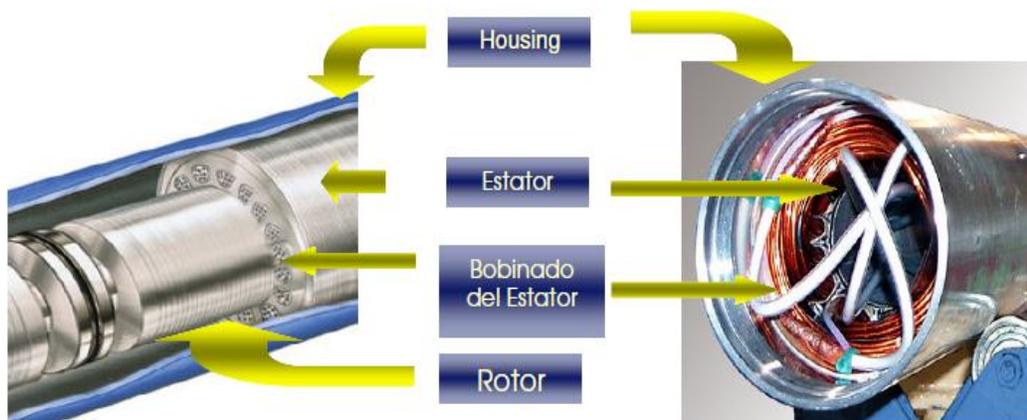
magnética y repulsión a medida que sus polos intentan seguir el campo eléctrico rotatorio generado por el estator.

FIGURA N. 5 “Motor electrosumergible y sus componentes básicos”.



(Imagen tomada de Manual Centrilift Pág 24).

FIGURA N.6 “Partes Motor de motor electrosumergible”



(Imagen tomada de Manual Centrilift Pág 25)

2.2.2 Sello: Se le denomina también protector y es la sección sellante que conecta el eje del motor a la bomba o al separador de gas.

Funciones:

- Evitar que el fluido del pozo contamine el fluido dieléctrico del motor.
- Absorber esfuerzos que transmite el eje de la bomba.
- Absorber la expansión del aceite dieléctrico de los motores debido a la temperatura.
- Igualar la presión anular del revestimiento con la presión interna del fluido dieléctrico del motor, permitiendo a la vez una comunicación de presiones.

2.2.3 Intake: Se le llama también entrada a la bomba y es un ensamblaje mecánico a través del cual pasa el fluido del pozo al interior de la bomba, también sirve para darle soporte al rodamiento que absorbe los esfuerzos axiales que transmite el eje.

2.2.4 Bomba Centrifuga: Está conformada por un determinado número de etapas, cada etapa en sí permite bombear un caudal determinado por el diseño de la misma, el número de etapas va a depender de la necesidad de cabeza que se requiere levantar.

Las bombas electrosumergibles son centrífugas multietapas. Cada etapa consiste en un impulsor rotativo y un difusor estacionario. El cambio de energía cinética a energía de presión es conseguido cuando el líquido que está siendo bombeado rodea el impulsor y como el impulsor rota a gran velocidad éste le imparte una moción rotatoria al líquido. La moción impartida por el impeller al líquido es de dos tipos:

- Radial: Debido a los esfuerzos centrífugos y donde el líquido tenderá a ser desplazado desde el centro hacia los bordes del impulsor.
- Tangencial al diámetro exterior del impulsor.

La resultante de estas dos fuerzas es la dirección de flujo desarrollada por la bomba.

¹ DONG, Liu. Estudio de Factibilidad de la Aplicación del Método de Bombeo Electro Sumergible (BES) en el Campo Bare, Faja Petrolífera del Orinoco. Trabajo de Grado. Sartenejas. Universidad Simón Bolívar. Ingeniería Geofísica, 2007. p.30-42.

FIGURA N. 7 “Bomba Centrifuga”



(Tomada de manual Reda Pág 47).

2.2.4.1. Clasificación de las Bombas:

Según el tipo de flujo:

- Radial

Diseñada para flujos pequeños, el impeller descarga el flujo en dirección radial.

- Mixto

Según sus Etapas:

- Bombas compresoras o de etapas fijas

Son utilizadas a medida que el diámetro de la bomba aumenta (alrededor de 6 pulgadas), los impulsores son asegurados en dirección radial y el empuje no es absorbido por la fricción del impulsor contra el difusor. Como resultado el cojinete del sello debe soportar el empuje de los impulsores y del eje de la bomba.

- Bombas con etapas flotantes

El impulsor puede flotar libremente sobre el eje y el empuje de cada impulsor es absorbido por unos cojinetes ubicados en el difusor. Por lo tanto el cojinete del sello únicamente debe absorber el empuje del eje de la bomba. La ventaja de éste diseño es que pueden colocarse numerosas etapas sin tener que ajustar los impulsores axialmente en el eje teniendo demasiado cuidado en el alineamiento.

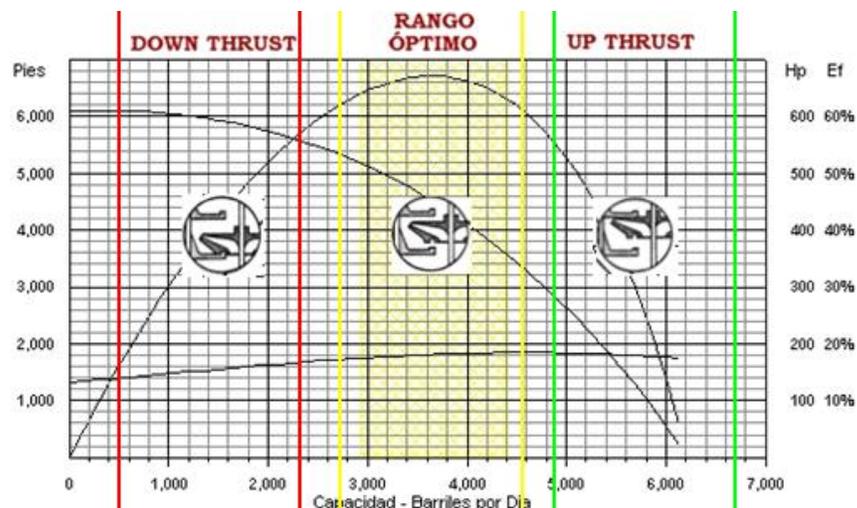
Cuando el impulsor se opera a una capacidad mayor que la de diseño mostrará desgaste por empuje ascendente (UpthrustWear) y cuando se opera la bomba a una capacidad menor que la de diseño se producirá desgaste por empuje descendente (DownthrustWear). Por estas razones las bombas deben operarse en un cierto rango de capacidad para obtener unas condiciones óptimas de desgaste

de los impulsores y del cojinete del sello; al operar la bomba en este rango, el desgaste será minimizado.

La tasa de descarga de la bomba electro-sumergible depende de la velocidad rotacional (RPM), el tamaño y el diseño del impulsor, el número de etapas, la cabeza dinámica contra la cual la bomba se opera y las propiedades físicas del fluido bombeado. La cabeza dinámica total de la bomba es el producto del número de etapas y la cabeza generada por cada etapa.

La figura a continuación es un ejemplo del funcionamiento de una bomba centrífuga la cual muestra el rango de operación recomendado junto con condiciones de desgaste por empuje ascendente y desgaste por empuje descendente.

FIGURA N.8 “Comportamiento bomba DOWN THRUSH WEAR – UP THRUST WEAR”



(Tomado de Tesis ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE (BES) EN EL CAMPO BARE, FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO Pág. 52).

2.2.5. Cable de potencia: La potencia es transmitida al motor electrosumergible por una línea de cable eléctrico trifásico que va adherido a la tubería de producción, éste cable debe ser pequeño (depende de la potencia requerida, puede ser No. 1, No. 2 ò No. 4) en diámetro, debe estar protegido de esfuerzos mecánicos e imprevistos que puedan deteriorar sus propiedades en el fondo del pozo.

La selección del tipo de cable está basado principalmente sobre las condiciones de fluidos, temperatura de fondo y limitaciones de espacio anular; el cable de

configuración redonda se usa cuando hay suficiente espacio anular y el cable de configuración plana se debe utilizar cuando hay límites de espacio anular.

FIGURA N.9 “Cables de potencia”



(Tomado de Manual de Reda Pág. 51)

2.2.6. Separador de gas rotatorio.

El separador de gas conecta el protector o sello y la bomba, permitiendo la producción de pozos con alto GOR (mayor o igual al 200 PCS/Bbl) ya que reduce la cantidad de gas libre al pasar por la bomba.

Utiliza fuerza centrífuga para separar el gas libre del fluido que entra a la bomba. El fluido entra al separador y es forzado hacia una cámara centrífuga por la acción de un inductor y una columna de baja succión. Una vez en la centrífuga el fluido con alta gravedad específica es forzado hacia el exterior de la pared de la cámara rotatoria por fuerza centrífuga dejando el gas cerca del centro. El gas es separado por el divisor de fases y es vaciado de regreso al anular del pozo donde éste asciende.

²<http://industria-petrolera.lacomunidadpetrolera.com/2009/05/bombeo-electrosumergible-bes.html>

FIGURA N.10 “Separador de gas rotativo dinámico”



(Tomado del Manual de REDA Pág.52)

2.2.7. Accesorios de fondo:

- **Válvula de Cheque :**
Localizada dos o tres uniones por encima de la bomba, puede ser usada para mantener la tubería llena de fluido cuando se para la bomba, evitando el giro invertido de la misma, y protegiéndola de daños en casos de re arranque del motor después de lapsos cortos de tiempo.
- **Válvula de drenaje :**
Localizada por encima de la válvula cheque, se usa para permitir el paso del fluido desde la tubería de producción hacia el anular, cuando se saca tubería; para evitar tubería llena durante reparaciones.
- **Cable plano:**
Conocido también como extensión de motor. Se usa para hacer la conexión desde la bomba a través de separador de gas y sello hasta el motor, donde hay limitaciones de diámetro.
- **Centralizadores**
Son usados para centrar el motor y la bomba, para facilitar el enfriamiento y en algunos casos para prevenir daños debidos al rozamiento durante la instalación. Se usan especialmente en pozos desviados.

- Protectores de Caucho:

Protege la parte externa de la tubería de producción.

- Bandas de cable plano :

Se usan para fijar el cable plano a la bomba, el separador de gas y el sello; colocando una sección cada 6 pies.

³HIRSCHFELDT, Marcelo. Diseño, Selección y Optimización Del Sistema De Bombeo Electrosumergible (ESP). OilProduction Consulting and Training. 2011. p. 80-95

3. METODOLOGÍA TapRoot®

TapRoot® es un sistema de análisis de causa raíz de los problemas. El sistema ayuda a las personas a solucionar inconvenientes mediante la búsqueda y la fijación de las causas fundamentales de los problemas que ocurren una y otra vez.

3.1 GENERALIDADES

La metodología TapRoot® busca la causa raíz de los inconvenientes, a causa de la falta de una mejor práctica o falla en aplicar el conocimiento que pudo haber prevenido el problema o haber reducido las posibilidades de ocurrencia o las consecuencias del problema significativamente.

TapRoot® es utilizado por empresas líderes en todo el mundo para investigar y solucionar las causas de los accidentes graves, incidentes cotidianos, pequeños conatos, problemas de calidad, errores humanos, problemas de mantenimiento, cuestiones de productividad, errores de fabricación entre otras. En pocas palabras casi cualquier tipo de dificultad que se pueda imaginar.

El sistema está basado en un rendimiento avanzado humano y tecnológico, lo cual otorga gran fiabilidad en los resultados. La teoría y los modelos de comportamiento humano y el rendimiento de los equipos de expertos. Este conocimiento fué utilizado en la construcción de TapRoot® de modo que cada persona que investiga los problemas pueden aprovechar los conocimientos de expertos sin tener que pasar años estudiando el comportamiento humano y/o el rendimiento del equipo.

Sin embargo TapRoot® no es solo para problemas complejos u operaciones de alto riesgo si no además para situaciones sencillas. El enfoque de sentido común y la naturaleza pura y simple del sistema es por qué las personas lo utilizan para analizar los problemas de la vida diaria.

La metodología TapRoot® fué desarrollada por Mark Paradies y Linda Unger basándose en las reglas, leyes y teorías humanas y el rendimiento del equipo y la aplicación de estas normas a la mejora del rendimiento. Mark y Linda crearon un sistema que puede ser utilizado tanto por expertos como por empleados en el campo del análisis de problemas, para conocer sus causas reales, el desarrollo de medidas correctivas eficaces y lograr la mejora del rendimiento mensurable.

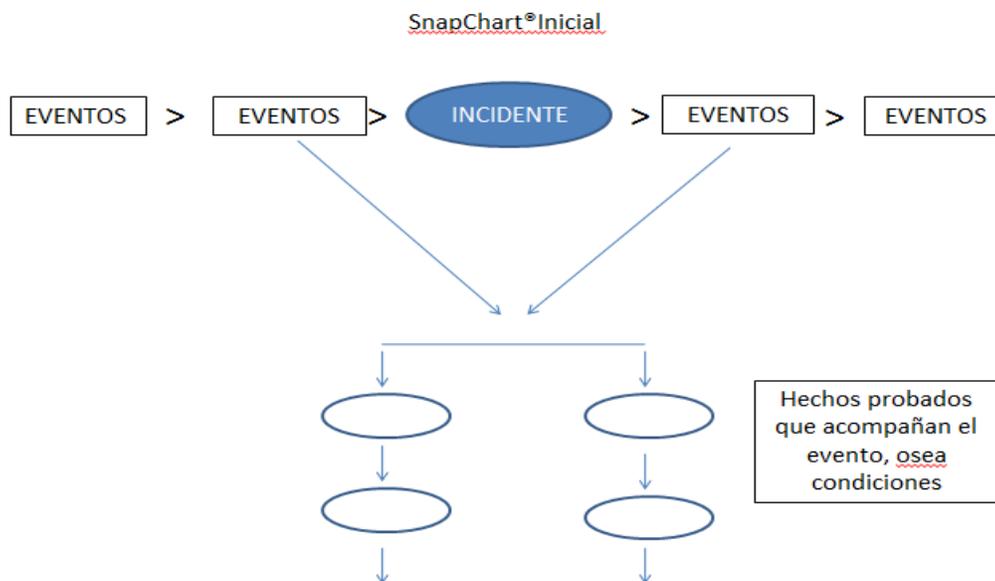
El sistema es utilizado y probado desde hace algunos años por empresas de todo el mundo para resolver la calidad, seguridad, producción y problemas de fiabilidad. Los usuarios dicen que la parte más sorprendente de este sistema es lo efectivo que es, y lo fácil de usar.

Tal vez por eso compañías como Intel, General Electric, Exxon Mobil, BP, la NASA, Phillips, Chevron, Pirelli, Bayer, Halliburton, Alaska Airlines entre otras, usaron y están usando TapRoot® para investigar los problemas y mejorar el rendimiento.

3.2 COMO FUNCIONA TapRoot®.

Las dos herramientas principales son SnapCharT® y RootCauseTree®

FIGURA N.11 “diagrama de árbol de causa raíz”

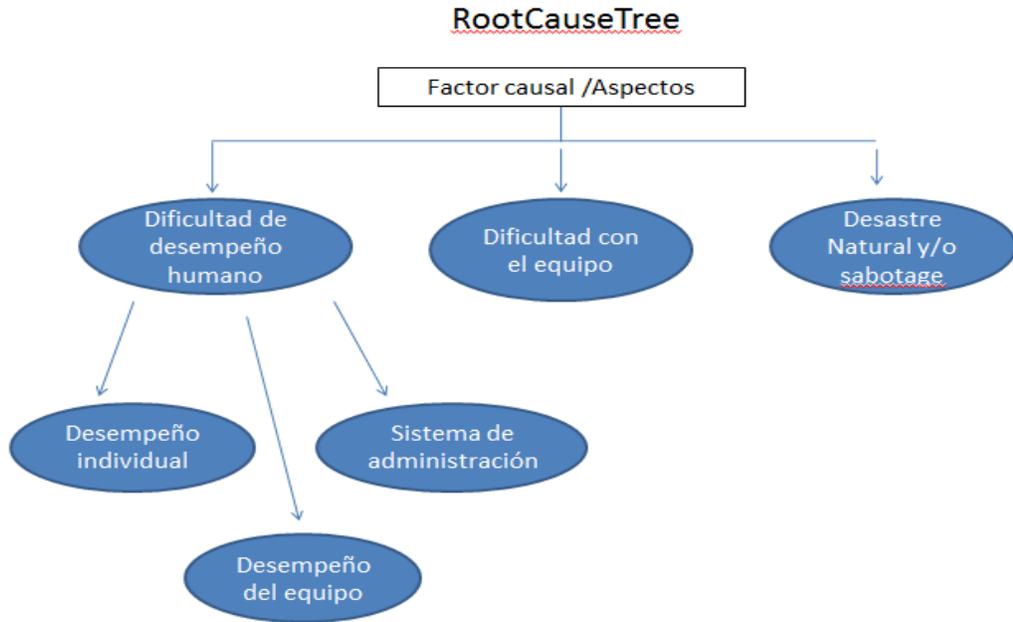


El diagrama de SnapCharT® ayuda a los investigadores a entender lo que ocurrió y además explicar lo que sucedió. En la parte superior se presenta un ejemplo claro de un diagrama de SnapCharT®.

3.3 ROOTCAUSETREE®

El RootCauseTree® ayuda al investigador a realizar un análisis sistemático de las causas fundamentales del comportamiento humano y los factores causales relacionados con el incidente del equipo. RootCauseTree® incluye una guía de rendimiento de resolución de problemas humanos que ayuda a los investigadores a hacer las preguntas correctas para resolver los problemas de rendimiento.

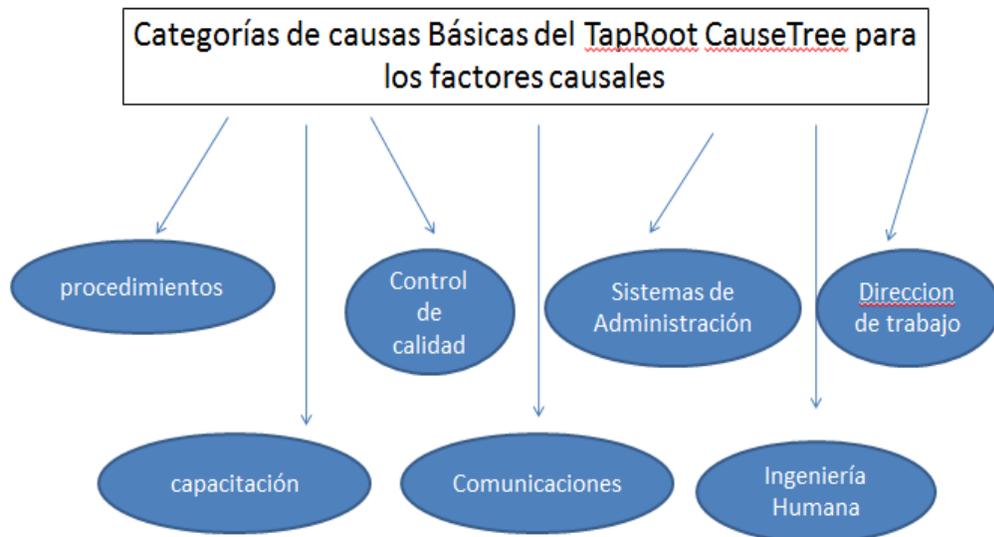
FIGURA N. 12 “diagrama de factor causal”



El árbol de causa raíz forma parte del sistema TapRoot® para el análisis de la causa raíz y la investigación de problemas.

Para encontrar una definición para una categoría del árbol, basta buscar el nombre de la categoría de causas básicas y la categoría de causa raíz.

FIGURA N.13 “Diagrama de causal básico”



3.4 ORDEN DE LA INVESTIGACIÓN

- 1) Planear la investigación.
- 2) Determinar la secuencia de eventos.
- 3) Definir los factores causales.
- 4) Analizar todas las causas raíz de cada factor causal.
- 5) Analizar las causas genéricas de cada causa raíz.
- 6) Desarrollar y evaluar las acciones correctivas.
- 7) Presentar reporte e implementar acciones correctivas.

NOTA: observar anexo 1

3.5 DEFINICIONES

Incidente: es la razón de la investigación lo peor que haya sucedido. El incidente define el alcance y contexto de la investigación.

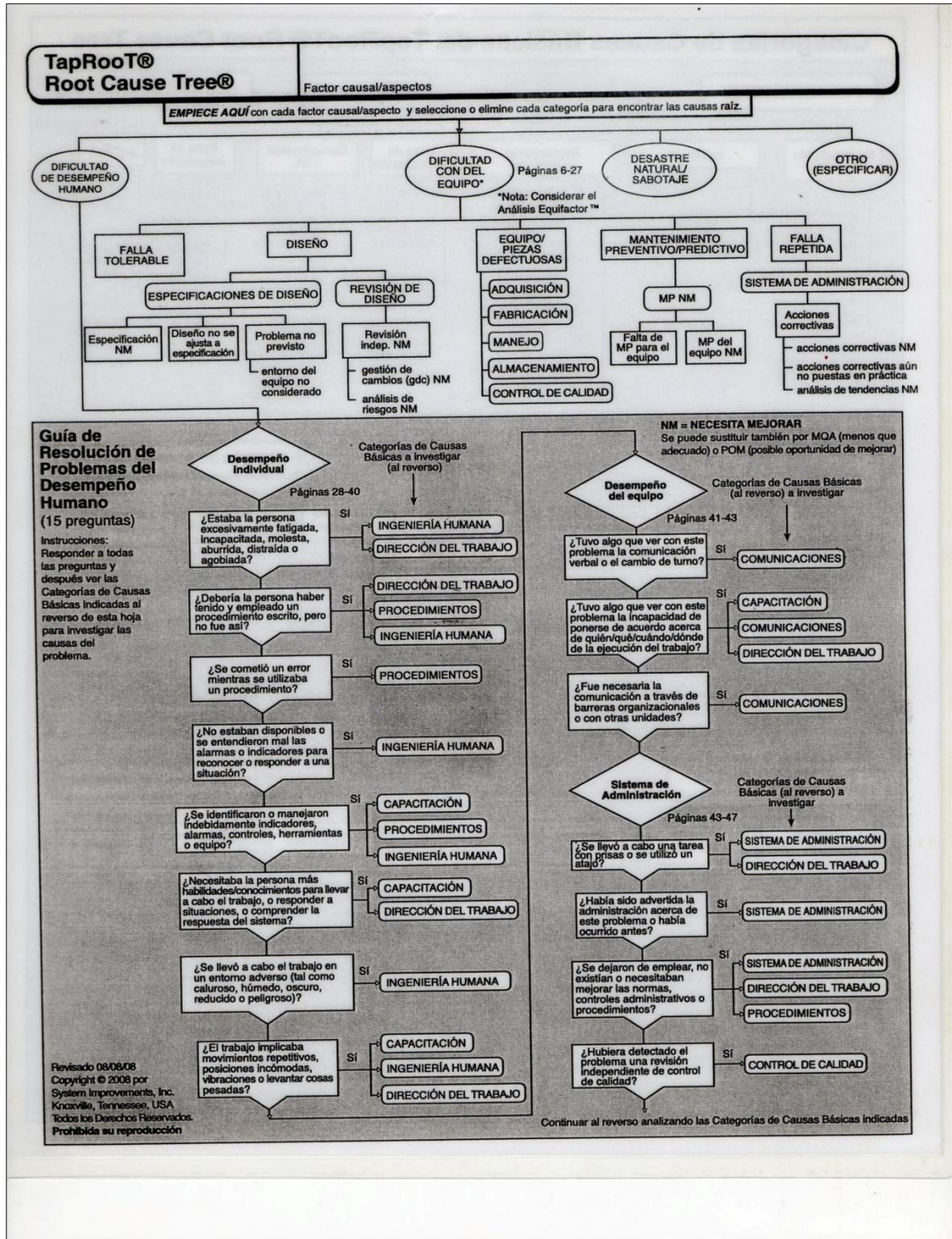
Eventos: hechos sucedidos antes y después del incidente.

