



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**“PREDICCIÓN Y ANÁLISIS DE FALLAS EN SISTEMAS DE
BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO”**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A

KRISTEL VIRIDIANA GRANADOS PÉREZ

DIRECTOR:

M. I. FELIPE DE JESÚS LUCERO ARANDA



MÉXICO, D.F.

FEBRERO, 2016

Contenido

Resumen	xi
Abstract	xii
Introducción	xiii
Capítulo I: Aspectos Fundamentales y Aplicaciones del Bombeo Electrocentrífugo	
Sumergido (BEC)	1
1.1. Descripción y Breve Historia del Bombeo Electrocentrífugo Sumergido	1
1.1.1. Bombeo Electrocentrífugo Sumergido en México	3
1.2. Equipo del Sistema de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido (BEC)	3
1.2.1. Descripción del Equipo	3
1.2.2. Equipo Superficial	6
1.2.2.1. Bola Colgadora	6
1.2.2.2. Caja de Conexiones o Caja de Viento	6
1.2.2.3. Tablero de Control (Switchboard)	7
1.2.2.4. Transformadores	8
1.2.2.5. Variador de Frecuencia (VSD)	8
1.2.3. Equipo Subsuperficial	9
1.2.3.1. Bomba Electrocentrífuga Sumergible	9
1.2.3.1.1. Principales Componentes de la Bomba Electrocentrífuga	
Sumergible	12
1.2.3.2. Motor Eléctrico	13
1.2.3.2.1. Combinaciones Tándem	15
1.2.3.3. Separador de Gas	17
1.2.3.3.1. Separador Convencional	17
1.2.3.3.2. Separadores Centrífugos	18
1.2.3.3.3. Separador Vortex	19
1.2.3.3.4. Manejador Avanzado de Gas (AGH) de REDA	19
1.2.3.3.5. Poseidón	20
1.2.3.4. Sección de Sello o Protectores	21
1.2.3.4.1. Protector Convencional y Protector Tipo "D"	22
1.2.3.4.2. Protector de Tres Cámaras	23
1.2.3.5. Cable de Potencia	24

1.2.4. Accesorios del Equipo Subsuperficial	26
1.2.4.1. Extensión de Cable del Motor	26
1.2.4.2. Válvula de Contrapresión o Válvula Check	26
1.2.4.3. Válvula de Drene	27
1.2.4.4. Centralizadores	27
1.2.4.5. Sensor de Fondo de Pozo	27
1.3. Hidráulica de la Bomba Electrocentrífuga Sumergida	27
1.3.1. Altura Dinámica Total o Carga Dinámica Total	27
1.3.2. Curvas Características de la Bomba	28
1.3.3. Empuje de la Bomba	31
1.3.3.1. Empuje Hidráulico	31
1.3.4. Leyes de Afinidad de las Bombas	31
1.3.5. Ventana de Operación	32
1.4. Diseños Especiales de Sistemas BEC	32
1.4.1. Bombeo Electrocentrífugo Sumergido – Bombeo Neumático	33
1.4.2. Sistema BEC con Camisa	34
1.4.3. Drene Gravitacional Asistido con Vapor (SAGD) – Sistema BEC	35
1.4.4. Sistema BEC con Empacador	36
1.4.5. Sistema BEC con Herramienta “Y”	37
1.4.6. Sistema BEC Dual	38
1.4.7. Bomba de Potencia	39

Capítulo II: Medidas de Evaluación de la Confiabilidad de los Sistemas

Artificiales de Producción	41
2.1. Introducción	41
2.2. Componentes de Medición del Tiempo de Vida	42
2.2.1. Recuento de Instalaciones	42
2.2.2. Tiempo en Exposición	43
2.3. Medidas Comunes de Tiempo de Vida	44
2.3.1. Tiempo Promedio de Vida de Todos los Sistemas	45
2.3.2. Tiempo Promedio de Vida de los Sistemas en Operación	45
2.3.3. Tiempo Promedio de Vida de los Sistemas que Fueron Desinstalados	45
2.3.4. Tiempo Promedio de Vida de los Sistemas que Fallaron	45
2.3.5. Tiempo Medio de Falla (MTTF)	46
2.3.6. Tiempo Medio para Desinstalar un Sistema (MTTP)	46
2.3.7. Rango de Falla (Fallas por Pozo por Año)	46

2.3.8. Rango Entre Operaciones de Mantenimiento (Operaciones de Mantenimiento por Pozo por Año).....	47
2.4. Ventana Móvil	47
2.4.1. Tamaño de la Ventana que se Utiliza en las Medidas.....	48
2.5. Distribuciones del Tiempo de Vida.....	48
2.6. Simulaciones de Monte Carlo	49
2.6.1. Caso 1. Estimando el Promedio de Vida “Real” del Sistema y el Tiempo Entre Operaciones de Mantenimiento Reales.....	49
2.6.2. Caso 2. Estimando el Cambio Entre el Tiempo de Vida Promedio “Real” y el Tiempo Entre Operaciones de Mantenimiento “Real”	51
2.6.3. Caso 3. Efecto del Cambio de Tamaño en la Muestra en el Cálculo del Tiempo Promedio Real Para la Vida Útil de los Sistemas y el Tiempo Entre Operaciones de Mantenimiento	53
2.7. Medidas de Tiempo de Vida Recomendadas	56
2.7.1. Tiempo Medio de Falla (MTTF) y Rango de Falla (Fallas por Pozo por Año)	56
2.7.2. Tiempo Medio para Desinstalar un Sistema (MTTP) y Rango de Operaciones de Mantenimiento (Operaciones de Mantenimiento por Pozo por Año).....	57
2.7.3. Otras Medidas.....	57
2.8. Incertidumbre en las Medidas del Tiempo de Vida	58
2.9. Conclusiones Acerca de las Medidas del Tiempo Medio de Vida de los Sistemas Artificiales de Producción	60
Capítulo III: Metodología Para el Reporte de Fallas de los Sistemas de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido.....	61
3.1. Desafíos al Compartir la Información de las Fallas de los Sistemas BEC	62
3.2. Nomenclatura Estándar de Fallas de Sistemas BEC Propuesta por Francisco Alhanati	74
3.2.1. Nomenclatura Estándar de Fallas de Sistemas BEC	74
3.2.1.1. Definiciones de Falla de Acuerdo a la ISO 14224.....	75
3.2.1.2. Modo de Falla	76
3.2.1.3. Componente que Falló.....	77
3.2.1.4. Descriptores de Falla	78
3.2.1.5. Causas de Falla	79
3.2.2. Equipo Usado.....	80
3.2.3. Sistemas en Operación	80
3.3. Nomenclatura Estándar de Fallas de Sistemas BEC Propuesta por C-FER Technologies para ESP-RIFTS JIP.....	81
3.3.1. Acerca de ESP-RIFTS JIP	81

3.3.2. Alcance	82
3.3.3. Definiciones.....	84
3.3.4. Estructura de la Información de Falla.....	84
3.3.4.1. Razón Para Ser Desinstalado.....	85
3.3.4.2. Componente que Falló.....	86
3.3.4.2.1 Componente Primario de Falla.....	88
3.3.4.3 Descriptores de Falla	88
3.3.4.4. Causas de Falla	89
3.3.5. Determinando Cuando la Falla Ocurre.....	91
3.3.5.1. Fallas del Sistema BEC	92
3.3.5.2. Condiciones de los Componentes y las Partes del Sistema BEC.....	92
3.3.6. Pasos Involucrados en la Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS	93
3.3.6.1. Paso 1: Establecimiento de los Valores Iniciales de la Atribución de las Fallas	93
3.3.6.2. Paso 2: Determinando la Razón Para ser Desinstalado	94
3.3.6.3. Paso 3: Determinando Si el Sistema BEC Falló	94
3.3.6.4. Paso 4: Determinando las Condiciones de los Componentes, los Componentes que Fallaron y los Descriptores de Falla.....	95
3.3.6.5. Paso 5: Determinando el Componente Primario de Falla y la Causa de Falla	95
3.3.6.6. Diagrama de Flujo de los Pasos Involucrados en la Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS.....	97

