

Análisis De Falla Del Sistema De Bombeo Horizontal Utilizado Para Inyección De Agua En Un Campo
Colombiano

Andrés Felipe Leal Mora

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero de Petróleos

Director:

M.Sc Erik G. Montes

Máster en Ingeniería de Hidrocarburos

Co-Directores:

Iván Jesús Bastidas

Ingeniero Industrial

Sebastián Miranda Fernández

Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Físico-Químicas

Escuela De Ingeniería De Petróleos

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A Dios, a mis Padres, a mi Hermano.

Todo mi esfuerzo y dedicación, mi deseo, por ustedes y para ustedes.

“Mientras tenga un deseo, tengo una razón para vivir...”

-Bernard Shaw

A mis amigos más cercanos, siempre presentes.

Gracias de corazón.

Lina, Natalia, Diego, Paola, Katalina, José, Mafe, Joan, Angie, Juan David y Mateo.

Katty, Nicolás, Andrey.

“La amistad es siempre una dulce responsabilidad, nunca una oportunidad”

- Gibran Jalil Gibra

Agradecimientos

A cada una de las personas que he tocado, y me han tocado, en la Universidad Industrial de Santander, mi Alma Máter, en Schlumberger Surencó, mi primera y gran experiencia a nivel profesional.

A los ingenieros Iván Bastidas, Sebastián Miranda, Erick Montes, por permitirme el desarrollo de este proyecto.

A cada una de las personas que han sido parte de mi formación personal y profesional.

Tabla de Contenido

Introducción	17
1. Capitulo 1: Componentes De Un Sistema De Bombeo Horizontal	18
1.1.Sistema de Bombeo Horizontal - Horizontal Pumping System (HPS)	18
1.1.1.Skid.	18
1.1.1.1.Especificaciones	19
1.1.1.2.Componentes del Skid.	19
1.1.1.2.1.Base Soldada – Base Weldment.	20
1.1.1.2.2.Plato Soporte Cámara de empuje – Thrust Chamber support plate.	21
1.1.1.2.3.Soporte Cámara de Empuje.	21
1.1.1.2.4.Anillo de Pernos – Bolt Ring de la Cámara de Empuje.	22
1.1.1.2.5.Bandejas de Goteo – Drip Pans.	22
1.1.1.2.6.Abrazaderas de Bombas – Pump Clamps.	23
1.1.1.2.7.Soportes para instrumentación – Instrumentation Support.	23
1.1.2.Fuente de Poder – Power Source	24
1.1.2.1.Especificaciones.	24
1.1.2.2.Consideraciones Ambientales	29
1.1.3.Coupling del Motor	31
1.1.3.1.Protector del Acople.	32
1.1.4.Cámara de empuje	32
1.1.5.Sello mecánico	33
1.1.6.Succión de la Bomba – Intake	34

1.1.7.Coupling Cámara de Empuje – Bomba	35
1.1.8.Bomba	36
1.1.8.1. Componentes principales de una bomba centrífuga	38
1.1.8.1.1.Etapas	38
1.1.8.1.2.Eje	41
1.1.8.1.3.Housing	42
1.1.8.1.4.Cabeza y Base	42
1.1.8.1.5.Cojinetes Radiales – Radial Bearings	43
1.1.8.1.6.Arandelas de Empuje – Thrust Washers	44
1.1.8.1.7.Curvas de desempeño de bombas centrífugas	45
1.1.8.1.8.Carga Neta de Succión Positiva Requerida – (NPSHr)	46
1.1.8.1.9.Descripción general de los atributos presentes en un sistema HPS	48
1.1.9.Cabeza de Descarga	49
1.1.10.Instrumentación	49
1.2. Descripción del sistema de bombeo estudiado	50
2. Capítulo 2: Análisis De Falla	55
2.1.Resumen del análisis de falla	55
2.2.Inspección y desmantelamiento	56
2.2.1.Observaciones de la Inspección	56
2.2.1.1.Glosario	56
2.2.1.2.Bomba Superior	56
2.2.1.2.1.Observaciones de la inspección	57
2.2.1.2.2.Resumen de la inspección del componente	61

2.2.1.2.3.Registro fotográfico – Bomba Superior	61
2.2.1.3.1.Observaciones de la inspección	65
2.2.1.3.3.Registro fotográfico - Bomba Central	68
2.2.1.4.1.Observaciones de la inspección	70
2.2.1.4.3.Registro fotográfico – Bomba Inferior	74
2.3.Análisis por Microscopía Electrónica de barrido (MEB)	75
2.3.1.Impulsor	75
2.3.2.Difusor	76
2.4.Caracterización fisicoquímica y microbiológica de una muestra del fluido bombeado	81
2.4.1.Caracterización Fisicoquímica	81
2.4.2.Caracterización Microbiológica	83
3.Capítulo 3: Evaluación De Alternativas – Soluciones Para La Operación De Futuros Sistemas De Bombeo Horizontal En El Campo De Estudio	85
3.1.Mecánica de la operación actual	86
3.2.Tratamiento del fluido bombeado con Bactericida	87
3.3.Implementación de un Sistema de Bombeo Full Bearing Housing (FBH) – Cojinetes de Carburo de Silicio	88
3.4.Tratamiento del fluido bombeado con Inhibidores de Corrosión	90
3.5.Comparación por costos de las alternativas propuestas	90
4.Conclusiones	91
5.Recomendaciones	93
Referencias Bibliográficas	94

Lista de Tablas

Tabla 1 Tipos de Skid - Especificaciones	19
Tabla 2 Bases Soldadas - Base Weldments	20
Tabla 3 Rangos recomendados V - HP para motores	24
Tabla 4 Factores de derrateo de motor, según la altitud	29
Tabla 5 Clases de aislamiento para motores, según la temperatura de operación.....	30
Tabla 6 Series de Bomba, máximas presiones permitidas	37
Tabla 7 Series de Bombas – Diámetros	40
Tabla 8 Caballaje soportado por un eje, según material y diámetro del mismo	41
Tabla 9 Descripción general de atributos presentes en un sistema HPS	48
Tabla 10 Información general del sistema de bombeo estudiado	50
Tabla 11 Descripción atributos de las bombas estudiadas	52
Tabla 12 Condiciones de la unidad durante el arranque	53
Tabla 13 Vibraciones y temperaturas en equipos básicos.....	53
Tabla 14 Vibraciones medidas – Bombas: inferior (1), central (2) y superior (3)	53
Tabla 15 Glosario - Descripción inspección de componentes	56
Tabla 16 Descripción general - Bomba Superior.....	56
Tabla 17 Condiciones externas - Bomba Superior.....	57
Tabla 18 Condiciones eje - Bomba Superior	57
Tabla 19 Condiciones cojinetes - Bomba Superior.....	58
Tabla 20 Medidas componentes - Bomba Superior	59
Tabla 21 Condiciones Impulsores y Difusores - Bomba Superior.....	60

Tabla 22 Descripción General - Bomba Central	64
Tabla 23 Condiciones externas - Bomba Central.....	65
Tabla 24 Condiciones eje - Bomba Central	65
Tabla 25 Condiciones cojinetes - Bomba Central.....	66
Tabla 26 Condiciones Impulsores y Difusores - Bomba Central.....	67
Tabla 27 Descripción General - Bomba Inferior.....	70
Tabla 28 Condiciones externas - Bomba Inferior	70
Tabla 29 Condiciones eje - Bomba Inferior.....	71
Tabla 30 Condiciones cojinetes - Bomba Inferior	72
Tabla 31 Condiciones Impulsores y Difusores - Bomba Inferior	73
Tabla 32 Resultados microanálisis químico mediante EDS	80
Tabla 33 Ensayos realizados - Caracterización Fisicoquímica	81
Tabla 34 Resultados parámetros fisicoquímicos analizados	82
Tabla 35 Peso relativo para cada grupo bacteriano.....	83
Tabla 36 Peso relativo para la magnitud del aislamiento.....	84
Tabla 37 Clasificación Corrosividad Total	84
Tabla 38 Recuento y Corrosividad – BSR, BPA	85
Tabla 39 Historial condiciones de operación – Razones de falla para bombas corridas en el campo de estudio durante el último año	86
Tabla 40 Costo total semestral por unidad de bombeo	87
Tabla 41 Costo semestral – Tratamiento con bactericida	87
Tabla 42 Costo Unidades de bombeo FBH - SS	89
Tabla 43 Costo semestral – Adición de inhibidor de corrosión	90
Tabla 44 Costos Alternativas – Evaluadas a seis meses	91

Lista de Figuras

Figura 1 Light Duty HPS Skid.....	19
Figura 2 Normal Duty HPS Skid	19
Figura 3 Maximum Duty HPS Skid.....	19
Figura 4 Light Duty HPS Weldment.....	20
Figura 5 Normal Duty HPS Weldment	20
Figura 6 Maximum Duty HPS Weldment.....	20
Figura 7 Thrust Chamber Support Table	21
Figura 8 Soporte Cámara de Empuje	21
Figura 9 Thrust Chamber Bolt Ring	22
Figura 10 Bandeja de Goteo - Drip Pan.....	22
Figura 11 Abrazadera de bomba - Pump Clamp.....	23
Figura 12 Switch Support y Junction Box Support.....	23
Figura 13 Motor a prueba de goteo.....	26
Figura 14 WPII Motor	26
Figura 15 TEFC Motor	27
Figura 16 XP Motor	28
Figura 17 Coupling de Motor tipo Espaciador.....	31
Figura 18 Protector del acople	32
Figura 19 Cámara de Empuje.....	32
Figura 20 Sello Mecánico	33
Figura 21 Succión de la Bomba – Intake	34
Figura 22 Adaptador de Intake.....	34

Figura 23 Sello de Housing.....	35
Figura 24 Coupling Cámara de Empuje – Bomba	35
Figura 25 Límites máximos aproximados de presión y caudal, según el tipo de bomba.....	36
Figura 26 Sección cruzada de una bomba típica.....	37
Figura 27 Etapa típica	39
Figura 28 Trayectoria del fluido a través de una etapa radial y de flujo mixto. Corte longitudinal Difusor - Impulsor – Difusor.....	40
Figura 29 Conjunto de Cojinetes Radiales.....	43
Figura 30 Arandelas de empuje descendente; impulsor D725N	44
Figura 31 Arandela de empuje ascendente; impulsor D725N	45
Figura 32 Curvas de desempeño para una etapa de una HPS M520AN	46
Figura 33 Curva NPSHr para una Bomba DN 1750.....	47
Figura 34 Cabeza de Descarga.....	49
Figura 35 Estación de bombeo.....	50
Figura 36 Diagrama puntos de medición - Unidad de Bombeo Horizontal.....	54
Figura 37 Vibraciones permisibles según la Norma ISO 10816.....	54
Figura 38 Identificación de las partes de una etapa.	61
Figura 39 Base bomba. Desgaste severo en bushing de estabilización.....	62
Figura 40 Vista externa conjunto de etapas. Evidencia de depósitos de arcilla con alto contenido de finos	62
Figura 41 Cabeza. Formación de un hombro en el extremo que registra el desgaste significativo del bushing de estabilización	62
Figura 42 Sleeves base y cabeza. Desgaste radial severo en superficies de fricción, fisura en cojinete de la cabeza.....	62

Figura 43 Espaciadores de base y cabeza registran desgaste radial severo, signo de manejo de abrasivos	63
Figura 44 Etapa extremo superior. Desgaste severo y pérdida de material en superficies downthrust	63
Figura 45 Etapa #5. Fractura en sleeve de estabilización, fragmentos del componente en el interior de las etapas	63
Figura 46 Impulsor extremo superior. Desgaste severo en superficies upthrust por pérdida de estabilización radial	63
Figura 47 Difusor ARZ, desgaste radial severo en bushing de estabilización de zirconia.	64
Figura 48 Difusor. Desgaste severo por abrasión en superficies downthrust.	64
Figura 49 Cabeza bomba central. Desgaste ligero en bushing de estabilización.	68
Figura 50 Difusor, vista interna. Desgaste moderado del Bushing de Zirconio.	68
Figura 51 Impeller, corrosión severa sobre las áreas de empuje ascendente.	69
Figura 52 Housing extremo superior. Alta pérdida de material por corrosión en el interior.	69
Figura 53 Impulsores presentaron focos de corrosión generalizada.	69
Figura 54 Etapas Std presentaron incrustación en las áreas de estabilización	69
Figura 55 Impulsor cercano a la cabeza con pérdida de material por corrosión en superficies upthrust. ...	74
Figura 56 Impulsores registran desgaste libre en las áreas de estabilización en empuje descendente (downthrust).	74
Figura 57 Difusores registran pérdida de material en las áreas de acople entre difusores	74
Figura 58 Vista en detalle de los surcos o canales formados sobre las superficies de impulsores	74
Figura 59 Muestra – Impulsor MEB	76
Figura 60 Resultados MEB – Impulsor	76
Figura 61 Difusor – Muestra MEB	77
Figura 62 Resultados MEB – Difusor Sucio	78
Figura 63 Resultados MEB – Difusor Limpio	78

Figura 64 Resultados MEB - Marcas de corrosión-erosión. Posible BSR.....	79
Figura 65 Morfología característica Desulfovibrio Desulfuricans.....	79

Resumen

TÍTULO: ANÁLISIS DE FALLA DEL SISTEMA DE BOMBEO HORIZONTAL UTILIZADO PARA INYECCIÓN DE AGUA EN UN CAMPO COLOMBIANO*

AUTOR: ANDRÉS FELIPE LEAL MORA**

PALABRAS CLAVE: ANÁLISIS DE FALLA, BOMBAS CENTRÍFUGAS, BOMBEO HORIZONTAL

DESCRIPCIÓN:

Frecuentes fallas en los sistemas de bombeo afectan la operación de diversas industrias en tiempo y costos. Es allí donde diseño de sistemas ajustados a las condiciones específicas de la aplicación, muchas veces previstas y muchas otras identificadas durante el desarrollo de la operación, o durante diagnósticos de falla de equipos previos; se hace absolutamente necesario para optimizar la operación, incrementando desempeños y tiempos de corrida.

En el caso de estudio el sistema de bombeo fue sacado de línea debido a las elevadas vibraciones registradas, tal y como también sucedió en otros equipos que lo precedieron. A simple vista los componentes de las bombas del equipo exhibían haber sido sometidos procesos corrosivos, más notorios en la bomba inferior, y de desgaste severo, más notorio en las bombas central y superior.

Este trabajo tiene como propósito realizar el análisis de falla de un sistema de bombeo horizontal utilizado para la inyección de agua en un campo colombiano. Para el estudio se realizó la debida descripción de los componentes del equipo, desmantelamiento, inspección, descripción y detallado registro fotográfico de los equipos. Se verificaron las condiciones del fluido inyectado a través de un análisis físico químico y microbiológico, realizados a muestras tomadas en la succión. Finalmente se proponen algunas alternativas – soluciones para mitigar los efectos de la causa identificada como raíz.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Erik G. Montes, Máster en Ingeniería de Hidrocarburos

Abstract

TITLE: FAILURE ANALYSIS OF THE HORIZONTAL PUMPING SYSTEM USED FOR WATER INJECTION IN A COLOMBIAN OILFIELD*

AUTHORS: ANDRÉS FELIPE LEAL MORA**

KEYWORDS: FAILURE ANALYSIS, CENTRIFUGAL PUMPS, HORIZONTAL PUMPING

DESCRIPTION:

Frequent faults in the pumping systems affect the operation of various industries in time and costs. It is there where systems design adjusted to the specific conditions of the application, many times foreseen and many others identified during the development of the operation, or during diagnostics of failure of previous equipment; It is absolutely necessary to optimize the operation, increasing performance and running times.

In the case of study, the pumping system was taken out of line due to the high vibrations recorded, as also happened in other equipment that preceded it. A simple saw the components of the equipment pumps exhibited to have undergone corrosive processes, more noticeable in the lower pump, and severe wear, more noticeable in the central and upper pumps.

The purpose of this work is to analyze the failure of a horizontal pumping system used for water injection in a Colombian field. For the study, the correct description of the components of the equipment was made, dismantling, inspection, description and detailed photographic record of the equipment. The conditions of the injected fluid were verified through a physical and chemical microbiological analysis, performed on samples taken in the suction. Finally, some alternatives are proposed - solutions to mitigate the effects of the cause identified as root.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Erik G. Montes, Máster en Ingeniería de Hidrocarburos

Introducción

Los sistemas de inyección de agua se encuentran presentes en la industria petrolera con el fin de reducir la declinación de la presión de yacimiento. Actualmente se ofrecen en el mercado diversos sistemas de bombeo para realizar la inyección, una de estas opciones son los sistemas horizontales con bombas centrífugas multietapa.

Frecuentes fallas de dichos sistemas de inyección afectan la operación en tiempo y costos. Es allí donde, como lo mencionan (Grigorescu, I. C. & Navas, G.; 2012), el diseño de sistemas ajustados a las condiciones específicas de la aplicación, muchas veces previstas y muchas otras identificadas durante el desarrollo de la operación o durante diagnósticos de falla de equipos previos; se hace absolutamente necesario para optimizar la operación, incrementando desempeños y tiempos de corrida.

Este trabajo pretende proponer y evaluar potenciales soluciones a la causa raíz y condiciones que contribuyeron a que el sistema de bombeo utilizado en el campo colombiano fallara, a través de la realización del desmantelamiento e inspección del equipo y el análisis de las condiciones operacionales a las que fue sometido.

CAPITULO 1: Componentes de un sistema de Bombeo Horizontal

1.1. Sistema de Bombeo Horizontal - Horizontal Pumping System (HPS)

(Schlumberger, HPS Selection Guide. 2005) Los sistemas de bombeo horizontal son una serie de bombas centrífugas multietapa, formuladas para características de alta presión / caudal medio, adecuadas para una amplia gama de aplicaciones industriales. Las capacidades estándar se sitúan en presiones de descarga de hasta 6650 psi, presiones de entrada de hasta 3000 psi y caudales de hasta 1850 gal / min. Ofrecen una alta confiabilidad y flexibilidad, en aplicaciones tan diversas como:

- Inyección de agua.
- Disposición de salmueras.
- Bombeo de crudo.
- Transferencia de propano líquido.
- Bombear fluido de potencia para bombas tipo Jet y Pistón.

1.1.1. Skid. Corresponde al robusto armazón de acero soldado, sobre el cual los componentes de la HPS están montados y alineados. Una unidad HPS completa corresponde al motor, cámara de empuje, soporte de la cámara de empuje, bomba, *clamp* para la bomba y los interruptores de *Shutdown* necesarios. Las características clave de un *Skid* son:

- Tip de Skid: *Light Duty* (LD), *Normal Duty* (ND) y *Maximum Duty* (MD).
- Diseño flexible: con capacidad de cambiar el tamaño de bombas/motores (manteniendo el mismo marco), eliminando así la necesidad de ordenar un nuevo Skid.

- Se puede almacenar un conjunto de componentes para un diseño flexible.
- Un soporte de cámara de empuje estándar para todos los tipos de Skid.