Condiciones: expresan los eventos, pueden ser acciones no tomadas, deben ser hechos no pueden ser juicios ni apreciaciones, deben ser precisos y cuantificados

SnapCharT®: Es un mapa de eventos y condiciones que relacionan un incidente.

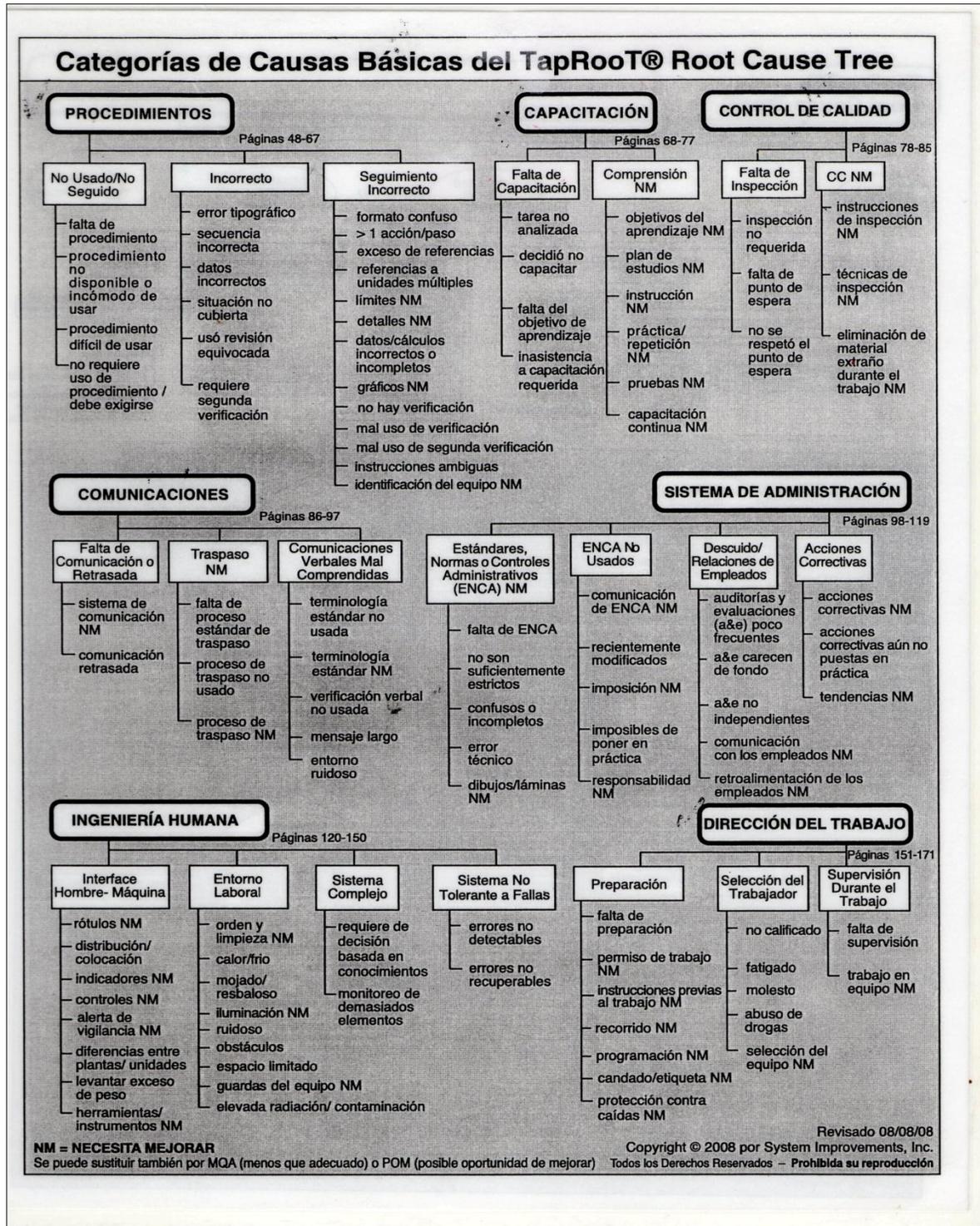
A continuación se presenta tabla TapRoot® que fue usada para analizar los casos correspondientes.

FIGURA N.14 "árbol de causa raíz"



(Tomado de TapRoot®System Improvements).

FIGURA N.15 “categorías de causal básico”



(Tomado de TapRoot®System Improvements).

4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA TapRoot®

4.1 POZO CORCEL A1 RUN 1

4.1.1 Observaciones durante el pulling:

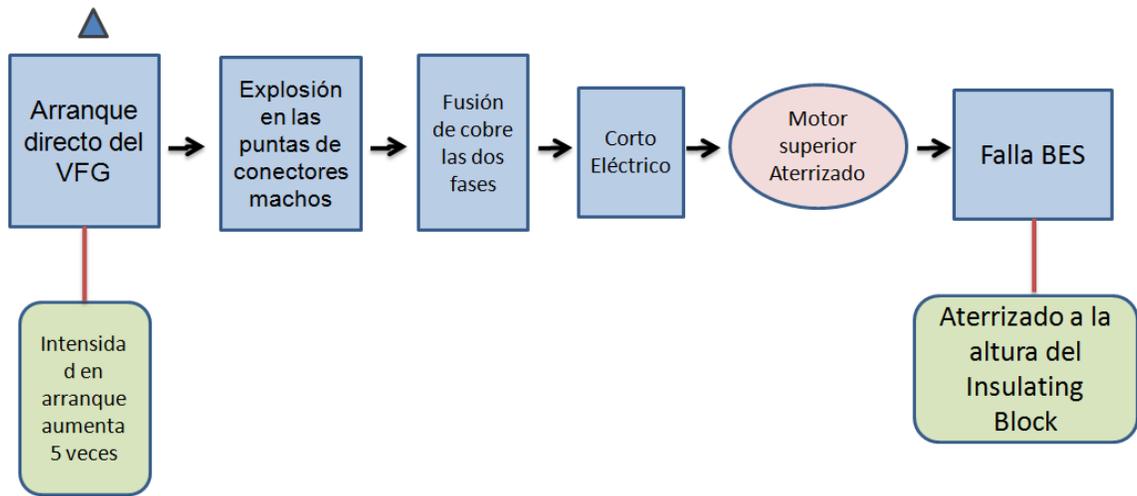
- El equipo BES se saca por motor superior aterrizado (falla eléctrica).
- El Motor superior presenta extensiones fuera de rango, el resorte del coupling roto, aceite contaminado con agua y eléctricamente desbalanceado entre fases AB: 28.7 Ohm, AC: 35.4 Ohm y BC: 49.8 Ohm, y sin aislamiento. Motor inferior con giro suave y eléctricamente balanceado entre fases con medidas AB: 0.4 Ohm, AC: 0.4 Ohm y BC: 0.4 Ohm y con bajo aislamiento 400 Mohmios.
- Las bombas se encuentran en buen estado mecánico con giro suave y buena estabilización del eje.
- Los sellos se encontraron con giro suave y todas las cámaras con aceite contaminado.
- El Intake se presenta con los orificios de admisión en buen estado mecánico y eje con juego radial moderado.

4.1.2 Análisis de falla: el equipo BES falla, y se saca por motor superior aterrizado a la altura del insulatingblock en la conexión con el pothead evidenciando una severa explosión por corto eléctrico en las puntas de los conectores macho que presentaron fractura y fusión del cobre de dos fases debido a los altos amperajes suministrados en los arranques directos del VFG y más aun sabiendo que el valor de intensidad en el arranque se incrementa en 5 veces el valor de la corriente normal de plena carga. El gran arco eléctrico que resulta de los amperios en las puntas de conectores quema el material aislante lo cual posibilita el corto.

A continuación se presentan el diagrama de eventos de la falla.

ESQUEMA N.1 "Pozo Corcel A1 Run 1"

Pozo Corcel C1 Run # 2.



Fuente Autores

A continuación se presentan una serie de fotografías que relacionan las fallas en las partes afectadas de la BES.

FOTOGRAFÍA N.1 “Pozo Corcel A1 Run 1”

Fotografía 1a Sello Superior

SELLO SUPERIOR

31G-103962



Primera cámara se halla contaminada con abundante lodo



Primera bolsa se encuentra rota en su parte superior



Fuelle elastomero con deformación plástica del material



Segunda bolsa se halla rota en la zona superior

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 1b Sello Inferior

SELLO INFERIOR

31G-103963



Primera cámara con la bolsa de añas con cortes extensos



Segunda cámara con la bolsa lacera en la parte superior



Cámara de empuje con aceite contaminado con lodos



Zapata de bronce con huellas de calor en todo el material

FUENTE: FAR PETROMINERALES

Fotografía 1c Motor Superior

MOTOR SUPERIOR

21K-87145



2 pines machos quedan incrustados al insulating block



Puntas del Pot head evidencian vestigios de altas corrientes



Area posterior del insulating con material decolorado por calor



Zona subyacente del insulating block con material fundido

FUENTE: FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz

TABLA N. 1 “Pozo Corcel A1 Run 1”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Corto circuito	Motor	I Block	Eléctrica	Operación	Procedimientos de operación

FUENTE: AUTORES

4.2 POZO CORCEL A2 RUN 1

4.2.1 Observaciones durante el pulling:

- El equipo BES se saca debido a la instalación a tierra con medidas eléctricas tomadas en la caja de venteo F-F: 3,2 Ohm, 3.0 Ohm y 3.0 Ohm. F-T 29, 29 Y 28 Ohm; el Aislamiento es de 1,24 KΩ con el Megger Kluge escala de 250 Volt. Luego Se efectuó la prueba de giro al equipo acoplado y este presento rotación normal.

- El Motor superior fue aterrizado, el cual presenta giro normal, aceite quemado y eléctricamente desbalanceado entre fases AB: 0.3 Ohm, BC: 0.3 Ohm Y AC: 0.4 Ohm y 0 Mohmios de aislamiento.
- El Motor inferior mostró bajo de aislamiento 500 Mohmios y balanceado entre fases en 0.4 Ohmios; se evidenció alto contenido de agua al interior con aceite quemado, de igual manera se registro el sensor; adicional al corto interno que se evidencio al interior de este. Todo el sistema sin juego radial y con giro normal.
- Las Bombas se hallaron con giro y desplazamiento suave.
- Se halló el Intake con los orificios de admisión libres de erosión.
- El Sello superior e inferior con todas las cámaras contaminadas con agua. Salen la totalidad de accesorios de instalación, 220 protectores LASALLE, 249 súperbandas, 4 protectores de MLE y Y-tool. Cable de potencia en buenas condiciones mecánicas y eléctricas, balanceado en 1.0 Ohm y 15000Mohmios de aislamiento. Fase C del MLE con EPDM recalentado.

4.2.2 Análisis de falla: el equipo BES presenta falla eléctrica en el motor superior a causa de la invasión con fluidos de pozo y agua al interior del motor a través del tándem seal que evidencio deterioro y acumulación en sus sellos mecánicos con sólidos y la bolsa superior del sello upper rota. Adicionalmente se observo recalentamiento de las fases del motor y en el bobinado se evidenciaron quemaduras del epoxyinsulation en zonas lejanas al corto. Posibles picos de corriente en los re-arranques, dado al mayor consumo de corriente en los arranques del motor a una mayor frecuencia (40Hz).

Los análisis de sólidos son muestras recolectadas del sello (sellos mecánicos, guías y cabezal) y los resultados presentados por el laboratorio LAPE de la Universidad Surcolombiana determina su composición desde el punto de vista del análisis químico como sólidos solubles en HCL 89% (CaCO₃, MgCO₃, FeCO₃, FeS y Fe₃O₄), e insolubles en HCL 11%, (porcentajes en peso) y desde el punto del análisis textural y mineralógico, 75% son compuestos poliméricos y 15% como carbonatos,(porcentajes en volumen).

Los sellos mecánicos normalmente se encuentran en contacto con el fluido del Pozo, en los procedimientos de arranque, los torques intempestivos ocasionan separación entre el respaldo de los anillos primarios y el frente de los fuelles elastoméricos, al solidificarse y acumularse los carbonatos en esta zona van generando paulatinamente cierta perdida en el paralelismo de las caras, causando un contacto mayor del asiento con la arista superior del anillo primario (huella encontrada sobre el asiento del sello principal). La perdida de paralelismo creada por la acumulación de sólidos en el respaldo, genera una separación en las caras, permitiendo el paso de fluido y sedimentos a los sellos de menor resistencia mecánica, generándose un paso periódico a lo largo de la operación. El nivel de la huella sugiere que la acción presentó una periodicidad y no se mantuvo a lo largo

de la operación; esto ocurre durante los escenarios presentados en los procedimientos de parada o arranque del equipo.

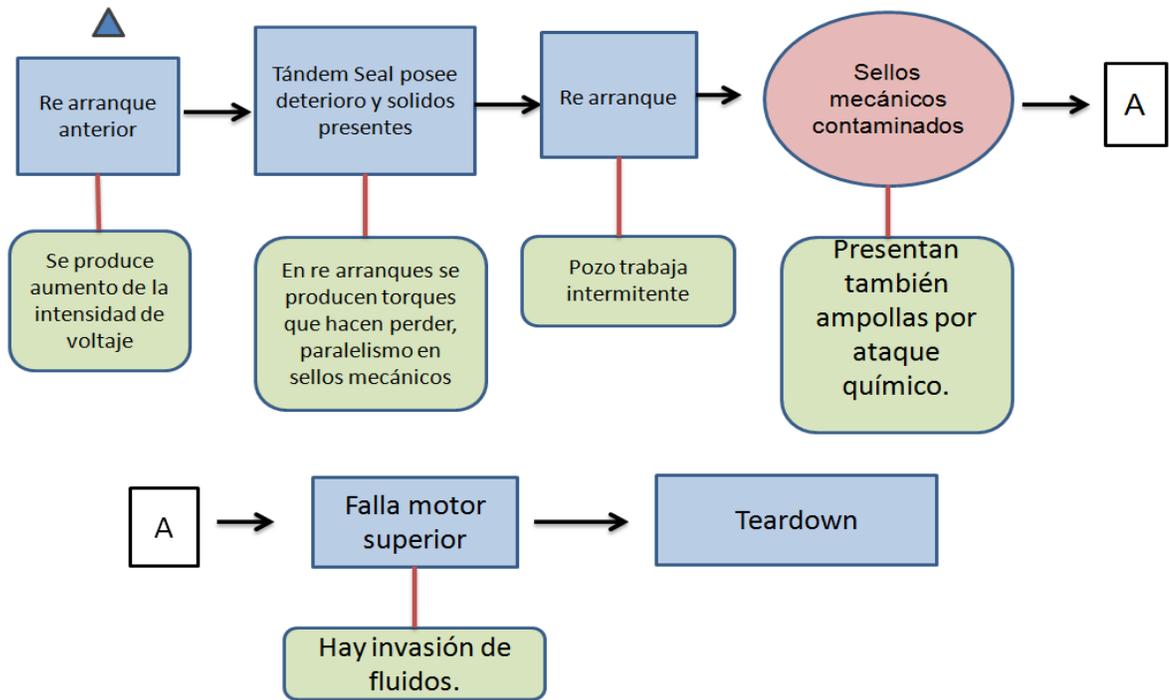
Los sellos mecánicos presentan ciertas ampollas de diámetros menores, señalando un tipo de reacción; el ataque químico de los fuelles elastoméricos puede ocasionar pérdida de las propiedades mecánicas disminuyendo la capacidad de sellado o el cierre perfecto entre las caras que se encuentra en contacto con el elastómero, permitiendo el paso de fluido. La variación de la estructura de los elastómeros analizados en la prueba de compatibilidad no es considerable, pero al incluir el parámetro tiempo se podría conseguir una reacción notoria.

El escenario de las bolsas en el tamdenseal fue el siguiente: Primera bolsa rota, segunda bolsa contraída (chupada) por la descompresión, tercera bolsa contraída en menor proporción y última bolsa sin contracción. Prueba de compatibilidad con el fluido de pozo de la bolsa fallada no presentó variación notoria.

La bolsa fallo debido a sobre-presurización al interior de la bolsa debido al taponamiento de la checkvalve del cabezal que se evidencio taponada con sólidos y que libero presión en la prueba hecha a los 20psi, 10psi por encima de lo normal. Adicionalmente esta es la cámara (superior) que mayor volumen de expansión presenta en el sello. La falla describe una falla mecánica (rasgadura por tracción), según esta morfología presentada se atribuye a los esfuerzos cíclicos presentados en los re-arranques, o la influencia de la presión normal de operación; La bolsa de sello no muestra reacción química ante el producto, pero posiblemente la composición del fluido del Pozo disminuyó la capacidad mecánica del material, conllevando el elemento a la falla.

A continuación se presentan el diagrama de eventos de la falla.

ESQUEMA N.2 “Pozo Corcel A2Run # 1”
 Pozo Corcel A2 Run # 1



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan una serie de fotografías que relacionan las fallas en las partes afectadas de la BES.

FOTOGRAFÍA N.2 “Pozo Corcel A2 Run # 1”

Fotografía 2a. Motor superior

MOTOR SUPERIOR



FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 2b. Insulating Block



FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 2c. MLE Y Pot Head



FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 2d. Rotor



FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 2e. Sello Superior

SELLO SUPERIOR

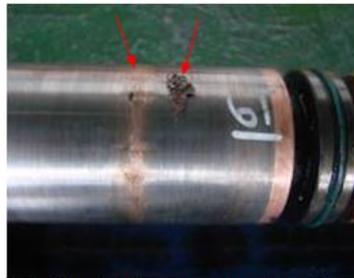


FUENTE FAR PETROMINERALES

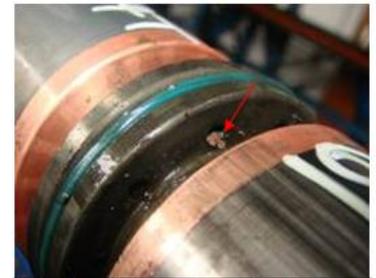
Fotografía 2f. Motor Superior
MOTOR SUPERIOR



Cabezal con existencia de aceite contaminado



Fricción de la limadura de cobre sobre el rotor No.6



Limallas de bronce depositadas sobre los cojinetes

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 2g. Daños Generados Por El Corto



Laminillas de material no magnético (primer corto) con los cobres derretidos



Vista lateral del primer corto con quemaduras en el epoxy insulation



Vista de los 2 cortos eléctricos

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz

TABLA N. 2 “Pozo Corcel A2 Run # 1”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Corto circuito	Motor	Estator	Eléctrica	manufactura	Incompatibilidad material del sello con fluido de pozo

FUENTE AUTORES

4.3POZO CORCEL A2 st1 RUN 1

4.3.1 Observaciones durante el pulling: éste se realizó debido a que el equipo presentó instalación a tierra.

- El motor superior fue encontrado con bajo aislamiento y el inferior fue hallado eléctricamente aterrizado.
- Las Bombas se hallaron en buen estado mecánico, con giro suave.
- El Intake con giro libre, orificios de admisión en buen estado mecánico.
- El Tándem de sellos se halló con giro normal.
- La Sección superior del sello se encontró con aceite contaminado en las dos primeras cámaras y limpio y trabajado en la cámara inferior.
- El sello inferior presentó aceite limpio y claro en cámaras superior y central, pero aceite quemado en la cámara inferior.
- Los Motores se encontraban con signos de arrastre en sus housings, con giro libre, y con aceite quemado en su interior.
- El Cable MLE se halló en buen estado electromecánico.
- La mayoría de las súperbandas y protectores de equipo salieron del pozo en buenas condiciones.

4.3.2 Análisis de falla: La falla eléctrica del equipo de fondo fue encontrada en el motor lower debido al corto eléctrico generado en el bearing # 19 y en las cercanías de la estrella del motor lower, este corto eléctrico se generó por la precipitación de limadura de bronce en estos dos puntos del motor (estrella y bearing # 19). Este bronce se originó por la destrucción del buje # 19 que a su vez de causar la producción de limadura causó el desbalance mecánico del conjunto de rotores dando como resultado los desgastes encontrados en los rotores, bearings y bujes cercanos al área de este buje.

Las posibles causas de la destrucción del buje tenemos:

- 1- Material defectuoso del buje de bronce más cuña.
- 2- Posible golpe en el motor en esta zona.
- 3- Posible vibración en la base del motor.
- 4- Sobre temperatura en la base del motor por una mala lubricación en esta área.

*Para la causa #1 posible destrucción de la cuña lo que genera que se gire el buje de lubricación.

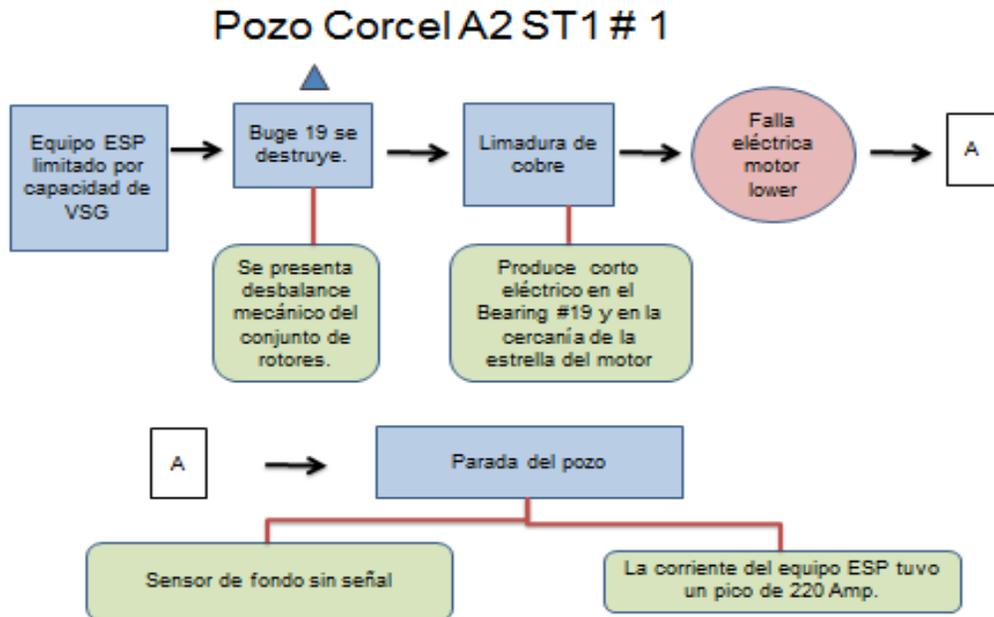
* En la causa #2, no encontramos rastros de golpes en la base del estator.