Capítulo IV: Análisis de Fallas de Sistemas de Bombeo Electrocentrífugo

Sumergido	100
4.1. Definición de Falla	100
4.1.1. Fallas de Sistemas BEC.....	100
4.2. Fallas Comunes en Sistemas BEC	100
4.2.1. Fallas Eléctricas	100
4.2.2. Fallas en la Bomba.....	102
4.2.3. Fallas en el Motor.....	102
4.2.4. Fallas en el Sello.....	103
4.2.5. Fallas en el Eje.....	103
4.3. Análisis de las Fallas de Acuerdo a su Causa	103
4.3.1. Fallas Relacionadas a la Terminación.....	106
4.3.1.1. Bomba.....	108
4.3.1.2. Motor.....	108

4.3.1.3. Cable	108
4.3.1.4. Entrada de la Bomba	109
4.3.1.5. Solución	109
4.3.2. Fallas Relacionadas a la Instalación	109
4.3.2.1. Bomba.....	111
4.3.2.2. Motor.....	111
4.3.2.3. Cable	111
4.3.2.4. Solución	111
4.3.3. Fallas Relacionadas a la Fabricación.....	112
4.3.3.1. Motor.....	113
4.3.3.2. Cable	113
4.3.3.3. Sello.....	114
4.3.3.4. Solución	114
4.3.4. Fallas Relacionadas al Desgaste por Uso.....	114
4.3.4.1. Bomba.....	116
4.3.4.2. Motor.....	116
4.3.4.3. Cable	117
4.3.4.4. Sello.....	117
4.3.4.5. Entrada de la Bomba	117
4.3.4.6. Solución	117
4.3.5. Fallas Relacionadas a la Operación.....	118
4.3.5.1. Bomba.....	119
4.3.5.2. Motor.....	119
4.3.5.3. Cable	119
4.3.5.4. Sello.....	120
4.3.5.5. Solución	120
4.3.6. Fallas Relacionadas a los Fluidos del Yacimiento.....	121
4.3.6.1. Bomba.....	122
4.3.6.2. Motor.....	123
4.3.6.3. Cable	123
4.3.6.4. Sello.....	123
4.3.6.5. Solución	123
4.3.7. Fallas Relacionadas al Diseño del Sistema o a la Selección de sus Componentes.....	124
4.3.7.1. Bomba.....	126
4.3.7.2. Motor.....	126
4.3.7.3. Sello.....	126
4.3.7.4. Solución	127

4.4. Factores Comunes de Causa de Falla en Sistemas BEC.....	127
4.4.1. Producción de Sólidos.....	127
4.4.1.1. Propuestas de Solución	134
4.4.2. Vibración en los Sistemas BEC.....	138
4.4.2.1. Modos de Vibración	138
4.4.2.2. Fuentes de Vibración	138
4.4.2.3. Control de Vibración	140
4.4.2.3.1. Reducción de la Fuente de Vibración.....	140
4.4.2.3.2. Reducción en la Respuesta a la Vibración.....	140
4.4.2.4. Medidores de Vibración	142
4.4.2.4.1. Acelerómetros	142
4.4.2.4.2. Sondas de Proximidad	142
4.4.2.4.3. Sondas de Velocidad	142
4.4.2.5. Requerimiento de Medición de Vibración en los Componentes del Sistema BEC.....	143
4.5. Análisis de Posibles Causas de Falla Durante el Transporte e Instalación del Sistema BEC.....	145
4.5.1. Falta de Supervisión.....	145
4.5.1.1. Recomendaciones Para la Supervisión	146
4.5.2. Falta de Comunicación y Coordinación Durante Cambios de Guardia	146
4.5.2.1. Recomendaciones Para la Comunicación y Coordinación Durante Cambios de Guardia	146
4.5.3. Almacenamiento de Equipo y Accesorios Eléctricos.....	146
4.5.3.1. Recomendaciones Para el Almacenamiento de Equipo y Accesorios Eléctricos	147
4.5.4. Falta de Procedimientos.....	147
4.5.4.1. Recomendaciones Para la Aplicación de los Procedimientos.....	148
4.5.5. Falta de Repuestos en el Pozo	148
4.5.5.1. Recomendaciones Para la Disposición de Repuestos.....	148
4.6. Análisis de Posibles Causas de Falla Durante el Ensamblaje del Sistema BEC	149
4.6.1. Golpeo del Sistema BEC con el Equipo de Perforación o Reparación.....	149
4.6.1.1. Recomendaciones Para Evitar el Golpeo del Sistema BEC	149
4.6.2. Desplazamiento de los Ejes del Sistema BEC Durante la Conexión.....	149
4.6.2.1. Recomendaciones Para Evitar el Desplazamiento de los Ejes del Sistema BEC Durante la Conexión	150
4.6.3. Falta o Exceso de Torque a los Pernos Durante las Conexiones	150

4.6.3.1. Recomendaciones Para Evitar la Falta o el Exceso de Torque a los Pernos Durante las Conexiones.....	150
4.6.4. Instalación del Sistema BEC en Condiciones Climáticas Adversas	151
4.6.4.1. Recomendaciones Para la Instalación del Sistema BEC en Condiciones Climáticas Adversas.....	151
4.7. Análisis de Posibles Causas de Falla Durante la Introducción del Sistema BEC	151
4.7.1. Geometría del Pozo	152
4.7.1.1. Recomendaciones Acerca de la Geometría del Pozo.....	152
4.7.2. Alta Velocidad de Introducción.....	152
4.7.2.1. Recomendaciones Para Evitar una Alta Velocidad de Introducción.....	153
4.7.3. Realización de los Empalmes Gruesos.....	153
4.7.3.1. Recomendaciones Para Evitar Empalmes Gruesos	154
4.7.4. Accesorios o Componentes Complementarios Mal Instalados	155
4.7.4.1. Recomendaciones Para la Instalación de Componentes Complementarios o Accesorios	155
4.7.5. Daño al Cable de Potencia.....	156
4.7.5.1. Recomendaciones Para Evitar Daño del Cable de Potencia	156
4.7.6. Fricción de los Flejes o Protectores con los Preventores.....	158
4.7.6.1. Recomendaciones Para Evitar la Fricción de los Flejes o Protectores con los Preventores	158
4.7.7. Problemas al Pasar por la Boca del Liner	158
4.7.7.1. Recomendaciones Para Pasar por la Boca del Liner.....	159
4.8. Análisis de Posibles Causas de Falla Durante la Recuperación del Sistema BEC y la Inspección Preliminar del Pozo	159
4.8.1. Alta Velocidad de Recuperación	160
4.8.1.1. Recomendaciones Para Evitar una Alta Velocidad de Recuperación	161
4.8.2. Problemas al Desinstalar la Bola Colgadora	161
4.8.2.1. Recomendaciones Para Desinstalar la Bola Colgadora.....	161
4.8.3. Atascamiento de la Tubería de Producción con el Cable de Potencia	162
4.8.3.1. Recomendaciones en Caso de Atascamiento de la Tubería de Producción con el Cable de Potencia	162
4.8.4. Exceso de Torque en la Tubería de Producción	163
4.8.4.1. Recomendaciones Para Evitar el Exceso de Torque en la Tubería de Producción	164
4.8.5. Recuperación Parcial de Accesorios.....	164
4.8.5.1. Recomendaciones en Caso de la Recuperación Parcial de Accesorios	165
4.8.6. Falta de Supervisión y Detección de las Fallas en las Partes Externas	165