1.1.1.1. Especificaciones.

Tabla 1

Tipos de Skid - Especificaciones

Tipo de Skid	Motor [HP]	Sección para Bomba	Longitud del Skid [ft]	Longitud de Bomba [ft]	Longitud Motor y Cámara de Empuje [ft]
<i>Light Duty</i>	≤ 250	<i>Single</i>	≤ 23	Hasta 16	7,3
<i>Normal Duty</i>	≤ 900	<i>Single/Double</i>	19,25 – 37	9,3 – 24,43	9,25
<i>Maximum Duty</i>	≤ 1500	<i>Double</i>	24 – 45	23,82 – 35,75	9,25

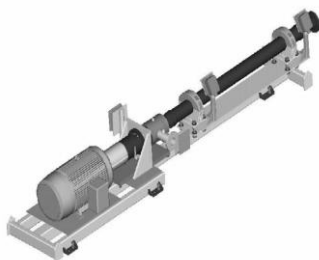


Figura 1 *Light Duty HPS Skid*

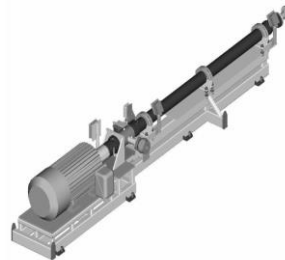


Figura 2 *Normal Duty HPS Skid*

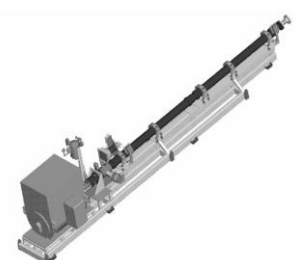


Figura 3 *Maximum Duty HPS Skid*

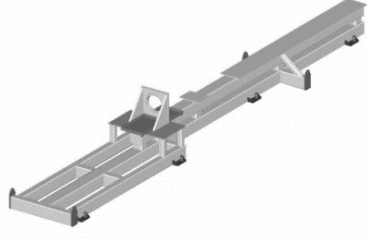
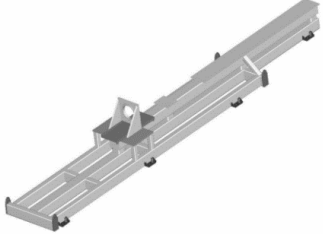
Nota: Adaptadas de Schlumberger (2005). Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572.

1.1.1.2. Componentes del Skid.

1.1.1.2.1. Base Soldada – Base Weldment. Soportes diseñados en módulos soldados para facilitar el ensamble.

Tabla 2

Bases Soldadas - Base Weldments

LD HPS Weldment	ND HPS Weldment	MD HPS Weldment
La base está construida en una sola plataforma, con riel para una bomba single. Está configurada para una altura fija de eje, 18 [in].  Figura 4 <i>Light Duty HPS Weldment</i>	Construida en una plataforma de doble riel para bomba. Está configurada para una altura fija de eje, 32 [in].  Figura 5 <i>Normal Duty HPS Weldment</i>	Tal y como la base ND, es construida con una plataforma con riel doble; con un componente adicional, estabilizadores laterales que incrementan la rigidez.  Figura 6 <i>Maximum Duty HPS Weldment</i>

Nota: Adaptadas de Schlumberger (2005). Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

1.1.1.2.2. Plato Soporte Cámara de empuje – Thrust Chamber support plate. Corresponde a una placa de acero montada en la parte superior del carril de la bomba, que proporciona soporte para la cámara de empuje. En ND y MD Skids, el soporte de la cámara de empuje cuenta con soportes verticales.

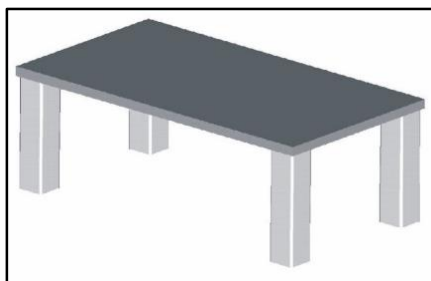


Figura 7 Thrust Chamber Support Table. Adaptado de Schlumberger (2005). Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

1.1.1.2.3. Soporte Cámara de Empuje. Es un compartimiento diseñado para resistir tremendas fuerzas horizontales con llaves diagonales (fuelles), soldadas a la placa base; que se extiende en la parte superior de la sección del riel para bomba y el motor. Este soporte proporciona un montaje muy resistente, correctamente alineado y rígido, para el anillo de pernos – Bolt Ring de la cámara de empuje.



Figura 8 Soporte Cámara de Empuje. Adaptado de Schlumberger (2005). Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

1.1.1.2.4. Anillo de Pernos – Bolt Ring de la Cámara de Empuje. Componente mecanizado que proporciona la superficie de montaje para la cámara de empuje. El anillo de perno se suelda en el interior del soporte de la cámara de empuje, utilizando un mandril de alineado especial; el mandril alinea paralelamente, con precisión, el anillo al carril de la bomba, y asegura la alineación perfecta y permanente de los demás componentes de la bomba y cámara de empuje. Mientras el Skid se encuentra apropiadamente posicionado durante el arranque, futuros reemplazos de bomba y/o cámaras de empuje no requerirán alineamiento.



Figura 9 Thrust Chamber Bolt Ring. Adaptado de Schlumberger (2005). Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

1.1.1.2.5. Bandejas de Goteo – Drip Pans. Las bandejas de goteo se instalan antes y detrás del soporte de la cámara de empuje por seguridad ambiental (contención de aceite secundario).

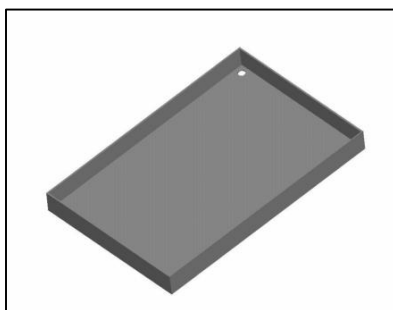


Figura 10 Bandeja de Goteo - Drip Pan. Adaptado de Schlumberger (2005). Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

1.1.1.2.6. Abrazaderas de Bombas – Pump Clamps. El conjunto de abrazaderas de la bomba consiste en dos secciones, una superior y otra inferior, atornilladas, con el fin de soportar y mantener la alineación de la bomba en el Skid. Estos accesorios están fundidos como una sola pieza, agujereados hasta el OD exacto de la bomba para la cual son requeridos, y cortados de forma precisa en dos mitades de acoplamiento. Las abrazaderas se encuentran montadas en el Skid a través de cuatro pernos de ajuste. Dichos pernos se sujetan a una placa de sujeción que está soldada al carril de la bomba.

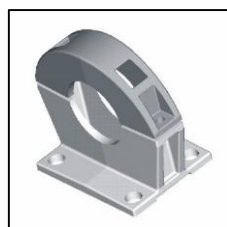


Figura 11 Abrazadera de bomba - Pump Clamp Adaptado de Schlumberger (2005).

Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

1.1.1.2.7. Soportes para instrumentación – Instrumentation Support. Se debe considerar el tipo de instrumentación que se ajustará al Skid, y donde deberá ser montada para poder cumplir con los requisitos de la operación. Un Skid de configuración estándar cuenta con sensores interruptores para ambos, succión y descarga de la bomba, ubicados en placas de montaje cercanas a las bridas relevantes.

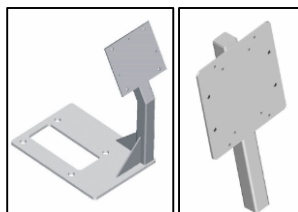


Figura 12 Switch Support y Junction Box Support. Adaptado de Schlumberger (2005). AL,

HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

1.1.2. Fuente de Poder – Power Source. El motor principal es la fuente de energía utilizada para brindarle rotación a la bomba, es usualmente un motor eléctrico.

1.1.2.1. Especificaciones.

- **Caballos de Fuerza – Horsepower:** Es la potencia requerida por etapa, multiplicada por el número de etapas y por la gravedad específica del fluido. La potencia máxima de la curva no debería exceder el rating factor del motor en servicio.
- **Voltaje:** Si es posible, utilice el voltaje disponible en sitio (para anular la necesidad de transformadores). Si se debe extender una línea de suministro, debe ser de la fuente más cercana posible, con el fin de minimizar las caídas de voltaje. Con respecto al tamaño del conductor, requerimientos de bajo voltaje resultarán en líneas de transmisión de gran diámetro. Por el contrario, requerimientos de voltajes altos minimizarán el tamaño del conductor, debido a que se manejarán corrientes más bajas. Reconociendo estos requerimientos, existe una recomendación de caballajes a manejar respecto a un rango de voltajes:

Tabla 3

Rangos recomendados V - HP para motores

<i>Rated Voltage 60 Hz (50 Hz)</i>	<i>Rango de Potencia Recomendado [HP] (50 Hz)</i>
460 (380)	Hasta 400 (300)
2300 y 4000 (3300)	400 a 1500 (1250)
6600 (6000)	≥ 1000 (≥ 800)

Nota: Tomado de Schlumberger (2013). ALFORM, HPS Field Service Manual, Original Instructions. HPS Sustaining Engineering. InTouch ID: 3255850.

Se considera bajo voltaje de 230 a 575 V; y medio voltaje de 600 a 7200 V.

- Frecuencia: En USA, los sistemas de potencia en ciclos de 60 Hz predominan, mientras que en Europa y el resto del mundo sistemas de 50 Hz son comunes. Las velocidades sincrónicas resultantes son 3600 y 3000 RPM, respectivamente. Sin embargo, las velocidades prácticas de diseño son 3570 y 2970 RPM, respectivamente, para permitir el slip del motor. El *Variable Speed Drive* (VSD) – Variador de Frecuencia, brinda la capacidad de variar las velocidades desde cero hasta velocidades por encima incluso de la velocidad sincrónica.

$$\text{Velocidad Sincrónica} = 120 \times \text{frecuencia} / \text{Número de Polos}$$

La velocidad de un motor eléctrico de dos polos es de aproximadamente 3570 RPM. La máxima velocidad en unidades HPS con VSD, es de 64 a 66 Hz generalmente. El fabricante del motor es quien determina el máximo de RPM.

- Variador de Frecuencia (VSD): es un controlador electrónico que ajusta la velocidad de un motor eléctrico (por encima y por debajo de su velocidad nominal), modulando la potencia entregada.
- Tipos de Carcasa de Motor: El ambiente en el cual operará el motor tendrá un efecto significativo en la expectativa de vida de la unidad. Mientras que una expectativa de vida de motor típica puede ser de hasta 20 años, ésta puede severamente recortada si el motor no es apropiadamente protegido del polvo, humedad o contaminantes. La diferencia principal entre los tipos de carcasa de motor es el grado de protección que se le provee al devanado:
 - A prueba de goteo – *Open Drip Proof* (ODP): es el de menor costo, ofrece una protección mínima del ambiente. Usan aire soplado exterior para enfriar el devanado. Usados principalmente en aplicaciones interiores, o instalaciones protegidas, libres de contaminantes, libres de humedad en el aire.

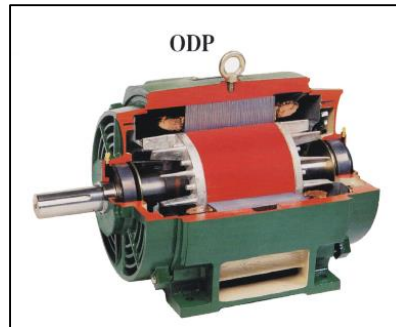


Figura 13 Motor a prueba de goteo. Tomado de: Kinsfather C. (2018). Motor Acronyms. Wolf Automation. Recuperado de <https://www.wolfautomation.com/blog/motor-acronyms-definitions/>

- Protegido del Clima – *Weather Protected II* (WPPII): es un diseño de motor abierto con resistencia a la humedad, aislamiento y mallas. Es adecuado para uso al aire libre con presencia de humedad, ambientes sucios o polvorientos. Se usan comúnmente para aplicaciones >400 HP.

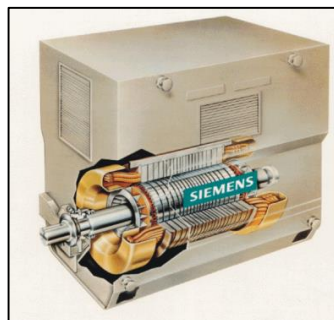


Figura 14 WPPII Motor. Tomado de: Siemens. AboveNema Motors. Industry USA Siemens. Recuperado de <https://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/electric-motor/anema-motors/pages/anema-motors.aspx>

Es básicamente un motor ODP con una carcasa que proporciona protección contra la intemperie, que evita que la lluvia horizontal pueda entrar en los devanados del motor. Cuando la atmósfera operativa contiene ácidos, sales u otra clase de químicos que puedan afectar el bobinado, un motor total y especialmente cerrado debe ser especificado y diseñado.

- Ventilador totalmente encerrado – *Totally Enclosed Fan Cooled* (TEFC): se utilizan en aplicaciones de exteriores severos, alta suciedad, polvo, ácidos, sales u otros contaminantes/entornos químicos que puedan afectar el bobinado.

No hay libre intercambio de aire entre el exterior y el interior del motor. El enfriamiento del cuerpo del motor se da a través de un ventilador interno que sopla aire sobre las aletas acanaladas del cuerpo del motor para disipar el calor del devanado. Esta capacidad de enfriamiento extra lo hace un diseño más costoso que los demás.

Frente a trabajos de maquinado y/o químicos, se construyen configuraciones especiales en este grupo, incluyendo sellos especiales para eje, entre otras mejoras.

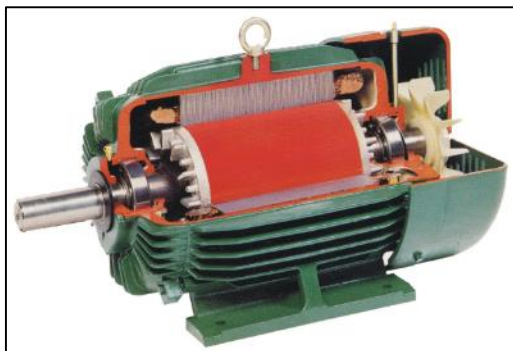


Figura 15 TEFC Motor. Tomado de: Indiamart. TEFC Squirrel Cage Induction Motors.

Recuperado de <https://www.indiamart.com/proddetail/tefc-squirrel-cage-induction-motors-13260062188.html>

- A prueba de explosiones – *Explosion Proof* (XP): deben ser usados en ambientes de operación que presenten gases explosivos. Básicamente, el XP es un motor TEFC internamente modificado, de manera que chispas o llamas no podrán escapar del interior, si ocurriera una explosión dentro del equipo.



Figura 16 XP Motor. Tomado de: Siemens. Semiotics XP Explosion-Proof Motors. Industry USA Siemens. Recuperado de <https://w3.siemens.com/drives/global/en/motor/low-voltage-motor/iec-motors/ex-motors/pages/ex-motors.aspx>

La temperatura de la superficie del motor no debe exceder el 80% de la temperatura de ignición de los gases presentes en el ambiente de operación.

- **Tamaño de la Estructura:** Según lo establecido por la National Electrical Manufacturers Association (NEMA), en el estándar MG1-11.01 se puede encontrar un conjunto de estándares dimensionales para motores eléctricos. Estas dimensiones incluyen entre otras cosas, la huella de montaje, ubicación del hoyo, diámetros de ejes, altura y extensión de la línea central, así como la longitud de todo el conjunto, desde la cubierta del ventilador hasta el final del eje.
- **Tipo de Cojinete:** motores eléctricos de gran tamaño están disponibles con dos tipos de cojinetes. Todos los marcos de motor NEMA están contruidos con rodamientos de bola lubricadas con grasa, comúnmente conocidas como “cojinetes antifricción”. Los motores NEMA están disponibles con cojinetes de bola – rodamientos, o cojinetes tipo buje (lubricados con aceite). Los cojinetes tipo buje son más costosos y pueden requerir una circulación por separado del aceite, con el fin de refrigerarlo. Por esta razón, usualmente no son considerados para aplicaciones por debajo de los 1000 HP.

1.1.2.2. Consideraciones Ambientales.

- **Altitud:** Motores operando en elevadas altitudes se encuentran normalmente derrateados para un valor conocido de output. Se debe tener presente la reducción de potencia que se requiere para elevaciones sobre los 3300 ft (1000 m), debido a la reducción en la efectividad de la refrigeración del motor. La densidad reducida del aire es la razón de que el motor no tenga la capacidad física de liberar normalmente el calor.

Una opción para operar en elevadas altitudes es especificar una clase de aislamiento que soporte mayores temperaturas en el motor, o utilizar un motor más grande que el requerido para la aplicación.

Tabla 4

Factores de derrateo de motor, según la altitud

HorsePower Derrating Factors	Altitudes [ft]
0,97	3300 – 5700
0,94	5000 – 6600
0,9	6600 – 8300
0,86	8300 - 9900
0,82	9900 - 11500

Nota: Tomado de Schlumberger (2013). ALFORM, HPS Field Service Manual, Original Instructions. HPS Sustaining Engineering. InTouch ID: 3255850.

- **Clases de Aislamiento:** En un motor eléctrico, los leads del estator, el embobinado, y las conexiones, se encuentran cubiertas con aislamientos dieléctricos. El tipo de aislamiento usado

depende de las condiciones del servicio, del tamaño de motor y voltaje requeridos; siendo la clase F la más usada.

Tabla 5

Clases de aislamiento para motores, según la temperatura de operación

Clase de Aislamiento	A	B	F	H
Máxima Temperatura interna de Operación	221 °F (150 °C)	266 °F (130 °C)	311 °F (155 °C)	356 °F (180 °C)

- Temperatura Ambiente: La temperatura ambiente también tiene un efecto sobre las especificaciones del motor. Fabricantes de USA, diseñan sus motores para una temperatura ambiente de no más de 104 °F (40 °C). Dado que existen aplicaciones donde las temperaturas de operación podrían fácilmente superar este valor, el motor en cuestión deberá contar con una clase de aislamiento mayor, o usar un motor sobredimensionado.

- Códigos de conformidad ambiental: Industrias especializadas tienen requerimientos especiales, para cumplir con las conformidades ambientales para motores.

- El estándar de la *Mine Safety and Health Administration* (MSHA) es un requerimiento opcional para motores vendidos para servicios de minería de alto riesgo, y está adaptado específicamente para atmósferas explosivas.
- Motores para trabajos de molido y ambientes químicos deben ser de hierro fundido, con desagües de acero inoxidable y *slinger v-ring* adaptado a atmósferas corrosivas.
- El código 45 de la IEEE es referido para operaciones en plataformas costa afuera, establece que motores a desempeñarse en ambientes marinos requieren una construcción en fundición

de hierro con todos los componentes añadidos (tales como *Name Plates*) en acero inoxidable, también establece especificaciones de pintura especiales.