* En la causa #3, la descartamos debido a que el motor era estabilizado en la base.

* En la causa # 4, No se encontró signos de sobre temperatura en esta área del motor.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla

ESQUEMA N.3 “Pozo Corcel A2ST Run # 1”



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.3 “Pozo Corcel A2ST Run # 1”

Fotografía 3a. Sello Superior

SELO SECCIÓN SUPERIOR



Bolsa aflax de cámara superior rota y contaminada



Sello mecánico superior con deterioro en fuelle



Cámara central se encontró con aceite contaminado

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 3b. Motor Inferior

MOTOR INFERIOR



Se encuentra magneto de la base saturado de partículas metálicas



En magneto de base se evidencia cobre por aterrizamiento de fases



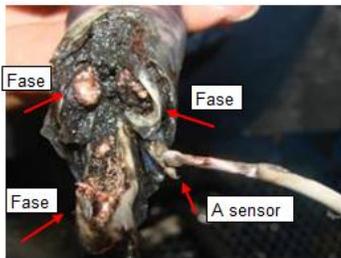
Se encuentra explosión cerca de conexión estrella y aceite quemado

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 3c Zona de Corto Circuito



Zona de cortocircuito cerca de conexión estrella, dos fases rotas



Zona de falla eléctrica recubierta de limalla con dos fases despegadas



Zona de acople eléctrico entre motores con slip teflons en buen estado y aceite quemado

FUENTE PETROMINERALES

Fotografía 3d. Conjunto de Buje Rotor



Orificio de lubricación para buje # 19 tapado por bronce fundido impidiendo paso de aceite



Rotor # 20 con arraste severo y signos de desgaste adhesivo contra buje #19



Bujes # 15 y # 18 quedaron insertos en sus bearings

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz

TABLA N. 3 “PozoCorcel A2ST Run # 1”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Instalación a tierra	Motor	Bujes de bronce	Eléctrica	Selección de diseño	Manufac tura

FUENTE AUTORES

4.4 POZO CORCEL A4 RUN 2

4.4.1 Observaciones durante el pulling: el Equipo BES se saca por presentar baja producción debido a un posible eje roto.

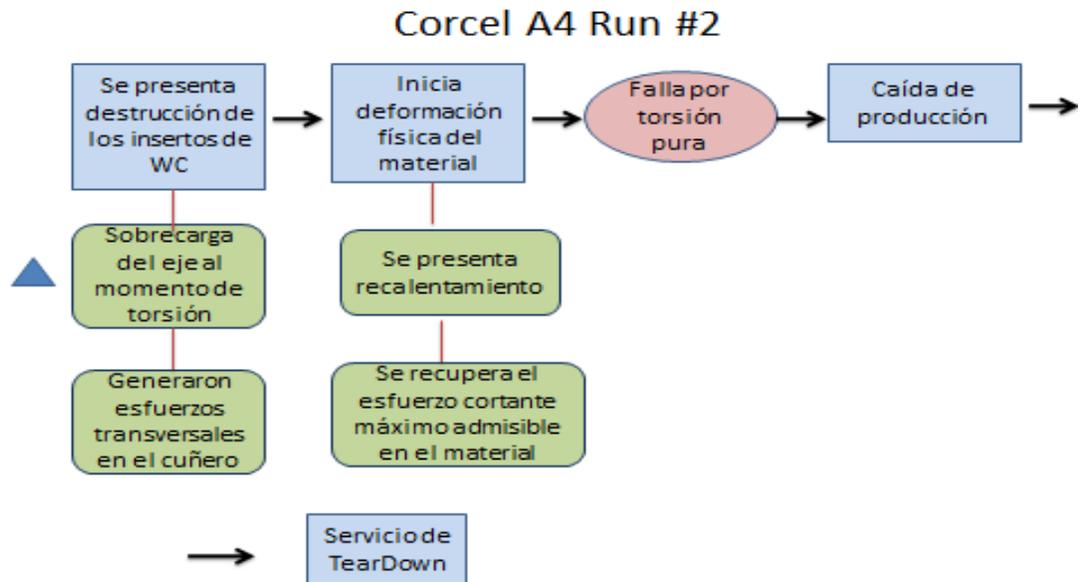
- Los Motores presentan extensiones en rango, aceite se observa limpio y claro, giro suave y eléctricamente balanceados entre fases AB: 0.3 Ohm, AC: 0.3 Ohm y BC: 0.3 Ohm, con 15000 Mohmios de aislamiento fases a tierra.
- La Bomba lower presentó juego radial excesivo y posible eje roto, la bomba superior presenta arrastre en la superficie externa del housing.
- El Intake se encuentra con giro normal y los orificios de admisión en buen estado mecánico.
- El Sello superior fue hallado con giro normal y con las 2 primeras cámaras contaminadas.
- El Sello inferior contenía aceite limpio en todas sus cámaras.
- El Cable de potencia y MLE en buenas condiciones mecánicas y eléctricas, balanceado en 1.9 Ohm y 5000Mohmios de aislamiento.

4.4.2 Análisis de falla: La composición química del eje sujeto de estudio por el laboratorio Sherry confrontado con los requerimientos para un material Inconel 718 según la norma ASTM B637, Grado UNS N07718 se ajustan dentro de los valores límites de los elementos dados por la norma para esta aleación, por lo que se clarifica que la calidad del material esta dentro de las especificaciones técnicas dadas. El mecanismo de falla en este material se da inicialmente por la destrucción de los insertos de WC a través de su cuñero por la sobrecarga del eje al momento de torsión generando esfuerzos transversales en el cuñero que descascararon, agrietaron y fracturaron el Flange de la etapa No.66 que creó la restricción al giro libre del eje por las indentaciones de los filos de WC en su superficie, que presento maquinado similar al de un buril y que genero la zona de estancamiento para que a 14cms se iniciara la deformación plástica del material asistida por recalentamiento que se evidencio en el ángulo de torsión generado en el plano longitudinal del cuñero y consecuentemente se superara el esfuerzo cortante máximo admisible en el material a medida que progresivamente aumento el torque, ocasionando finalmente la falla por torsión pura el día 28 de octubre a las 11 horas, donde se registro una caída de producción por más de 3000 BFPD y

se continuo operando con un caudal de 5000 BFPD durante 4 días con las 65 etapas que permanecieron acopladas al sistema de transmisión de potencia hasta el momento de la intervención.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.4 “Pozo Corcel A4 Run # 2”



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.4 “Pozo Corcel A4 Run # 2”

Fotografía 4a. Corte del Eje



FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 4b. Fragmentos del WC



Trozos fragmentados de WC recolectados del difusor No. 66



Hongos de WC con deformación del cuñero por sobre-torsión

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz

TABLA N. 4 “Pozo Corcel A4 Run # 2”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Eje roto	Bomba	Eje	Mecánica	Operación	Operación incorrecta

FUENTE AUTORES

4.5 POZO CORCEL C1 RUN 1

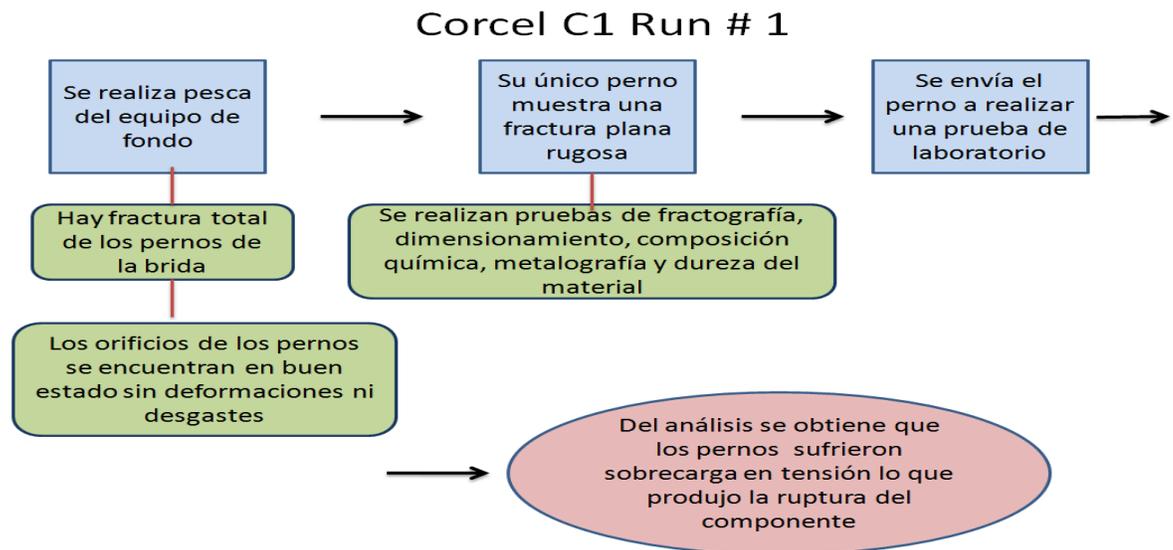
4.5.1 Observaciones durante el pulling: el Equipo BES se sacó por posible instalación a tierra. Después de empezar el pulling, el peso de la sarta disminuyó de 145.000 lb a 140.000 lb, sin haber sacado el primer tubo. Después de sacada la totalidad de tubería, protectores cannon y cable de potencia, se sacó la descarga encontrándose sólo un tornillo sobre la brida del acople con la bomba superior, por lo tanto todo el equipo se quedó en el fondo del pozo por la fractura de todos los tornillos. Se encontró MLE roto antes de llegar al Pot-head.Pack-off y cable de potencia salieron en buenas condiciones tanto mecánicas como eléctricas. Posiblemente uno de los motores se encuentra aterrizado.

4.5.2 Análisis de falla: El equipo de fondo fue de pescado, ya que se fracturaron la totalidad de los pernos que sujetaban la brida de la base de la descarga con la brida de la cabeza de la bomba superior para acoplar estos componentes del equipo BES. Durante el pulling la descarga salió con su protector de MLE y solamente un perno en su base. Todos los orificios para los pernos de la brida de acople en descarga estaban en buen estado mecánico, sin deformaciones, ni desgastes. Su único perno mostró una superficie de fractura plana, rugosa y con superficie de fractura en forma de copa y cono. Este perno fue enviado a un

laboratorio externo para realizar análisis de fractografía, dimensionamiento, composición química, metalografía y dureza del material y análisis de mecanismo de fractura. A partir de los resultados de este análisis podemos obtener la causa raíz de los pernos fracturados, "posible sobrecarga en tensión produjo ruptura del componente". Por la disminución del peso de la sarta durante el pulling, inferimos que los pernos fallaron durante el pulling.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.5 "Pozo Corcel C1 Run # 1"



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.5 "Pozo Corcel C1 Run # 1"

Fotografía 5a. Brida de Acople



FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 5b. Perno Encontrado



Único perno que salió con la descarga mostrando su superficie de fractura plana



Perno fue enviado a laboratorio externo para diversos análisis del material y del mecanismo de fractura.

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz

TABLA N. 5 “Pozo Corcel C1 Run # 1”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Fractura pernos	Bomba	Pernos	Mecánica	Instalación	Instalación field services

FUENTE AUTORES

4.6 POZO CORCEL C1 RUN 2

4.6.1 Observaciones durante el pulling: El Equipo BES de fondo salió por posible instalación a tierra.

- Hay Falla eléctrica en zona de acople entre motores.
- El Conjunto de bombas salieron con giro libre, extensiones en rango, housing sin señales de arrastre y no presentaron juego radial.
- El Intake se halló con giro normal y orificios de admisión sin taponamiento por sólidos.
- El Sello superior estaba con todas las cámaras contaminadas con fluido de pozo, el cual presentó giro libre y extensión dentro de rango.
- El Sello inferior se halló con aceite contaminado en cámara superior y central, con el aceite quemado en la cámara inferior proveniente de los motores.
- Los Motores estaban con giro normal, el aceite quemado al interior.
- Para desacoplar los motores, el lead de la fase C tuvo que ser cortada.
- El MLE se halló en buenas condiciones físicas y eléctricas.

4.6.2 Análisis de falla: Las posibles causas de la falla eléctrica del motor inferior en la zona de acople entre motores pudieron ser:

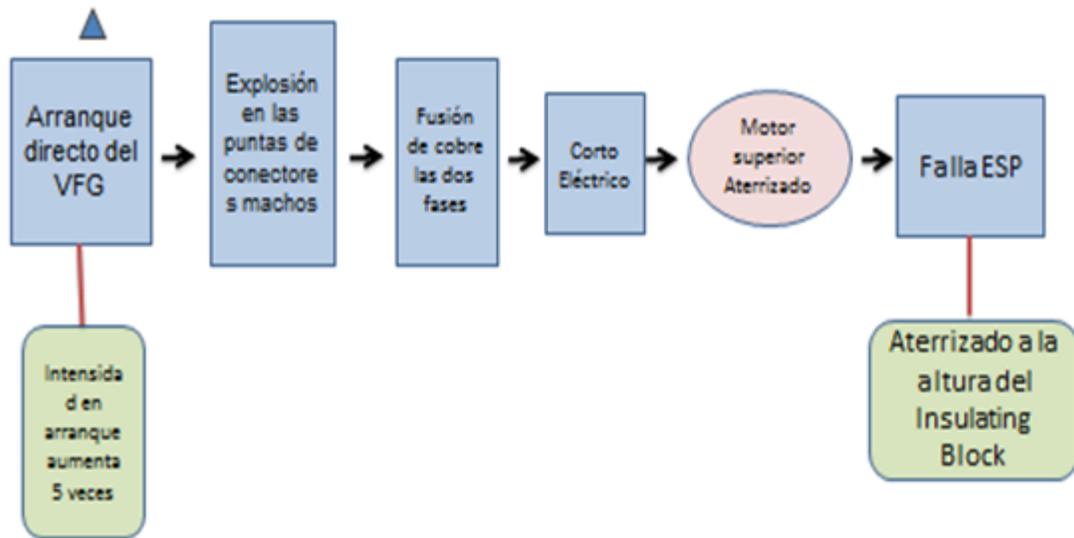
1. En la instalación en pozo, durante el acople de los motores al bajar el motor superior, pudo haber ocurrido un posible impacto del eje de este motor contra el coupling, causando que la punta del eje del motor inferior chocara contra el pin del coupling hasta doblarlo y romperlo, desplazándose hasta que el coupling quedara empotrado en este eje. Debido al golpe que sufriría el eje del motor inferior, el rodete sólido podría haber impactado contra los pedestales de la zapata de bronce, con la consecuencia de lograr desalinearse uno o más de estos. Al cambiar por unas pocas milésimas de pulgadas el alineamiento de un pedestal, se perdería la geometría necesaria para una correcta creación de la película hidrodinámica de aceite que lubricaría el conjunto de soporte axial. Con una inadecuada lubricación se crearían prematuros desgastes adhesivos severos entre la zapata de bronce y el rodete sólido incrementándose la temperatura de la zona del cabezal, por el calor generado por la fricción entre las dos superficies. El calor generado por el conjunto de soporte axial iría en aumento por la limalla producida por los desgastes, hasta afectar por sobre-temperatura el aislante de los leads del cabezal, sus terminales y bujes de teflón desencadenándose un eventual cortocircuito por arco eléctrico acompañado de una posterior explosión en la zona del cabezal.

2. En el ensamble de los motores en el taller, durante la colocación de los terminales de los leads de la base del motor superior, pudo haber quedado incorrectamente ponchado el terminal correspondiente al lead de la fase B, desatando una mala conducción o falso contacto en la unión entre los hilos del lead y el terminal, causando un punto caliente. Este falso contacto se podría simular como una resistencia variable, que además de generar calor de Joule, provocaría caídas fluctuantes de voltaje en la fase B del motor inferior, creando un desbalance de voltaje de alimentación del embobinado del estator. EL desbalance de voltaje alternaría la conexión estrella con la conexión Delta de manera intermitente, por lo tanto se generarían variaciones no completamente sinusoidales en la suma de los campos magnéticos induciendo vibraciones en el equipo. Las vibraciones podrían afectar principalmente el conjunto de soporte axial por estar el eje estabilizado con un buje de carburo de tungsteno en la base y por medio de cojinetes tipo widefoot. En medio de las vibraciones los pedestales de la zapata de bronce podrían quedar en instantes desalineados con respecto a la cara del rodete sólido, impidiendo una correcta lubricación del conjunto de soporte axial creándose prematuros desgastes adhesivos severos, incrementando así la temperatura de la zona del cabezal, por el calor generado por la fricción entre las dos superficies. El calor generado por el conjunto de soporte axial sumado al calor ocasionado por el falso contacto, podría afectar por sobre-temperatura el aislante de los leads del cabezal, sus terminales y bujes de teflón desencadenándose un eventual cortocircuito por arco eléctrico acompañado de una posterior explosión en la zona del cabezal.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.6 “Pozo Corcel C1 Run # 2”

Pozo Corcel C1 Run # 2.



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.6 “Pozo Corcel C1 Run # 2”

Fotografía 6a.Motor Superior

UPPER MOTOR

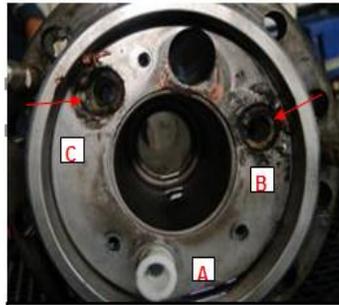


FUENTE FAR PETROMINERALES

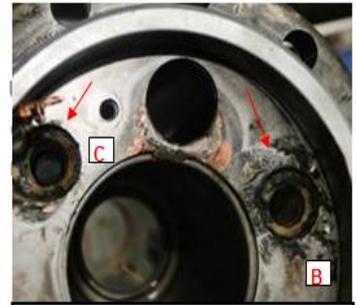
Fotografía 6b Conexión Entre Motores



Zona de conexión entre motores mostró falla en fases B y C



Bujes de teflón correspondientes a las fase B y C se fundieron



Plato retenedor con señales de cortocircuito en orificios de fases B y C

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 6c. Motor Inferior

LOWER MOTOR



Coupling de motores quedó atascado en el eje



Pin de coupling salió suelto y doblado al extraer el coupling del eje



Residuos de explosión en zona del cabezal

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 6 “Pozo Corcel C1 Run # 2”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Pines de conexión	Motor	Base	Eléctrica	Instalación	Instalación field services

FUENTE AUTORES

4.7 POZO CORCEL C2 RUN 2

4.7.1 Observaciones durante el pulling:

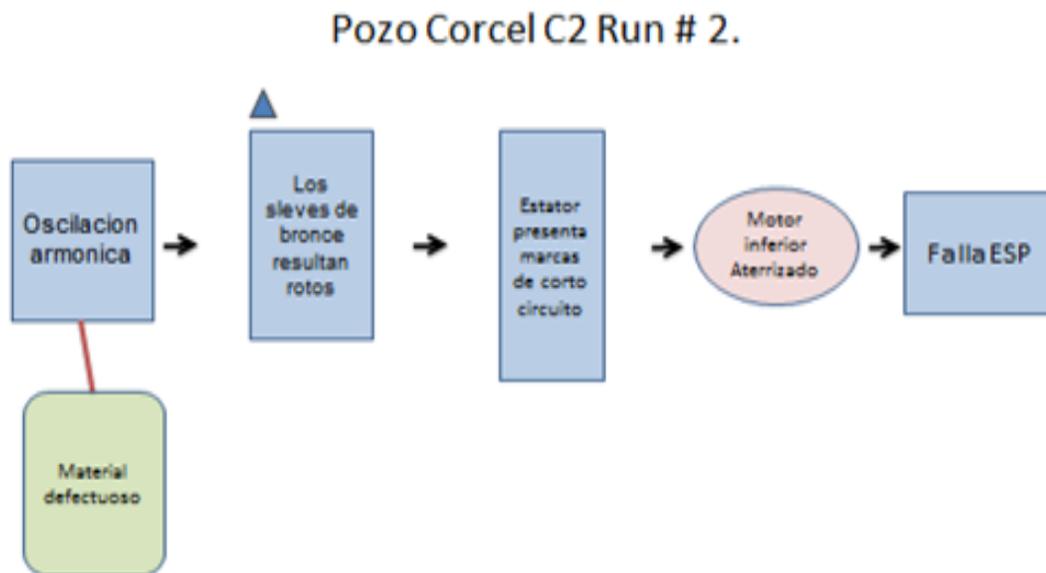
- El eje de rotación de las tres bombas se encontraba gastado, aunque la superficie externa de las bombas se encontraban en buen estado.

- El eje de rotación del cuerpo de los sellos estaba desgastado.
- El motor superior mostraba desgarramiento en el eje de rotación, pero eléctricamente el motor estaba en buenas condiciones, este estaba balanceado a 0.4 Ohm y tenía 20 G ohm de aislamiento del suelo.
- El lower motor estaba aterrizado y desbalanceado entre sus fases (AB: 0.6 Ohm, BC: 0.6 Ohm, AC: 0.7 Ohm).
- El eje de rotación presenta gran desgaste.
- El aceite del motor estaba oscuro con olor a quemado.