4.8.6.1. Recomendaciones Para la Supervisión y Detección de Fallas en las Partes Externas.....	166
4.8.7. Problemas Relacionados a la Protección del Sistema BEC Recuperado del Pozo.....	166
4.8.7.1. Recomendaciones para la Protección del Sistema BEC Recuperado del Pozo	166
Capítulo V: Modelos para el Análisis de Fallas	168
5.1. Conceptos Previos de Probabilidad	169
5.1.1. Términos Probabilísticos	170
5.1.2. Distribución Exponencial	172
5.1.3. Proceso Homogéneo de Poisson	172
5.1.4. Proceso No Homogéneo de Poisson	174
5.1.5. Distribución de Weibull.....	174
5.1.6. Distribución Ji-Cuadrada	175
5.2. Proceso de Modelado	176
5.2.1. Definición del Sistema.....	176
5.2.2. Condiciones Operativas	177
5.3. Elección del Modelo.....	177
5.3.1. Kaplan Meier, No Paramétrico	178
5.3.2. Riesgo Proporcional de Cox, Semi paramétrico.....	179
5.3.3. Distribución Exponencial	180
5.3.4. Distribución de Weibull.....	181
5.3.5. Métodos Gráficos	182
5.3.5.1. Gráficas de Duane	182
5.3.5.2. Gráficas de Tiempo Total Escalonado	182
5.3.6. Proceso Homogéneo de Poisson	185
5.3.7. Métodos Numéricos	185
5.3.8. Distribución de Weibull Incorporando Simulación de Monte Carlo	185
5.4. Resumen de los Modelos Presentados.....	186
5.5. Aspectos Adicionales a Tomar en Cuenta en el Modelado.....	187
5.5.1. Influencia del Desgaste por Uso.....	187
5.5.2. Tamaño de la Muestra	189
5.5.3. Errores en la Estimación del Rango Constante de Falla	189
5.5.4. Información Restringida	190
5.5.5. Estimación de Parámetros	190
5.5.6. Variación en los Criterios Económicos	194

5.6. Modelo de Evaluación Comparativa de Tiempo de Vida Útil de Sistemas BEC entre Diferentes Aplicaciones (ESP-RIFTS).....	196
5.6.1. Descripción del Modelo	197
5.6.2. Determinación de los Parámetros y Coeficientes del Modelo	199
5.6.3. Problemas Encontrados	200
5.6.3.1. Información Restringida	200
5.6.3.2. Información Incompleta.....	201
5.6.3.3. Elección de Parámetros.....	201
5.6.3.4. Incertidumbre en las Predicciones	202
5.6.4. Resultados Obtenidos	203
5.6.5. Otros Beneficios del Desarrollo del Modelo	204
Conclusiones y Recomendaciones	205
Anexo 1: Apéndices.....	207
Apéndice 2.1. Ejemplos de Cálculos de Medidas de Tiempos de Vida en Situaciones Especiales.....	207
Apéndice 2.2. Cálculo de Tiempo de Falla y Censura con Simulación de Monte Carlo	210
Apéndice 3.1. Ejemplos de Aplicación de la Nomenclatura Estándar	212
Ejemplo 1: Falla de un Componente que No Pertenece al Sistema BEC (Válvula Superficial)	212
Ejemplo 2: Error Humano.....	214
Ejemplo 3: Falla de un Componente Subsuperficial que No Pertenece al Sistema BEC (Liner Ranurado)	215
Ejemplo 4: Diseño Inadecuado del Sistema BEC	217
Ejemplo 5: Componentes del Sistema BEC Desechados Sin Inspección o Pruebas de Fábrica	218
Ejemplo 6: Mantenimiento Preventivo No Programado - El Sistema de Monitoreo de Fondo de Pozo Muestra el Comienzo de una Posible Falla Potencial	220
Ejemplo 7: Aplicación Difícil - Aplicaciones que Tienen Muchos Problemas Relacionados	221
Ejemplo 8: Una Situación Diferente a la Falla de un Componente del Sistema BEC que Resultó en una Aparente Falla del Sistema BEC	223
Apéndice 5.1. Comparación de Modelos No Paramétrico (Kaplan Meier), Semi Paramétrico (Cox) y Paramétrico (Weibull)	225
Ejemplo 1. Encontrando el Percentil 50 (P50) del Tiempo de Falla Para el Conjunto de Datos.....	226
Ejemplo 2. Comparando Dos Curvas de Supervivencia que Difieren en un Factor	228

Apéndice 5.2. Ejemplo de Predicción de Fallas en el Bloque F, Kuparuk, Alaska	231
Anexo 2: Glosario	238
Índice de Figuras	240
Índice de Tablas	244
Referencias Bibliográficas	246

Resumen

Palabras Clave: Sistemas Artificiales de Producción SAP, Bombeo Electrocentrífugo Sumergido BEC, Confiabilidad de Sistemas BEC, Análisis de Fallas de Sistemas BEC, Modelos de Predicción de Fallas.

El objetivo principal de esta tesis es establecer los fundamentos para poder llevar a cabo de manera adecuada el análisis de fallas de los sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido que permitan incrementar su vida útil promedio y sus rangos de operación, y por lo tanto, la confiabilidad del sistema.

En la primera parte de esta tesis, se describe el sistema BEC con sus componentes y diferentes aplicaciones; presentamos las medidas de evaluación de la confiabilidad de los sistemas artificiales de producción, mostramos la importancia de una base de datos que cumpla con las especificaciones requeridas para que sea útil en el proceso de análisis y predicción de fallas y su aplicación en los modelos para la predicción del Tiempo de Vida Útil y fallas en los sistemas.

En la segunda parte, presentamos las fallas que ocurren en los componentes subsuperficiales de los sistemas BEC y las causas de falla que pueden tener lugar en cualquiera de las diferentes etapas de su vida útil; mostramos como a partir de estas fallas es posible llevar a cabo un análisis para identificar los puntos clave en los que se debe poner especial atención para poder disminuir el rango de falla y así poder mejorar la aplicación del sistema. Finalmente presentamos de manera concreta los diferentes modelos que pueden ser aplicados para el análisis de fallas.

Esta tesis se encuentra enfocada solamente al análisis de fallas en sistemas BEC. Cabe mencionar que en México, aun no existe una norma oficial con procedimientos, ni nomenclatura estándar para el reporte de fallas y por lo tanto tampoco una base de datos; razón por la que el análisis de esta tesis se llevó a cabo con la información de los desarrollos llevados a cabo por Francisco Alhanati, C-FER Technologies y la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS.

Por último, debemos tener en cuenta que los modelos aplicados al análisis de fallas de los sistemas BEC requieren de mucho más estudio para poder lograr desarrollar una herramienta con una baja incertidumbre en sus predicciones. Actualmente la información que se tiene al respecto es muy poca, los aspectos y parámetros a considerar para poder predecir el Tiempo de Vida Útil y el número de fallas esperado, son muchos; además que existe la gran necesidad de contar con una base de datos de fallas completa y confiable.

Abstract

Key Words: Artificial Lift, Electrical Submerged Pump ESP, ESP Reliability, Survey of ESP Failures, Statistical Assessment of Electrical Submersible Pump Failures.

The main objective of this thesis is to establish the fundamentals to carry out the failure analysis of electrical submerged pumps, which allow us to extend the expected run life and operating rates, therefore increasing reliability of ESP.

In the first part of this thesis, we describe ESP and its components; the use of the run life measures of the artificial lift systems reliability. Additionally, the importance of a data set that can be useful in the survival analysis, which implies prediction of run time and failure rate.

In the second part, we present the failures of the subsuperficial components of ESP, and failure causes that may occur in any of the ESP's different stages. So then, we can perform the survival analysis from the failure data, and be able to identify key points which we must work on to decrease the failure rate and improve ESP's applications. Finally, we present the different models that have been applied to survival analysis.