- **Ruido:** La importancia del ruido generado por el motor radica en el efecto que tiene para la calidad del ambiente de trabajo, y consecuentemente es un asunto sujeto a reglamentación gubernamental. El ruido generado por un motor es principalmente causado por el movimiento de aire, por lo tanto, el tipo de carcasa es el principal factor que afecta la emisión de ruido. Por ejemplo, un motor TEFC es más ruidoso que un motor ODP.

1.1.3. Coupling del Motor. El torque del motor es transferido al eje de la cámara de empuje por medio de un *coupling* tipo disco flexible con un espaciador retirable de 7 pulgadas de longitud. Los *hubs* de tanto motor como cámara de empuje están perforados para lograr un ajuste de interferencia y son acoplados sobre los ejes con cuñas recortadas para lograr un balance preciso. El motor es montado sobre el Skid usando una herramienta de alineamiento de precisión láser dirigida hacia ambos *hubs*.

Dado que el *spacer* se encuentra atornillado al *pack* de discos, puede ser fácilmente removido para reemplazar el sello del eje sin alterar la alineación del motor o de la tubería de admisión.

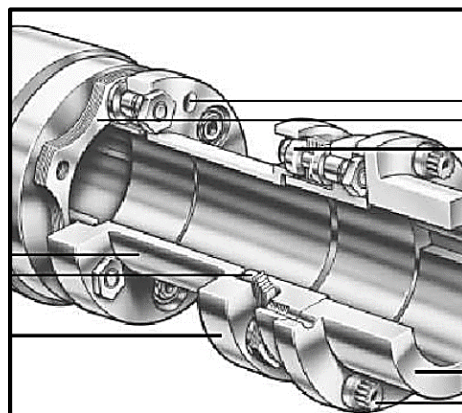


Figura 17 Coupling de Motor tipo Espaciador. Adaptado de Schlumberger (2005).

Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

1.1.3.1. Protector del Acople. El protector de acoplamiento es esencial para una operación segura del sistema. El protector es en aluminio no productor de chispas, suministrado en longitudes de 15 o 17 pulgadas. La longitud generalmente depende del espacio entre el orificio de acoplamiento (lado del motor) y el cuerpo del motor. La brecha máxima permitida es 2,5 pulgadas.

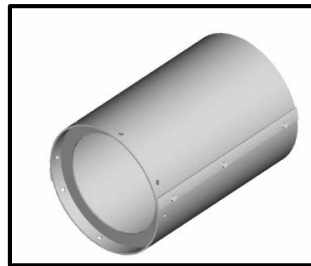


Figura 18 Protector del acople. Adaptado de Schlumberger (2005). Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

1.1.4. Cámara de empuje. La cámara de empuje (Fig 19) es un componente montado sobre un soporte vertical rígido entre el motor y la succión de la bomba. Contiene dos cojinetes, encargados de absorber las cargas de Downthrust y Upthrust, así como cojinetes radiales que soportan el peso del eje y los *couplings*. Es una máquina auto-lubricada con su propio suministro de aceite lubricante/refrigerante. Transmite el torque desde el motor a la bomba, a través de un acople que usa cuñas.

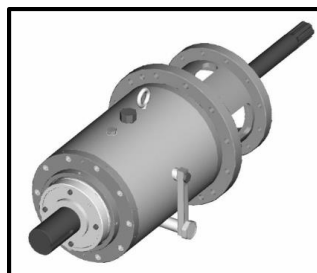


Figura 19 Cámara de Empuje. Adaptado de Schlumberger (2005). Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

1.1.5. Sello mecánico. Es un dispositivo que se ajusta sobre el eje de una bomba, permite el incremento de presión dentro del housing de la bomba, y por lo tanto previene fugas de líquido del interior del housing de la bomba al eje en rotación.

Existe también un sello de housing, éste se ajusta sobre la cámara de empuje y sella el motor de la chaqueta de la succión de la bomba; también sirve como superficie de soporte para el sello mecánico del eje.

Normalmente, como se ilustra en la figura 20, un sello contiene un elemento estático y un elemento dinámico (giratorio) que se ponen en contacto entre sí para formar una cara de sellado con un recorrido de fuga mínimo. Estas superficies (caras) se juntan bajo resorte y/o presión hidráulica para energizar el contacto de sellado. La operación exitosa depende de lograr las condiciones adecuadas en la interfaz sello/eje, ya que una fina película hidrodinámica del líquido contenido lubrica las caras. Las caras son muy pulidas, muy planas y están hechas de materiales duros con características de fricción muy bajas. Si bien el principio básico de operación sigue siendo el mismo, los sellos mecánicos varían ampliamente en detalle, diseño y construcción, para satisfacer las condiciones operativas específicas (es decir, la velocidad, presión y fluido que se debe contener).

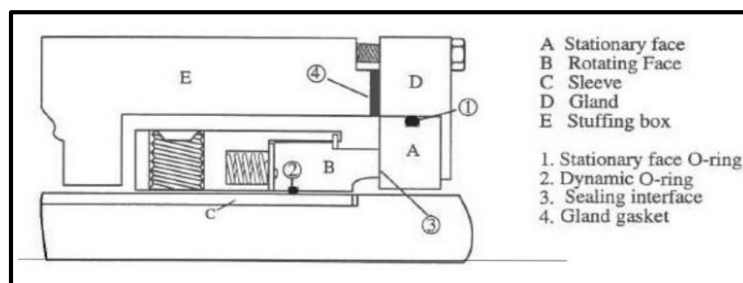


Figura 20 Sello Mecánico. Adaptado de Schlumberger (2005). Schlumberger. AL, HPS

Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

1.1.6. Succión de la Bomba – Intake. Esta parte se compone de la camisa de líquido principal y la boquilla de admisión con brida de succión adjunta. Proporciona un conducto entre la fuente de líquido y la brida de entrada de la bomba (o base), con ayudar de un adaptador (Fig. 22) y también conecta mecánicamente la cámara de empuje, el Skid mismo (a través del soporte de la cámara de empuje) y la bomba. El lado del motor de la admisión está sellado por el sello del housing (Fig. 23).

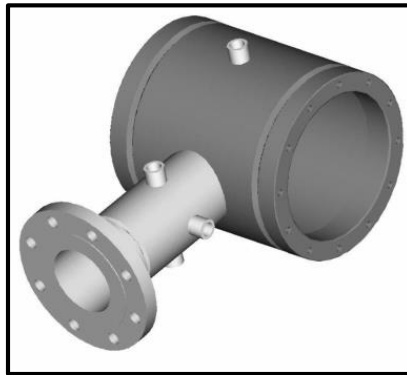


Figura 21 Succión de la Bomba – Intake. Adaptado de Schlumberger (2005). Schlumberger.

AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

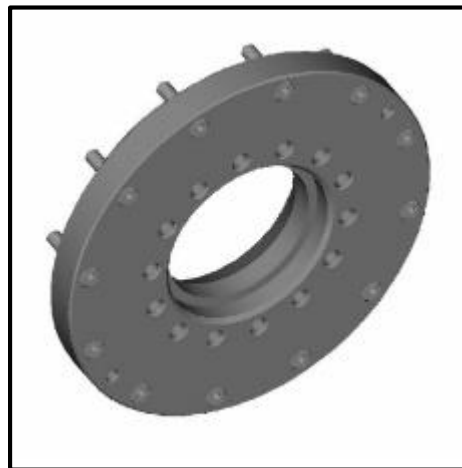


Figura 22 Adaptador de Intake. Adaptado de Schlumberger (2005). Schlumberger. AL, HPS

Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

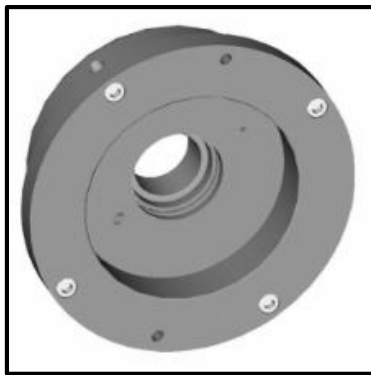


Figura 23 Sello de Housing. Adaptado de Schlumberger (2005). Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

1.1.7. Coupling Cámara de Empuje – Bomba. El torque del motor es transferido a través del *coupling* del motor y el eje de la cámara de empuje al eje de la bomba a través de un *coupling* ranurado.

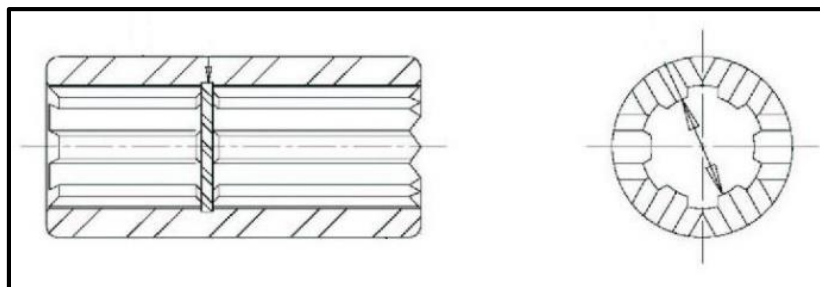


Figura 24 Coupling Cámara de Empuje – Bomba. Adaptado de Schlumberger (2005). Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

Dado que los ejes de la bomba y cámara de empuje deben estar completamente acoplados para que el empuje generado se transmita hacia los cojinetes de la cámara de empuje, el *coupling* bomba – cámara debe llenarse con la cantidad adecuada de pequeños espaciadores (“*shims*”). Este proceso es conocido como ajuste de eje (“*Shaft Setting*”), y se logra a través de una herramienta especial llamada Herramienta – H; se realiza cada vez que una bomba es instalada o reemplazada.

1.1.8. Bomba. Bombas centrífugas multi etapas, que pueden llegar a brindar altas, medias o bajas presiones, de acuerdo con lo requerido.

Las bombas usadas en los sistemas horizontales vienen en diferentes estilos, basados principalmente en los requerimientos de presión. Todas las bombas son probadas hidrostáticamente sobre 1.5 veces su presión máxima de trabajo permitida.

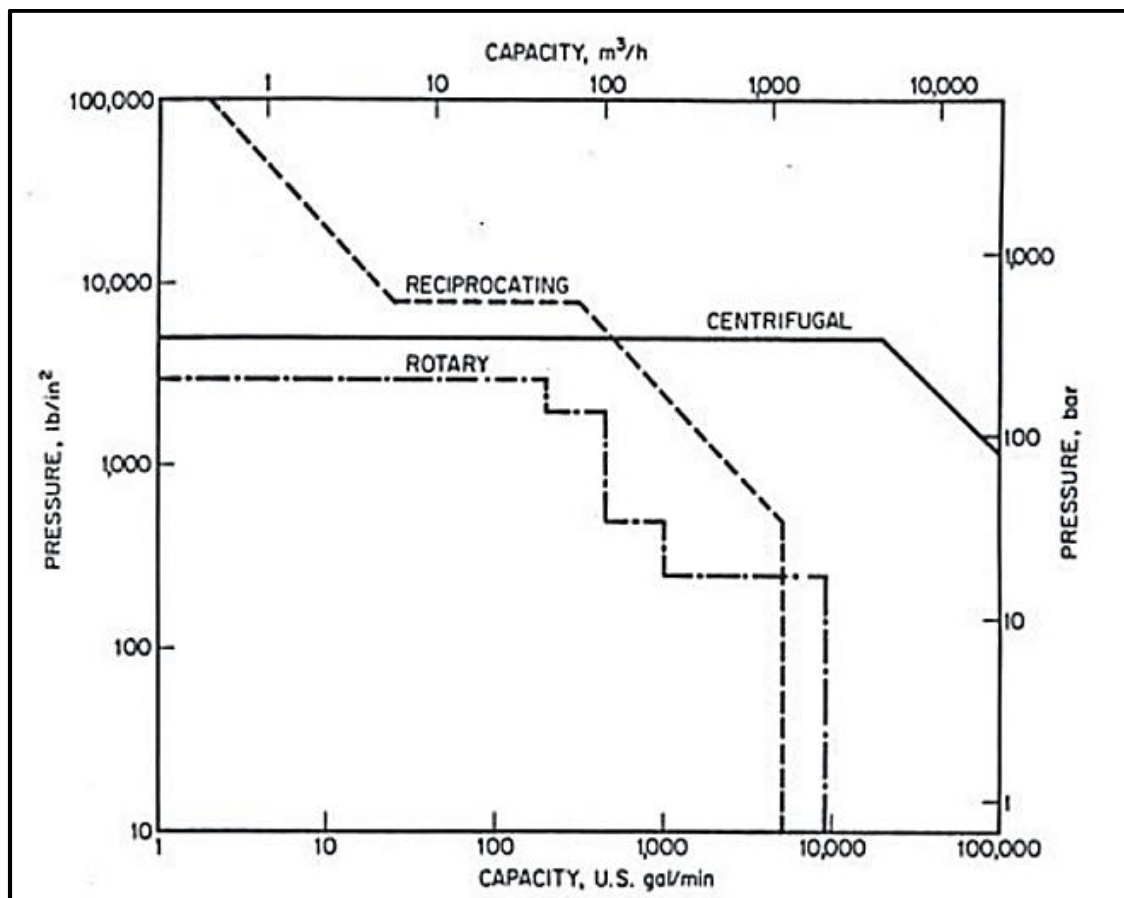


Figura 25 Límites máximos aproximados de presión y caudal, según el tipo de bomba. Adaptado de Schlumberger (2005). Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch

ID: 3983572

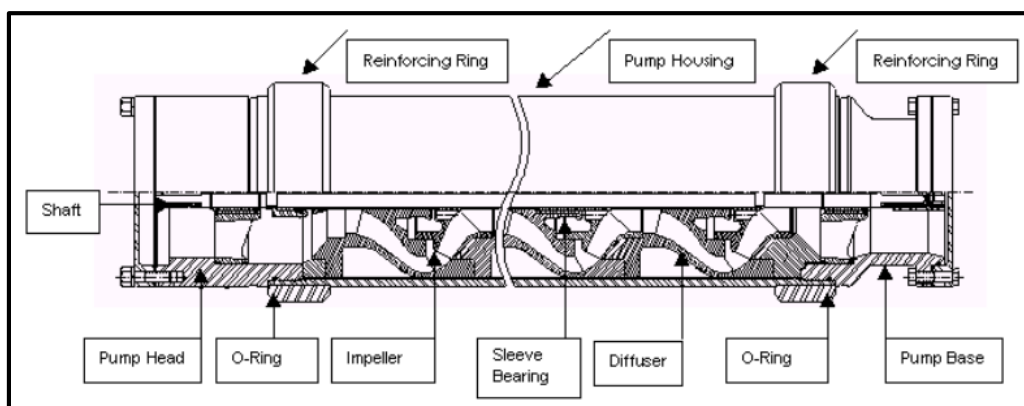


Figura 26 Sección cruzada de una bomba típica. Adaptada de: T. Gabor, 2009. Chapter 3: ESP Components and their Operational Features. Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operations and Maintenance. Burlington, USA. Elsevier Inc.

Tabla 6

Series de Bomba, máximas presiones permitidas

Series de Bombas	Máxima Presión Permitida			
	Bomba de Fondo	Sistema de Bombeo Horizontal		HPS XH**
		316 SS	Redalloy	
400	2700	NA	NA	NA
540	3133	3330	4750	6650
538	2833*	2730	4750	6650
675	2300	1800	5000	6000
862	1333*	1000	3330	6000
950	750	1000	3250	4000
1000	550	1200	2800	3100

*Redalloy (SS) y Carbon Steel

**Aplica para todos los materiales

Nota: Tomado de Schlumberger (2013). ALFORM, HPS Field Service Manual, Original Instructions. HPS Sustaining Engineering. InTouch ID: 3255850.

(T. Gabor, 2009) La bomba centrífuga genera caudal mediante la transferencia de la potencia del eje del motor a los impulsores de la bomba, que a su vez transfieren la potencia al fluido en forma de velocidad de flujo. La bomba desarrolla presión de cabeza a medida que el líquido pasa a través de cada difusor. Cada etapa incluye un impulsor y un difusor, y puede producir una pequeña cantidad de presión. Las etapas múltiples se apilan de extremo a extremo para cumplir con la presión requerida por cada sistema en cuestión. El desempeño de la bomba en la generación de cabeza cambiará si la viscosidad del fluido, gravedad específica del fluido, volumen de gas libre, o si las RPM de la bomba cambian.

1.1.8.1. Componentes principales de una bomba centrífuga.

1.1.8.1.1. Etapas. Una etapa consiste en un impulsor giratorio y un difusor estacionario. Los impulsores en una bomba están enchavetados al eje y giran con el eje cuando es accionado por el motor. Los difusores no están enchavetados y no giran. Durante el proceso de ensamblaje, los impulsores y los difusores se colocan en el eje y luego se colocan dentro de la carcasa (*housing*) de la bomba. El *housing* es simplemente una carcasa cilíndrica de metal. En este momento, la compresión se coloca en los difusores, es esta fuerza de compresión la que genera una expansión de los difusores contra el diámetro interno del *housing* de la bomba, lo que hace que los difusores no giren en el *housing*.

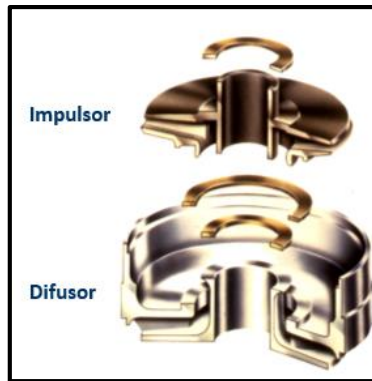


Figura 27 Etapa típica. Adaptada de: T. Gabor, 2009. Chapter 3: ESP Components and their Operational Features. Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operations and Maintenance. Burlington, USA. Elsevier Inc

- Nomenclatura: Un tipo de etapa es denominado según la tasa de flujo que alcanza en su punto de mejor eficiencia (*Best Efficiency Point, BEP*), expresada en gal/min a una frecuencia de operación de 60 Hz.

Una bomba M520N, por lo tanto, operará con su mayor eficiencia en los 520 gal/min. La primera letra observada, en este caso “M”, indica que la etapa corresponde a la serie M, lo que significa que corresponde a la serie de 8,62 in de diámetro externo en la bomba. La “N” final hace referencia al material del que está hecha la etapa, en este caso Ni-Resist.

- Tipos de etapa según su geometría: los elementos que afectarán el desempeño de una etapa son el diámetro del impulsor, el volumen de los pasajes de flujo en difusores e impulsores, y la inclinación de dichos pasajes. Estos tres elementos componen la llamada geometría de la etapa.

Diferentes tipos de etapa, del mismo diámetro, pueden manejar caudales diferentes, según el volumen en de los canales de flujo de cada una. La etapa que maneje mayor caudal será notablemente más alta que la de menor caudal, mientras que los demás componentes se mantengan iguales.

▪ Etapas de flujo radial: también conocidas como tipo “panqueque”, presentan canales de flujo con cambios de dirección muy abruptos. Estos cambios pueden estar cerca de los 180 grados en una etapa de flujo radial, y son estos cambios los que permiten que la etapa desarrolle “cabeza”. Los cambios direccionales son los que determinan la capacidad de una etapa para levantar fluidos. Se denominan etapas tipo panqueque porque sus pasajes de flujo tienen un perfil muy plano. Una etapa radial generalmente desarrollará una buena cantidad de cabeza (o presión), pero puede no ser muy efectiva para fluir volúmenes de líquido altos.