4.7.2 Análisis de falla: Se presentó la falla en la bomba debido al desgaste del rotor estator mientras giraba, el desgaste se da a consecuencia de una rotación excéntrica del eje debido al colapso de los sleeves de bronce los sleeves colapsaron debido a la concentración de stress radial producido por la oscilación armónica, esto sumado a la excentricidad de los sleeves causó el problema.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.7 “Pozo Corcel C2 Run # 2”

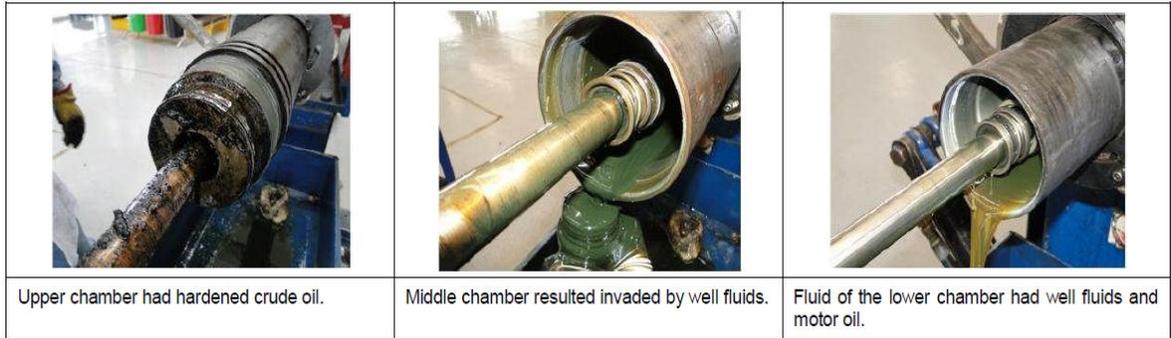


FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

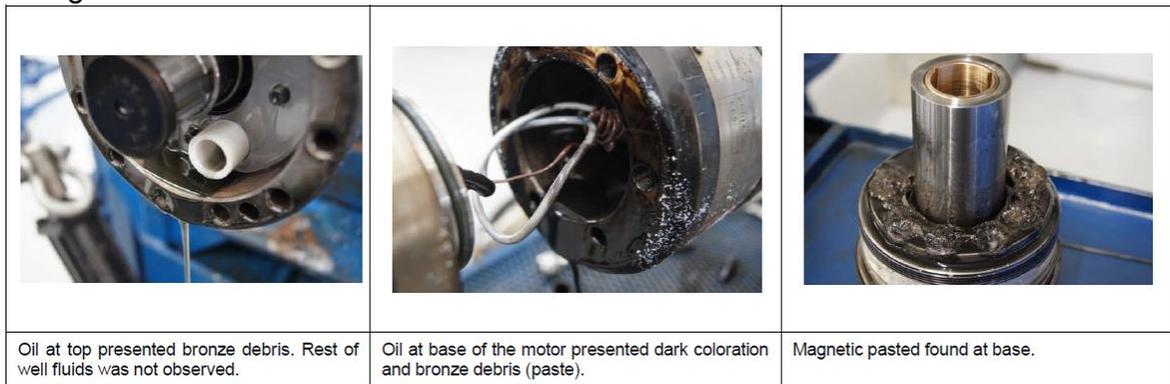
FOTOGRAFÍA N.7 “Pozo Corcel C2 Run # 2”

Fotografía 7a. Aceite En las Cámaras



FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 7b Aceite en el Motor



FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 7 “Pozo Corcel C2 Run # 2”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Instalación a tierra	Motor	Buje de bronce	Eléctrica	Diseño del sistema	manufactura

FUENTE AUTORES

4.8POZO CORCEL C3 RUN 1

4.8.1 Observaciones durante el pulling: El equipo acoplado giro libremente.

- Se realiza pulling del BES por falla eléctrica en el motor superior, que se encuentra con aceitecontaminado en el cabezal debido posiblemente a la falla eléctrica en las cercanías al I-block.

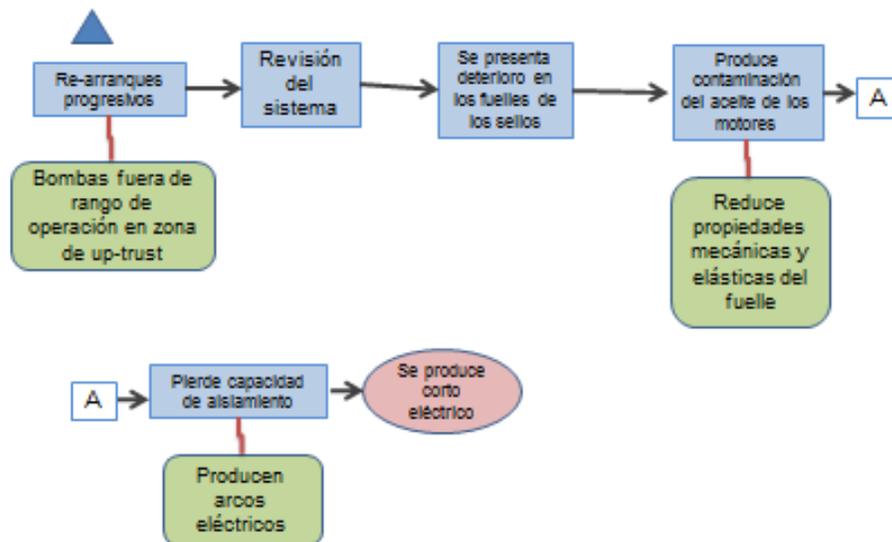
- Los motores middle y lower presentan medidas correctas entre devanados (0.3 ohmios), balanceados y con buen aislamiento fase a tierra 20000 M ohmios, con aceite trabajado y extensiones en rango.
- Las bombas giraron y desplazaron libremente, con extensiones del eje en rango.
- El Sello superior se halla contaminado en las primeras recamaras, lo cual evidencia agua de la formación dentro de sus bolsas.}
- El cable sale en su totalidad sin ningún daño eléctrico o mecánico, lo mismo que los 2 empalmes (Cable –Cable y Cable-MLE).

4.8.2 Análisis de falla: El quipo BES presento falla en el motor superior vanguard en la zona del InsulatingBlock por presentar la Fase A a tierra debido a la degradación y fusión del aislamiento de los hilos de su bobina. Las causas de este evento derivan en una múltiple serie de hipótesis que presentan su dimitido luego de los extensos análisis realizados a cada uno de sus componentes internos.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.8 “Pozo Corcel C3 Run # 1”

Corcel C3 Run # 1



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.8 “Pozo Corcel C3 Run # 1”

Fotografía 8a. Motor Superior

MOTOR SUPERIOR



FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 8b Quemaduras Debido al Corto



FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 8 “Pozo Corcel C3 Run # 1”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Instalación a tierra	Motor	Estator	Eléctrica	Desconocida	Desconocida

FUENTE AUTORES

4.9 POZO CORCEL C3 RUN 2

4.9.1 Observaciones durante el pulling

La información acerca del pulling de este pozo no fue suministrada.

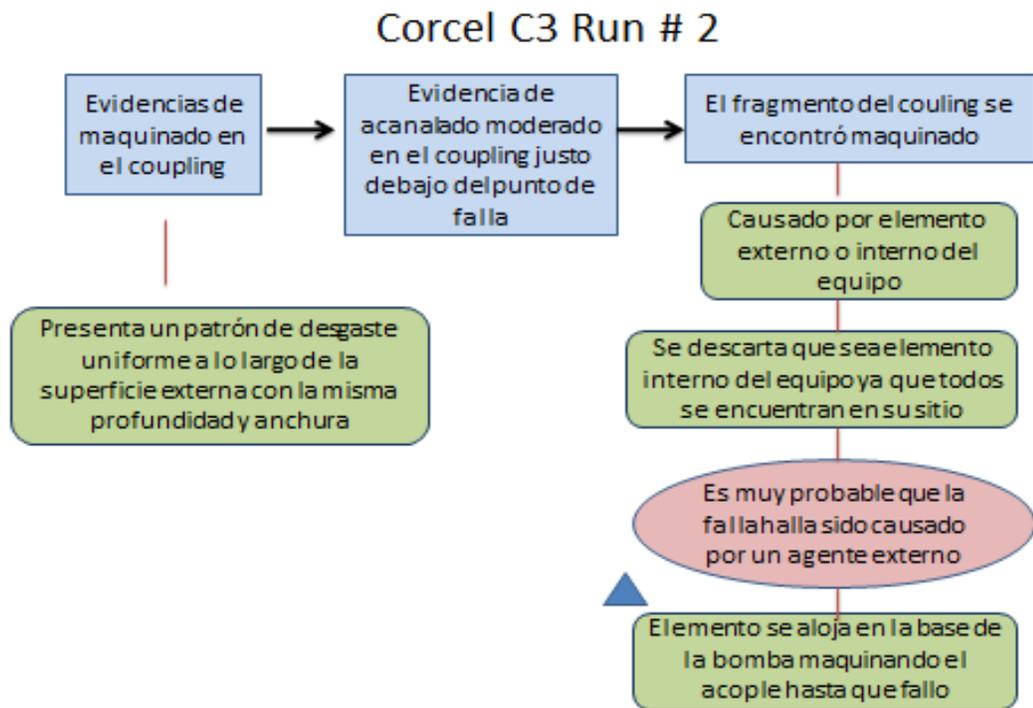
4.9.2 Análisis de falla

La ruptura del coupling Intake - Bomba es la causa de parada de la unidad BES.

Evidencias de maquinado fueron encontradas en el coupling. Estas señales fueron determinadas en el coupling por que se observa un patrón de desgaste uniforme a lo largo de la superficie externa con la misma profundidad y ancho. Evidencia de acanalado moderado en el couplings observada justo debajo del punto de falla (hacia el Intake). También, el fragmento recuperado del coupling presento señales severas de haber sido maquinado. Esto pudo haber sido causado por un elemento externo o interno del equipo. Se descarta la opción de los elementos internos ya que todos los elementos de la unidad BES fueron encontrados de acuerdo a planos y especificaciones. Es por esto, que es muy probable que la falla haya sido debido a un agente externo que se alojó en la base de la bomba maquinando permanentemente el acople del equipo hasta que falló.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.9 “Pozo Corcel C3 Run # 2”



A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.9 “Pozo Corcel C3 Run # 2”

Fotografía 9a. Ejey Coupling Afectados



El eje presento marcas hacia el lado de la ruptura del coupling



Punto de ruptura del coupling



Una de las partes del coupling

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 9b. Sello Inferior
SECCION SELLO INFERIOR



Estrias del eje en buenas condiciones



Evidencia de agua en la camara superior - Exterior de la bolsa



La bolsa de la camara superior no presento ninguna marca de expansion

FUENTE PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 9 “Pozo Corcel C3 Run # 2”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Instalación a tierra	Intake	Coupling Intake-bomba	Mecánica	Manufactura	Elemento extraño en BES

4.10 CORCEL C3 RUN 3

4.10.1 Observaciones durante el pulling: El Equipo de fondo salió por instalación a tierra (posible corto eléctrico).

- El Motor superior se encontró aterrizado (falla eléctrica).
- El Conjunto de bombas salieron con giro libre, el housing sin señales de arrastre, ni daño mecánico.
- El Intake igualmente se halló con giro libre.
- El Sello superior estaba con todas las cámaras contaminadas con fluido de pozo, además presentó giro libre.
- El Sello inferior se halló con aceite contaminado en cámara superior y aceite oscuro en las cámaras inferiores proveniente de los motores.
- El Motor superior salió eléctricamente con resistencia entre fases en 0 Ohm y sin aislamiento a tierra. Éste Presentó giro libre y aceite dieléctrico oscuro en su interior.
- Los Motores medio e inferior presentaron giro, y se encontraron eléctricamente balanceados entre fases en 0.2 Ohm y 7 GOhm de aislamiento, también con aceite oscuro en su interior.
- El Cable de potencia y el MLE salieron en buenas condiciones tanto mecánicas como eléctricas.

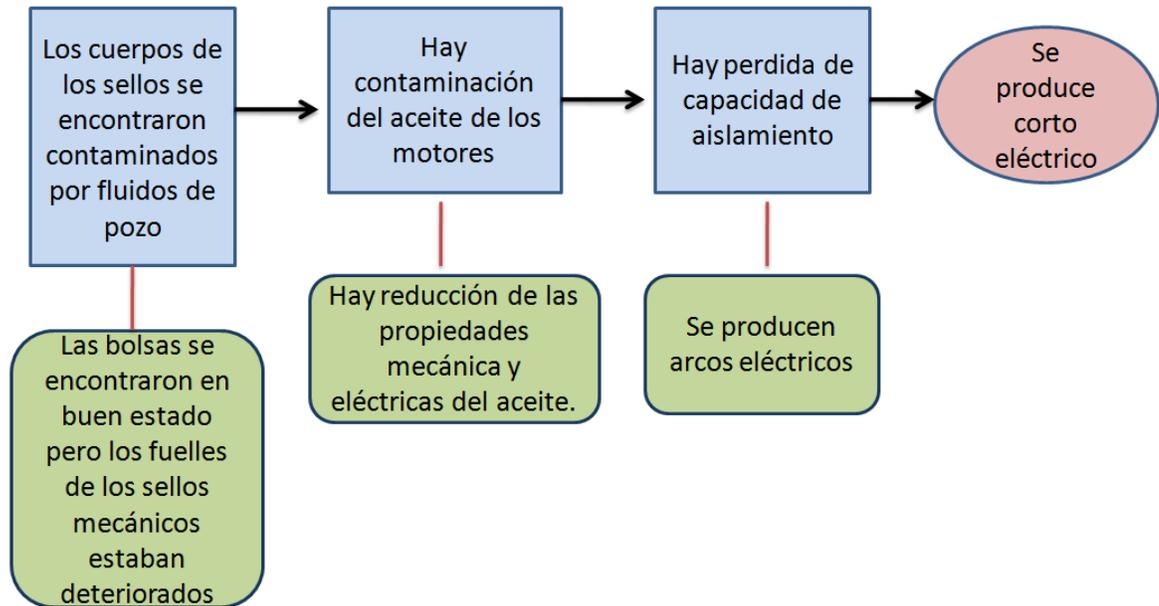
4.10.2 Análisis de falla: Es importante tener en cuenta que el equipo tuvo 37 re-arranques en su vida de operación. Además las bombas estuvieron operando por fuera del rango de operación hacia la zona de Up-thrust.

Ambos cuerpos de sello se encontraron con todas sus cámaras contaminadas por fluidos de pozo, con sus bolsas en buen estado de operación, pero con sus sellos mecánicos con deterioro principalmente en los fuelles. Esto provocó la contaminación del aceite de los motores, reduciendo las propiedades mecánicas y eléctricas del aceite. Al reducirse la rigidez dieléctrica del aceite, este pierde la capacidad de aislamiento necesaria para evitar arcos eléctricos o puentes entre dos puntos con alta diferencia de potencial eléctrico. En este evento particular, hubo un cortocircuito entre dos fases dentro del Isolating-block, donde la distancia entre fases es mínima y el aceite contaminado sirvió como puente eléctrico.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.10 “Pozo Corcel C3 Run 3”

Corcel C3 Run 3



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.10 “Pozo Corcel C3 Run 3”

Fotografía 10a. Sello Superior



FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 10b. Fluidos Contaminantes



Tubo guía saturado de sólidos inorgánicos del fluido



Fluidos de pozo contaminando cámara central



Sólidos inorgánicos de pozo adheridos a la guía superior

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 10c. Sólidos en bolsa Aflas y Sellos Mecánicos



Bolsa Aflas de cámara central en buen estado mecánico



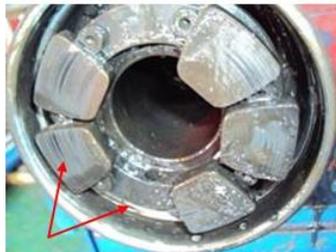
Sólidos encontrados al interior de la bolsa central



Sello mecánico superior con sólidos incrustados en su fuelle

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 10d. Desgaste de Zapata



Sin dos de sus pedestales estaba la zapata de up-thrust



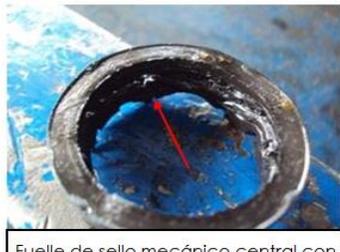
Con leves desgastes se encontraron el conjunto de empuje en up-thrust



Sello mecánico central contaminado y deteriorado

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 10e. Fuelles, Bujes Y Eje Del BES



Fuelle de sello mecánico central con señales visibles de deterioro



Bujes de carburo de tungsteno en buenas condiciones visuales



Eje con crudo adherido y leves desgastes radiales

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 10 “Pozo Corcel C3 Run 3”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Instalación a tierra	Sello	Sello mecánico	Eléctrica	Diseño del sistema	Incompatibilidad material del sello con fluido de pozo

FUENTE AUTORES

4.11 POZO CORCEL D1 RUN 1

4.11.1 Observaciones durante el pulling: Éste es llevado a cabo debido a una falla eléctrica.

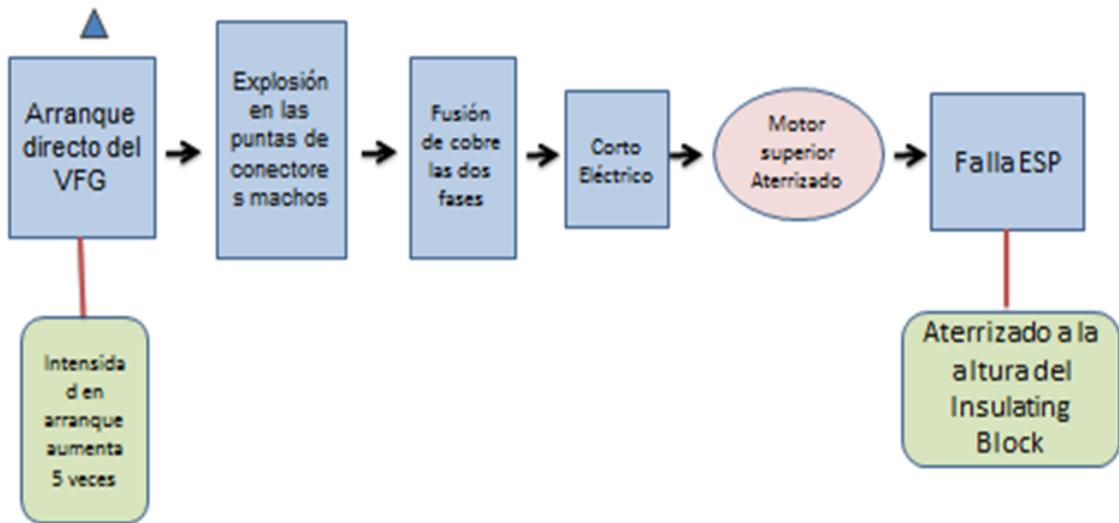
- Las bombas se encuentran en buenas condiciones mecánicas: hay rotación normal del eje así como buen movimiento axial.
- El sello tienen todas sus cámaras con aceite quemado y desechos (escombros), el eje del motor no puede rotar; el motor también se ha encontrado desbalanceado y aterrizado.
- El motor bajo, muestra buenas lecturas eléctricas, pero tiene aceite quemado con presencia de desechos (escombros) coloreados de gris (rucio).
- El sensor de fondo está en buenas condiciones pero es reemplazado debido a presentar aceite contaminado.
- El cable de poder está en buenas condiciones.

4.11.2 Análisis de falla: Es de observar que el equipo tuvo varias paradas relacionadas con problemas de filtros. Se observó que el motor superior estaba aterrizado, y el rotor bearing se atascó debido a desgarre interno, los re-arranques y la calidad de los materiales permitieron la entrada de materiales al motor.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.11 "Pozo Corcel D1 Run # 1"

Pozo Corcel D1 Run # 1.



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.11 "Pozo Corcel D1 Run # 1"

Fotografía 11a. Bolsa Superior Y Evidencia De Contaminantes en la Cámara



Upper bag is torn and with well fluid contamination



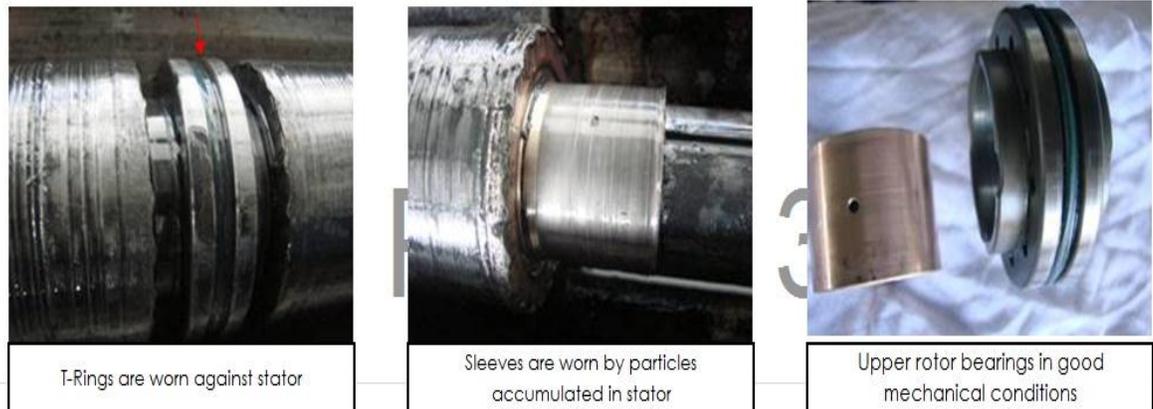
Metallic debris present in all chambers



Water is evidenced in medium chamber due to bag's failure

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 11b. Anillos Y Sleeves Desgastados



FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 11 “Pozo Corcel D1 Run # 1”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Instalación a tierra	Sello	Up-trust bearing	Eléctrica	Manufactura	Control de calidad

FUENTE AUTORES

4.12 POZO CORCEL D1 RUN 3

4.12.1 Observaciones durante el pulling: El Equipo de fondo se saca por instalación a tierra.

- El conjunto de bombas salió en buen estado general, con extensiones en rango, giro libre del eje y juego radial normal, no se observó arrastre ni daño mecánico en los housings de ninguna bomba.
- El Intake se encontró en condiciones normales.
- El Tándem de sellos vanguard se halló con extensión del eje en rango, giro libre y con aceite dieléctrico contaminado en la totalidad de sus cámaras.
- El motor superior salió desbalanceado entre fases con las siguientes medidas AB: 0.2 Ohm; BC: 0.1 Ohm; CA: 0.2 Ohm y con 600 Ohm de aislamiento a tierra y con aceite dieléctrico contaminado. Presentó giro normal y extensiones en rango.
- Los Motores middle y lower se encontraron eléctricamente desbalanceados entre fases y con 3 GOhm de aislamiento fase-tierra en los dos casos,

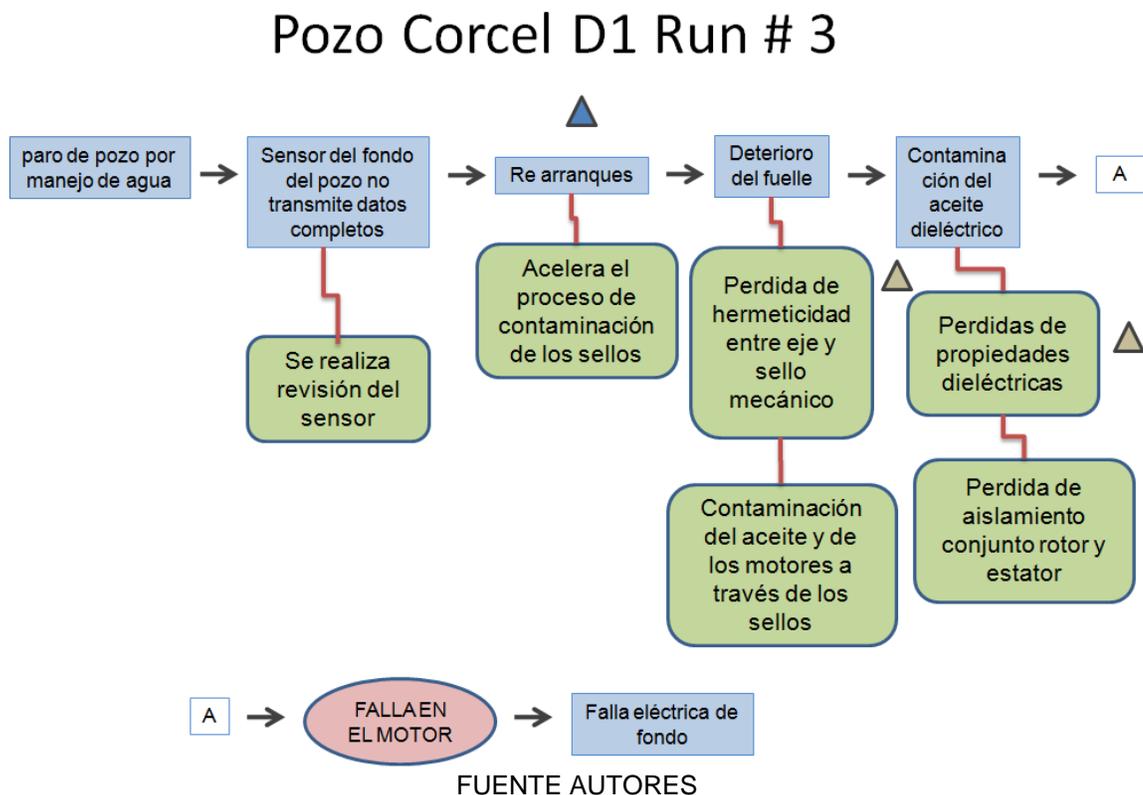
Presentaron giro normal, extensiones en rango y aceite dieléctrico igualmente contaminado.