This thesis work is focused in ESP failures. It is worth mentioning that in Mexico, we have not Recommended Practices specific to this matter, neither ESP Failure Nomenclature Standard nor a general or specific data set; reason why the analysis presented in this thesis is based on Francisco Alhanati's work, C-FER Technologies and ESP-RIFTS.

Finally, we must consider that the statistical models used in the failure analysis require more study in order to develop a new for ESP survival analysis tool with low uncertainty rates in its predictions. Nowadays the information we have is shallow, and parameters and mechanisms to consider to run life and failure prediction, many; plus there is the great need of a complete and relievable data set.

Introducción

Conforme se produce el aceite de un campo petrolero, la presión del yacimiento disminuye. Después de un tiempo la presión es insuficiente para poder vencer las caídas de presión dentro del pozo, por lo que es necesario implementar algún sistema artificial de producción que nos permitan conducir los hidrocarburos del yacimiento a la superficie. Uno de estos, es el sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido (BEC). En la actualidad, aproximadamente el 10% de la producción mundial de aceite es producida por medio de este sistema.

De todos los sistemas artificiales de producción, el sistema BEC es capaz de producir mayores gastos que cualquier otro, además de ser el sistema que puede utilizarse en los yacimientos más desafiantes por sus condiciones operativas, como alta temperatura, alta viscosidad del aceite, mayores profundidades y altas RGA, por mencionar algunas. Lo anterior hace necesario mejorar las aplicaciones actuales del sistema BEC; para lo que un análisis de fallas resulta de gran utilidad ya que a partir de este podemos evitar fallas en futuras operaciones y podemos predecir de manera confiable el Tiempo de Vida Útil de los sistemas de acuerdo a sus condiciones de aplicación a partir de modelos probabilísticos.

En el Capítulo I, se describe el sistema BEC en su totalidad, mostrando los componentes del equipo superficial y subsuperficial, sus accesorios y además los diseños especiales que podemos encontrar del sistema para diferentes aplicaciones.

En el Capítulo II, se presentan las medidas de evaluación de la confiabilidad de los sistemas artificiales de producción, además de la forma y datos con los que estas se calculan. Poniendo especial énfasis en que la información recopilada y los tiempos con los que las medidas de evaluación son calculadas sean adecuadas, ya que pueden llegar a afectar de manera significativa el Tiempo de Vida Útil y Tiempo Medio a la Falla, los cuales son utilizados para el análisis de falla de los sistemas BEC.

En el Capítulo III presentamos la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS, por sus siglas en inglés Electric Submersible Pump – Reliability Information and Failure Tracking System, y las bases con las que fue llevada a cabo, como un ejemplo de lo que una base de datos debe llevar para que pueda resultar útil.

En el Capítulo IV, se presentan las fallas y causas de falla en los sistemas BEC, también se muestra que a partir de estas fallas, podemos llevar a cabo un análisis, e identificar los puntos clave en los que debemos trabajar para poder disminuir el rango de falla y poder mejorar las aplicaciones del sistema BEC. Cabe mencionar que las fallas no son un factor que hace que la confiabilidad en el sistema se reduzca, por otro lado el uso de una herramienta para predecir el tiempo de vida útil y el rango de falla si puede aumentarla, llevándonos a mejores resultados tanto operativos como económicos. De igual manera en este capítulo se presentan procedimientos establecidos a seguir para evitar errores humanos. Todo lo anterior nos dará como resultado un incremento notable en los Tiempos de Vida Útil, y por lo tanto, la confiabilidad del sistema será mucho mayor.

En el Capítulo V, se muestra de manera concreta los diferentes modelos que han sido aplicados para el análisis de fallas en sistemas BEC. Se presentan a los autores que han trabajado con estos modelos, y los resultados que obtuvieron. De igual forma se presenta un análisis de los modelos y su utilidad para la predicción de fallas y Tiempo de Vida Útil de los sistemas BEC a manera de resumen. Por último se mencionan los aspectos adicionales en los cuales se debe poner atención para el desarrollo de un modelo.

En los apéndices presentamos ejemplos; el primero es sobre del cálculo de las medidas de confiabilidad de los sistemas artificiales de producción, correspondientes al Capítulo II, dando énfasis en algunos puntos que muchas veces no se toman en cuenta y pueden afectar nuestras medidas. El segundo ejemplo corresponde al Capítulo III y es sobre el llenado del formato de la Nomenclatura Estándar, ya que existen algunos casos que podrían considerarse como especiales, los cuales podrían causar conflicto y errores en el llenado de las formas del reporte de falla, dándonos como resultado información no confiable. Los siguientes dos ejemplos forman parte del Capítulo V, uno muestra de manera muy general la diferencia de la confiabilidad del cálculo de la mediana de la curva de supervivencia con métodos no paramétrico, semi paramétrico y paramétrico; el segundo presenta de manera ilustrativa, el ejemplo del cálculo de la predicción de fallas para un campo en Kuparuk, Alaska, llevado a cabo por Sawaryn y Ziegel.

Finalmente se presentan conclusiones y recomendaciones que fueron resultado de la realización de este trabajo de tesis.

Capítulo I: Aspectos Fundamentales y Aplicaciones del Bombeo Electrocentrífugo Sumergido (BEC)

1.1. Descripción y Breve Historia del Bombeo Electrocentrífugo Sumergido

En 1910, el ruso Armais Arutunoff, inventó el bombeo electrocentrífugo sumergible, Figura 1.1. También se convirtió en el fundador de la compañía REDA, por sus siglas en inglés Russian Electrical Dynamo of Arutunoff. En 1926, Arutunoff obtuvo la patente estadounidense para la bomba eléctrica sumergible y el mismo año el primer sistema BEC operó de manera exitosa.

El primer sistema BEC tenía un motor eléctrico de 6 metros y una bomba centrífuga multietapa. Entre el motor y la bomba se encontraba el sello. La energía eléctrica era suministrada desde la superficie por medio de cable trifásico. El equipo completo se introdujo dentro del pozo en el fondo de la sarta de la tubería de producción. En la actualidad, estos siguen siendo los componentes principales del sistema BEC. Lo que ha cambiado de manera significativa a través de los años es el material de los componentes y su funcionalidad. Al igual que el rendimiento del Sistema BEC ha aumentado; el motor ha pasado de 105 HP a 1600 HP, y los rangos del líquido producido, de 1,000 BPD a cerca de 30,000 BPD, como se ilustra en la Figura 1.2. ¹

El equipo del sistema BEC durante su historia, ha tenido mejoras. A principios de la década de los 50s, se introdujeron secciones de sellos mecánicos sobre sus ejes, este fue el primer mejoramiento para aumentar la vida útil del sistema. Los nuevos sellos brindaron una mejor protección contra las fugas de los fluidos producidos hacia el motor. En los inicios del sistema BEC, la producción de pozos con una RGA alta era un gran desafío y los separadores gravitacionales simples no resolvían el problema. El primer separador de gas rotatorio se introdujo a principio de 1970 y fue un gran avance en cuanto a la separación de gas. Otros componentes del sistema BEC también han evolucionado a lo largo de los años, sin embargo; el siguiente gran progreso fue cuando se introdujo el primer variador de frecuencia (VSD, por sus