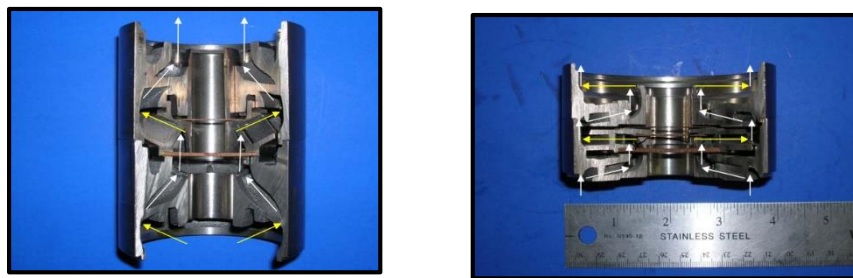


Figura 28 Trayectoria del fluido a través de una etapa radial y de flujo mixto. Corte longitudinal
Difusor - Impulsor – Difusor.

Tabla 7

Series de Bombas – Diámetros

Series	Type	OD [in]
338	A	3,38
400	D	4,00
540	G	5,13
538	S	5,38
562	H	5,63
675	J	6,75
738	L	7,25

862	M	8,63
950	N	9,50
1000	N	10,0

Nota: Tomado de Schlumberger (2013). ALFORM, HPS Field Service Manual, Original Instructions. HPS Sustaining Engineering. InTouch ID: 3255850.

▪ Etapas de flujo Mixto: las transiciones direccionales son mucho más suaves en la etapa de flujo mixto y el fluido puede viajar a través del impulsor y el difusor con mucha menos restricción. Debido a esto, en las etapas de flujo mixto fluirán mayores volúmenes de líquido, pero no se desarrollará tanta presión como en las radiales. Los pasajes de flujo en una etapa de flujo mixto comienzan a tomar más de un perfil de dirección ascendente.

1.1.8.1.2. Eje. Encargado de transmitir rotación a los impulsores, se encuentra disponible en diferentes materiales. El material dependerá de la potencia a la que será sometido el eje, de los esfuerzos torsionales que sufrirá, así como de la composición del fluido a bombear.

Tabla 8

Caballaje soportado por un eje, según material y diámetro del mismo

Diámetro del Eje	Material del Eje				
	Monel	Inconel 625	Inconel 718	High Strength Monel	625 Plus
0,62	94	150	180	116	201
0,68	125	200	240	154	267
0,75	160	256	307	198	342
0,87	256	410	492	316	547
1,00	375	600	720	463	801
1,18	637	1019	1223	787	1361
1,37	800	1280	1536	988	1710

1,50	1000	1600	1920	1235	2137
1,62	1125	1800	2160	1389	2404
1,75	1500	2400	2880	1853	3206
2,00	2270	3632	4358	2803	4851

Nota: Tomado de Schlumberger (2013). ALFORM, HPS Field Service Manual, Original Instructions. HPS Sustaining Engineering. InTouch ID: 3255850.

1.1.8.1.3.

Housing. El *housing* de la bomba es un tramo tubería de acero dentro del cual se insertan las etapas. Se encuentran disponibles en una amplia variedad de tamaños, desde unos pocos pies hasta longitudes superiores a los 20 pies. Pueden ser de acero al carbono (*Carbon Steel*) o de aleaciones especializadas para resistir ambientes más corrosivos, como lo es el Redalloy, que consiste en una aleación de componentes 9 Cromo – 1 Molibdeno. También pueden ser recubiertos con materiales especializados para brindar una protección adicional contra corrosión a abrasión.

1.1.8.1.4. Cabeza y Base. La cabeza y la base se roscan en la carcasa y tienen bridas. Incluyen orificios para pernos para facilitar la conexión con los componentes adyacentes. Estos pueden incluir otras bombas, el adaptador de descarga o un dispositivo de admisión. Las cabezas y las bases están disponibles en material de acero al carbono estándar o Redalloy para resistencia a la corrosión. El acero inoxidable 416 y el acero inoxidable 316 se pueden usar para las cabezas y bases Redalloy según los requisitos de la aplicación. Otros materiales también pueden estar disponibles para abordar entornos y condiciones específicos

Las cabezas y las bases también se pueden revestir para proporcionar una protección adicional contra la corrosión.

1.1.8.1.5. Cojinetes Radiales – Radial Bearings. Los cojinetes radiales aseguran que los componentes rotacionales se mantengan radialmente estables. En la configuración más básica, el eje de una bomba puede ser estabilizado directamente en cada extremo por un único buje. Cabe resaltar que los difusores también asisten en la estabilización radial, ya que cuentan en su interior con un buje estático sobre, o en su forma más sencilla, una cavidad dentro de la cual rotará un buje dinámico o el *hub* del impulsor.

Diseños más avanzados que el estándar cuentan con un conjunto de cojinetes en cabeza y base, así como en intervalos a lo largo de las etapas de la bomba. Estos conjuntos de cojinetes consisten en un buje dinámico o sleeve, enchavetado al eje, y un buje fijo, estático, o bushing. Los bujes dinámicos rotarán dentro de los estáticos, brindando estabilidad radial en varios puntos a lo largo de la bomba.

Los cojinetes pueden encontrarse en diversos materiales, su uso dependerá de la aplicación. Pueden ser de Zirconia, Carburo de Silicio, Carburo de Tungsteno o Graphalloy.



Figura 29 Conjunto de Cojinetes Radiales

1.1.8.1.6. Arandelas de Empuje – Thrust Washers. En general, cada impulsor incluirá una arandela de empuje ascendente y una arandela de empuje descendente. Cuando el rendimiento de la etapa sugiere que puede ser necesaria una capacidad adicional de soporte de empuje, algunos impulsores de flujo radial tales como la D725N utilizarán dos arandelas de empuje descendente para compartir el empuje aplicado.

Las arandelas de empuje evitan el contacto directo metal-metal entre los impulsores y los difusores. La arandela de empuje evita el contacto hacia arriba entre el impulsor y la parte inferior del difusor que está encima; la(s) arandela(s) descendentes también evitan el contacto directo en una dirección descendente entre el impulsor y el difusor debajo de él. Si las fuerzas ascendentes o descendentes que actúan sobre los impulsores se vuelven excesivas, estas arandelas pueden desgastarse, lo que da como resultado el desgaste de las superficies asociadas.

Las arandelas de empuje están hechas de un material compuesto de algodón finamente tejido y una resina fenólica. Variarán tanto en grosor como en diámetro, dependiendo de dónde se coloquen.

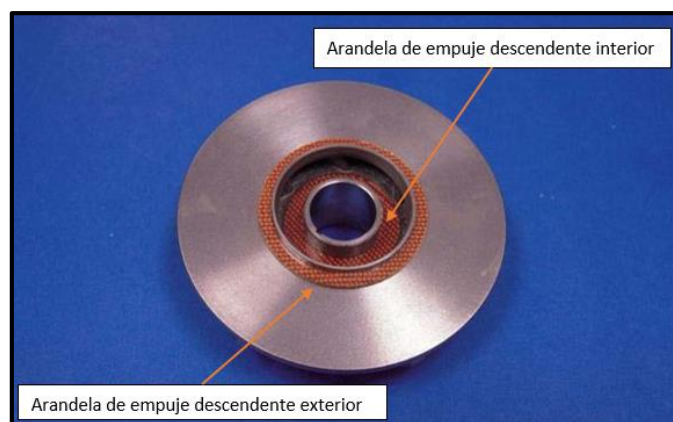


Figura 30 Arandelas de empuje descendente, impulsor D725N

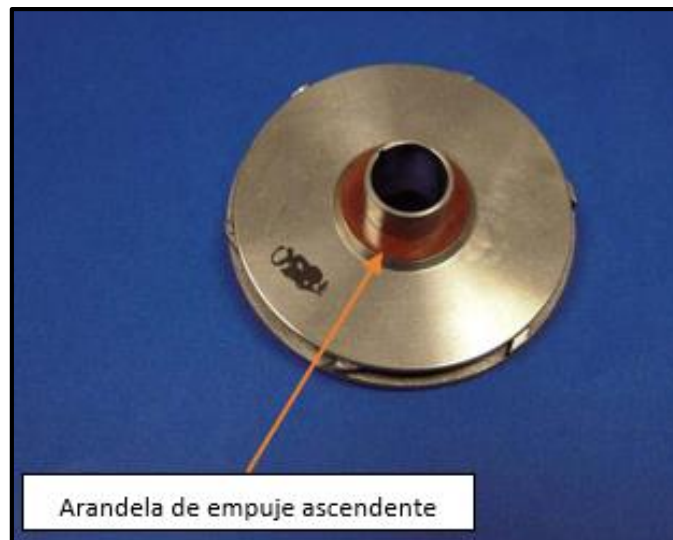


Figura 31 Arandela de empuje ascendente, impulsor D725N

1.1.8.1.7. Curvas de desempeño de bombas centrífugas. El desempeño de una bomba centrífuga se muestra en figuras como la presentada a continuación. Tres curvas diferentes, capacidad de levantamiento de cabeza, demanda de potencia, y curva de eficiencia. (T. Gabor, 2009).

El total de cabeza generado por la bomba cambia con el caudal, incrementa cuando la tasa de flujo cambia de más a menos, la relación entre cabeza y caudal está definida por la curva de capacidad de cabeza definida para cada bomba. Dicha curva definirá el punto de operación del equipo para cada aplicación.

La curva de potencia define los caballos de fuerza requeridos para operar en el punto mencionado. Típicamente, la demanda de potencia incrementa con la tasa de flujo.

La curva de eficiencia define la potencia hidráulica generada por la bomba como un porcentaje de la potencia transmitida desde el motor hasta el eje.

El rango de operación recomendado para cada bomba está definido en la curva de la bomba como el área sombreada en amarillo.

Las curvas de desempeño de cada bomba proveen las RPM y gravedad específica del fluido referencia con que se generaron.

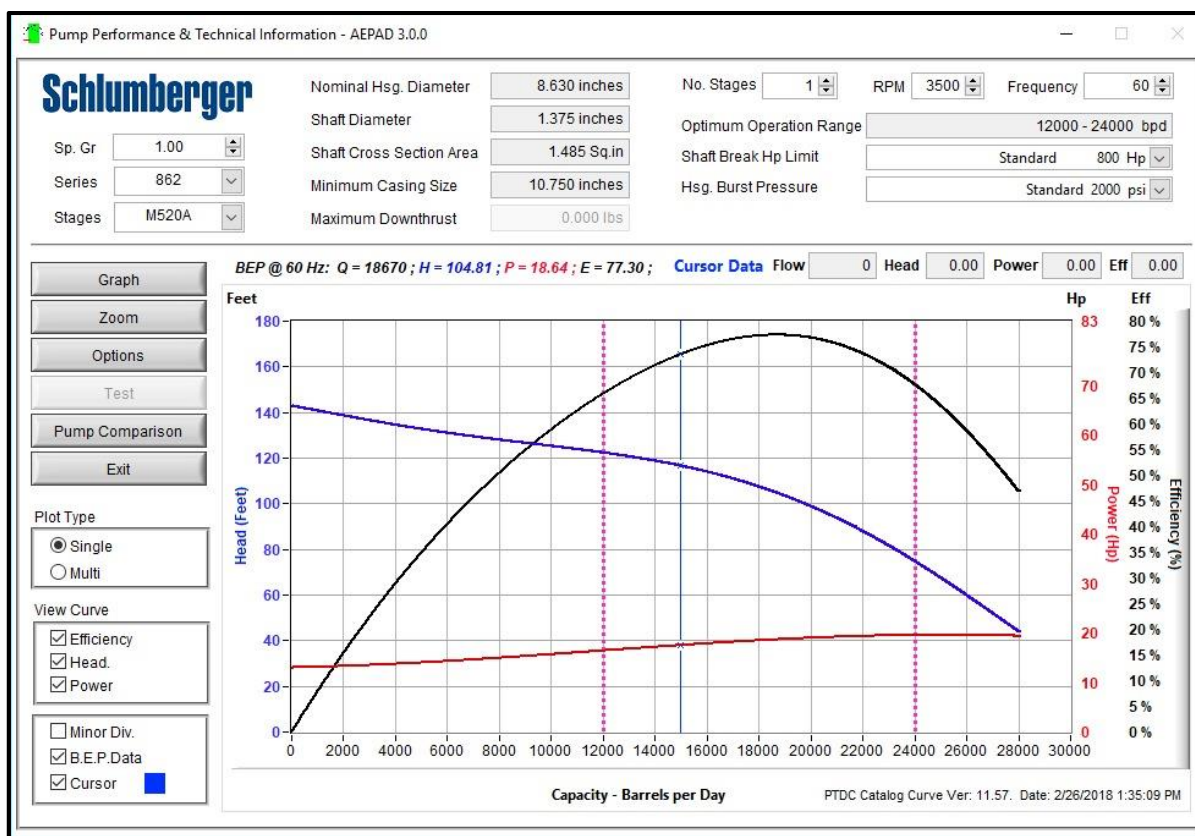


Figura 32 Curvas de desempeño para una etapa de una HPS M520AN. Tomada de:

Schlumberger (2018). Software AEPAD 3.0. HPS M520AN Performance

1.1.8.1.8. Carga Neta de Succión Positiva Requerida – (NPSHr). La presión en la succión de la bomba debe ser lo suficientemente alta para prevenir la cavitación del fluido cuando pase a través de la boquilla del *intake*, hacia las etapas inferiores.

La carga neta de succión positiva se puede definir como la cabeza total absoluta en la succión, en pies, determinada en la boquilla de succión y corregida respecto a un punto de referencia; menos la presión de vapor del líquido en pies. Es un análisis de las condiciones de energía en el lado de

succión de una bomba para determinar si el líquido se vaporizará/cavitara en el punto de presión más bajo en la bomba.

Esta condición puede lograrse manteniéndose por encima de la curva de la carga de succión neta positiva requerida (NPSHr) para la aplicación en cuestión. Se ha desarrollado una curva NPSHr para cada bomba. Las curvas HPS NPSHr se desarrollaron para agua a temperatura de 60 grados F y una velocidad de bomba de 3500 rpm.

Se deben considerar dos valores de cabeza de succión positiva neta; una cabeza de succión positiva neta requerida (NPSHr) y una cabeza de succión positiva neta disponible (NPSHa). El Instituto Hidráulico define NPSHr para bombas centrífugas como, "La cantidad de cabeza en la succión, sobre la presión de vapor, necesaria para prevenir más del 3% de pérdida en la carga total a una capacidad específica". NPSHa es la cabeza total disponible; la NPSHa siempre debe ser igual o mayor que NPSHr.

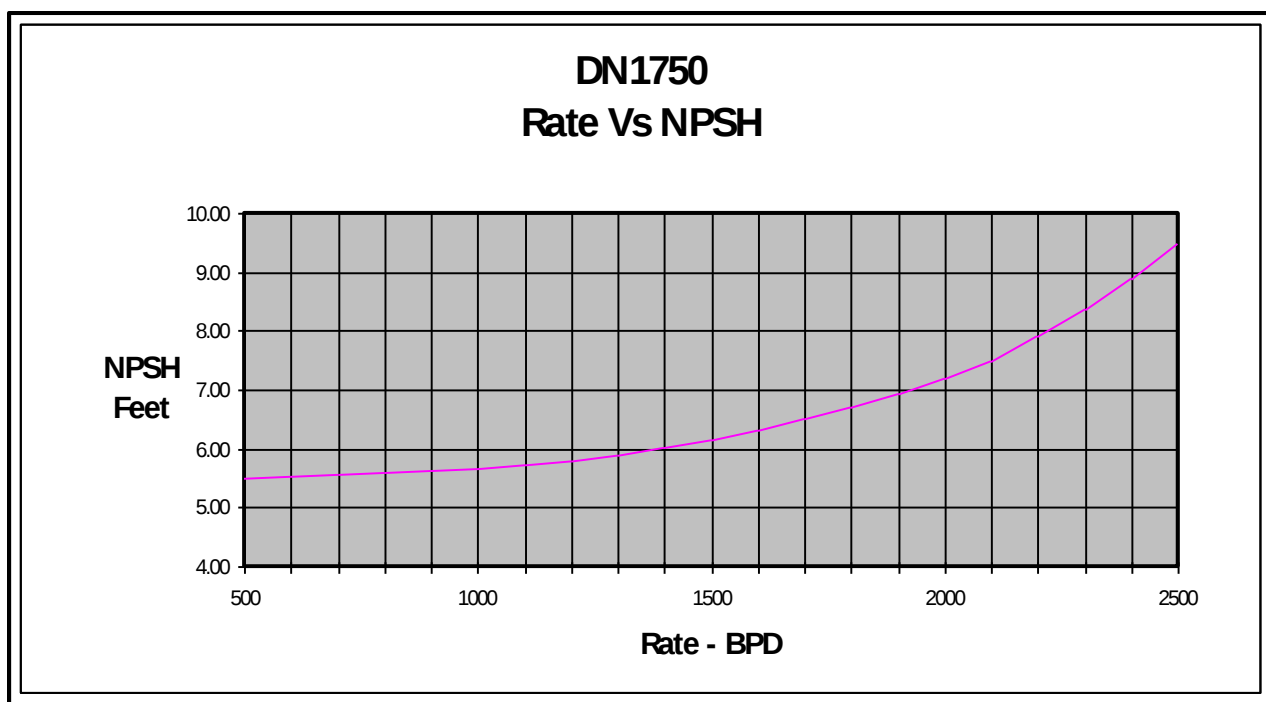


Figura 33 Curva NPSHr para una Bomba DN 1750. Adaptado de Schlumberger (2005).

Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

1.1.8.1.9. Descripción general de los atributos presentes en un sistema HPS. A continuación, se presentará una tabla con los atributos típicos descritos a través de la nomenclatura para unidades RedaHPS de la compañía Schlumberger.

Tabla 9

Descripción general de atributos presentes en un sistema HPS

<i>Atributos</i>	<i>Abreviaciones</i>
Serie	D, G, S, H, J, M, N
Caudal	Galones por Minuto (@ BEP)
Conexión tandem	C-CT
Número de etapas	Definida en la descripción de la bomba
Flanche de base	400, 540, 562, 675, 725, 738, 862, 950, 1000
Flanche de cabeza	400, 538, 540, 562, 675, 725, 862, 950, 1000, 1125
Tamaño del housing	10, 20, 30, 23, 24, etc.
Material del housing	CS, RLOY, RLOY 13 CR. or NONE
Rosca del housing	<i>Buttress, V Thread</i> , Cuadrada
Material de los ejes	HS Monel, Monel, Inconel
Tornillería	Acero (S-Trim), Monel (M-Trim)
Material elastómeros	HSN, AFLAS, CHEMRAZ, VITON, HNBR
Material cojinetes radiales	None, ZZ, ZS, SS, ZT
Material cabeza/base	CS, RLOY, RLOY 13 CR, 316 SS
Diseño - presión del housing	NA, HPS, HOS-H, HPS-XH

1.1.9. Cabeza de Descarga. El cabezal de descarga es un adaptador de doble brida. La parte de la bomba del cabezal de descarga es una brida base de bomba Reda, estándar o extrapesada (XH), con un sello interno de elastómero, O-ring. La otra mitad es una brida ANSI estándar para acoplar con el sistema de tubería de salida. El lado de salida del cabezal de descarga es una brida de junta solapada con un anillo de perno separado para eliminar los problemas de alineación del orificio del perno. (Fig. 34).