- El Cable de potencia sale entorchado, sin daño en la coraza y con buenas mediadas eléctricas

4.12.2 Análisis de falla: Se presentó falla eléctrica en el motor superior. Se ubicó un corto circuito puntual a la altura del rotor #8. Este corto fue ocasionado debido a que el aceite dieléctrico de los motores se contaminó con fluido de pozo, lo que causó la pérdida de sus propiedades dieléctricas y la pérdida del aislamiento entre el conjunto de rotores y el estator. La contaminación del aceite de los motores ocurrió a través de los sellos. Durante el desensamble de los mismos se encontraron todos los sellos mecánicos con el fuelle de AFLAS completamente deteriorado. Al estar el fuelle deteriorado se pierde la hermeticidad que debe existir entre el eje y el sello mecánico, de esta manera se da vía libre a la contaminación de todas las cámaras del sello. Según la data suministrada por PETROMINERALES del historial de start-stops, el equipo venía trabajando de forma intermitente, lo cual pudo haber acelerado el proceso de contaminación de los sellos.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.12 “Pozo Corcel D1 Run # 3”



A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.12 “Pozo Corcel D1 Run # 3”

Fotografía 12a. Cámara, Bolsa Y Sello Mecánico En Buenas Condiciones



Aceite contaminado con fluido de pozo en cámara superior



Bolsa AFLAS superior en buenas condiciones mecánicas



Sello mecánico superior con fuelle AFLAS dañado

FUENTE FAR PETROMINERALES

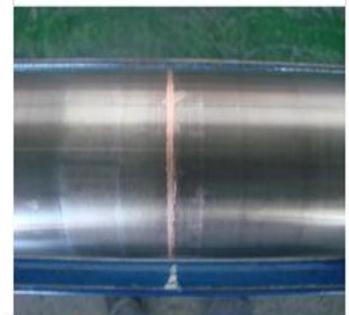
Fotografía 12b. Muestras De Corto Eléctrico



Aceite dieléctrico contaminado en cabezal del motor



Leads del cabezal con señales de calentamiento (Cinta Kapton oscurecida)



Corto eléctrico localizado en el rotor #8

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 12 “Pozo Corcel D1 Run # 3”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Instalación a tierra	Sello	Sello mecánico	Eléctrica	Diseño del sistema	Incompatibilidad material del sello con fluido de pozo

FUENTE AUTORES

4.13. POZO CORCEL E1 RUN 1

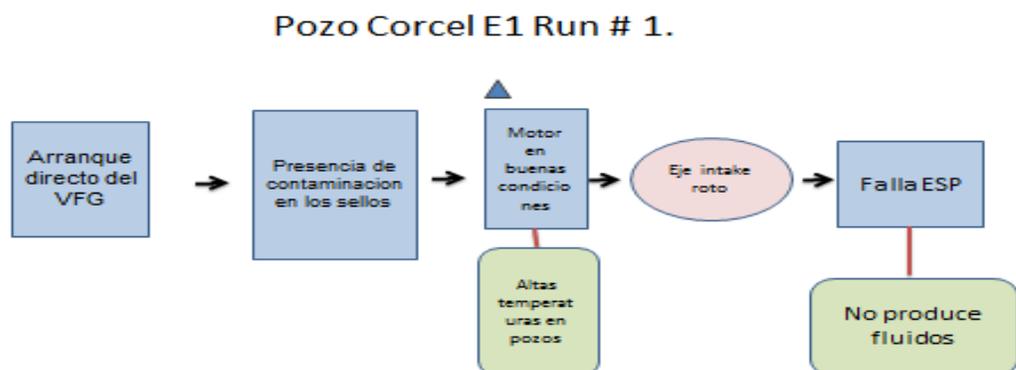
4.13.1 Observaciones durante el pulling:

- El equipo fue retirado afuera porque no estaba supliendo (llevando) líquidos a la superficie. La prueba de rotación fue desarrollada en el quipo pero este presentaba restricciones (de giro). Cuando las bombas fueron desensambladas estas no rotaban y no tenían ningún movimiento axial.
- El eje del Intake estaba roto en la parte superior, hacia la cabeza del Intake.
- Los sellos tienen unos niveles de contaminación normal en la primera cámara y en la otra cámara muestra aceite limpio.
- Los motores fueron encontrados en buenas condiciones mecánicas y eléctricas.
- Hay evidencia depósitos de carbonato en el Intake y en el equipo de coupling.
- El eje del Intake está roto en la cabeza del Intake debido a la torsión.
- El eje presenta estrías donde la torsión excedió la resistencia del material y produce una deformación elástica (es decir el material no regresa a su forma).

4.13.2 Análisis de falla: La bomba presenta daño mecánico y daño en los impellers esto se produce por el movimiento excéntrico que genera continuos impactos con los sleeves de carburo de tungsteno causando el fisuramiento en su estructura.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.13 “Pozo Corcel E1 Run # 1”



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.13 “Pozo Corcel E1 Run # 1”

Fotografía 13a. Muestra de Daños



Diffusers' Bore presented severe wear against the impellers' hub



Radial Scratches in the bottom diffuser by friction with the skirt



Broken Flanged sleeves due to impacts

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 13b. Daños Internos



Internal damage of impellers in the keyway area



Damage in the keyway by high torque



Lateral efforts in the keyway cause expansion of hub

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 13 “Pozo Corcel E1 Run # 1”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Baja producción	Bomba	Eje	Mecánica	Transporte	Almacena Miento-transporte

FUENTE AUTORES

4.14. POZO CORCEL E1 RUN 2

4.14.1 Observaciones durante el pulling: el Equipo BES se saca por presentar baja producción por posible eje roto.

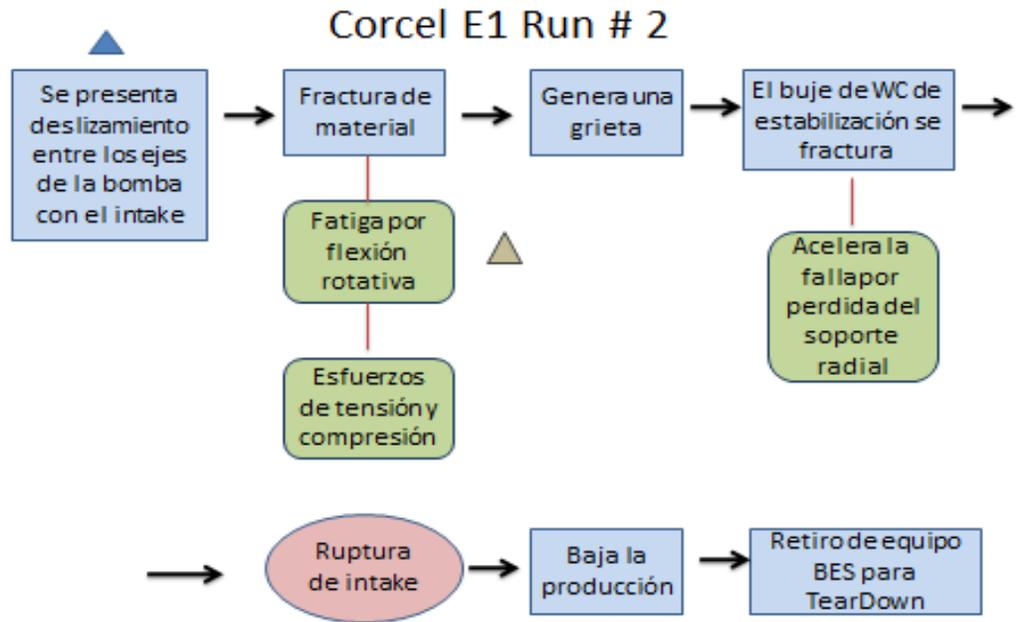
- El equipo presenta giro restringido estando acoplado en boca de pozo.
- Al desacoplar el equipo se encuentran las bombas con giro libre y extensiones en rango.
- El intake es hallado con el eje partido en el área de conexión con la bomba lower.
- Los sellos se observan en condiciones normales de operación, la primera cámara contaminada y las restantes con aceite trabajado.
- Los Motores se encuentran en buenas condiciones eléctricas y mecánicas.
- El Cable de potencia se retira en buenas condiciones físicas y eléctricas.

4.14.2 Análisis de falla: El Equipo BES presenta falla por ruptura de eje del intake, cuyo material era de Inconel 718, con propagación de grieta a 45 grados con respecto al eje axial, a la altura de la estría superior que acopla con la bomba, específicamente en el borde del coupling que efectuó las veces de concentrador de esfuerzo.

El mecanismo de fractura en este material es de fatiga por flexión rotativa, que ocasiona esfuerzos de tensión y compresión en cada punto de la periferia del eje por cada revolución, afectando de manera regular su superficie y dando la posibilidad de inicio de una grieta en el sentido radial por cualquier punto de la periferia. Estos esfuerzos transversales al eje, son ocasionados posiblemente al desalineamiento entre los ejes de la bomba con el intake, debido a la pérdida del paralelismo entre caras del flange de la base de la bomba con el cabezal del intake, por la condición de intromisión del gasket. Adicionalmente a la rotura del eje, el buje de WC de estabilización, se fractura por el impacto que le genera el detrimento en el balance del sistema, acelerando por la pérdida del soporte radial la falla.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.14 “Pozo Corcel E1 Run # 2”



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.14 “Pozo Corcel E1 Run # 2”

Fotografía 14a. Condiciones del Eje



FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 14b. Daños a Causa de Fatiga



FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 14 “Pozo Corcel E1 Run # 2”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Baja producción	Bomba	Eje	Mecánica	Instalación	Instalación field services

FUENTE AUTORES

4.15. POZO CORCEL E1 RUN 3

4.15.1 Observaciones durante el pulling: el Equipo de fondo salió por presentar falla eléctrica.

- El Motor inferior se encontró aterrizado (falla eléctrica).
- El Conjunto de bombas salieron con giro libre, además el housing se encontraba sin señales de arrastre, ni daño mecánico y no presentaron juego radial.
- El Intake igualmente se halló con giro libre.
- El Sello superior estaba con todas las cámaras contaminadas con fluido de pozo, presentó giro libre y extensiones fuera de rango.
- El Sello inferior se halló con aceite contaminado en cámara superior y aceite oscuro en las cámaras inferiores proveniente de los motores.
- El Motor superior salió eléctricamente balanceado entre fases en 0.4 Ohm y con 1 GOhm de aislamiento (Bajo aislamiento). Presentó giro libre y aceite dieléctrico oscurecido en su interior.

- El Motor inferior no presentó giro, y se encontró eléctricamente desbalanceado y aterrizado.
- El Cable de potencia salió en buenas condiciones tanto mecánicas como eléctricas.

4.15.2 Análisis de falla: Antes de analizar la falla es importante tener en cuenta que el equipo tuvo 30 re-arranques durante su operación, los motores estuvieron operando al 98% de su carga nominal y, 26 horas antes de la falla, se aumentó la frecuencia de 44Hz a 55 Hz (660 rpm) en un intervalo de 10 minutos.

El motor inferior presentó falla eléctrica generada por contacto directo del bearing #16 de cabeza a base contra las laminillas del estator que provocó un desgaste de estas y del aislamiento del embobinado, dejando descubiertos los conductores eléctricos (espiras) del estator, que finalmente hicieron contacto físico con este bearing desencadenando un cortocircuito y una posterior explosión en la zona. Tener en cuenta que los bearings están diseñados para permanecer fijos al estator soportando radialmente el conjunto rotórico, pero el bearing #16 giró solidariamente con el conjunto rotórico. Posiblemente este evento fue influenciado por pérdida de lubricación del aceite por altas temperaturas, como se evidenció en los leads y la coloración del eje del motor superior; asistido por las partículas metálicas resultantes del desgaste de las zapatas de los sellos; y por vibraciones que dejaron signos de arrastre en los rotores #15, #16 y #17 que desprendió más cantidad de limalla y aceleró el desgaste progresivo dentro del motor.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.15 “Pozo Corcel E1 Run # 3”



FUENTE AUTORES

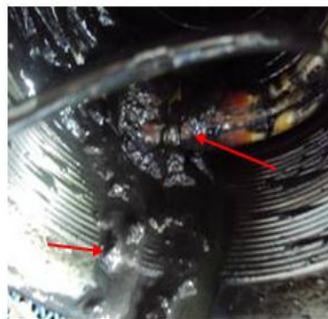
A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.15 “Pozo Corcel E1 Run # 3”

Fotografía 15a. Motor Inferior
LOWER MOTOR



Magneto en base con limaduras metálicas



Conexión estrella en base sin novedades, presencia de residuos de epóxico en zona



Rotores en su superficie muestran que el aceite estaba oscuro, con apariencia de quemado

FUENTE FAR PETROMINERALES

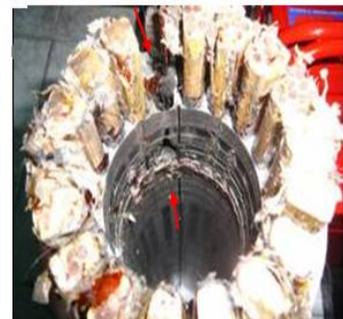
Fotografía 15b. Daños Causados Por La Falla



Conductores de fase del mismo slot en estator rotos por cortocircuito



Slot presentó sus conductores rotos como consecuencia del cortocircuito



Zona más crítica de falla en estator coincide con slot con conductores rotos

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 15 “Pozo Corcel E1 Run # 3”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Instalación a tierra	Motor	Balinera	Eléctrica	Manufactura	Diseñomecánico

FUENTE AUTORES

4.16. POZO CORCEL E1st RUN 4

4.16.1 Observaciones durante el pulling: Éste se realizó debido a que la bomba presentó instalación a tierra.

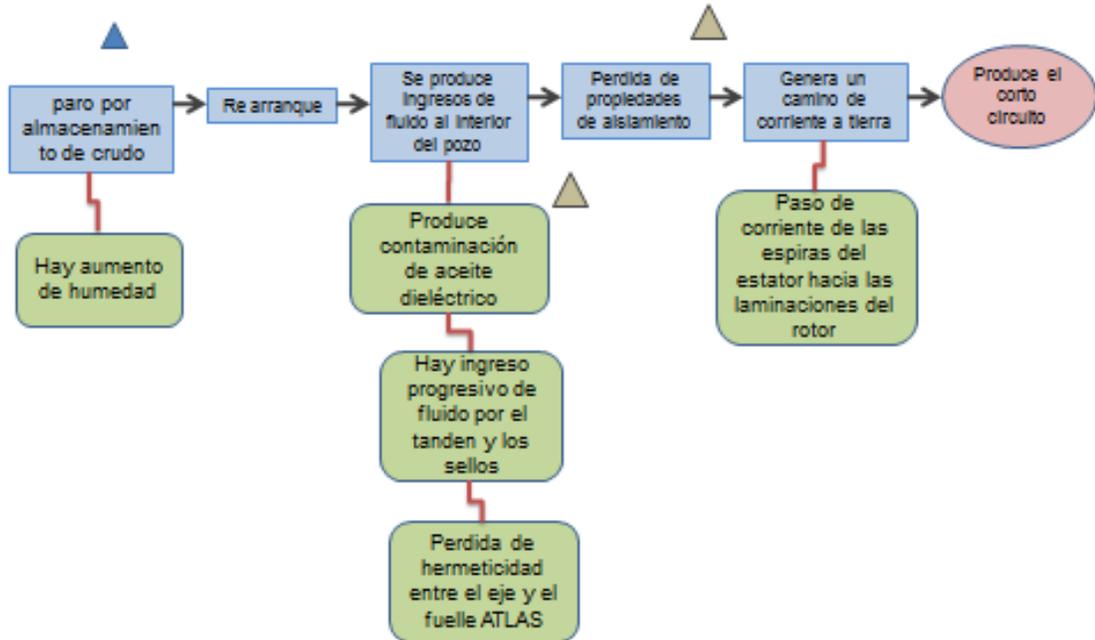
- Los tres cuerpos de bombas se encontraron externamente en buenas condiciones, con giro libre del eje y sin presentar juego radial.
- El Intake se halló igualmente en buen estado, con orificios de admisión en buenas condiciones y con giro libre.
- El tándem de sellos presentó giro libre y extensión del eje en rango en el cuerpo superior.
- Al desacoplar el tándem de sellos del motor superior se encontró presencia de aceite oscurecido.
- El motor superior no presentó giro y se encontró eléctricamente desbalanceado entre fases con medidas AB: 0.2 Ohm, BC: 0.2 Ohm, AC: 0.3 Ohm y con bajo aislamiento fase-tierra.
- El motor central se encontró con giro libre y extensión del eje en rango, eléctricamente balanceado entre fases en 0.2 Ohm con 3 GOhm de aislamiento fase tierra.
- El motor inferior se encontró eléctricamente balanceado entre fases en 0.4 Ohm y con 2 GOhm de aislamiento fase-tierra.

4.16.2 Análisis de falla: El motor superior se encontró con desbalance entre fases y sin aislamiento a tierra. El aceite dieléctrico se encontró con presencia evidente de agua/humedad. No se encontraron desgastes mecánicos significativos en los componentes internos, ni señales de arrastre contra el estator en rotores y cojinetes suficientes como para desencadenar en una falla eléctrica. Se hallaron señales de cortocircuito por arco eléctrico (cobre fundido) en el rotor #13 contado de cabezal a base. Al ingresar fluidos de pozo al interior del motor, se produjo una contaminación del aceite dieléctrico, ocasionando que este perdiera sus propiedades de aislamiento. Por esa razón, se pudo generar un camino de corriente a tierra asistido por la humedad y por lo tanto un paso de corriente de las espiras del estator hacia las laminaciones y posteriormente hacia el rotor provocando el aterrizamiento del estator. De acuerdo a lo encontrado en el tándem de sellos y sus respectivos sellos mecánicos, el fluido de pozo fue ingresando progresivamente a las cámaras de los sellos, al perderse la hermeticidad entre el eje con el fuelle AFLAS, el cual se encontró altamente deteriorado en la totalidad de los sellos mecánicos. Debido a lo anterior y al haber mucha menor restricción al recorrido del fluido de pozo al interior de los sellos, la falla ocurrió de manera prematura.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.16 “Pozo Corcel E1ST Run # 4”

Corcel E1ST #4



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.16 “Pozo Corcel E1ST Run # 4”

Fotografía 16a. Muestras de Falla



Leve capa de posible emulsión agua-aceite dieléctrico sobre superficie de rotores



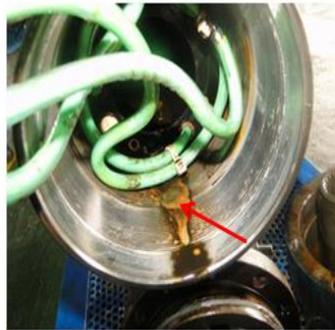
Señal de corto circuito ubicada en el rotor #13 contado de cabezal a base



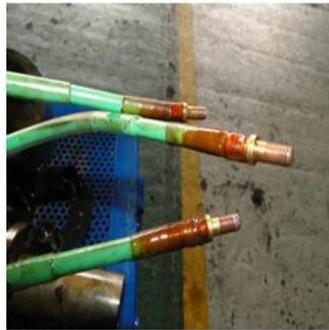
Conjunto de rotores y cojinetes sin señales de desgaste a considerar

FUENTE FAR PETROMINERALES

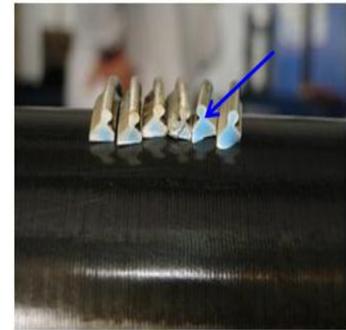
Fotografía 16b. Muestras Daños Causados Por La Falla



Presencia de agua al interior del motor



Leads de la base en buenas condiciones



T-ring con coloración azul en el interior indicando alta temperatura superficial (condición normal)

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 16 “Pozo Corcel E1ST Run # 4”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Instalación a tierra	Sello	Sello mecánico	Eléctrica	Diseño del sistema	Incompatibilidad del material del sello con fluido de pozo

FUENTE AUTORES

4.17. POZO BOA 1 RUN 2

4.17.1 Observaciones durante el pulling: el Equipo BES de fondo salió por instalación a tierra (posible corto eléctrico).

- El Motor inferior se encontró aterrizado. Aunque el Conjunto de bombas salieron con giro libre.
- El Housing se encontraba sin señales de arrastre y no presenta juego radial.
- El Intake se halló con giro normal y orificios de admisión sin taponamiento por sólidos.
- El Sello superior estaba con todas las cámaras contaminadas con fluido de pozo, presentó giro libre y extensión dentro de rango.
- El Sello inferior se halló con aceite contaminado en cámara superior y central y aceite trabajado y oscuro en la cámara inferior proveniente de los motores.

- El Motor superior salió eléctricamente balanceado entre fases en 0.4 Ohm y con 10 G Ohm de aislamiento. Presentó giro libre y aceite dieléctrico trabajado y levemente oscurecido en su interior.
- El Motor inferior no presentó giro, y se encontró eléctricamente balanceado en 0.3 Ohm y aterrizado.
- El Cable de potencia salió en buenas condiciones tanto mecánicas como eléctricas.

4.17.2 Análisis de falla: Es de resaltar que el equipo tuvo 26 re-arranques en su vida de operación, los motores estuvieron operando en promedio al 95% de su carga nominal, y en el último mes trabajaron a 63,5 Hz, con una temperatura en su interior medida en 325 °F. Las bombas estuvieron trabajando por fuera de su rango de operación, con un leve up-thrust.