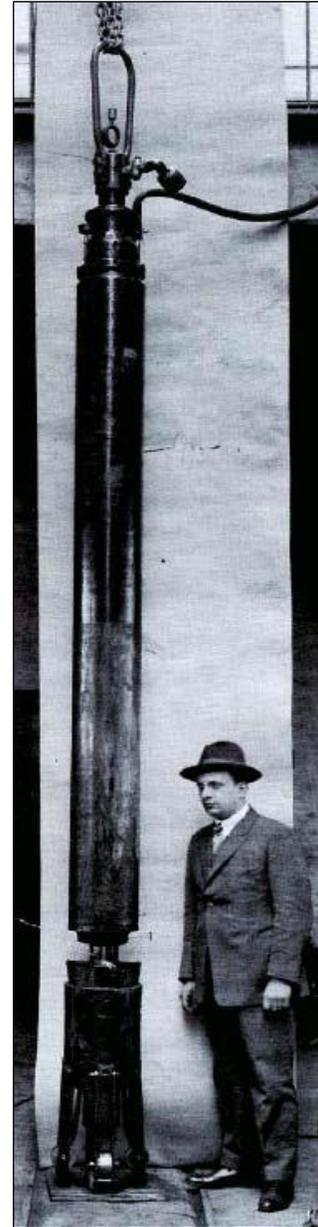


Figura 1.1 – Arutunoff y su Bomba Electrocentrífuga (Bearden, 2009)

siglas en inglés: Variable Speed Drive) en 1977. Esto hizo posible ajustar el rendimiento del sistema para manejar las condiciones cambiantes del pozo. ²

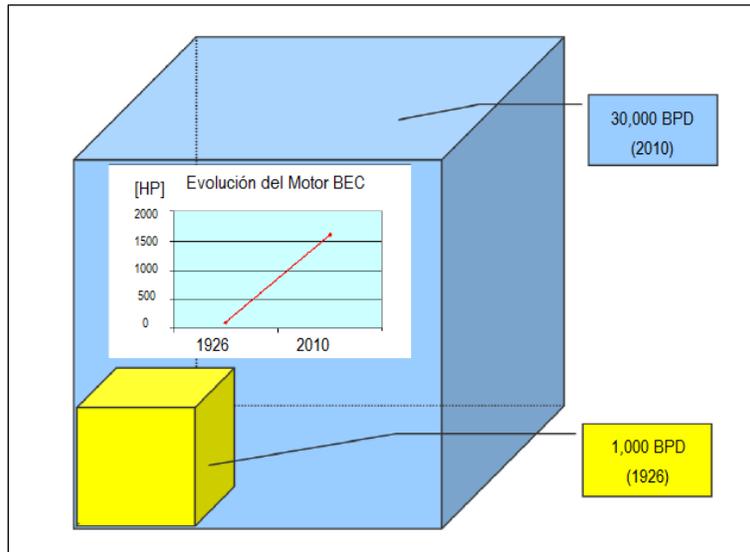


Figura 1.2 – Evolución del Sistema BEC (Stale, 2010)

Desde su primera aplicación para un pozo petrolero en 1929, ha probado ser un sistema artificial de producción eficiente y económico. En la industria petrolera, comparativamente con otros sistemas artificiales de producción tiene ventajas y desventajas, debido a que un pozo candidato a producir eficientemente con bombeo electrocentrífugo sumergido, debe reunir características que no afecten su funcionamiento tales como altas RGA, altas temperaturas, presencia de arena en los fluidos producidos y medio ambiente de operación agresivo, que son factores que pueden provocar las fallas en el sistema como se verá en el Capítulo IV del presente trabajo de tesis.

Entre las características únicas del sistema está su capacidad de producir volúmenes considerables de fluido desde grandes profundidades, bajo una amplia variedad de condiciones del pozo y particularmente se distingue porque, su unidad de impulso o motor está directamente acoplada con la bomba en el fondo del pozo. El aparejo de bombeo electrocentrífugo trabaja sobre un amplio rango de profundidades y gastos. Su aplicación es particularmente exitosa cuando las condiciones son propicias para producir altos volúmenes de líquidos con bajas relaciones gas-aceite. El sistema opera sin empacador inferior de la tubería de producción, generalmente por arriba del área de los disparos.

Para poder llevar a cabo una buena selección del equipo de bombeo, se debe considerar en el diseño el volumen y propiedades físicas de la mezcla, ya que varían constantemente en el interior de la bomba; lo cual se traduce en reducciones importantes de su capacidad volumétrica, desde la

presión de succión hasta la descarga. Por lo que las dimensiones del motor y de la bomba son aún menores, para lograr una operación más eficiente del sistema, para obtener en la superficie el gasto de líquidos deseado, manteniendo la presión necesaria en la cabeza del pozo.

Para el año 2000 se encontraban operando más de 14,000 sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido de la compañía REDA en 115 países.

1.1.1. Bombeo Electrocentrífugo Sumergido en México

En el año 2011 con la participación de 28 empresas nacionales e internacionales de países como Arabia Saudita, Rusia y Estados Unidos, Pemex presentó el proyecto de Bombeo Electrocentrífugo (BEC), el cual busca garantizar la producción de los yacimientos Ek, Balam, Takin, Maloob Zaap y Ayatsil, localizados en la sonda de Campeche, en el Golfo de México.

El objetivo es garantizar el diseño, instalación, operación asistida y mantenimiento del sistema BEC para el aseguramiento del flujo de los crudos pesados de dichos yacimientos, ya que el bombeo electrocentrífugo sumergido se utiliza desde hace más de quince años en yacimientos petroleros de 27 grados API y más de cinco años en pozos productores de crudo de 13 grados API.

Dadas las características del crudo producido en los pozos exploratorios fue necesario realizar sus evaluaciones de potencial con sistema BEC, concluyendo que este sistema es el sistema artificial de producción más eficaz para explotar los yacimientos de cretácico tanto pesado como extra pesado.

El proyecto tendrá un plazo de ejecución de cinco años para la instalación de este sistema en 122 pozos, con una inversión de mil millones de dólares, y se realizará a través de una licitación pública internacional.

En la actualidad de acuerdo con la información publicada en la página oficial de la nueva Empresa Productiva del Estado, Pemex, ya se han llevado a cabo tanto licitaciones como firma de contratos como parte de este proyecto.

1.2. Equipo del Sistema de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido (BEC)

1.2.1. Descripción del Equipo

Una unidad típica del sistema BEC, está constituida en el fondo del pozo por los componentes: motor eléctrico, protector, separador de gas, bomba electrocentrífuga y cable conductor. Las partes

superficiales son: cabezal, cable superficial, tablero de control, transformador. La bomba centrífuga es accionada por un motor eléctrico que se alimenta de energía de la superficie.

El sistema BEC es instalado en el pozo por encima del nivel de los disparos. Cuando los fluidos entran dentro del pozo pasan el motor enfriándolo, el motor se encuentra conectado con la parte inferior de la sarta de tubería. Después los fluidos continúan fluyendo, pasan la sección de sello o protector y entran dentro del separador, el cual quita la mayor parte del gas, sin embargo, los separadores son opcionales, ya que el arreglo puede estar compuesto por una entrada o intake simple.

Cuando los fluidos entran a la bomba son levantados por múltiples etapas de la bomba hasta llegar a la superficie. El sistema BEC es una forma efectiva y económica de llevar grandes volúmenes de fluidos desde pozos muy profundos con una gran variedad en las condiciones de los pozos. El bombeo electrocentrífugo sumergido es una forma versátil de levantamiento artificial y tiene aplicaciones alrededor de todo el mundo.⁷

Se incluyen todos los accesorios necesarios para asegurar una buena operación, como son: separador de gas, flejes de cable, extensión de la mufa, válvula de drene, válvula de contrapresión, centradores, sensor de presión y temperatura de fondo, dispositivos electrónicos para control del motor, caja de unión, y controlador de velocidad variable.

La integración de los componentes es indispensable, ya que cada uno ejecuta una función esencial en el sistema para obtener las condiciones de operación deseadas que permitan impulsar a la superficie el gasto requerido. En la Figura 1.3, se muestra la distribución de los componentes del aparejo en la forma tradicional como quedan colocados en el pozo.