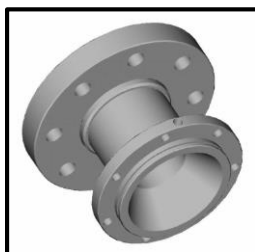


Figura 34 Cabeza de Descarga. Adaptado de Schlumberger (2005). Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

1.1.10. Instrumentación. La inversión del equipo está protegida por instrumentación sobre patín. Los sistemas precableados abarcan desde indicadores de interruptores de apagado básicos hasta adquisición y control de datos locales, sistemas de control de supervisión remota y adquisición de datos (SCADA) basados en telemetría. Las condiciones de falla en RedaHPS pueden ser causadas por cualquiera de varios factores, incluidos problemas de alineación, abrazaderas o accesorios sueltos, válvulas cerradas o baja NPSH. El método de instrumentación estándar utiliza interruptores de vibración y presión conectados a la aparamenta del motor para causar un apagado si se exceden los límites. Los métodos de instrumentación opcionales incluyen transductores analógicos para monitorear la vibración y las presiones. En este caso, el equipo de control del motor debe leer las señales del transductor de monitoreo e iniciar un apagado del motor cuando se exceden los límites.

1.2. Descripción del sistema de bombeo estudiado

El campo colombiano en cuestión cuenta con una estación de bombeo completa, compuesta por varias unidades horizontales en funcionamiento simultáneo y algunas más dispuestas como unidades de respaldo en caso de falla de las que se encuentran en uso. La unidad por diagnosticar fue sacada de línea (luego de 183 días de operación) debido a un progresivo incremento de las vibraciones, que alcanzaron valores por encima del límite recomendado para operar, suministrado por el proveedor de esta.



Figura 35 Estación de bombeo

Tabla 10

Información general del sistema de bombeo estudiado

INFORMACIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE BOMBEO ESTUDIADO			
<i>Datos de Bombas</i>			
	Bomba 1 – Inferior	Bomba 2 - Central	Bomba 3 - Superior
Tamaño del Housing	862	862	862
Número de Etapas	19	24	24
<i>Datos del Motor instalado</i>			
Fabricante	SIEMENS	Serial	0667075 - 020 – 1
HP Rating	1500	Tipo de Carcasa	CG II
Voltaje de Placa	4160	RPM del Motor	3570

Tamaño del Marco	5810 S	Amperaje de Placa	177
Factor de Seguridad de Diseño (SF)	1,15		
Space Heaters	Yes (x) No ()	Clase de aislamiento	F
Max RPM en Operación	3570	Fecha del último Servicio	-
Tipo de Cojinetes del Motor	SLEEVE BEARING	Verificación de Rotación	Si (X) No ()
Cámara de Empuje			
Modelo	G3A - 3B	TC- Temperatura del aceite	175°F
Serial Number	XDBX XXXX	TC- Lectura de vibración	0,165 inch/seg
Part Number	10047XXXX	Oil level status	OK
Sello Mecánico			
Seal	Type 2 (x) Single Cartridge () Double Cartridge ()		
Intake Assembly Data		Discharge Assembly Data	
Material	SS	Material	SS
MAWP [psi]	1500	MAWP [psi]	1500
Test Pressure [psi]	2500	Test Pressure [psi]	6000
Intake Piping Support	Yes(x) No()	Discharge Piping Support	Yes (x) No()
Skid			
Modelo		Condición General	Buena (x) Requiere reemplazo ()
Observed Operating Conditions			
Motor Amps	173	Fluid S.G.	1
Volts	4130	Is Filter in Place	Yes(x) No()
Frequency Hz	60Hz	Was filter cleaned?	OK
Intake Pressure (HPS off)	63 psi	NPSH-A	
Discharge Pressure	3106 psi	Intake Pressure (HPS on)	63 psi
Flow Rate	19805 BPD	Motor Alignment Form	Acceptable (x) No Accept()
Fluid Type	H2O	Base Line Vibration	Acceptable (x) No Accept()
Surface Electrical			
Tipo de Equipo de Supfc.	VSD () SWB(x)	Model: CFMVRXXXX-1500-4160-3R S/N: S20056XXXX-01-1	
Controlador del Motor	Uniconn () K095 () Otro(x)		

Fuente de Poder	Eléctrica (x) Gas () Otro ()						
Transmisores/Switches	Vib 1 (x) Vib 2 () Flow Meter (x) Pint() Pdis(x) Pi@Filter() TC-Temp (x)						
Inter Cool				P/N GENERAL: 10042XXX			
Controlador del Motor	S/N: F 0611032627		Marca: Baldor		Model: SPEC 35S216 1458G1		
	H/P: 0,5	V:115 / 230	Amp: 6,8	RPM: 1750	Frame: 56cz	Hz: 60	Sf: 1,25
	Code: M	Class: F	Nema E: 64%		PF: 64%		
Radiador	S/N: 5XXX7		PSI: 300	F: 350	Model: AOC-19-99695		

Tabla 11

Descripción atributos de las bombas estudiadas

Equipo	Descripción
Bomba Superior	PUMP: M520-A C-CT 24 STG 862/862 24 CS BTHD, 1,37 INC, M-TRM, HSN, ARZ, SS H&B, HPS-H, BLUE PAINT
Bomba Central	PUMP: M520-A C-CT 24 STG 862/862 24 CS BTHD, 1,37 INC, M-TRM, HSN, ARZ, SS H&B, HPS-H, BLUE PAINT
Bomba Inferior	PUMP: M520-A C-CT 19 STG 862/862 19 CS BTHD, 1,37 INC, M-TRM, HSN, ARZ, SS H&B, HPS-H, BLUE PAINT

Bombas de 8,62’’ de diámetro, con capacidad de 520 gal/min en su punto de mayor eficiencia, housings de acero al carbono, cabeza y base de acero inoxidable, ejes en Inconel de 1,37’’ de diámetro, tornillería en Monel y todo material elastomérico (sellos) en nitrilo de alta resistencia.

La bomba superior contaba con 24 etapas, la central con 24 y la inferior con 19, para un total de 67 etapas en todo el conjunto.

Cuando la unidad fue puesta en servicio, se obtuvieron las siguientes mediciones de temperaturas y vibraciones operativas:

Tabla 12

Condiciones de la unidad durante el arranque

Running Freq	60 Hz	Running Amps	173 Amp
Pint	65 psi	Pdisch	3144 psi
Number of Pumps	3		

Tabla 13

Vibraciones y temperaturas en equipos básicos

Vib at Basic Equipment (In/Sec)			
Position		Vertical	Horz
MOTOR	M1	0,061	0,072
MOTOR	M2	0,072	0,054
TC	TC1	0,123	0,132
TC	TC2	0,123	0,132
Intake	Int1	0,078	0,091
Intake	Int2	0,078	0,091
Disch	Dis1	0,053	0,111
INCRE	Axial	0,053	0,111

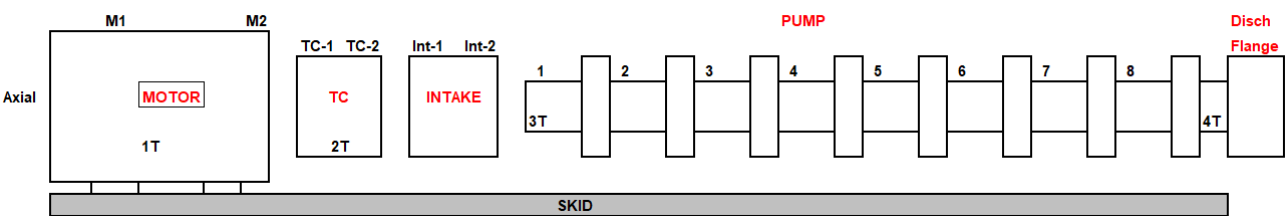
Temperature (°F)	
Posit.	Reading
1T	91
2T	94
3T	94
4T	95

Tabla 14

Vibraciones medidas – Bombas: inferior (1), central (2) y superior (3)

Vib at Pump # 1 (In/Sec)			Vib at Pump # 2 (In/Sec)			Vib at Pump # 3 (In/Sec)		
Pos	Vertical	Horz	Pos	Vertical	Horz	Pos	Vertical	Horz
1	0,083	0,121	1	0,068	0,211	1	0,051	0,153
2	0,083	0,121	2	0,068	0,211	2	0,051	0,153
3	0,083	0,121	3	0,068	0,211	3	0,051	0,153
4	0,083	0,121	4	0,068	0,211	4	0,051	0,153
5	0,071	0,198	5	0,072	0,213	5	0,063	0,132
6	0,071	0,198	6	0,072	0,213	6	0,063	0,132
7	0,071	0,198	7	0,072	0,213	7	0,063	0,132
8	0,071	0,198	8	0,072	0,213	8	0,063	0,132

Figura 36 Diagrama puntos de medición - Unidad de Bombeo Horizontal



Valores admitidos según la Norma ISO 10816, para la medición y evaluación de vibraciones, que en este caso aplicaría el rango correspondiente al Grupo 3, flexible:

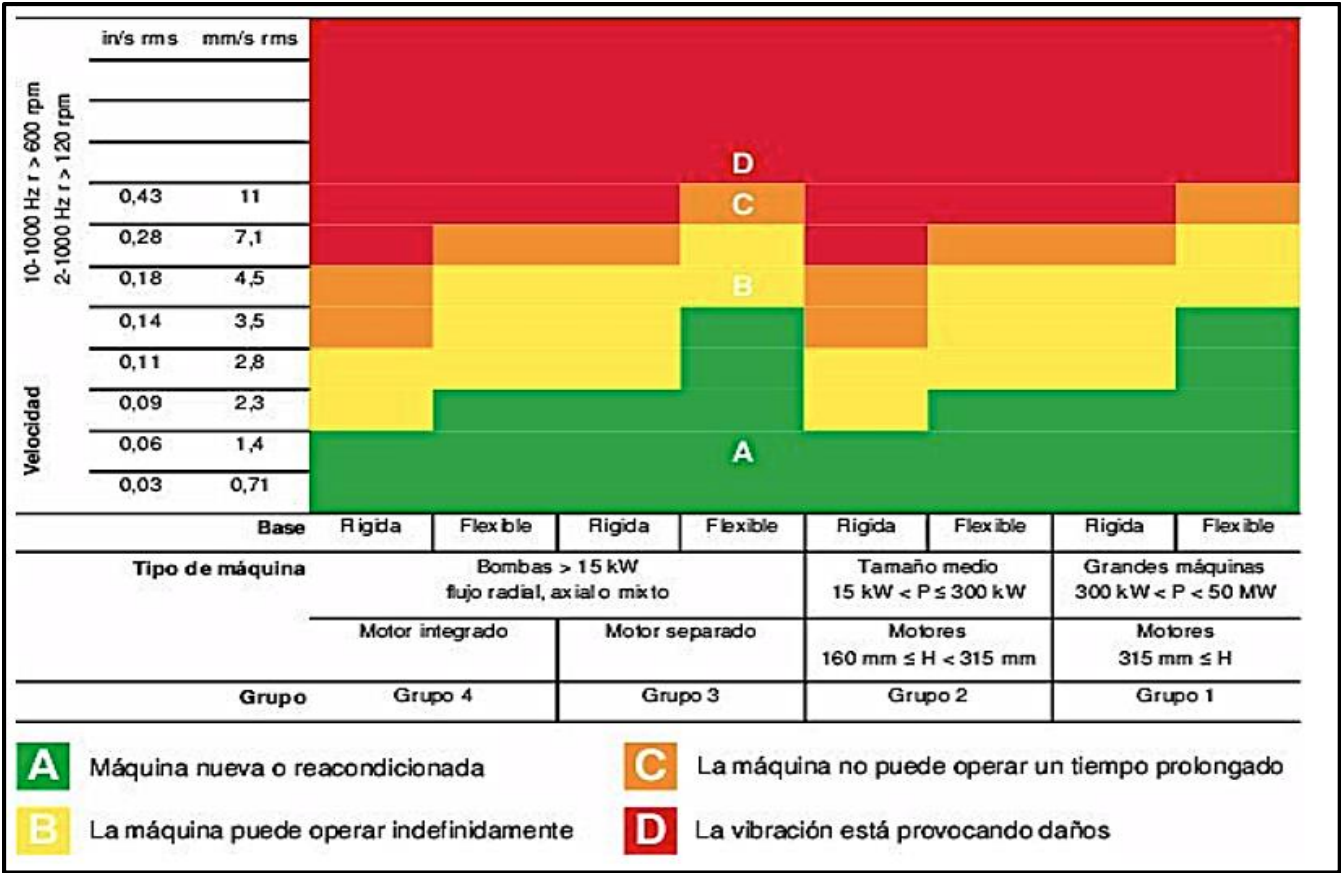


Figura 37 Vibraciones permisibles según la Norma ISO 10816

2. Capítulo 2: Análisis de Falla

La metodología guía para realizar el análisis de falla presentado a continuación corresponde a la utilizada en el *ART (Assembly, Repair and Testing) Center* de Schlumberger Surency, lugar en el que tuve la oportunidad de realizar mis pasantías y del que nació este proyecto.

Para este trabajo inicialmente se realiza una inspección visual de los componentes a analizar, realizando registros fotográficos y toma de medidas a las partes pertinentes. Se analiza la macro morfología exhibida en los componentes, así como las tomas de microscopía electrónica de barrido. Finalmente se analizan los resultados de las pruebas a las que se sometió el fluido, con el fin de caracterizarlo, y a partir de todo lo observado se llega a la(s) potencial(es) razones de falla.

2.1. Resumen del análisis de falla

La unidad fue sacada de operación al registrarse vibraciones de hasta 1 in/s en las unidades de bombeo. La causa raíz de la alta vibración registrada durante la operación obedece a la pérdida de masa sobre impulsores y difusores por corrosión.

La presencia de material corrosivo (proveniente de bacterias sulfato reductoras BSR) genera pitting y pérdida de material en algunas áreas de las etapas, los impulsores pierden su centro de masa y por ende las partes móviles del tren de etapas pierden el balance durante su rotación, creándose un movimiento no uniforme o errático de las etapas que termina ocasionando desgaste y posterior pérdida de algunos componentes de estabilización radial, lo cual desencadenó un incremento significativo de vibración y aumento de temperatura.

2.2. Inspección y desmantelamiento

Inicialmente se realiza el desensamble de los cuerpos de bomba, se realiza una inspección visual y se toman medidas a los componentes clave de cada bomba.

2.2.1. Observaciones de la Inspección

2.2.1.1. Glosario

Tabla 15

Glosario - Descripción inspección de componentes

S1	Severo / Unilateral
SU	Severo / Uniforme
M1	Moderado / Unilateral
MU	Moderado / Uniforme
L1	Ligero / Unilateral
LU	Ligero / Uniforme
S	Severo
M	Moderado
L	Ligero

2.2.1.2. Bomba Superior

Tabla 16

Descripción general - Bomba Superior

General

Descripción:

Tipo:

M520

Serie:	862/862
Etapas:	24
Eje:	1.375 in INC 625
Metalurgia Etapas:	Ni - Resist
Metalurgia <i>Housing</i> :	<i>Carbon Steel</i>
Estabilización:	ARZ

2.2.1.2.1. Observaciones *de la inspección*

Tabla 17

Condiciones externas - Bomba Superior

Condiciones Externas

Condición	Cabeza	Base	<i>Housing</i> / Carcaza
Buena	Si	Si	Si
Recalentamiento	No	No	No
Desgaste <i>Bushings</i>	SU	SU	-

Se evidencia desgaste radial severo en *bushing* y *sleeves* de estabilización tanto de base como en cabeza, el cojinete dinámico de la cabeza registra fisura a lo largo del cuñero.

Tabla 18

Condiciones eje - Bomba Superior

Shaft / Eje

Condición superficial

Cabeza	Medio	Base
--------	-------	------

Buena	Si	Si	Si
Recalentamiento	-	-	-

Desplazamiento del eje / *Shaft Setting*

Cabeza	Base	<i>Shaft Play</i> / Juego axial
0.090 in	0.200 in	-

Ranuras / *Shaft Spline*

	Cabeza	Base
Buena	Si	Si

Giro / *Shaft Rotation*

Libre	Con arrastre	Sin Giro
Si	-	-

Material: Inconel 625

Bomba con giro restringido, medidas de *shaft setting* por fuera del rango de aceptación (Base: 0.200 in, plano: 0.130- 0.190 in; Cabeza: 0.090 in, plano: *Flush* o 0.060 in adentro). Eje sin desplazamiento axial.

Tabla 19

Condiciones cojinetes - Bomba Superior

***Solids* / Material foráneo**

Se encuentra gran cantidad de material similar a arcilla de granulometría fina en el interior de las etapas.

Sleeves / Cojinetes de fricción dinámicos

Material: Zirconia

	Cabeza	Medio	Base
Desgaste	SU	SU	SU

Bushings / Cojinetes de fricción estacionarios

Material: Zirconia

	Cabeza	Medio	Base
Desgaste	SU	SU	SU

Los *sleeves* y *bushings* de las etapas ARZ presentan desgaste radial severo a lo largo de todo el equipo. El cojinete dinámico de la etapa #5 a partir del extremo superior presenta fractura, los fragmentos de este se encontraron incrustados en los pasajes de flujo de las etapas superiores. En los extremos de los cojinetes se alcanzan a evidenciar la formación de un hombro que confirma el desgaste pronunciado en el que se encuentran los componentes.

Tabla 20

Medidas componentes - Bomba Superior

Componente	Medida según plano	Medida actual.	Perdida de material.
<i>Bushing-Cabeza</i>	1,727"	1,772"	0,045"

<i>Bushing-Base</i>	1,727"	1,762"	0,035"
<i>Bushing etapa ARZ-Medio</i>	1,727"	1,774"	0,047"
<i>Sleeve-Cabeza</i>	1,719"	1,689"	0,030"
<i>Sleeve-Base</i>	1,719"	1,670"	0,049"
<i>Sleeve etapa ARZ-Medio</i>	1,719"	1,675"	0,044"

Tabla 21

Condiciones Impulsores y Difusores - Bomba Superior

Material: Ni-Resist

Desgaste	Cabeza	Medio	Base
<i>Downthrust Pad</i>	S	S	S

Impellers / Impulsores

Material: Ni-Resist

Desgaste	Cabeza	Medio	Base
<i>Skirt</i>	SU	SU	SU
<i>Bottom Shroud</i>	S	S	S
<i>Balance Ring</i>	SU	SU	SU
<i>Top Shroud</i>	S	S	S

Se evidencio desgaste catastrófico casi en la totalidad de las etapas, registrando gran pérdida de material por abrasión, el desgaste incrementa hacia la parte superior de la bomba.