El motor inferior presentó falla eléctrica generada por contacto directo del bearing #1 de cabeza a base contra las laminillas del estator que provocó un desgaste de estas y del aislamiento del embobinado, dejando descubiertos los conductores eléctricos (espiras) del estator, que finalmente hicieron contacto físico con este bearing desencadenando un cortocircuito y una posterior explosión en la zona. Tener en cuenta que los bearings están diseñados para permanecer fijos al estator soportando radialmente el conjunto rotórico, pero el bearing #1 giró solidariamente con el conjunto rotórico. Posiblemente este evento fue influenciado por pérdida de lubricación del aceite por altas temperaturas, como se evidenció en la cinta Kapton oscurecida y cristalizada en los leads.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.17 “Pozo Boa 1 Run # 2”



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.17 “Pozo Boa 1 Run # 2”

Fotografía 17a. Sello Superior

UPPER SEAL 31G-106111



Agua en el anular de la cámara superior



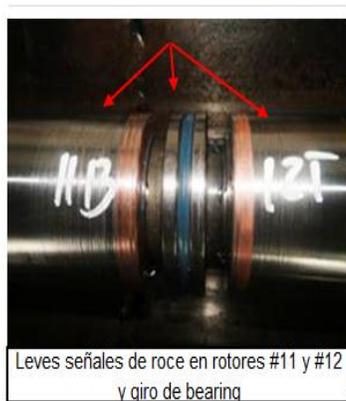
Se encontró bolsa aflas rota



Sello mecánico PFS en buen estado de su cara y fuelle

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 17b. Señales de Corto Circuito



Leves señales de roce en rotores #11 y #12 y giro de bearing



Señales de cortocircuito en estator cerca a la zona de falla



Evidente arrastre en laminillas del estator correspondiente a la zona de cortocircuito

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 17 “Pozo Boa 1 Run # 2”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Instalación a tierra	Motor	Balinera	Eléctrica	manufactura	Diseño mecánico

FUENTE AUTORES

4.18. POZO BOA 2 RUN 1

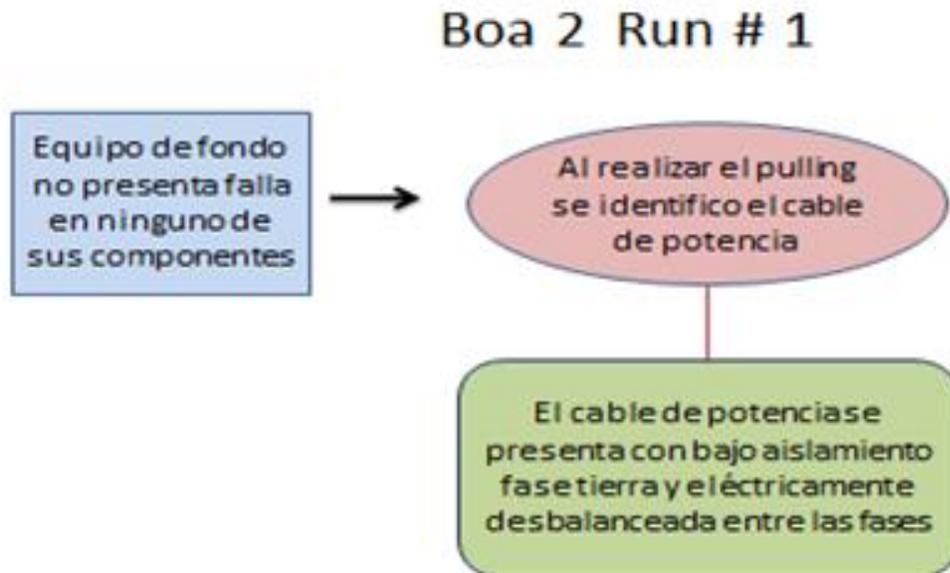
4.18.1 Observaciones durante el pulling: El equipo de fondo fue sacado debido a que se presentó instalación a tierra (posible corto circuito).

- Los cuatro cuerpos de bombas se encontraron con giro libre.
- El tándem de sellos se encontró igualmente con giro libre y extensión del eje en rango en el cuerpo superior.
- El motor superior se encontró eléctricamente balanceado entre fases en 0.5 Ohm, 8 GOhm de aislamiento fase-tierra, giro libre y extensión del eje en rango.
- El motor inferior se encontró igualmente balanceado entre fases en 0.4 Ohm, 10 GOhm de aislamiento fase-tierra, giro libre y extensión del eje en rango.
- El cable de potencia presentó bajo aislamiento y desbalance eléctrico entre fases.
- Quedaron 7 súperbandas en fondo.

4.18.2 Análisis de falla: El equipo de fondo no presentó falla de ninguno de sus componentes, durante el pulling se identificó la falla eléctrica en el cable de potencia. Para el momento del desensamble del equipo no se conto con el cable para realizar su inspección.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.18 “Pozo Boa 2 Run # 1”



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.18 “Pozo Boa 2 Run # 1”

Fotografía 18a. Bomba Inferior

LOWER PUMP



Difusor de la zona del cabezal sin obstrucción en trayectorias de flujo



Sólido inorgánico sobre superficie interna (área de flujo) de la base



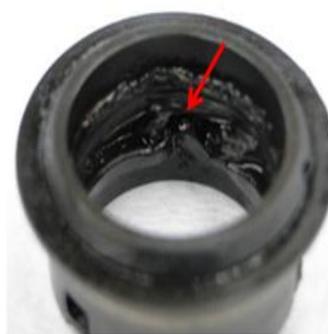
Presencia de sólido inorgánico sobre arandela de empuje descendente de impulsor. Presentó reacción al HCl

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 18b. Daños En Los Aflas



Bolsa AFLAS superior con ruptura longitudinal



Fuelle AFLAS de sello mecánico superior con daño



Resorte de sello mecánico superior fracturado

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 18c. Daños en los Difusores



Difusores con sólidos arcillosos en trayectorias de flujo



Sólidos arcillosos depositados sobre superficies de difusores



Detalle del sólido encontrado en las etapas

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 18 “Pozo Boa 2 Run # 1”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Instalación a tierra	Cable	cable	Eléctrica	Cable	Cable

FUENTE AUTORES

4.19. POZO CANDELILLA 2 RUN 1

4.19.1 Observaciones durante el pulling: el Equipo BES de fondo salió por instalación a tierra.

- El BIW del empaque hidráulico instalado a 3034 ft se encontró con bajo aislamiento (20 k ohm).
- Luego de ser desacopladas, las bombas salieron con giro normal, extensiones en rango, sin juego radial.
- El intake se halló con giro normal y orificios de admisión sin deformaciones.
- El Tándem de sellos se encontró con giro suave y extensión dentro del rango.
- Todas las cámaras del cuerpo superior se encontraron contaminadas por fluidos de pozo.
- El Cuerpo inferior con cámara superior con aceite contaminado y cámara central e inferior con aceite trabajado.

- Los Motores se hallaron con giro normal, con el aceite trabajado al interior. El motor superior se halló balanceado entre fases en 0.5 Ohm y con 10 G ohm de aislamiento de fases a tierra.
- El motor inferior se encontró igualmente balanceado entre fases en 0.5 Ohm y con 10 G ohm de aislamiento de fases a tierra.
- El BIW de la cebolla, cable de potencia y MLE se encontraron en condiciones físicas y eléctricas normales.

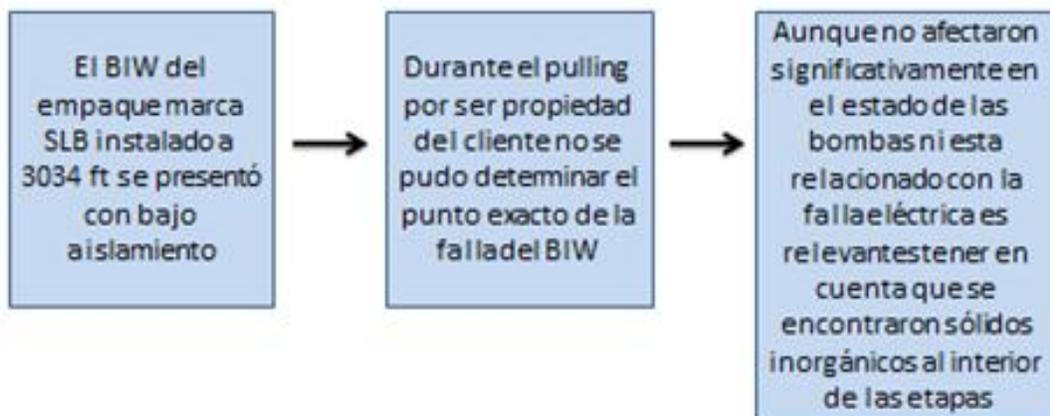
4.19.2 Análisis de falla: el BIW del empaque hidráulico instalado a 3034 ft se encontró con bajo aislamiento (20 k ohm). Durante el pulling, por ser de propiedad del cliente no se pudo determinar el punto exacto de la falla del BIW.

La evidencia de la falla quedó en la locación del cliente.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.19 “Pozo Candelilla 2 Run # 1”

Candelilla 2 Run # 1



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N. 19 “Pozo Candelilla 2 Run # 1”

Fotografía 19a. Revisión Cámara, Bolsa Aflas Y Fuelle



Agua al interior de cámara central



Ruptura por la costura de bolsa Aflas central



Fuelle de sello mecánico central con desgastes moderados

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 19b. Problemas Causados por los Sólidos



Cámara inferior con aceite contaminado



Sólidos laminares al exterior e interior de sello mecánico inferior



Filtro de bearing support saturado de sólidos inorgánicos

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 19 “Pozo Candelilla 2 Run # 1”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Conector BIW	BIW	BIW-Lower-Hunger	Eléctrica	BIW Hanger	BIW Hunger

FUENTE AUTORES

4.20. POZO CANDELILLA 2 RUN 3

4.20.1 Observaciones durante el pulling: El equipo de fondo fue sacado debido a que se presentó bajo aislamiento.

- Los tres cuerpos de bombas se encontraron externamente en buenas condiciones y presentaron giro libre.
- El Intake se encontró igualmente en buenas condiciones, con giro libre y orificios de admisión en buen estado.
- El tándem de sellos se encontró con giro libre y extensión del eje en rango en el cuerpo superior.
- Las cámaras de los sellos no fueron revisadas de acuerdo al procedimiento de short run (corridas con runlife inferior a 365 días).
- El motor superior se encontró con giro libre, extensión del eje en rango, aceite dieléctrico limpio. Eléctricamente balanceado entre fases en 0.2 Ohm y con 12.2 G Ohm de aislamiento fase-tierra.
- El motor central se encontró con giro libre y extensiones en rango, con aceite dieléctrico limpio. Eléctricamente balanceado entre fases en 0.3 Ohm y con 18.3 G Ohm de aislamiento fase-tierra.
- El motor inferior se encontró igualmente con giro libre, extensión del eje en rango, aceite dieléctrico limpio y eléctricamente balanceado entre fases en 0.2 Ohm con 13.8 G Ohm de aislamiento fase-tierra.
- El cable de potencia presentó 2 G Ohm de aislamiento fase-tierra.
- El conector lower del empaque de fondo presentó bajo aislamiento con medidas A-T: 57 k Ohm, B-T: 116 M Ohm y C-T: 108 M Ohm.
- El penetrador se encontró igualmente con bajo aislamiento con medidas A-T: 57 k Ohm, B-T: 48 k Ohm y C-T: 95 M Ohm.

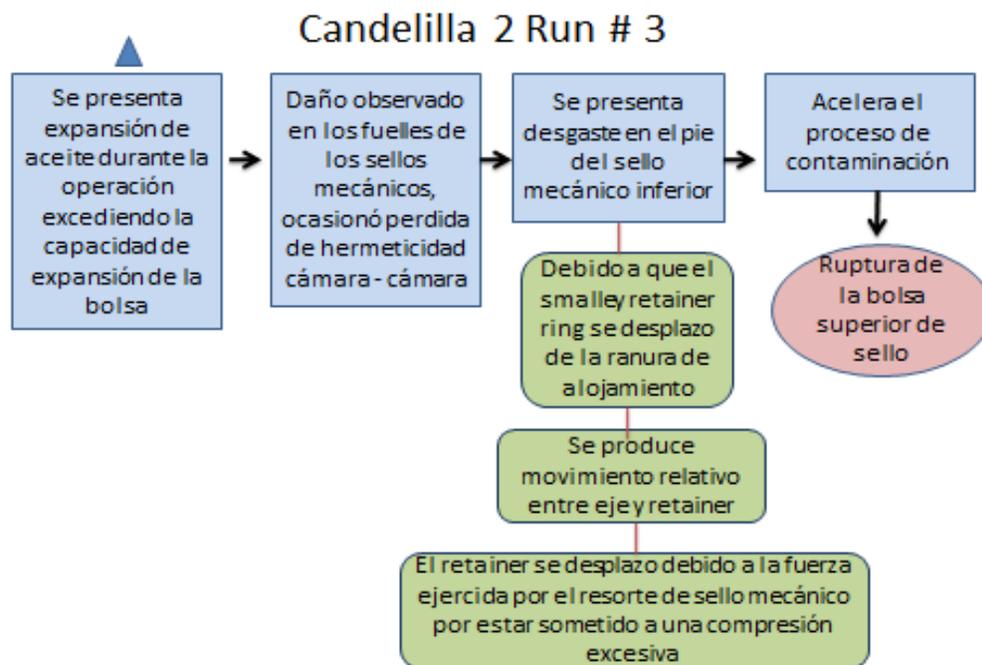
4.20.2 Análisis de falla: La condición de pérdida de aislamiento con respecto a tierra del equipo de fondo que causó la parada y la extracción del sistema BES fue generada por malas condiciones eléctricas de los conectores de superficie, los cuales según reporte de pulling presentaron bajo aislamiento. Para el momento de este reporte no se contó con los conectores de superficie (elementos fallados) los cuales no fueron suministrados por el contratista. Los motores fueron inspeccionados y se les realizó ensayo de Hi-Pot e IP (Índice de polarización) pasando satisfactoriamente. Si bien el equipo de fondo no presentó falla, se observó presencia de agua en todas las cámaras de los dos cuerpos de sellos. Lo contaminación ocurrió debido a la ruptura de la bolsa AFLAS superior del sello superior lo que posiblemente fue causado porque la expansión del aceite del motor durante operación excedió la capacidad de expansión de la bolsa. Para esto se está revisando el incremento de la capacidad de expansión de los sellos haciendo uso de tres cuerpos de sello. Adicionalmente, el daño observado en los fuelles AFLAS de los sellos mecánicos, ocasionó pérdida de hermeticidad cámara-cámara tal como se evidenció en la prueba de hermeticidad previa al desensamble (sello inferior) acelerando aun más el proceso de contaminación. Con el fin de

validar esta situación se encuentra en curso un análisis de compatibilidad de fluido de pozo-elastómero.

El desgaste observado en el eje del sello inferior a la altura del sello mecánico inferior, fue ocasionado debido a que el smalleyretainer ring se desplazó de la ranura de alojamiento y se produjo movimiento relativo entre las dos partes (eje y retainerring). El smalleyretainer ring posiblemente se desplazó de su ranura de alojamiento debido a la fuerza ejercida por el resorte del sello mecánico al estar sometido a una posible compresión excesiva (el resorte se encontró con deformación indicando que sobrepasó su límite elástico). De acuerdo a una revisión de los desensambles hechos a sellos de esta misma configuración, se recolectó la evidencia de diferentes casos y se realizará una consulta con nuestra casa matriz con el fin de identificar con mayor certeza la causa de este desgaste y su solución.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.20 “Pozo Candelilla 2 Run #3”



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.20 “Pozo Candelilla 2 Run #3”

Fotografía 20a. Bolsa y Cámaras Contaminadas



Presencia de fluidos de pozo al interior y exterior de la bolsa en cámara superior



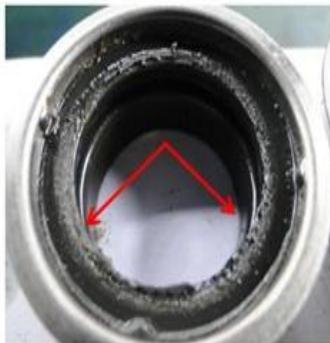
Bolsa AFLAS con ruptura en extremo superior



Acumulación de sólidos finos sobre guía superior

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 20b. Sello Mecánico.



Sello mecánico superior con fuelle ALFAS deteriorado



Fuelle AFLAS de sello mecánico inferior con deterioro leve



Resorte con deformación plástica leve

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA 20 “Pozo Candelilla 2 Run #3”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Conector BIW	BIW	BIW-packer	Eléctrica	BIW packer	BIW packer

FUENTE AUTORES

4.21. POZO CANDELILLA 3 RUN 1

4.21.1 Observaciones durante el pulling: el Equipo BES de fondo salió por instalación a tierra (posible corto eléctrico).

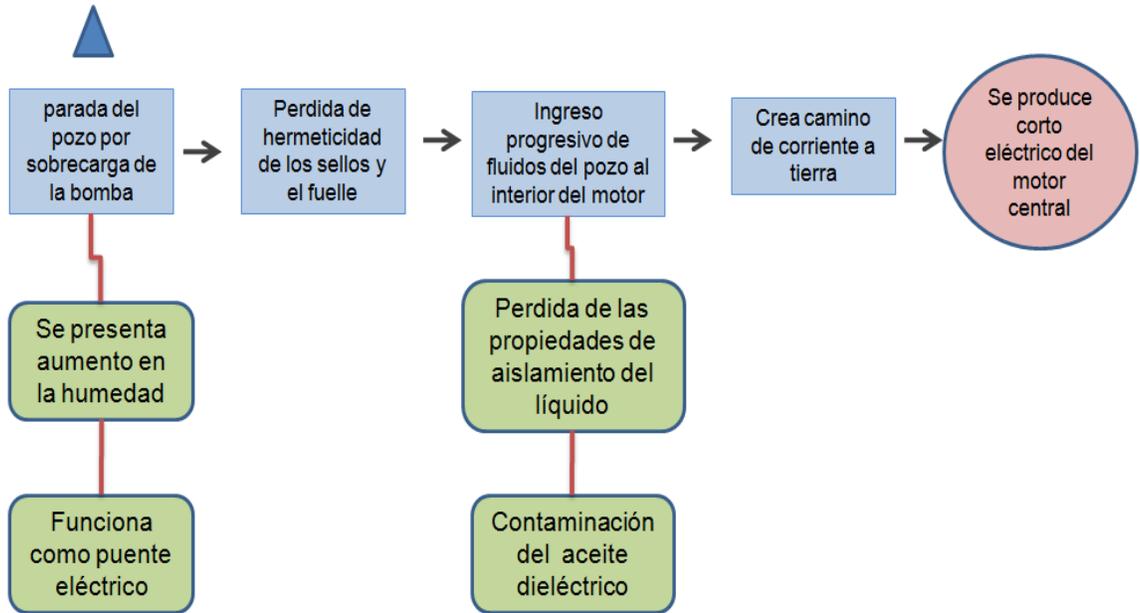
- El Motor central se encontró aterrizado (corto eléctrico).
- Luego de ser desacopladas, las bombas salieron con giro normal, extensiones en rango, sin juego radial.
- El intake se halló con giro normal y orificios de admisión sin deformaciones. Tándem de sellos con giro restringido y extensión dentro del rango.
- Todas las cámaras de ambos cuerpos se encontraron contaminadas por fluidos de pozo.
- Los Motores estaban con giro normal, con el aceite contaminado al interior.
- El motor superior se halló balanceado entre fases en 0.3 Ohm y con 1 M ohm de aislamiento de fases a tierra.
- El motor central estaba desbalanceado entre fases en AB: 0.2 Ohm, BC: 0.2 Ohm y CA: 0.3 Ohm y aterrizado.
- El motor inferior estaba balanceado entre fases en 0.3 Ohm y con 5 G ohm de aislamiento.
- El Cable de potencia y MLE en buenas condiciones físicas y eléctricas.

4.21.2 Análisis de falla: El motor central se encontró con desbalance entre fases y aterrizado. El aceite se encontraba contaminado por fluidos de pozo, la presencia de agua al interior era evidente porque la medida de rigidez dieléctrica del aceite fue de 2 KV. No se encontraron anomalías mecánicas en los componentes internos, ni rozamiento en los rotores. Se encontraron señales de cortocircuito por arco eléctrico en el rotor #2 de cabezal a base. El ingreso de fluidos del pozo al interior del motor, contaminó el aceite dieléctrico, haciendo que este perdiera sus propiedades de aislamiento. Por esa razón, posiblemente el estator tuvo un camino de corriente a tierra, asistido por la humedad. La humedad en el motor funcionó como un puente para paso de corriente de las espiras del estator hacia las laminillas y luego hacia el rotor provocando el aterrizamiento del estator a través de un arco eléctrico. Según las evidencias encontradas, la ruta de contaminación en el motor sería a través de los sellos. Los fluidos de pozo fueron ingresando progresivamente a las cámaras de los sellos a través del eje al perderse la hermeticidad con el fuelle de los sellos mecánicos, que se encontraron deteriorados.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.21 "Pozo Candelilla 3 Run # 1"

Candelilla 3 Run # 1



FUENTE AUTORES

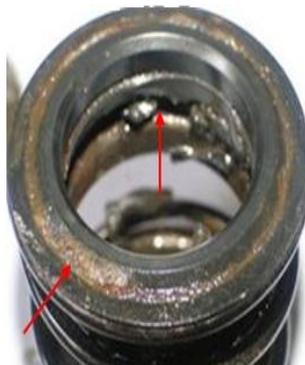
A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.21 "Pozo Candelilla 3 Run # 1"

Fotografía 21a. Contaminantes Sobre Sellos, Fuelles y Aflas



Sólidos orgánicos (posibles asfáltenos) sobre guía inferior



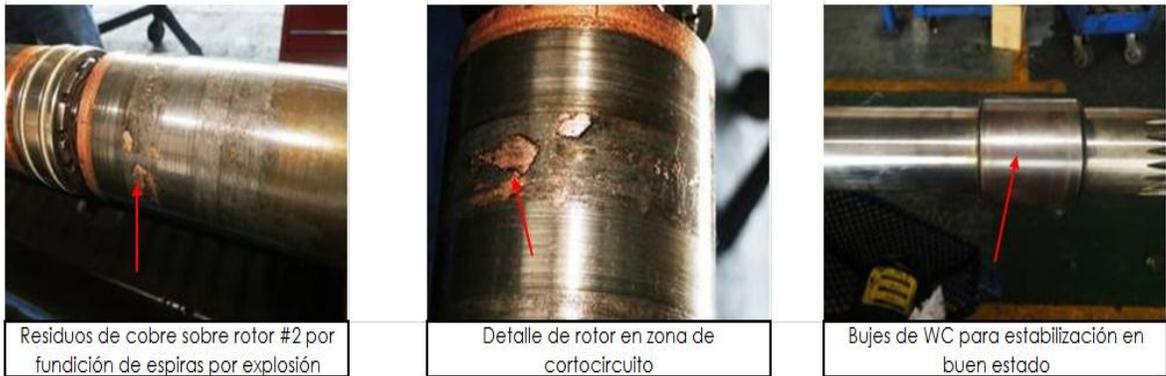
Sólidos sobre cara de sello mecánico inferior, fuelle deteriorado



Carbonatos reaccionando sobre caras de sellos mecánicos

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 21b. Daños Sobre Rotor.



FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 21 “Pozo Candelilla 3 Run # 1”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Fuelle dañado	Sello	Sello mecánico	Eléctrica	Diseño del sistema	Incompatibilidad material del sello con fluido de pozo

FUENTE AUTORES

4.22. POZO CANDELILLA 4 RUN 1

4.22.1 Observaciones durante el pulling: El equipo de fondo fue sacado debido a que se presentó pérdida de producción.

- La bomba superior no presentó giro y la bomba inferior se encontró con eje roto.
- El tándem de sellos se halló con extensión del eje en rango en el cuerpo superior y con giro libre.
- Las cámaras de los sellos no fueron revisadas de a cuerdo al procedimiento de short run (corridas con runlife menor a 365 días).
- El motor superior presento giro libre y extensión del eje en rango, eléctricamente balanceado entre fases en 0.3 Ohm y con 10 G Ohm de aislamiento fase-tierra.
- El motor inferior se encontró igualmente con giro libre y extensión del eje en rango, eléctricamente balanceado entre fases en 0.4 Ohm y con 8 G Ohm de aislamiento fase-tierra.

- El cable de potencia y el MLE se hallaron en buenas condiciones mecánicas y eléctricas.

4.22.2 Análisis de falla: El equipo de fondo fue sacado debido a que se presentó pérdida de producción. La bomba superior se encontró con presencia de sólido incrustante que presentó reacción del HCl al interior de las etapas. La acumulación progresiva de este sólido en las estrechas tolerancias entre las partes en movimiento relativo (impulsores y bujes rotativos y difusores estáticos) generó una restricción al giro normal del eje de la bomba, hasta causar la fractura del eje de la bomba superior en diferentes puntos después de ocurrir trabamientos sucesivos. Las superficies de fractura del eje presentaron forma plana la cual es una de las características de una fractura por sobrecarga de torsión del equipo dúctil.

La bomba inferior se encontró igualmente con fractura del eje en dos puntos de estabilización, lo cual ocurrió debido a que las vibraciones causadas por el manejo de sólidos y la fractura en el eje en la bomba superior, fueron transmitidas al eje de la bomba inferior causando la fractura de algunos de los bujes de WC de estabilización, lo que a su vez causó una restricción al giro y por último la fractura de el eje por sobrecarga de torsión del tipo dúctil (superficie de fractura con forma plana).

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.22 “Pozo Candelilla 4 Run # 1”



FUENTE AUTORES

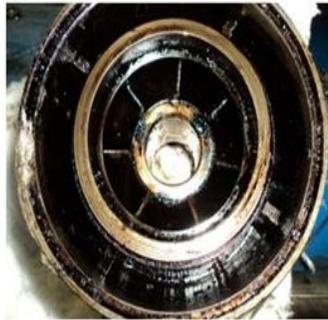
A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N.22 “Pozo Candelilla 4 Run # 1”

Fotografía 22a. Daños en el Difusor y el Buje



Pad de Up-thrust de difusor con señales de desgaste



Álabes y pad de Down-thrust de difusor sin desgaste



Buje de WC de estabilización fracturado

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 22b. Presencia y Acumulación de Sólidos



Acumulación de partículas de sólidos metálicos magnéticos en cabezal



Superficie de fractura con forma plana. Presencia de sólido incrustante en zona de falla



Presencia de sólido incrustante al interior de difusor

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA N. 22 “Pozo Candelilla 4 Run # 1”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Baja producción	Bomba	Eje	Mecánica	Baja producción	Scale

FUENTE AUTORES

4.23. POZO MAPACHE 1 RUN 2

4.23.1 Observaciones durante el pulling: Éste se realizó por posible instalación a tierra (corto eléctrico).

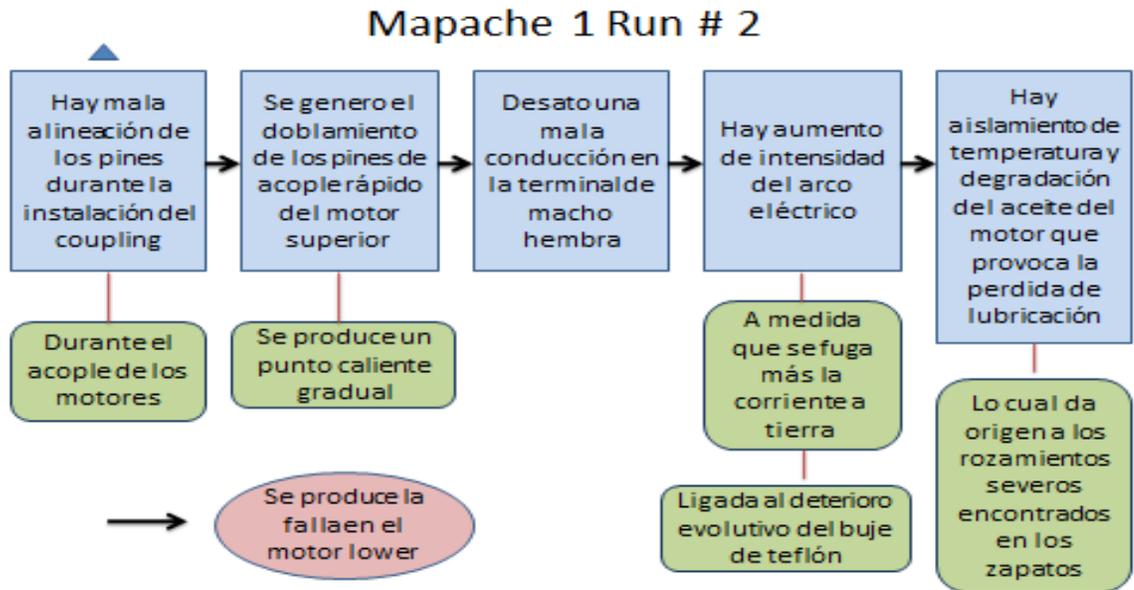
- El motor upper se encontró con bajo aislamiento y el lower se halló eléctricamente aterrizado.
- Las bombas se encontraron en buen estado mecánico con giro suave y con leve juego radial.
- El Intake se encontró con giro libre y juego radial, orificios de admisión en buen estado mecánico.
- El Tándem de sellos con giro normal.
- Sello superior con aceite contaminado en las dos primeras cámaras y trabajado en la cámara inferior.
- El Sello inferior con aceite quemado en todas sus cámaras. Motores con signos de arrastre en sus housings y con giro libre, y con aceite quemado en su interior.
- El Cable de potencia en buen estado electromecánico.
- Salieron la mayoría de las súper bandas y protectores de equipo.

4.23.2 Análisis de falla: Durante el acople de los motores debido a una posible mala alineación de los pines durante la instalación del coupling, generando que se doblara uno de los pines terminal de acople rápido del motor superior y desatando una mala conducción o falso contacto en la unión del terminal hembra y macho, causando un punto caliente gradual debido al aumento en intensidad del arco eléctrico desarrollado en esta zona a medida que se fugaba más la corriente a tierra, ligada al deterioro evolutivo del buje de teflón.

A La vez que se presentaba esto se fue dando los aumentos de temperatura y degradación del aceite del motor que ocasionó la pérdida de lubricación especialmente en esta área, dando origen a los rozamientos severos encontrados en la zapata y rodete sumado a los sucesivos re-arranques y paradas donde vemos las mayores fuerzas de empujes axiales.

A continuación se presenta la secuencia de eventos de la falla.

ESQUEMA N.23 “Pozo Mapache 1 Run # 2”



FUENTE AUTORES

A continuación se presentan algunas imágenes donde se registra los daños causados por la falla.

FOTOGRAFÍA N. 23 “Pozo Mapache 1 Run # 2”

Fotografía 23a. Daños Sobre el Plato Base



Orificios de salida de fases C y B quemados y con buje de teflón derretido



Buje de teflón quemado y derretido dentro de orificio de plato de base



Pines terminales levemente doblados y fundidos por corto eléctrico

FUENTE FAR PETROMINERALES

Fotografía 23b. Evidencia de Daños y Deterioro a Raíz del Corto Eléctrico.



Pines terminales quemados evidenciando desviación en su cuerpo



Rubber boots derretidos por calentamiento durante corto



Zona de conexión de pot head sin obstrucciones

FUENTE FAR PETROMINERALES

Seguidamente encontramos la tabla resumen del análisis del FAR y los detalles de la causa raíz.

TABLA 23 “Pozo Mapache 1 Run # 2”

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Pines de conexión	Motor	Base	Eléctrica	Instalación	Instalación field services

FUENTE AUTORES

5. ANALISIS DE RESULTADOS

TABLA N. 24 “incidencia de fallas”

INSIDENCIA DE FALLAS		
CATEGORIA DE FALLA	NUMERO DE POZOS AFECTADOS	PORCENTAJE (%)
ELECTRICA	17	74
MECÁNICA	6	26

FIGURA N. 16 “incidencia de fallas”

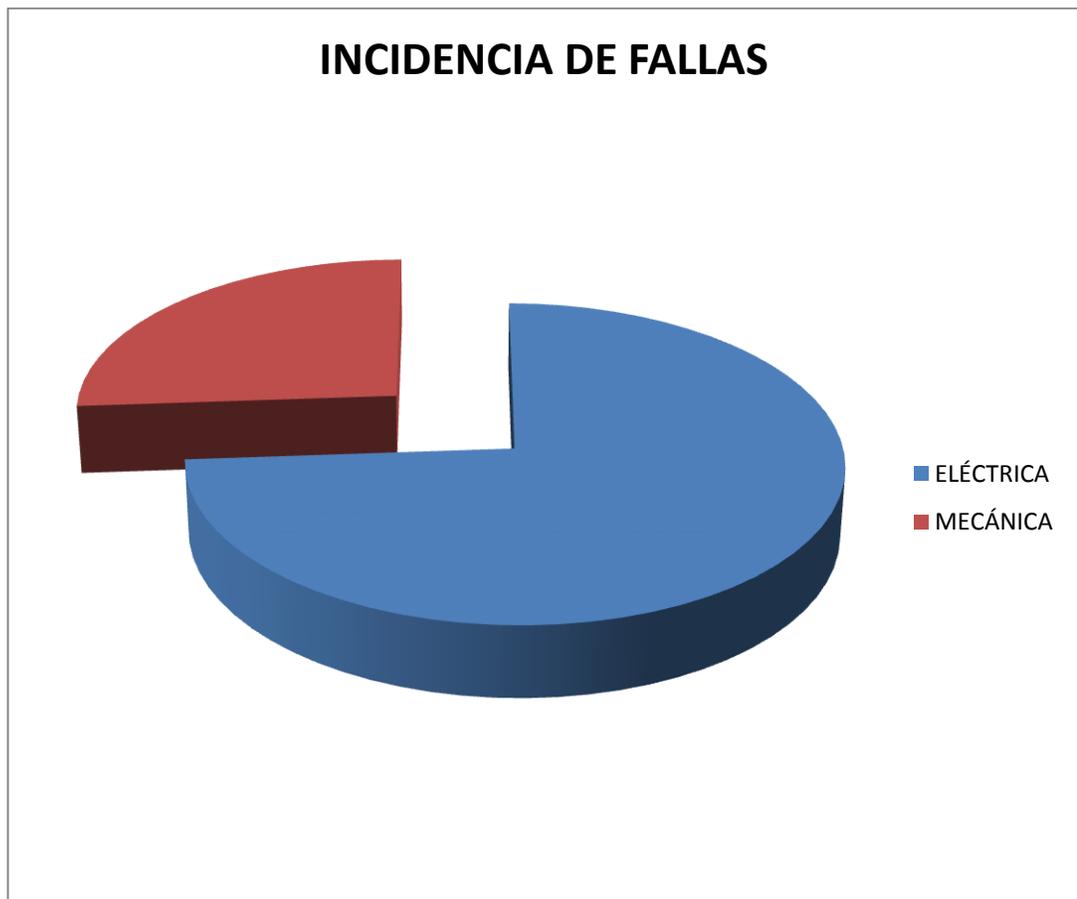


TABLA N. 25 “razón de falla”

RAZON DE FALLA		
TIPO	NÚMERO DE POZOS AFECTADOS	PORCENTAJE (%)
MOTOR	8	34.8
SELLO	6	26.1
BOMBA	5	21.7
BIW	3	13.0
CABLE	1	4.3
INTAKE	1	4.3

FIGURA N. 17 “razón de falla”

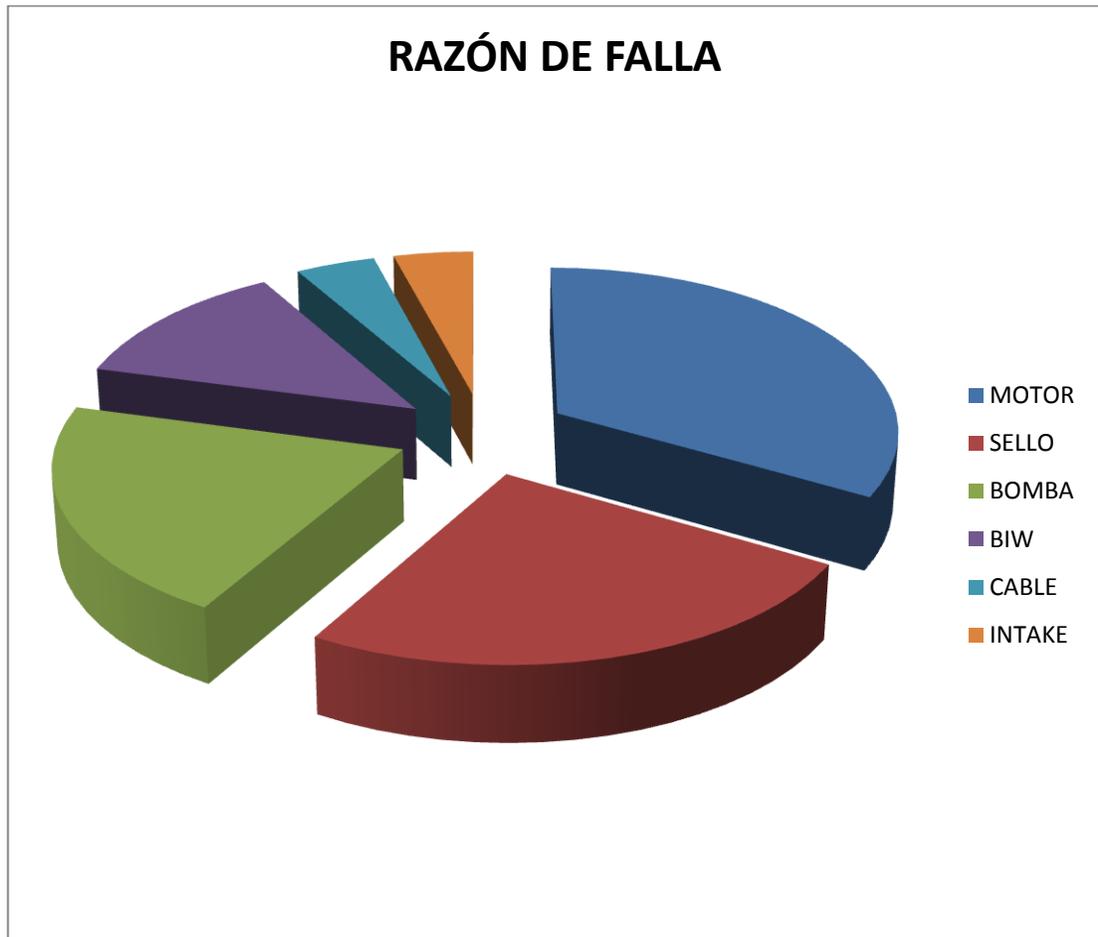


TABLA N. 26 “causas generales de las fallas”

CAUSAS GENERALES		
TIPO	NÚMERO DE POZOS AFECTADOS	PORCENTAJE (%)
DISEÑO DEL SISTEMA/SELECCION	7	30.4
MANUFACTURA	4	17.4
INSTALACIÓN	5	21.7
CONECTORES	3	13.0
BAJA PRODUCCIÓN	1	4.3
OPERACIÓN	1	4.3
TRANSPORTE	1	4.3
DESCONOCIDA	1	4.3

FIGURA N. 18 “causa generales de las fallas”

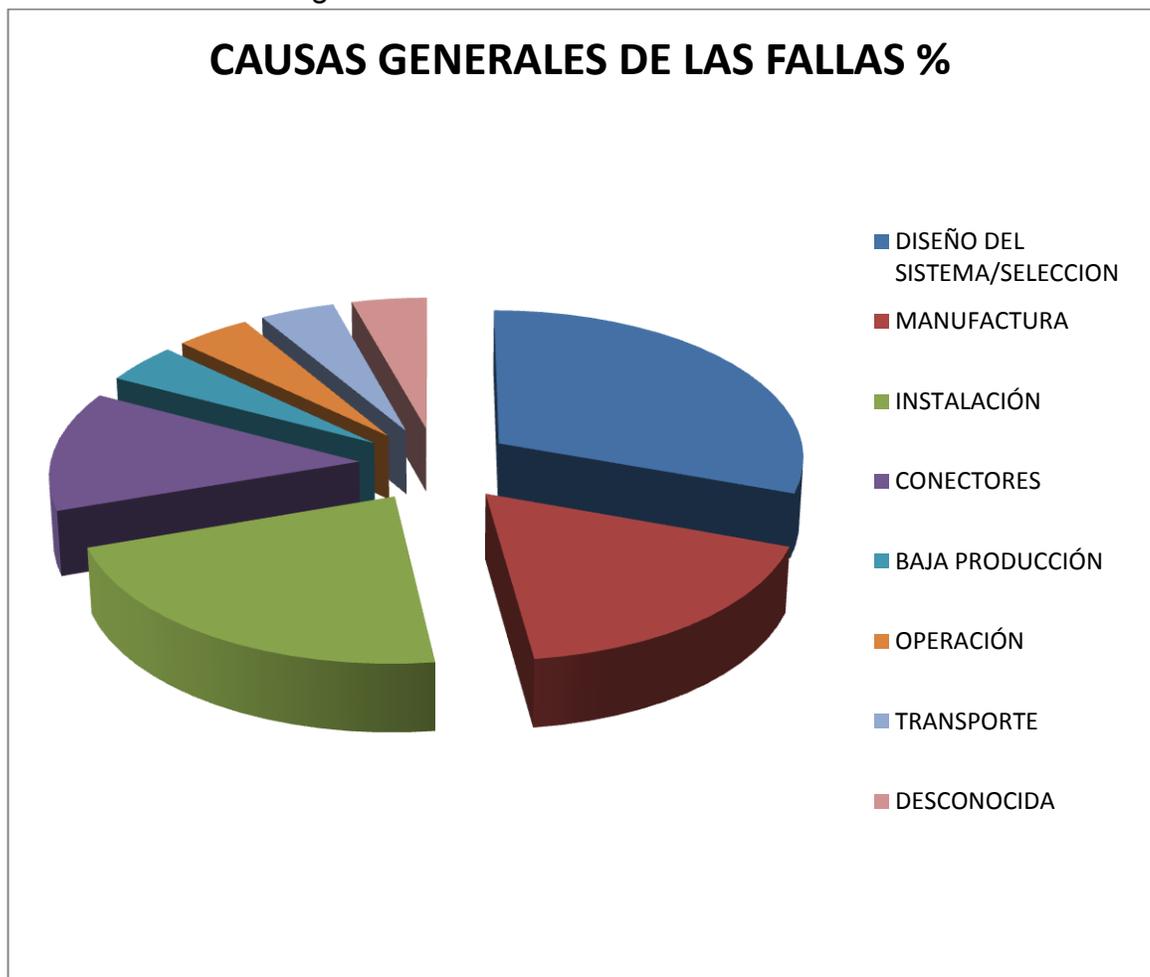
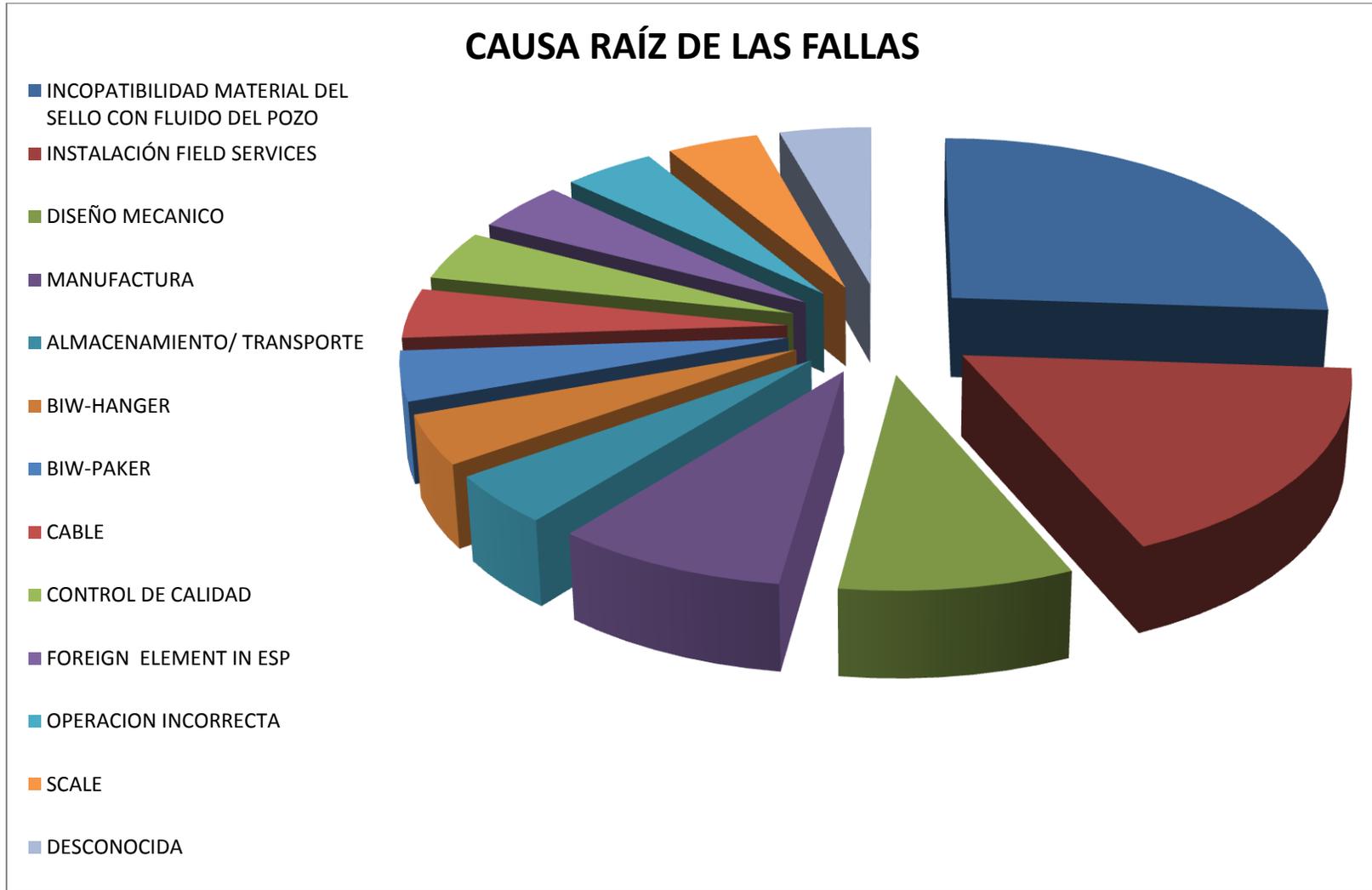