El bombeo electrocentrífugo sumergido por lo regular es usado para grandes volúmenes, mayores a 1,000 BPD. Como cualquier otro sistema tiene ventajas y desventajas, las cuales se presentan a continuación:

Ventajas:

- Equipo superficial mínimo
- Alta resistencia a los ambientes corrosivos
- Puede ser utilizado en pozos desviados
- Puede manejar altas temperaturas
- Puede manejar un amplio rango de gastos de manera efectiva y económica
- Puede ser utilizado para fluidos con altas viscosidades

- Manejo simultáneo de aceite, gas y agua

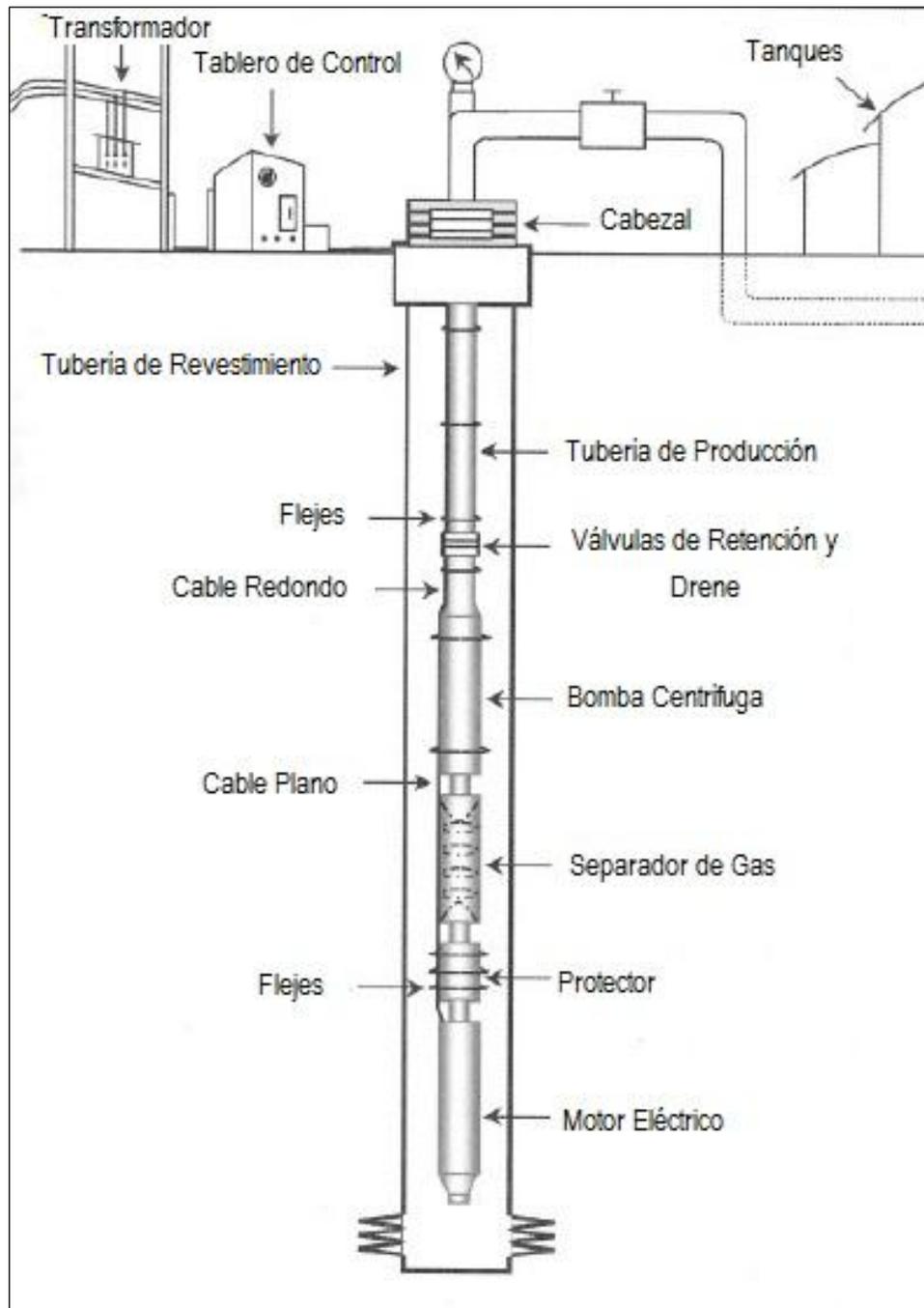


Figura 1.3 – Distribución de los Componentes del Aparejo del Sistema BEC (Díaz-Zertuche, 2003)

Desventajas:

- No presenta un buen manejo de arenas
- Sensible a gas
- Requiere reparaciones que son muy costosas

- Profundidad de operación limitada, tanto por el rango de potencia del motor eléctrico como por el cable
- Costo inicial alto debido a las etapas de la bomba, potencia del motor y cable, sobre todo si este requiere recubrimientos especiales debido a un ambiente altamente corrosivo

1.2.2. Equipo Superficial

1.2.2.1. Bola Colgadora

La bola colgadora usada en las instalaciones de los pozos con sistemas BEC, está diseñada para cargar el peso del equipo subsuperficial y mantener el control en el espacio anular. Debe sellar el espacio entre la tubería de producción y el cable.

Este dispositivo se coloca en un nido sobre el árbol de válvulas. Su función es sostener la tubería de producción, permitir su paso y el de los tres conductores del cable, proporcionando el sello necesario en el espacio anular entre la tubería de producción y de revestimiento para evitar la fuga de fluidos a la superficie. Está construida de acero, cubierta de neopreno. En el caso de instalaciones marinas el paso de los conductores del cable, lo tiene integrado y su contacto es como el de la mufa.³

1.2.2.2. Caja de Conexiones o Caja de Viento

Se instala por razones de seguridad entre el cabezal del pozo y el tablero de control, debido a que el gas puede viajar a lo largo del cable superficial y alcanzar la instalación eléctrica en el tablero. En la caja de viento o de conexiones, los conductores del cable quedan expuestos a la atmósfera evitando esa posibilidad.³

Como se muestra en la Figura 1.4 el cable eléctrico que sale del pozo se une con el cable de la caja de interruptores dentro de la caja de conexiones.

La caja de conexiones tiene las siguientes funciones:

- Conecta los cables provenientes del pozo con los cables de superficie
- Ventea a la atmósfera el gas que llega a superficie con el cable de potencia. Esto previene explosiones
- Proporciona un punto de vigilancia o supervisión del sistema eléctrico accesible del equipo subsuperficial

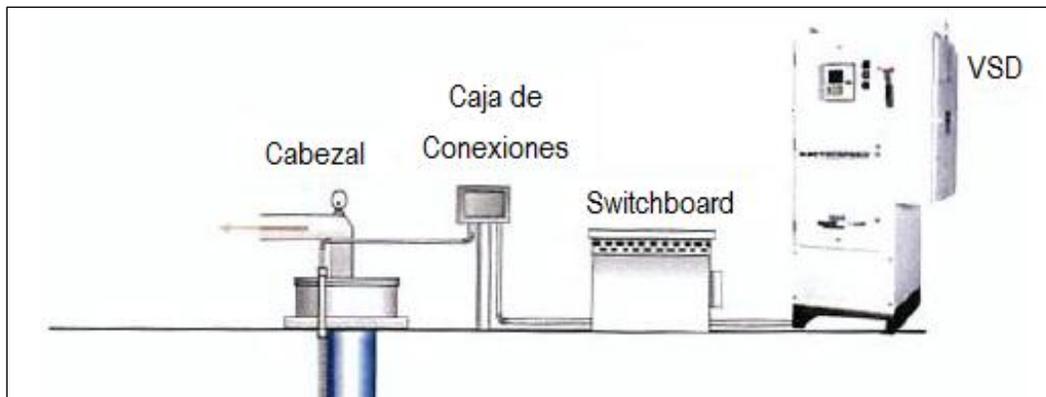


Figura 1.4 – Equipo Superficial del Sistema BEC (Baker Hughes Centrilift, 2008)

1.2.2.3. Tablero de Control (Switchboard)

El sistema de control del sistema BEC es conocido como switchboard o tablero de control, el cual controla la operación del sistema entero. Las funciones principales son, proveer el control de encendido y apagado de la unidad BEC y monitorear y guardar los parámetros de operación.