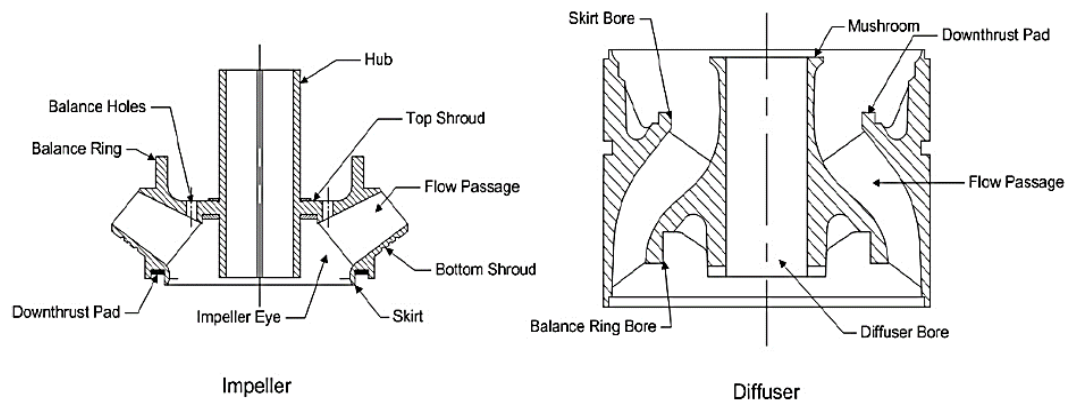


Figura 38 Identificación de las partes de una etapa. Adaptado de Schlumberger (2005).

Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572

2.2.1.2.2. Resumen de la inspección del componente. La bomba se encuentra en condición externa aceptable sin marcas recalentamiento, medidas en base y cabeza por fuera de rango de operación y giro restringido. El eje se encuentra sin signos de desgaste sobre su superficie o torsión. El housing no presenta desgaste en las superficies internas. Los componentes de estabilización radial (Fig. 41 y 42) se encontraron con desgaste radial generalizado a lo largo de todo el equipo, el sleeve de la quinta etapa desde el extremo superior se encontraba fracturado (Fig.45), fragmentos de este se encontraron en el interior de las etapas superiores.

Las etapas se encontraron con desgaste catastrófico (Fig. 44), con alta pérdida de material por abrasión (Fig. 48); el desgaste incrementa hacia la parte superior del equipo. En el interior de la bomba se encuentra gran cantidad de material similar a la arcilla de granulometría fina.

Algunos componentes como espaciadores (Fig. 43) en base, cabeza y etapas registran desgaste radial severo, lo cual genera indicios de manejo de abrasivos.

2.2.1.2.3. Registro fotográfico – Bomba Superior



Figura 39 Base bomba. Desgaste severo en bushing de estabilización



Figura 41 Cabeza. Formación de un hombro en el extremo que registra el desgaste significativo del bushing de estabilización



Figura 40 Vista externa conjunto de etapas.
Evidencia de depósitos de arcilla con alto contenido de finos



Figura 42 Sleeves base y cabeza. Desgaste radial severo en superficies de fricción, fisura en cojinete de la cabeza



Figura 43 Espaciadores de base y cabeza registran desgaste radial severo, signo de manejo de abrasivos



Figura 45 Etapa #5. Fractura en sleeve de estabilización, fragmentos del componente en el interior de las etapas



Figura 44 Etapa extremo superior. Desgaste severo y pérdida de material en superficies *downthrust*



Figura 46 Impulsor extremo superior. Desgaste severo en superficies *upthrust* por pérdida de estabilización radial



Figura 47 Difusor ARZ, desgaste radial severo en bushing de estabilización de zirconia.

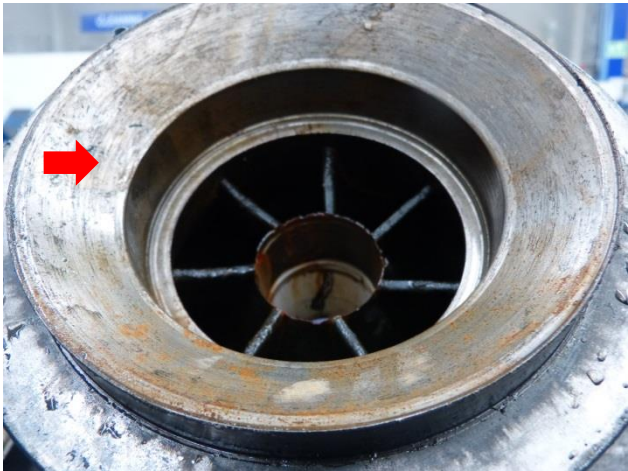


Figura 48 Difusor. Desgaste severo por abrasión en superficies downthrust.

2.2.1.3. Bomba Central

Tabla 22

Descripción General - Bomba Central

General

Descripción:

Tipo:	M520
Serie:	862/862
Etapas:	24
Eje:	1.375 in INC 718
Metalurgia Etapas:	Ni - Resist
Metalurgia Housing:	Carbon Steel
Estabilización:	FBH ZS

2.2.1.3.1. Observaciones de la inspección

Tabla 23

*Condiciones externas - Bomba Central***Condiciones Externas**

Condición	Cabeza	Base	Housing / Carcaza
Buena	Si	Si	Si
Recalentamiento	No	No	No
Desgaste Bushings	LU	LU	-

Desde el punto de vista externo no se evidencian signos de recalentamiento en el *housing* del equipo. Los componentes de estabilización radial en la cabeza presentaron desgaste radial medio tanto en el *sleeve* como en el *bushing*. Los cojinetes de la base registraron tan solo desgaste ligero en la superficie de fricción. (Sleeve OD Base: 1.727 in, Sleeve OD Cabeza: 1.725 in; OD Plano: 1.727 in).

Tabla 24

*Condiciones eje - Bomba Central***Shaft / Eje****Condición superficial**

	Cabeza	Medio	Base
Buena	Si	Si	Si
Recalentamiento	-	-	-

Desplazamiento del eje / Shaft Setting

Cabeza	Base	Shaft Play / Juego axial
0.052 in	0.160 in	0.060

Ranuras / Shaft Spline

	Cabeza	Base
Buena	Si	Si

Giro / Shaft Rotation

Libre	Con arrastre	Sin Giro
-	Si	-

Material: Inconel 718

Giro libre, medidas de *shaft setting* dentro del rango de aceptación (Base: 0.160 in, plano: 0.130- 0.190 in; *Flush* o 0.060 in adentro). Desplazamiento axial del eje ligeramente por encima del rango de operación.

Tabla 25

Condiciones cojinetes - Bomba Central

Solidos / Material foráneo

Se observa una ligera cantidad de material solido de granulometría fina en el interior y exterior de las etapas.

Sleeves / Cojinetes de fricción dinámicos

Material: Zirconia

	Cabeza	Medio	Base
Desgaste	LU	LU	LU

Bushings / Cojinetes de fricción estacionarios

Material: Zirconia

	Cabeza	Medio	Base
Desgaste	MU	LU	MU

Los componentes de estabilización radial registraron desgaste incremental hacia los extremos. En el extremo inferior los cojinetes dinámicos y estáticos tanto de la base hasta la etapa 9 registraron desgaste progresivo que se redujo hasta la base; en las etapas superiores presentaron desgaste progresivo que se reducía hasta la cabeza.

Tabla 26

*Condiciones Impulsores y Difusores - Bomba Central****Diffusers / Difusores***

Material: Ni-Resist

Desgaste	Cabeza	Medio	Base
<i>Downthrust Pad</i>	M	M	M

Impellers / Impulsores

Material: Ni-Resist

Desgaste	Cabeza	Medio	Base
<i>Skirt</i>	L	MU	L
<i>Bottom Shroud</i>	MU	MU	MU
<i>Balance Ring</i>	MU	MU	MU
<i>Top Shroud</i>	L	M	L

Las etapas, tanto impulsores como difusores presentaron desgaste pendular que se reduce hacia los extremos. Las etapas inferiores registraron desgaste moderado en superficies *upthrust* (Fig. 50).

2.2.1.3.2. Resumen de la inspección del componente. *Housing* sin marcas de alta temperatura sobre su superficie. Medidas en base y cabeza dentro del rango operativo según plano, giro libre. Las etapas presentaron pérdida de material generalizado a lo largo de todas las etapas por corrosión (Fig. 51), adicionalmente se registra cierto desgaste en superficies de empuje descendente, el cual disminuye hacia los extremos de la bomba. *O-ring* de base y cabeza sin daños físicos o degradación por temperatura.

Los componentes de estabilización radial en la base y cabeza se encontraron en aceptables condiciones, con tan solo desgaste ligero en las superficies de fricción (Fig. 49), únicamente a los extremos de la bomba. El eje no presentó signos de desgaste radial sobre su superficie.

2.2.1.3.3. Registro fotográfico - Bomba Central

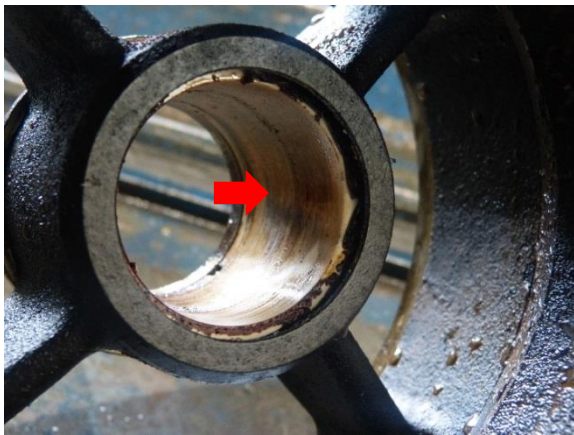


Figura 49 Cabeza bomba central. Desgaste ligero en bushing de estabilización.



Figura 50 Difusor, vista interna. Desgaste moderado del Bushing de Zirconio.



Figura 51 Impeller, corrosión severa sobre las áreas de empuje ascendente.



Figura 53 Impulsores presentaron focos de corrosión generalizada.



Figura 52 Housing extremo superior. Alta pérdida de material por corrosión en el interior.



Figura 54 Etapas Std presentaron incrustación en las áreas de estabilización

2.2.1.4. Bomba Inferior

Tabla 27

Descripción General - Bomba Inferior

General

<i>Descripción:</i>	Serie:	862/862
	Etapas:	19
	Eje:	1.375 in INC 718
	Metalurgia Etapas:	Ni - Resist
	Metalurgia Housing:	Carbon Steel
	Estabilización:	ARZ

2.2.1.4.1. Observaciones de la inspección

Tabla 28

Condiciones externas - Bomba Inferior

Condiciones Externas

Condición	Cabeza	Base	Housing / Carcaza
Buena	Si	Si	Si
Recalentamiento	No	Si	No
Desgaste Bushings	LU	LU	-

Cabeza y base en condiciones aceptables. El housing no presenta marcas de recalentamiento visibles en ningún punto. El interior del housing presenta vestigios de corrosión sobre su superficie.

Tabla 29

*Condiciones eje - Bomba Inferior***Shaft / Eje****Condición superficial**

	Cabeza	Medio	Base
Buena	Si	Si	Si
Recalentamiento	-	-	-

Ranuras / Shaft Spline

	Cabeza	Base
Buena	Si	Si

Giro / Shaft Rotation

Libre	Con arrastre	Sin Giro
Si	-	-

Material: Inconel 625

Bomba con giro libre, medidas de *shaft setting* por fuera del rango de aceptación. El eje no presenta desgaste radial ni signos de recalentamiento.

Tabla 30

*Condiciones cojinetes - Bomba Inferior***Sólidos / Material foráneo**

Se encuentra material similar a arcilla de granulometría fina en el interior de las etapas.

Sleeves / Cojinetes de fricción dinámicos

Material: Zirconia

	Cabeza	Medio	Base
Desgaste	LU	LU	MU

Bushings / Cojinetes de fricción estacionarios

Material: Zirconia

	Cabeza	Medio	Base
Desgaste	LU	LU	LU

Los *bushings* de zirconia de los difusores presentaron desgaste ligero uniforme, la gran mayoría aun conservaban las tolerancias de acuerdo con el plano.

Los difusores de la cabeza presentan desgaste ligero en las superficies de contacto. En algunos casos se presenta pérdida de material puntual con apariencia de corrosión o erosión de manera aleatoria (Fig. 55).

Tabla 31

*Condiciones Impulsores y Difusores - Bomba Inferior****Diffusers / Difusores***

Material: Ni-Resist

Desgaste	Cabeza	Medio	Base
<i>Downthrust Pad</i>	M	M	M

Impellers / Impulsores

Material: Ni-Resist

Desgaste	Cabeza	Medio	Base
<i>Skirt</i>	LU	LU	LU
<i>Bottom Shroud</i>	LU	LU	LU
<i>Balance Ring</i>	MU	MU	MU
<i>Top Shroud</i>	LU	LU	LU

Desgaste ligero en *downthrust* en impulsores generalizado a lo largo del equipo (Fig. 56). Algunos impulsores presentaron pérdida de material con apariencia de efecto combinado entre corrosión y erosión focalizada en el balance ring.

2.2.1.4.2. Resumen de la inspección del componente. Housing sin marcas de alta temperatura sobre su superficie y pérdida de material por corrosión sobre las paredes internas. Medidas en base y cabeza por fuera del rango operativo según plano, giro libre. Se encuentran una cantidad considerable de material similar a la arcilla con partículas finas depositadas en el interior de las etapas. Los componentes de estabilización tanto en base, cabeza y etapas ARZ registraron tan solo un desgaste ligero en las superficies

de fricción. Por su parte las etapas presentaron un alto grado de pérdida de material por corrosión generalizado en todas las etapas (Fig. 58).

2.2.1.4.3. Registro fotográfico – Bomba Inferior



Figura 55 Impulsor cercano a la cabeza con pérdida de material por corrosión en superficies upthrust.



Figura 56 Impulsores registran desgaste libre en las áreas de estabilización en empuje descendente (downthrust).

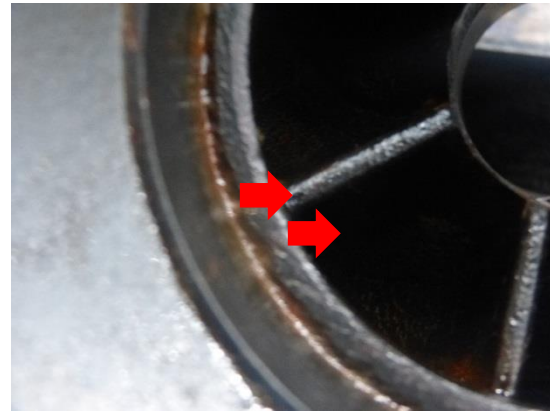


Figura 57 Difusores registran pérdida de material en las áreas de acople entre difusores



Figura 58 Vista en detalle de los surcos o canales formados sobre las superficies de impulsores

2.3. Análisis por Microscopía Electrónica de barrido (MEB)

Con el fin de complementar la investigación los componentes de una etapa fueron analizadas a través de microscopía electrónica de barrido por un laboratorio especializado, que realizó capturas utilizando un aumento 80X.

La inspección por microscopía electrónica de barrido se realizó en zonas específicas de las piezas objeto de estudio, donde se observaron defectos notables asociados a procesos de deterioro y/o cambio de la estructura del material. El objetivo del análisis es identificar la morfología y eventual presencia de microgrietas asociadas a la falla y/u otro tipo de daño en el material, micro-discontinuidades, presencia de micro-picaduras, entre otros. De manera complementaria, se realizó análisis SEM-EDS *Mapping*, cuyo propósito es identificar elementos químicos depositados sobre la superficie de la muestra.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

2.3.1. Impulsor. Se evidencia morfología de daño en sentido perimetral en forma de acanalamiento (área señalada con flechas amarillas) y presencia de sólidos de tonalidad naranja (Fig. 59).

Se observa la formación de micro-depresiones, fosas profundas hemisféricas que al traslaparse dan origen a un defecto de tipo canal. Esta morfología de daño también se evidenció durante la inspección visual a nivel macroscópico (Fig. 60).

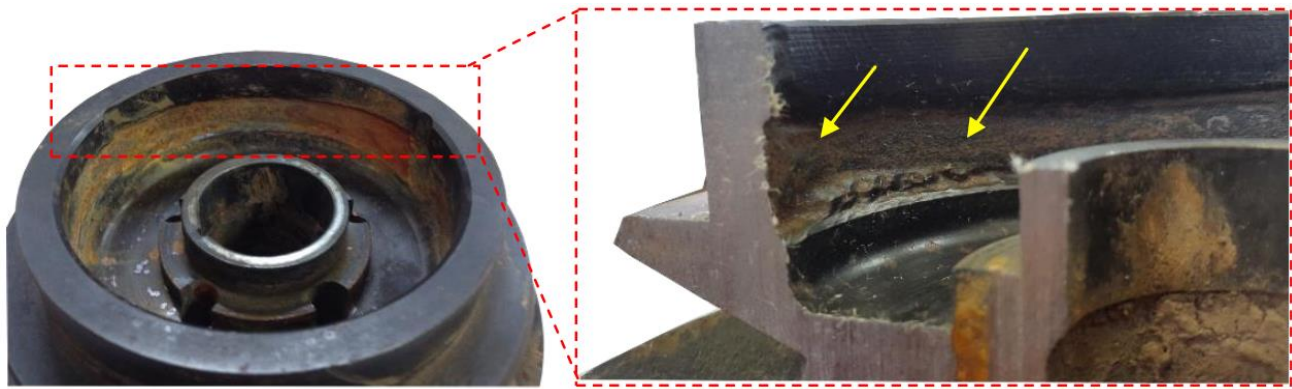


Figura 59 Muestra – Impulsor MEB

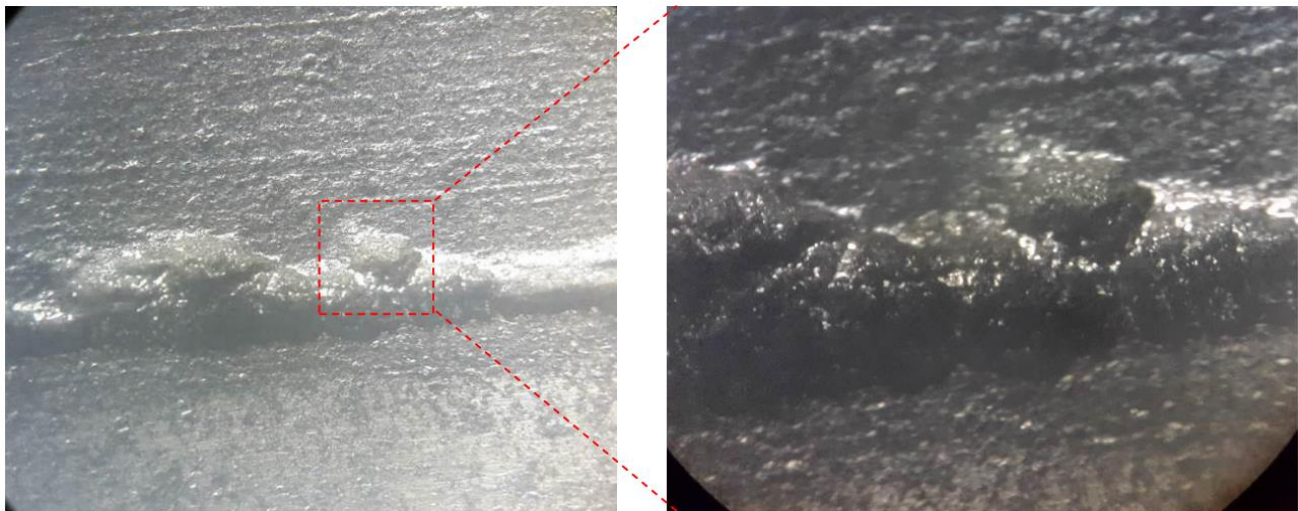


Figura 60 Resultados MEB – Impulsor

2.3.2. **Difusor.** La muestra del difusor a analizar (Fig. 61) corresponde a un corte longitudinal que permitió observar el interior del Bushing Bore (cavidad en la que se encuentra fijo el cojinete estático).