TABLA N. 27 “causa raíz de las fallas”

CAUSA RAIZ		
TIPO	NÚMERO DE POZOS AFECTADOS	PORCETAJE (%)
INCOMPATIBILIDAD MATERIAL DEL SELLO CON FLUIDO DEL POZO	6	26.1
INSTALACION FIELD SERVICES	4	17.4
DISEÑO MECANICO	2	8.7
MANUFACTURA	2	8.7
ALMACENAMIENTO/ TRANSPORTE	1	4.3
BIW-HANGER	1	4.3
BIW-PAKER	1	4.3
CABLE	1	4.3
CONTROL DE CALIDAD	1	4.3
FOREIGN ELEMENT IN ESP	1	4.3
OPERACION INCORRECTA	1	4.3
SCALE	1	4.3
DESCONOCIDA	1	4.3

FIGURA N. 19 “causa raíz de las fallas”



- El análisis evidenció la necesidad de realizar estudios de compatibilidad con los diferentes fluidos de pozos y varios tipos de elastómeros. Este trabajo ya fue realizado por Petrominerales y permitió cambiar el elastómero de los sellos de Aflas 1796 a Aflas 1966 pero la discusión de ese resultado no hace parte del alcance de este proyecto.
- Con respecto a las fallas en los Sellos, se observa que 5 de las 6 fallas son asociadas a los sellos mecánicos (la mayoría de estos son tipo DTH19BB/LBB/LSD2KM21 3 sellos y tipo SDTH19BB/LBB/L 2 sellos respectivamente). Se recomienda evaluar las características de este componente, ya que es de suma importancia para la vida útil de la bomba.
- Se evidenció que en los Sellos o Protectores de la compañía Schlumberger ofrece las cámaras en paralelo lo cual permite alargar la vida útil del equipo, retrasando el tiempo de contaminación de las cámaras, mientras que los sellos de Baker Centrilift son de cámara en serie lo cual hace que la contaminación sea directa a todas las cámaras originando fallas prematuras
- Se observa la responsabilidad de los re-arranques en el daño de los equipos ESP, por cual se recomienda revisar las prácticas actualmente aplicadas para los re-arranques y capacitación permanente del personal.
- Se evidenciaron problemas con los conectores de superficie y fondo marca BIW. Se tuvieron 5 fallas por bajo aislamiento e instalaciones a tierra. Se tenían solamente 3 FAR's (Failure Analysis Report) con respecto a esta falla. Se recomienda evaluar la causa raíz de estas fallas, ya que estos conectores son confiables y se usan en la mayoría de las aplicaciones de Bombeo electro-sumergible en la industria.
- De los 8 motores afectados 5 presentan daño por manufactura, 2 por instalación 1 desconocido, lo cual lleva a revisar el uso de estos motores para las aplicaciones de Petrominerales. Los motores con mayor reiteración de falla por manufactura fueron los de 836HP.
- Con lo relacionado a las bombas se encontró que el 80% las fallas fueron influenciadas por ruptura del eje. Se evidencio como causa raíz el inadecuado manejo de la bomba durante el transporte o la instalación de esta, en donde pudo haber recibido un golpe por la mala manipulación. Se recomienda establecer o revisar el procedimiento para el transporte e instalación de la bomba en pozo.

- Se detecto que 13 de las 23 fallas se presentaron en la parte superior de la bomba, siendo la más reincidente la tipo P155, las cuales estaban siendo utilizadas con un motor 990. Se recomienda revisar si la configuración de estas dos componentes es la aplicación más adecuada para trabajar en conjunto.

CONCLUSIONES

- Se analizaron los FAR utilizando la metodología **TapRoot®System** de los campos de Petrominerales en la región de los llanos orientales como son los campos CORCEL, GUAITQUIA, BOA, CANDELILLA y MAPACHE encontrando la causa raíz de cada uno de los pozos 23 pozos analizados. Quedando por revisar 13 pozos adicionales ya que no se contaban con el TearDown de éstos.
- Después de revisados los **Teardown** por medio de la metodología **TapRoot®System** se pudo concluir que la causa principal de las fallas era la no compatibilidad de los materiales de los sellos con los fluidos del pozo 26.1% de incidencia, aunque cabe resaltar que instalación **fieldservices** presento un 17.4% de incidencia, dejando en evidencia las problemas de más relevancia en el momento de buscar una solución efectiva.
- Estas dos incidencias representan el 43,5% del total de las fallas siendo éstas las más reiterativas, el 56.5% restante hace referencia a fallas aisladas ó unitarias.

RECOMENDACIONES

- ✓ Aplicar la metodología en los siguientes análisis que se realicen a los sistemas BES en el futuro.
- ✓ Organizar un equipo de trabajo direccionado a continuar con el trabajo de revisión y dedicado a proponer sugerencias que minimicen la incidencia de los fallos en los sistemas BES.
- ✓ Adquirir licencia del programa directamente con el fabricante, lo que asegura la retroalimentación de la información con otros usuarios.
- ✓ Recopilar la información de los teardown, los pulling y las imágenes correspondientes para así retroalimentar la base de datos general.

BIBLIOGRAFÍA

- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1486
JULIO 23 DE 2008
BOGOTA D.C.
- LiuDong, ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE (BES) EN EL CAMPO BARE, FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO.
MAYO DE 2007
SARTENEJAS
PÁG: 29-42
- W.J. Powers, TRW Reda Pump Div. PETROLEUM ENGINEERING HANDBOOK
CHAPTER 7
PÁG: 7-2; 7-17
- John Bearden, Centrilift, Beaker Hughes inc. ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMPS. PETROLEUM ENGINEERING HANDBOOK VOLUMEN IV
CHAPTER 13
PÁG: IV-625; IV-700
- API RECOMMENDED PRACTICE 11S (API RP 11S) THIRD EDITION
NOVIEMBRE 1 DE 1994
AMERICAN PETROLEUM INSTITUD WASHINGTON D.C.
- Palomino T. Jorge PROGRAMA DE ADIESTRAMIENTO ESP OIL ENGINEERING CONSULTANTS.
2005
PÁG: 10-35
- REDA COLOMBIA CURSO AVANSADO DE OPERACIONES DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE.
1996-1998
PÁG: 2-133
- SYSTEM IMPROVEMENTS, Inc. TapRooT®
KNOXVILLE, TENNESSEE
2008
PÁG: 2-214

- SYSTEM IMPROVEMENTS, Inc. Root Cause Tree ® DICCIONARIO, SEPTIMA EDICIÓN.
KNOXVILLE, TENNESSEE
2008
PÁG: 1-170
- WWW.TapRoot.com
- <http://onlinedictionary.datasegment.com/word/bearing>
- http://www.ittcannon.com/uploadedFiles/Product_PDFs/BIW_Feedthru.pdf
- <http://rodamientos.wordpress.com/>
- http://www.unicrom.com/Tut_bobina.asp
- <http://www.americanspecialmetals.com/Inconel7>
- http://prof.usb.ve/jaller/Ascenso/CT-6311-cap_03.pdf
- http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/salvatori_a_m/capitulo1.pdf

GLOSARIO

Bearing: Balinera, un soporte giratorio colocado entre las partes móviles para permitir para moverse con facilidad.

BIW: Permite que el fluido eléctrico pase a través del empaque y vaya a motor ,(es un empaque).

Bomba lower: Bomba inferior.

Buje de Teflón: teflón bushing (un forro de teflón cilíndrico utilizado para reducir la fricción).

Checkvalve : Válvula que se puede cerrar para impedir el paso de fluido.

Cinta Kapton: es una cinta eléctricamente aislante y resistente al calor que tiene muchos usos entre ellos sujetar objetos sometidos al calor.

Cojinetes tipo widefoot: Son puntos de apoyo de ejes y árboles para sostener su peso, guiarlos en su rotación y evitar deslizamientos.

Los cojinetes van algunas veces colocados directamente en el bastidor de la pieza o máquina, pero con frecuencia van montados en soportes convenientemente dispuestos para facilitar su montaje en este caso son anchos en su base.

Diodos: Es un componente que permite la circulación de corriente eléctrica en un solo sentido.

Electroimán: Un electroimán es un tipo de imán en el que el campo magnético se produce mediante el flujo de una corriente eléctrica, desapareciendo en cuanto cesa dicha corriente.

Epoxy insulation: Aislamiento Epóxido.

Fuelle de Aflas: es un contenedor deformable en este caso de un material de alta resistencia llamado Aflas.

Housing: Cubierta que protege el motor.

Inconel: Inconel es una marca de Special Metals Corporation que se refiere a una familia de superaleaciones austeníticas de base níquel-cromo. Las aleaciones de inconel se utilizan normalmente en aplicaciones a altas temperaturas.

Inconel 718: Aleación Inconel 718 precipitación hardenable-níquel-cromo también contienen cantidades importantes de hierro, niobio, molibdeno y, junto con cantidades menores de aluminio y titanio. Combina resistencia a la corrosión y de

alta resistencia con excelente soldabilidad incluida la resistencia a postweld agrietamiento.

Inductores: Un inductor o bobina es un componente pasivo de un circuito eléctrico que, debido al fenómeno de la autoinducción, almacena energía en forma de campo magnético.

Intake: Se refiere a la sección por donde ingresan los fluidos a la bomba electrosumergible.

Maquina síncrona: Una máquina síncrona es una máquina eléctrica rotativa de corriente alterna cuya velocidad de giro en régimen permanente está ligada con la frecuencia de la tensión en bornes y el número de pares de polos.

MLE: Motor Lead electrical.

Motor aterrizado: Por seguridad la carcasa (carcasa) o envoltura del motor esta conectada a Tierra. Desde ese punto de vista, se considera la carcasa del motor como una extensión de la Tierra. Cuando se presenta un deterioro del aislamiento de las bobinas del motor, se produce una corriente de falla que viaja a la carcasa (Tierra).

Motor de inducción: Los motores asíncronos o de inducción son prácticamente motores trifásicos. Están basados en el accionamiento de una masa metálica por la acción de un campo giratorio.

Pothead: Conector del cable hacia el motor.

Pulling: Es el proceso de sacado de la unidad BES después de detectar el problema y haber decidido el sacar el equipo.

Re-arranques: es el proceso por el cual es encendida desde superficie la BES luego de haber sido detenida.

Semiconductor: Semiconductor es un elemento que se comporta como un conductor o como aislante dependiendo de diversos factores, como por ejemplo el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre.

Sleeves: enchufe.

Stress radial: Estrés en el eje producido.

Tandem seal: Serie de sellos en la BES.

ANEXOS

ANEXO 1. Paso a Paso De La Metodología

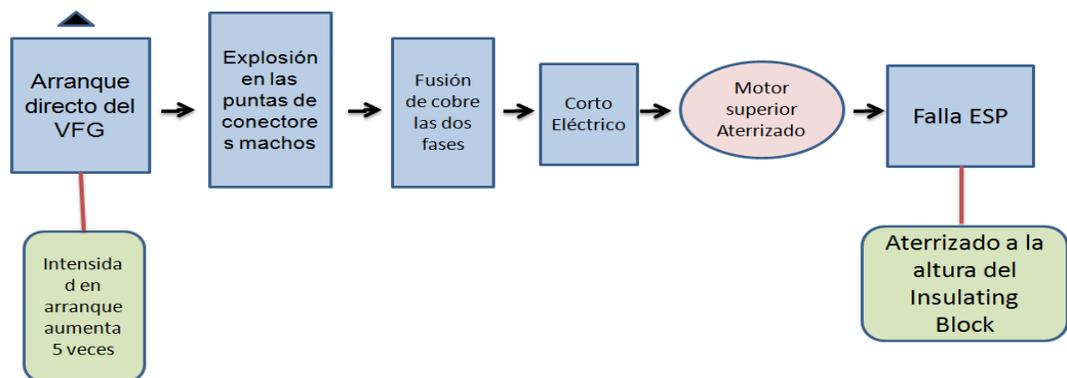
1) Planear la investigación.

Recopilar los datos que más pueda acerca de la falla presentada, datos de producción, datos de pozo, informes de campo instantes antes y después de la falla (pulling), análisis de laboratorio de los partes falladas (teardown, si existen) entre otras

2) Determinar secuencia de eventos.

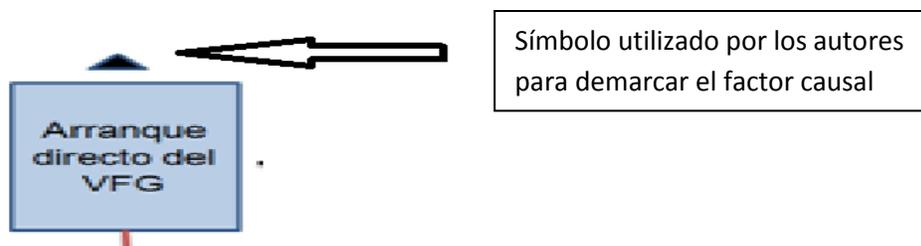
Con la información recopilada comenzar a organizar los eventos que sucedieron antes durante y después de la falla en un SnapChart como muestra el ejemplo.

Pozo Corcel A1 Run 1

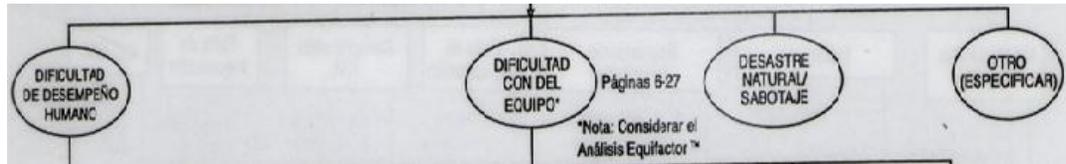


3) Definir factores causales.

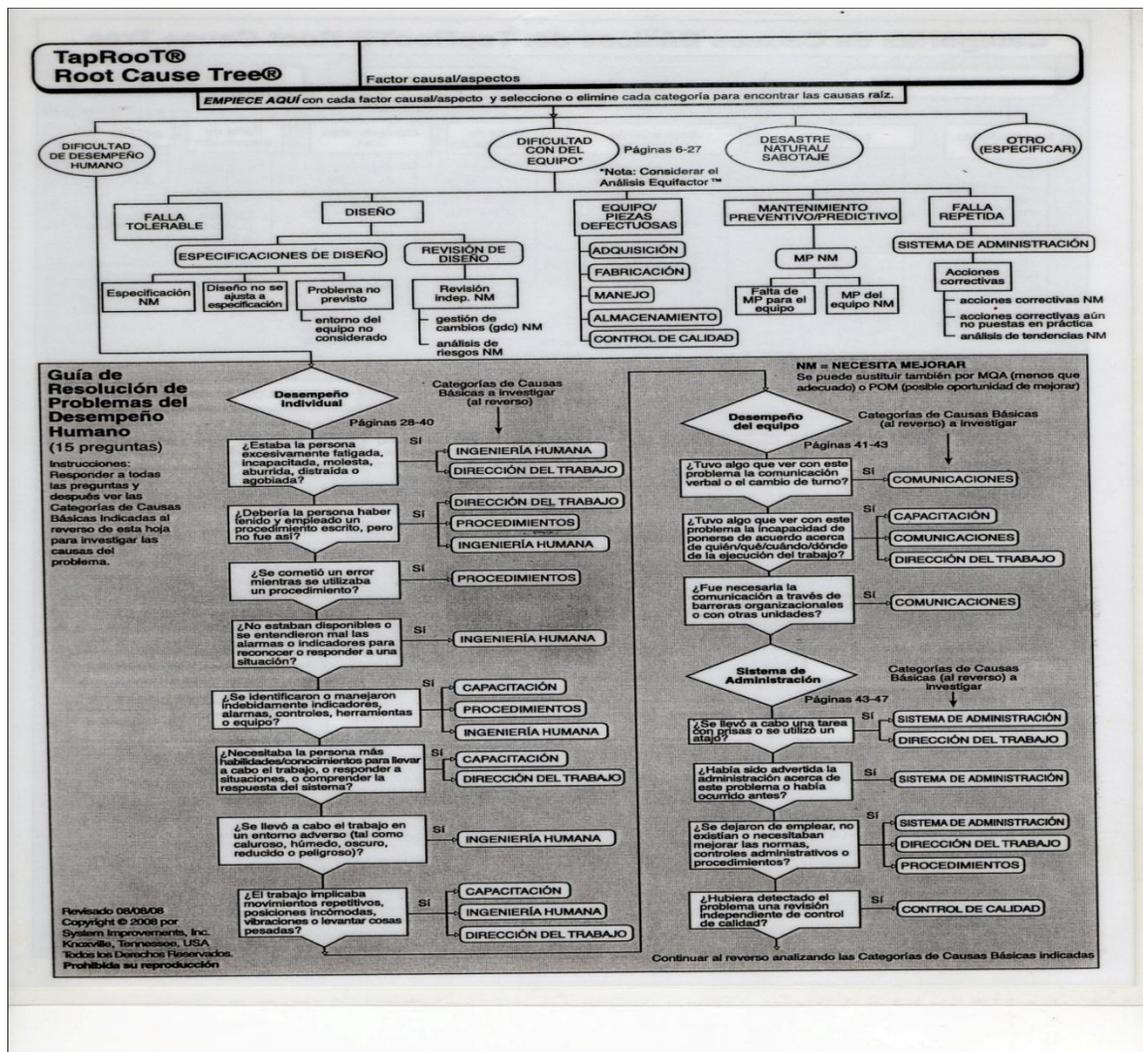
Luego de organizar la información en un Snapchart demarcar con un símbolo característico para usted (puede usar Δ , α o el que a usted le parezca conveniente) las casillas que contengan los eventos que pueden haber influido directamente en la falla



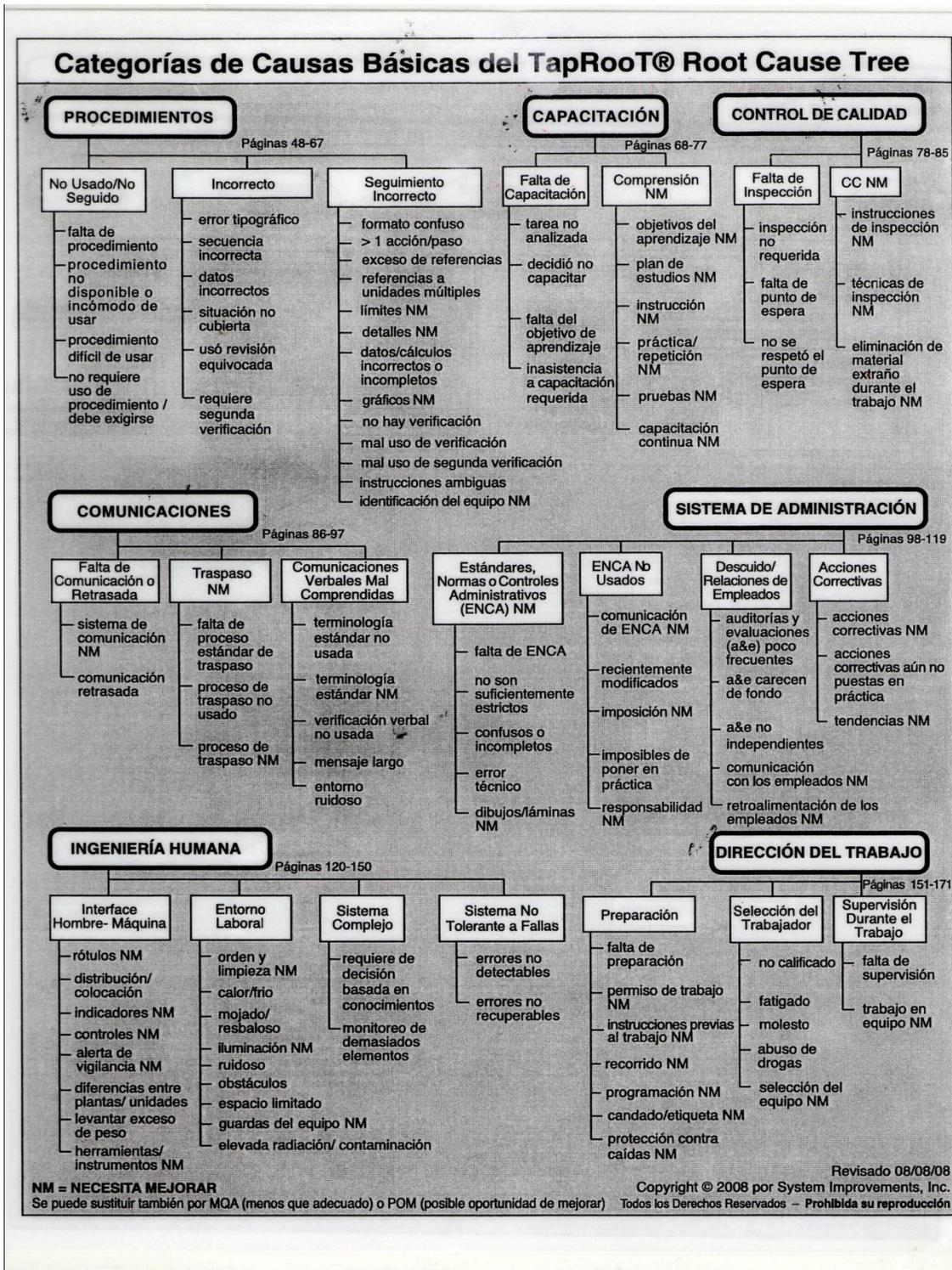
- Analizar todas las causas raíz de cada factor causal. Luego de tener los posibles factores causales comenzar a revisar la tabla y a descartar las posibilidades, mediante los registros e informes con los cuales usted cuenta.



- Analizar las causas genéricas de cada causa raíz. Luego de encontrar el causal genérico puede continuar por la tabla siguiendo las causas básicas como lo indica la misma.



- 6) Analizar las causas básicas de cada causa raíz.
Luego de encontrar el causal genérico continuar revisando la tabla y obtener el causal básico de la falla como lo muestra a continuación



7) Organizar la información obtenida

Después de haber realizado el escaneo de la información otorgada por la empresa o laboratorio y de haber descartado posibilidades de la falla, organice la información de una forma clara donde quede claro cuál fue la causa raíz de la falla como se muestra en el ejemplo a continuación.

Detalle de falla	Componente primario	Sub-componente	categoría	Causa general	Causa raíz
Corto circuito	Motor	I Block	Eléctrica	Operación	Procedimientos de operación

8) Presentar reporte e implementar acciones correctivas.

Después de obtener satisfactoriamente la causa raíz de la falla puede plantear el mejor modelo para dar solución y evitar que la falla se reitere