Este componente, como ya mencionamos es el que gobierna la operación del aparato de producción en el fondo del pozo. Dependiendo de la calidad del control que se desea tener, se seleccionan los dispositivos que sean necesarios para integrarlos al tablero. Este puede ser sumamente sencillo y contener únicamente un botón de arranque y un fusible de protección por sobrecarga; o bien contener fusibles de desconexión por sobrecarga y baja carga, mecanismos de relojería para restablecimiento automático y operación intermitente, protectores de represionamiento de líneas, luces indicadoras de la causa del paro, amperímetro, y otros dispositivos para control remoto.

Adicionalmente, el tablero de control puede proteger el equipo tanto de problemas superficiales como subsuperficiales.

Los problemas subsuperficiales que puede prevenir son:

- Sobrecarga del motor
- Carga baja del motor
- Corrientes no adecuadas

Problemas superficiales que puede prevenir son:

- Entrada de voltajes muy altos o muy bajos
- Desequilibrio de voltajes
- Caída de rayos.

1.2.2.4. Transformadores

Este componente se utiliza para elevar el voltaje de la línea doméstica al voltaje requerido en la superficie para alimentar al motor en el fondo del pozo; algunos están equipados con interruptores “taps”, que les dan mayor flexibilidad de operación.

La energía eléctrica disponible en las plataformas es por lo regular de 6000 volts o más. Sin embargo, los motores BEC operan con voltajes entre 250 y 4000 volts, los transformadores deben ser usados para proporcionar el nivel de voltaje adecuado.¹ Los transformadores son unidades que funcionan con diésel, cuentan con su sistema de enfriamiento y se encuentran disponibles en unidades de tres fases simples y unidades trifásicas.⁵

1.2.2.5. Variador de Frecuencia (VSD)

El sistema BEC puede operar a frecuencia fija de 50 o 60 HZ, o también puede operar a frecuencia variable. El VSD, por sus siglas en inglés, Variable Speed Drive; permite cambiar la frecuencia fija de la onda de corriente alterna suministrada a otras frecuencias que van de un rango de 30 a 90 Hz. Adicionalmente, el variador de frecuencia mejora las condiciones de arranque del motor.

Y podemos ver que algunos de los resultados que podemos obtener al operar a mayor frecuencia es, una mayor velocidad de operación en la bomba, al tener este incremento de velocidad, obtenemos un incremento en el gasto y el levantamiento de la bomba.

La unidad VSD, hace posible variar el rendimiento del sistema BEC y controlar la velocidad del motor. Al lograr esto, se pueden obtener los siguientes beneficios:

- Mejor control de la temperatura del motor
- Mejorar el manejo del gas
- Ajustar a las condiciones cambiantes del pozo

Por lo regular en los campos petroleros, el suministro de energía es alto, y requiere que los voltajes superficiales sean ajustados de manera individual para cada pozo. Al usar la unidad VSD, esta proporciona la frecuencia necesaria, y los transformadores hacen los ajustes necesarios para asegurar que se cuente con el voltaje requerido para el funcionamiento del sistema BEC.

La unidad VSD es ampliamente aceptada como una herramienta importante para asegurar la flexibilidad de operación del sistema BEC. Estas unidades son comunes en pozos en los que las condiciones están sujetas a muchos cambios (es recomendada para la mayoría de pozos).

1.2.3. Equipo Subsuperficial

1.2.3.1. Bomba Electrocentrifuga Sumergible

El corazón del sistema BEC es la bomba eléctrica sumergible; para poder entender cómo funciona en conjunto el sistema, es importante entender la operación de la bomba. Por eso es que la descripción del sistema y sus componentes debe empezar con un análisis de construcción y operación de la bomba.

La función básica de la bomba es imprimir a los fluidos del pozo, el incremento de presión necesario para hacerlos llegar a la superficie con la presión en la cabeza del pozo.

En la Figura 1.5 podemos ver los componentes principales de las bombas eléctricas sumergibles. Las bombas utilizadas en la industria petrolera pueden ser clasificadas en dos grupos; las bombas de desplazamiento positivo y las bombas dinámicas. El tipo de bombas con el que trabaja el sistema BEC, son bombas dinámicas.² Las bombas electrocentrifugas sumergibles son de múltiples etapas, y cada etapa consiste en un impulsor giratorio y de un difusor estacionario.

El sistema BEC utiliza bombas eléctricas sumergibles que funcionan por medio de motores eléctricos, que convierten la energía del eje rotatorio en fuerza centrífuga, las cuales proporcionan la energía necesaria al fluido del yacimiento para llevarlo a la superficie.

Las características principales de las bombas centrífugas del sistema BEC son:

- Bombas de múltiples etapas
- Tienen configuración de flujo radial o mixta
- Operan en posición vertical

Las bombas sumergibles usadas en los sistemas BEC han evolucionado continuamente a través de los años pero el principio básico de operación sigue siendo el mismo. Los fluidos del pozo, después de que están sujetos a una gran fuerza centrífuga a causa de la rotación a alta velocidad del impulsor, pierden su energía cinética en el difusor que es donde toma lugar la conversión de energía cinética a presión.

El tamaño de cada etapa que se use determina el volumen del fluido que va a producirse, la carga o presión que la bomba genera depende del número de etapas y de este número depende la potencia requerida. De una forma muy general el diseño del impulsor se puede clasificar como: radial, para gastos bajos y alta altura; y mixtos en que podemos manejar gastos altos y baja altura. En una

bomba de impulsores flotantes, estos se mueven axialmente a lo largo de la flecha y pueden descansar en empuje ascendente o empuje descendente en los cojinetes cuando están en operación. Estos empujes a su vez, los absorbe un cojinete en la sección sellante.

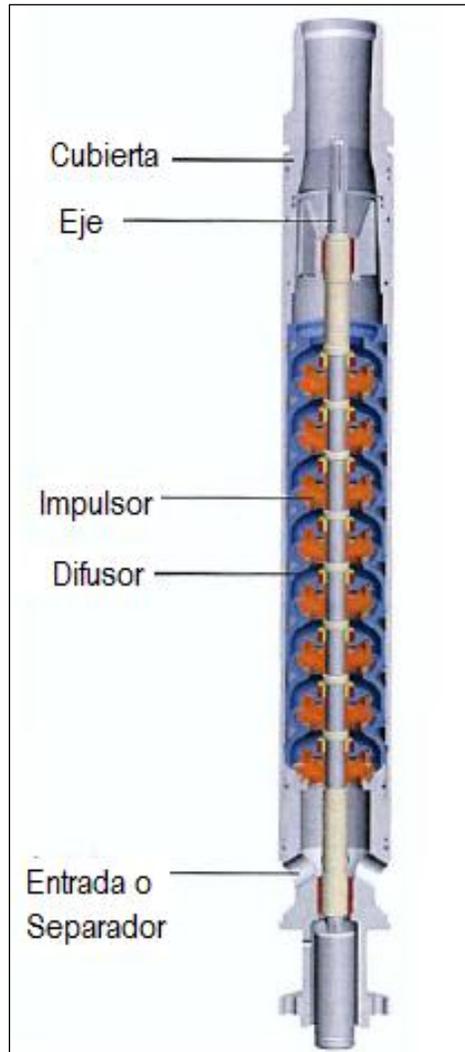


Figura 1.5 – Bomba Electrocentrífuga Sumergida (Baker Hughes Centrilift, 2008)

Los empujes desarrollados por los impulsores dependen de su diseño hidráulico y mecánico, además del gasto de operación de la bomba. Una bomba operando a un gasto superior al de su diseño produce empuje ascendente excesivo y por el contrario operando en un gasto menor produce empuje descendente.