Se evidencia una morfología de daño con bordes suaves y fondo plano, en la ranura de ubicación del sistema de sello (área enmarcada en el cuadro rojo). El área de contacto de la caja donde se aloja el elemento de sello se encuentra deteriorada, lo que la inhabilita para que facilite la hermeticidad y propicia la generación de sobrecargas y cargas asimétricas que afectan (deformación-rotura, ya que es un elastómero) la funcionalidad del elemento de sello. Adicionalmente, se observó que el avance del daño

toma forma redondeada (área señalada con las flechas amarillas), características típicas de un deterioro motivado por la presencia de microorganismos. (Fig. 61).

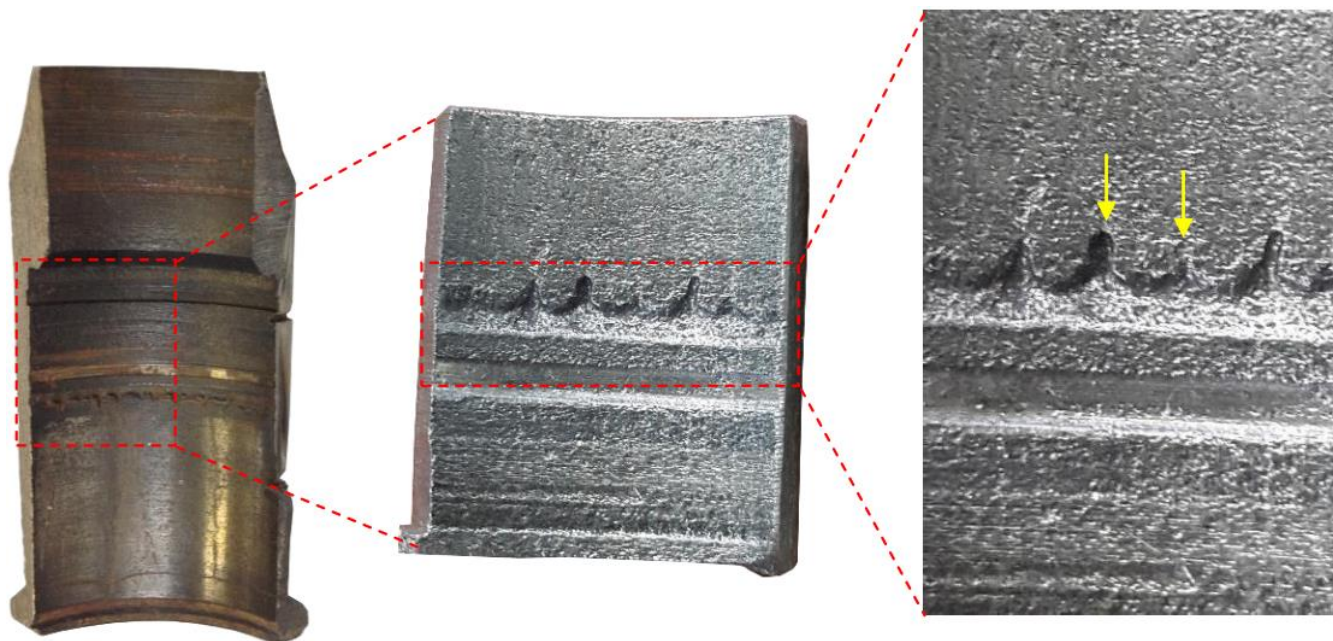


Figura 61 Difusor – Muestra MEB

Se identifican los sitios anódicos y catódicos sobre la superficie sucia del difusor (Fig. 62). Los sitios catódicos corresponden a los bordes (zonas de mayor altura) de las micro cavidades y los anódicos a las zonas bajas respectivas. Se observa que la morfología de daño analizada presenta características de fenómenos de corrosión asistidos por la presencia de microorganismos, debido a la formación de depresiones hemisféricas con fondos planos y bordes suaves (zonas enmarcadas en los círculos rojos).

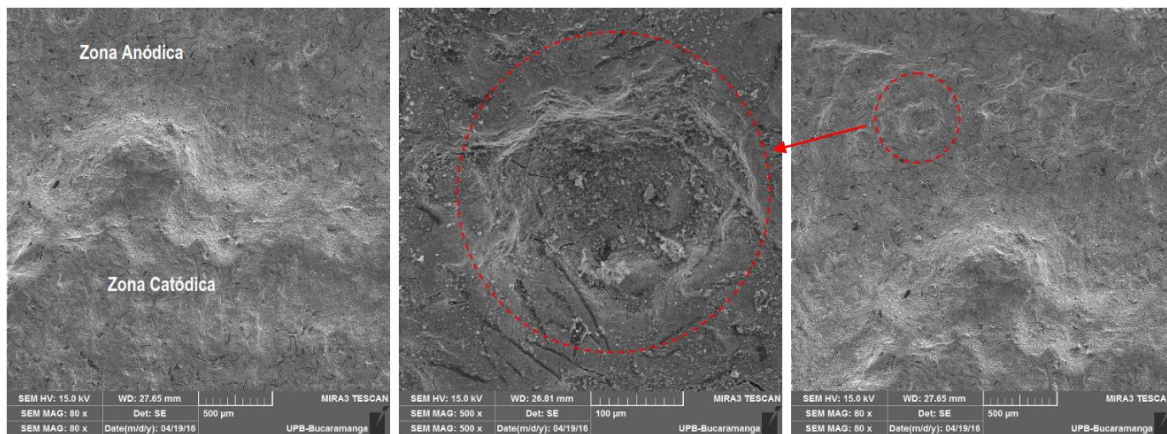


Figura 62 Resultados MEB – Difusor Sucio

Se identifican los sitios anódicos y catódicos sobre la superficie limpia del difusor (Fig. 63). Los sitios catódicos corresponden a los bordes (zonas de mayor altura) de las cavidades mientras que los sitios anódicos corresponden a las zonas bajas de las cavidades observadas. La micrografía de la derecha permite observar la acumulación de biomasa adherida a la superficie analizada. Las estructuras que se asemejan a montículos irregulares y productos de corrosión (zonas indicadas con flechas rojas) coinciden con las regiones de pérdida localizada de material. Esta condición permite que exista un gradiente de oxígeno dentro de los montículos, lo que eventualmente favorece el desarrollo de colonias bacterianas.

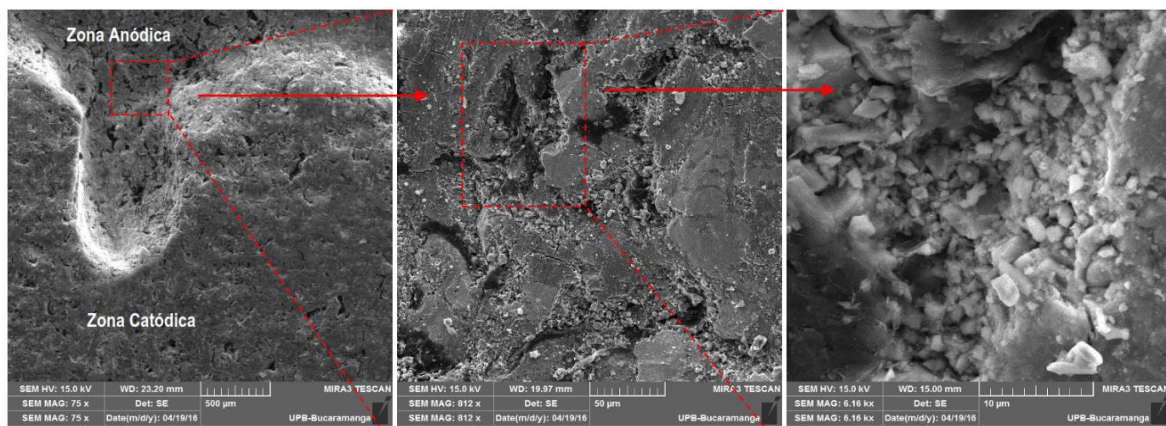


Figura 63 Resultados MEB – Difusor Limpio

Finalmente se realizaron tomas sobre las marcas de pitting encontradas en la cara interna del Bushing Bore (Fig. 64), y se encontró lo que podría ser una bacteria sulfato reductora (BSR), *Desulfovibrio Desulfuricans* (Fig. 65).

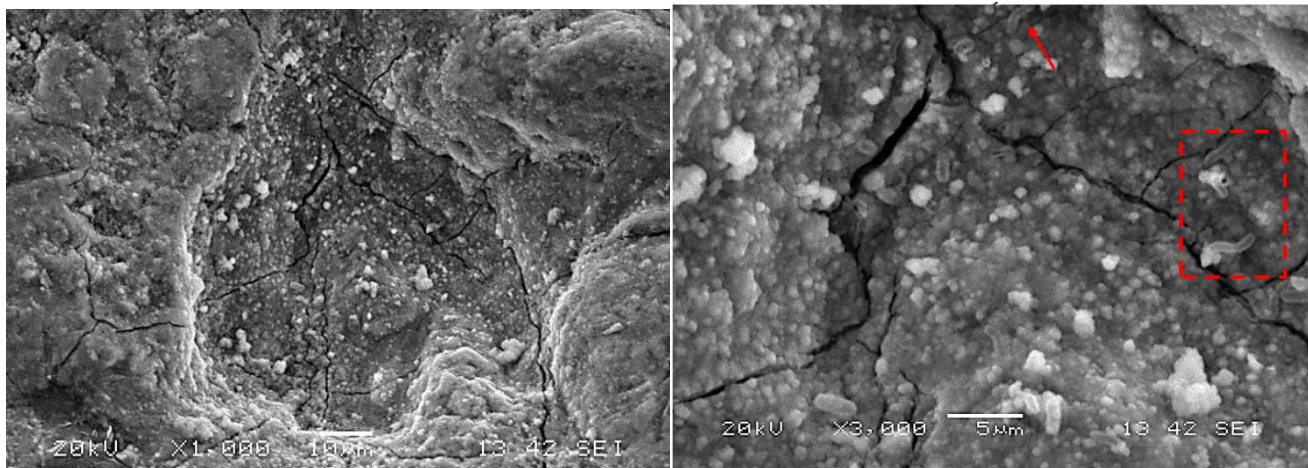


Figura 64 Resultados MEB - Marcas de corrosión-erosión. Posible BSR

En las regiones similares a la que se encontró la posible bacteria se realizó un microanálisis químico mediante un espectrómetro de emisión de rayos X (EDS), acoplado al microscopio electrónico de barrido. Los resultados obtenidos muestran picos de azufre en dichas regiones, lo que permite intuir mas no asegurar, que la bacteria observada es la reductora de sulfato. (Tabla 32).

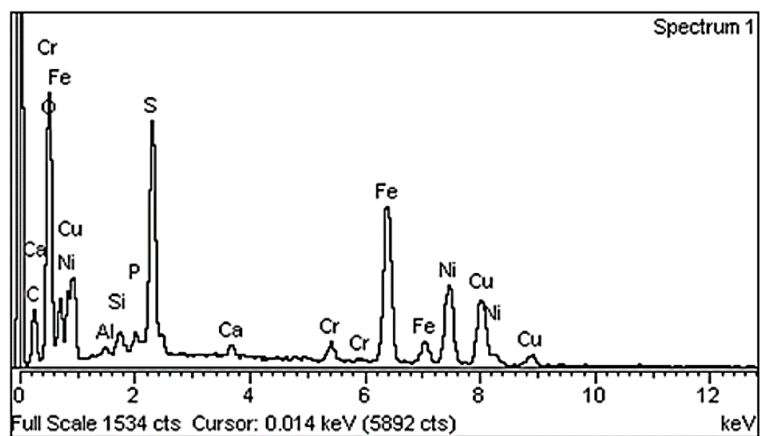
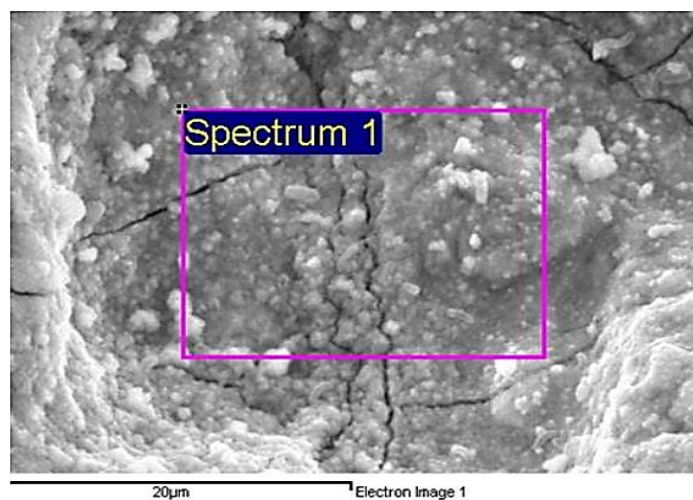


Figura 65 Morfología característica *Desulfovibrio Desulfuricans*. Tomada de: LookingForDiagnosis.

Desulfovibrio desulfuricans. LookingForDiagnosis. Recuperada de

https://lookfordiagnosis.com/mesh_info.php?term=desulfovibrio+desulfuricans&lang=2

Tabla 32

Resultados microanálisis químico mediante EDS

Element	Weight%	Atomic%
C K	15.55	31.25
O K	28.02	42.26
Al K	0.27	0.24
Si K	0.59	0.51
P K	0.44	0.34
S K	7.84	5.90
Ca K	0.55	0.33
Cr K	1.19	0.55
Fe K	17.03	7.36
Ni K	13.83	5.68
Cu K	14.69	5.58
Totals	100.00	

2.4. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de una muestra del fluido bombeado

Con el objetivo de identificar los posibles causantes de la corrosión encontrada en los componentes de las bombas se realiza un análisis fisicoquímico y microbiológico del fluido bombeado. Las muestras de fluido fueron tomadas en la succión de la bomba, y sometidas a los siguientes ensayos.

2.4.1. Caracterización Fisicoquímica. A través de los resultados obtenidos en los siguientes ensayos se identificó la naturaleza del fluido, en función de su composición, para posteriormente realizar una valoración de su potencial corrosivo, siguiendo los criterios y recomendaciones expuestos en el manual de corrosión (Roberge P, 2000), así como los criterios del laboratorio mismo que realizó la caracterización (CIC, Corporación para la Investigación de la Corrosión, UIS-Guatiguará).

Tabla 33
Ensayos realizados - Caracterización Fisicoquímica

ENSAYOS FISICOQUÍMICOS	NORMA
Potencial de Hidrógeno	SM 4500 H+B
Determinación de Conductividad	SM 2510 B
Sólidos Disueltos Totales	SM 2540 C
Sólidos Suspendidos Totales	SM 2540 D
Determinación de Cloruros	SM 4500 Cl- B
Determinación de Dureza Cálrica	SM 3500 Ca B
Determinación de Dureza Total	SM 2340 C
Determinación de Sulfatos	SM 4500-SO4 E
Determinación de Hierro Total	SM 3500 Fe B
Determinación de Hierro Total	SM 3500 Fe B

Determinación de Alcalinidad	SM 2320 B
------------------------------	-----------

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla 34, la concentración de Oxígeno Disuelto determinada mediante muestreo in situ, clasifica a los fluidos asociados a la succión de las unidades de inyección del Campo Guando y de la Estación de Transferencia Melgar, como medios severamente corrosivos.

Tabla 34

Resultados parámetros fisicoquímicos analizados

ITEM	ENSAYO (UNIDADES)	Succión Unidad de inyección	
		Resultado	Corrosividad
1	Concentración de O ₂ Disuelto (ppm)	2,00	Severa
2	Concentración de CO ₂ Disuelto (ppm)	12,00	Baja
3	Concentración de H ₂ S Disuelto (ppm)	0,00	Baja
4	Potencial de Hidrógeno (pH)	7,99	Moderada
5	Determinación de Conductividad (μS/cm)	1197,5	Moderada
6	Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	910,00	Moderada
7	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	31,00	Moderada
8	Determinación de Cloruros (mg/L)	256,1	Moderada
9	Determinación de Dureza Cálrica (mg/L)	264,00	Incrustante
10	Determinación de Dureza Total (mg/L)	318,40	Incrustante
11	Determinación de Sulfatos (mg/L)	8,08	Baja
12	Determinación de Hierro Total (mg/L)	2,09	Baja
13	Determinación de Hierro Soluble (mg/L)	2,05	Baja
14	Determinación de Alcalinidad (mg/L)	450,00	Incrustante

La caracterización del fluido advierte una condición de alarma frente a la ocurrencia de fenómenos de corrosión en los materiales metálicos de los componentes del sistema de inyección que estén expuestos. Lo anterior, teniendo como referencia los parámetros de calidad para aguas de inyección, la condición de corrosividad se reduce si la concentración de Oxígeno Disuelto permanece en un nivel $[O_2] \leq 20$ ppb (menor o igual a partes por billón).

El pH ligeramente básico (7,5 - 8,5) cataloga al fluido como moderadamente corrosivo, en virtud de la tendencia incrustante por la precipitación de sales y/o compuestos carbonatados. Estos compuestos pueden generar taponamiento y procesos de corrosión bajo depósito, debido a los gradientes de concentración de agentes contaminantes y la formación de ambientes propicios para el desarrollo de colonias bacterianas.

El carácter incrustante identificado, se confirma con los resultados de la dureza total, dureza cálcica y alcalinidad, en razón a que las concentraciones de CaCO_3 determinadas son superiores a 150 mg/L. Por último, la concentración de cloruros ($> 200,00$ mg/L) y la cantidad de sólidos disueltos totales ($> 500,00$ mg/L) clasifican al fluido como un electrolito catalizador de procesos de corrosión electroquímica.

2.4.2. Caracterización Microbiológica. La metodología empleada para determinar la corrosividad microbiológica de las muestras recolectadas se fundamentó en función de la cuantificación de bacterias presentes (tanto Bacterias Sulfato reductoras, BSR, como Bacterias Productoras de Ácido, BPA), a través de la técnica Extinción por Dilución Seriada (EDS).

La cantidad de bacterias se constituye en la base para determinar los niveles de biocriticidad asociada a cada muestra y el riesgo que representa para la integridad del sistema. Cuando se determinan dos (2) o más grupos poblacionales, es necesario analizar en conjunto su corrosividad. Para esto, se aplica la metodología descrita a continuación.

- Asignar pesos relativos para cada grupo bacteriano: Los pesos relativos están asignados teniendo en cuenta las características metabólicas y fisiológicas que determinan la agresividad de las bacterias en términos de corrosión metálica.

Tabla 35

Peso relativo para cada grupo bacteriano

GRUPO BACTERIANO	PESO RELATIVO
BSR	0,60
BPA	0,40
TOTAL	1,00

- **Magnitud de Aislamiento:** a la cantidad de microorganismos presentes en la muestra, magnitud de aislamiento, también se le asignará un peso relativo; de acuerdo con el criterio del laboratorio, que se basa en el análisis de resultados de ensayos realizados bajo condiciones de laboratorio (proyectos de investigación) y de datos obtenidos a partir de las actividades de inspección y monitoreo adelantadas en campo (proyectos aplicados y servicios a la industria).

Tabla 36

Peso relativo para la magnitud del aislamiento

MAGNITUD DEL AISLAMIENTO (BACT/G)	PESO
No Detectable (N.D)	0
De 10^1 a 10^2	1
De 10^3 a 10^4	2
De 10^5 a 10^6	3
Mayor a 10^6	4
TOTAL	10

- **Ponderado - Corrosividad Total:** finalmente la corrosividad de la muestra corresponderá a la sumatoria de los productos de los pesos relativos asignados a cada grupo bacteriano y de los pesos relativos correspondientes a la magnitud del aislamiento resultante.

Tabla 37

Clasificación Corrosividad Total

CORROSIVIDAD TOTAL	PUNTAJE	
	DESDE	HASTA
Baja	0	1,05
Media o Moderada	1	2,35

Alta	2	3,05
Severa	>3,1	

Tabla 38

Recuento y Corrosividad – BSR, BPA

Grupo Bacteriano	Recuento (Bact/ml)	Peso Relativo Magnitud Aislamiento	Peso Relativo Grupo Bacteriano	Corrosividad por Grupo Bacteriano	Corrosividad de la muestra	Corrosividad Total
BSR	10^3	2	0,6	1,2	2,0	Moderada
BPA	10^3	2	0,4	0,8		

Los resultados de caracterización microbiológica indican que los fluidos recolectados en la succión de las unidades de inyección del Campo Colombiano y de la Estación de Transferencia en cuestión, se comportan como un medio favorecedor para el desarrollo de microorganismos involucrados en procesos de corrosión. Lo anterior, en virtud de que la concentración de títulos bacterianos obtenida para los dos grupos evaluados (BSR y BPA), supera la concentración máxima permisible (10^2 Bact/ml) en sistemas de transporte de fluidos.

3. Capítulo 3: Evaluación de alternativas – soluciones para la operación de futuros sistemas de bombeo horizontal en el campo de estudio

Teniendo presentes los fenómenos que dieron origen a la falla del equipo, así como algunas propiedades críticas del fluido, se consideran las siguientes opciones para mejorar el tiempo de corrida de futuros sistemas de bombeo horizontal en el campo estudiado.

3.1. Mecánica de la operación actual

Tal y como ya se explicó, la estación de inyección cuenta con varias bombas operando simultáneamente, contando siempre con equipos de respaldo en caso de fallas. Debido a las propiedades del fluido, y su efecto sobre los materiales de las sargas de bombeo, el campo presenta un tiempo de corrida promedio de 6 meses. Durante el último año fallaron varios equipos, por las mismas razones, presentando evidencias muy similares durante las inspecciones, lo que permite creer que la razón de falla pudo ser similar, sí no la misma.

Tabla 39

Historial condiciones de operación – Razones de falla para bombas corridas en el campo de estudio durante el último año

Unidad HPS			Condiciones de operación observadas	
Unidad	Servicio Requerido	Razón	Presión de Descarga (psi)	Caudal (BPD)
1	Reemplazar todos los cuerpos de bomba	Vibración y Ruido excesivos	3093	21774
2	Reemplazar bomba superior	Falla - Eje Roto	3148	17545
3	Reemplazar todos los cuerpos de bomba	Vibración y Ruido excesivos	3045	20500
4	Reemplazar la Cámara de Empuje	Vibración y Ruido excesivos	3210	19120
5	Reemplazar todos los cuerpos de bomba	Vibración y Ruido excesivos	3156	19685
6	Reemplazar bomba superior y central	Falla – Eje Roto	3040	20480

Teniendo presente el peor caso posible en términos económicos, el tener que reemplazar los tres cuerpos de bomba de las características estudiadas, que ha sido el caso más frecuente durante el último año; se está asumiendo el siguiente costo **cada seis meses de operación**, al simplemente traer los equipos nuevos.

Tabla 40

Costo total semestral por unidad de bombeo

Equipo	Descripción	Costo [USD]
Bomba Superior	PUMP: M520-A C-CT 24 STG 862/862 24 CS BTHD, 1.37 INC, M-TRM, HSN, ARZ, SS H&B, HPS-H, BLUE PAINT	30240,9
Bomba Central	PUMP: M520-A C-CT 24 STG 862/862 24 CS BTHD, 1.37 INC, M-TRM, HSN, ARZ, SS H&B, HPS-H, BLUE PAINT	30240,9
Bomba Inferior	PUMP: M520-A C-CT 19 STG 862/862 19 CS BTHD, 1.37 INC, M-TRM, HSN, ARZ, SS H&B, HPS-H, BLUE PAINT	25822,4
Costo Total Semestral por Unidad de Bombeo		86.304,2

3.2. Tratamiento del fluido bombeado con Bactericida

A partir de la causa raíz de la falla, corrosión microbiana producida por la acción de bacterias sulfato reductoras, la primera alternativa en la que podría pensarse es el tratamiento del fluido a bombear, con el fin de que este cumpla con los requerimientos de calidad en sistemas de transporte de fluidos.

El tratamiento adecuado suministrable por la empresa de servicios con la que la operadora tiene contrato multiservicios vigente sería el siguiente: Por cada 200 barriles de fluido a bombear, diluir 1 galón de producto.

Tabla 41

Costo semestral – Tratamiento con bactericida

Presión de Descarga [psi]	Caudal Bombeado [BPD]	Galones de tratamiento requeridos, día[gal/d]	Precio por Galón [USD/gal]
3144	17846	178,46	21,68
Costo del Tratamiento, día [USD]	Costo Mensual Tratamiento [USD]	Costo Semestral del Tratamiento con Bactericida [USD]	
3869,01	116070,384	696.422,304	

Además de adicionar el costo de las unidades de bombeo (USD 86304,27).

3.3. Implementación de un Sistema de Bombeo Full Bearing Housing (FBH) – Cojinetes de Carburo de Silicio

Sí bien en el montaje de un sistema de bombeo horizontal se cuenta con una serie de *clamps* o abrazaderas, que soportan y mantienen alineados los cuerpos de bomba (como ya se explicó anteriormente), que ayudan a reducir vibraciones y problemas asociados a éstas; en el interior de la bomba existen unos componentes también claves para lograr ese mismo objetivo: las estabilizaciones radiales, a través del uso de los ya mencionados cojinetes radiales.

Los cuerpos de bomba de las unidades utilizadas actualmente en el campo fueron ensamblados bajo una configuración ARZ, *Abrasion Resistant Zirconia*, que hace referencia a que cada cierto número de etapas estándar (etapas que no cuentan con cojinetes radiales, y la estabilización la brinda la cavidad interior misma de los difusores), hay una etapa *Full Bearing Housing* (etapas estabilizadas con cojinetes radiales) con bujes estacionarios y móviles de zirconio; generalmente se ubican en una relación 3:1, cada 3 etapas estándar, una estabilizada con cojinetes.

Una configuración que mejoraría la condición de las unidades, e incrementaría su *runlife*, sería una estabilización totalmente FBH, donde absolutamente todas las etapas, de todos los cuerpos, cuenten con cojinetes cerámicos (bajo esta configuración cabeza y base de la bomba también serán estabilizadas con cojinetes cerámicos). Con todas las etapas estabilizadas con cojinetes cerámicos, aumenta la resistencia del equipo a abrasivos y a la corrosión, ya que los cerámicos no son susceptibles a los procesos electroquímicos que sí afectan a los metales.

Con el uso de la estabilización FBH no habría contacto metal - metal, como sucedía con el eje girando dentro de la cavidad interior del difusor en las etapas estándar, el contacto sería siempre cojinete – cojinete, hecho que reduciría notablemente las vibraciones del equipo en caso de que comenzaran a presentarse movimientos erráticos en los componentes móviles.

Según la compañía proveedora de servicios, esta configuración garantizaría un *runlife* de al menos **un año**, bajo las condiciones del fluido al que se enfrentan los equipos.

Tabla 42

Costo Unidades de bombeo FBH - SS

Equipo	Descripción	Costo [USD]
Bomba Superior	PUMP: M520-A C-CT 24 STG 862/862 24 CS BTHD, 1.37 INC, M-TRM, HSN, FBH , SS H&B, HPS-H, BLUE PAINT	37582,42
Bomba Central	PUMP: M520-A C-CT 24 STG 862/862 24 CS BTHD, 1.37 INC, M-TRM, HSN, FBH , SS H&B, HPS-H, BLUE PAINT	37582,42

Bomba Inferior	PUMP: M520-A C-CT 19 STG 862/862 19 CS BTHD, 1.37 INC, M-TRM, HSN, FBH , SS H&B, HPS-H, BLUE PAINT	29752,75
Costo Unidades de Bombeo FBH		104.917,59

3.4. Tratamiento del fluido bombeado con Inhibidores de Corrosión

Con el fin de mitigar los efectos de la corrosión que puedan generar las bacterias o las propiedades mismas del fluido, otra alternativa a considerar debe ser la adición de inhibidores de corrosión en el sistema, que llevarán a incrementar el tiempo de corrida de los equipos.

Contando inicialmente con el costo de las unidades (**USD 86304,27**), el tratamiento adecuado que podría ser suministrado por la empresa proveedora de servicios consiste en la adición de 8 galones de inhibidor por cada 350 barriles de fluido a bombear.

Tabla 43

Costo semestral – Adición de inhibidor de corrosión

Presión de Descarga [psi]	Caudal Bombeado [BPD]	Galones de tratamiento requeridos, día[gal/d]	Precio por Galon [USD/gal]
3144	17846	815,82	39,75
Costo del Tratamiento, día [USD]	Costo Mensual Tratamiento [USD]	Costo Semestral de adicionar inhibidor de corrosión al sistema [USD]	
32.428,73	972.861,94	5.837.171,657	

3.5. Comparación por costos de las alternativas propuestas

Al comparar las distintas alternativas mencionadas, en un intervalo de seis meses, se concluye que continuar con la mecánica de operación actual es la alternativa más viable. Sin embargo, se recomienda considerar el hecho de que el implementar unidades FBH incrementaría el runlife por

encima de los 6 meses, y que de cumplirse la garantía de la compañía de servicios (Runlife de mínimo un año para esta configuración), se convertiría en la propuesta más viable.

Tabla 44

Costos Alternativas – Evaluadas a seis meses

Alternativa	Costo [USD]
Unidades de bombeo FBH-SS	104.917,59
Tratamiento con Bactericida	696422,304
Continuar con la mecánica actual	86.304,2
Inhibidor de Corrosión	5.837.171,657

4. Conclusiones

La causa raíz de la alta vibración registrada durante la operación obedece a la pérdida de masa sobre impulsores y difusores por corrosión. La presencia de material corrosivo (proveniente de bacterias sulfato reductoras BSR) genera pitting y pérdida de material en algunas áreas de las etapas (pérdidas de diámetro interno medidas en componentes de estabilización de hasta 2,8%, respecto a sus medidas en planos), los impulsores pierden su centro de masa y por ende las partes móviles del tren de etapas pierden el balance durante su rotación, creándose un movimiento no uniforme o errático de las etapas que termina ocasionando desgaste y posterior pérdida de algunos componentes de estabilización radial, lo cual desencadenó un incremento significativo de vibración y aumento de temperatura.

La inspección visual de los componentes permitió identificar una morfología de daño que se ajusta a un proceso de corrosión generalizada de tipo picado, relacionada con los procesos de corrosión

electroquímica, dadas las características fisicoquímicas del fluido asociado a la succión de la unidad de inyección del campo. (Covert R. - Nickel Institute, 1998). En este sentido los materiales ricos en níquel, impulsores y difusores presentaron pérdida de masa de tipo localizado debido a la formación de zonas anódicas – catódicas, aunque en menor medida si se compara con componentes de acero al carbono (housing), que presentan menor resistencia a condiciones de corrosión – erosión.

El fluido asociado a la succión del sistema de inyección del Campo Colombiano presentó características que lo catalogan como un electrolito severamente corrosivo, dada la concentración de Oxígeno Disuelto ($> 20,00$ ppb), con tendencia incrustante, pH ligeramente básico ($7,5 - 8,5$), concentraciones de CaCO_3 (> 150 mg/L), catalizador de procesos de corrosión electroquímica, concentración de cloruros ($> 200,00$ mg/L) y sólidos disueltos totales ($> 500,00$ mg/L) y apropiado para el crecimiento de microorganismos, títulos BSR y BPA ($> 10^2$ Bact/ml), particularmente bajo condiciones de flujo estacionario.

Impulsores y difusores de los distintos cuerpos de bomba exhibieron evidencias que se ajustan a un proceso de corrosión microbiológica. Esta aseveración fue validada mediante la inspección por Microscopia Electrónica de Barrido, donde se identificó la presencia de mallas de biomasa y elementos como Azufre en los depósitos remanentes sobre los puntos de daño, así como la presencia misma de los microorganismos. La hipótesis se fortalece con la condición de estancamiento que existe en la zona del bushing bore del difusor, ya que se presenta un diferencial de oxígeno, capaz de facilitar las condiciones anaerobias y la colonización de bacterias.

Dentro del grupo de alternativas - solución propuestas y económicamente evaluadas, continuar con la mecánica de operación actual resultó ser la más viable, con una inversión de USD 86.304,2 para

un tiempo de corrida estimado de seis meses, siguiendo la tendencia de trabajar con un fluido de las características vistas, bastante agresivas para los materiales que componen las unidades.

5. Recomendaciones

Implementar esquemas de caracterización fisicoquímica de los fluidos asociados al sistema de inyección del campo, con el objetivo de asegurar el control los parámetros determinantes en los procesos de corrosión de los materiales expuestos.

Crear una metodología para asegurar el seguimiento y control de las variables microbiológicas en los fluidos asociados a los sistemas de inyección del campo, con el objetivo de mitigar su impacto frente la integridad de los materiales, especialmente en zonas de flujo estacionario.

Realizar la caracterización electroquímica del fluido bombeado, que permita identificar la tasa de pérdida de masa de los componentes del equipo en cuestión, y proponer el uso de aleaciones (en etapas y housings) menos susceptibles a los procesos de deterioro encontrados para los equipos en operación en el campo de estudio.

Evaluar la viabilidad de realizar los tratamientos químicos, adición de bactericida o inhibidores de corrosión, teniendo presentes los productos y precios de todos los proveedores operando en Colombia, según las características del fluido bombeado.

Realizar un modelo que a partir de la información del fluido, de operación y materiales del equipo, permita pronosticar tiempos medios de falla de los equipos a usar en el futuro.

Referencias Bibliográficas

- B. Chris. Dismantle, Inspection, and Failure Analysis (DIFA) Reference Manual for REDA Electric Submersible Pumping Systems, Version A. 2008. ID: 3352230.

- Castillo, J. 1998. Normatización en el diseño y construcción de bombas centrífugas horizontales para procesos (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/546/1/1020124837.PDF>
- Covert R., Nickel Institute (1998). Properties and Applications of Ni-Resist and Ductile Ni-Resist Alloys. Disponible en: https://www.nickelinstitute.org/en/TechnicalLibrary/Reference%20Book%20Series/11018_PropertiesandApplicationsofNi_ResistandDuctileNi_ResistAlloys.aspx
- Grigorescu, I. C., & Navas, G. (2012, January 1). Damage Mechanisms in Multistage Pumps For Water Injection. NACE International.
- Jorge L. Parrondo, Sandra Velarde, Carlos Santolaria, (1998). Development of a predictive maintenance system for a centrifugal pump. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 4 Issue: 3, pp.198-211. Disponible en: <https://doi.org/10.1108/13552519810223490>
- Organización Panamericana de la Salud (PAHO). 2005. Guía para el diseño de estaciones de agua potable. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/tecapro/documentos/agua/161esp-diseno-estbombeo.pdf>
- Patton, C. C. (1990, October 1). Injection-Water Quality. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/21300-PA
- Powell, W. B., Mulvey, J. S., & Meyer, A. E. (1973, January 1). Applications of High Speed Centrifugal Multistage Pumps for Waterflood Injection Service. Petroleum Society of Canada. doi:10.2118/73-110
- Roberge P. (2000). Handbook of Corrosion Engineering. McGraw-Hill.
- Schlumberger. AL, Engineering. Artificial Lift Engineering Operations Reference Manual – Downhole. Intouch Support: AL-ESP Field Services & Bypass Sy., 2016. 3255850.

- Schlumberger. AL, Engineering. Artificial Lift Field Operations Reference Manual – Surface.Intouch Support: AL-Surface Electrical., 2016. ID: 1658713429.
- Schlumberger. AL, HPS Selection Guide, Version B. 2005. InTouch ID: 3983572.
- Schlumberger. ALFORM, HPS Field Service Manual, Original Instructions. HPS Sustaining Engineering, 2013. InTouch ID: 3255850.
- S. Ariely, A. Khentov (2006). Erosion corrosion of pump impeller of cyclic cooling water system. Engineering Failure Analysis, Vol. 13, pp.925-932
- Shujun Gao, Bruce Brown, David Young, Marc Singer (2018). Formation of iron oxide and iron sulfide at high temperature and their effects on corrosion. Corrosion Science, Vol. 135, pp.167-176
- T. Gabor (2009). Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operations and Maintenance. Burlington, USA. Elsevier Inc
- Quality Criteria for Water. Environmental Protection Agency: office of water regulations and standards. May 1986
- Vazdirvanidis, G. Pantazopoulos, A. Rikos (2017). Corrosion investigation of stainless-steel water pump components. Engineering Failure Analysis, Vol. 82, pp.466-473
- Y.A. Khalid, S.M. Sapuan (2007). Wear analysis of centrifugal slurry pump impellers. Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 59 Issue: 1, pp.18-28, <https://doi.org/10.1108/00368790710>