Un impulsor operando a una velocidad dada, genera la misma cantidad de carga independientemente de la densidad relativa del fluido que se bombea, ya que la carga se expresa en

términos de altura de columna hidráulica del fluido. De esta característica se desprende el siguiente concepto:

La presión desarrollada por una bomba centrífuga sumergible, depende de la velocidad periférica del impulsor y es independiente del peso del líquido bombeado. La presión desarrollada convertida a la longitud de columna hidráulica que levanta la bomba, es la misma cuando la bomba maneja agua de densidad relativa de 1.0, aceite de densidad relativa de 0.85, salmuera de densidad relativa de 1.35, o cualquier otro fluido de diferente densidad.

En estos casos la lectura de la presión en la descarga de la bomba es diferente, únicamente permanecen fijos el diámetro y la velocidad del impulsor. En la Figura 1.6, se muestran bombas idénticas, que producen columnas hidráulicas de igual longitud, manejando líquidos con diferentes densidades relativas.

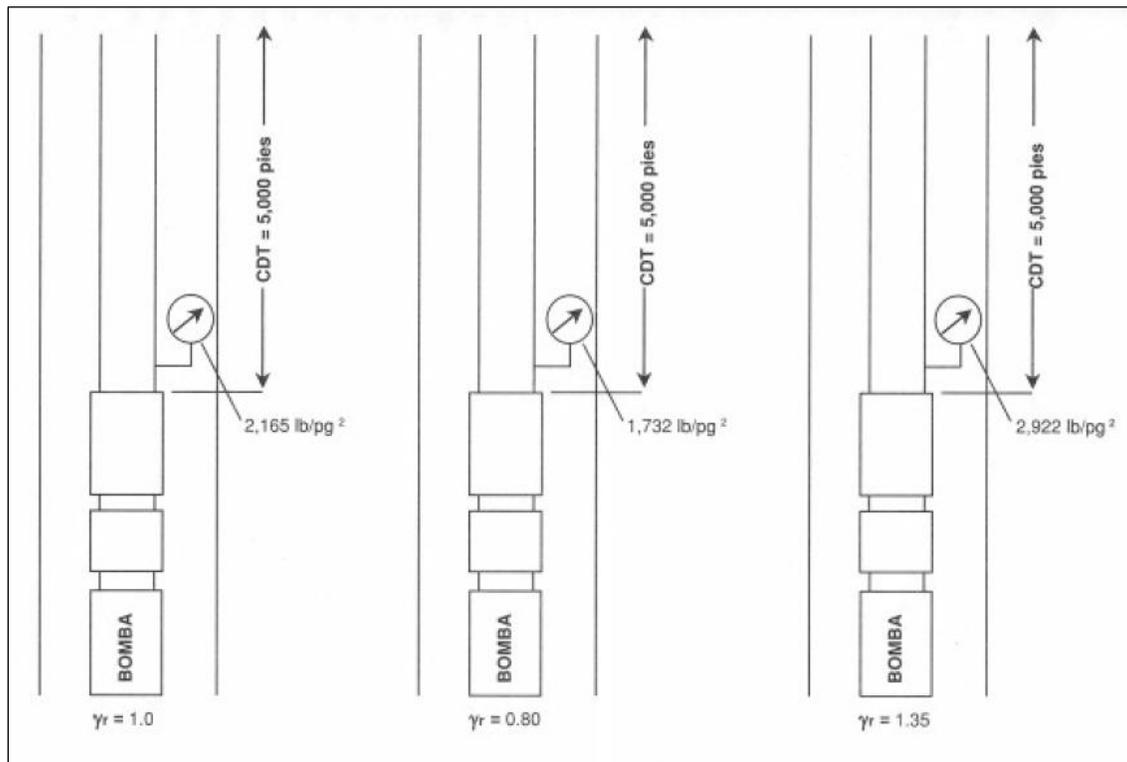


Figura 1.6 – Bombas Trabajando con Líquidos con Diferentes Densidades Relativas (Díaz-Zertuche, 2003)

Una interpretación diferente del concepto anterior, es que cada etapa de la bomba imprime a los fluidos un incremento de presión exactamente igual. En esta forma, si la primera etapa eleva la presión en 0.5 kg/cm² y la bomba tiene 20 etapas, el incremento total de presión que se obtiene es de 10 kg/cm².

1.2.3.1.1. Principales Componentes de la Bomba Electrocentrífuga Sumergible

Para una mejor ilustración de los componentes principales de las bombas, se muestra la Figura 1.7, en la que se pueden identificar cada uno de ellos. Dentro integrados como partes de la bomba electrocentrífuga sumergida.

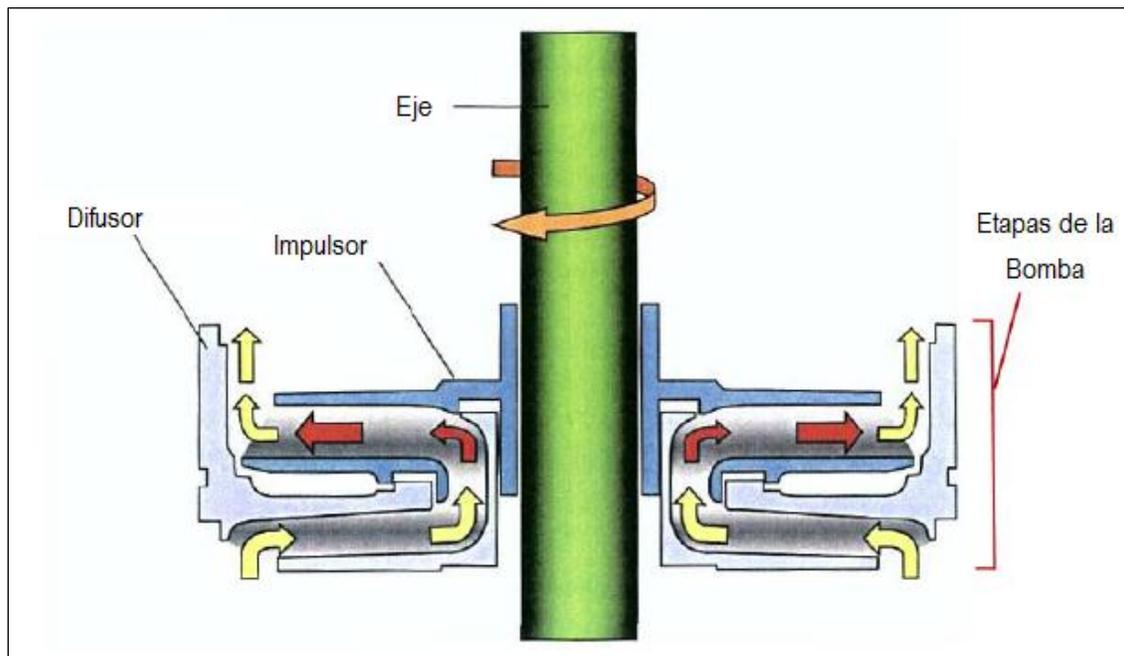


Figura 1.7 – Principales Componentes de la Bomba Electrocentrífuga Sumergida
(Baker Hughes Centrilift, 2008)

Impulsor

El impulsor se encuentra junto con el eje y gira con las RPM del motor. Cuando el impulsor gira transfiere la fuerza centrífuga al fluido producido.

Existen dos tipos de impulsores:

- a. Impulsores Fijos: Las bombas con impulsores fijos (también llamadas bombas de compresión) tienen los impulsores unidos al eje. Por lo que no se pueden mover muy fácilmente de forma axial.
- b. Impulsores Flotantes: En las bombas con impulsores flotantes (también llamadas bombas flotantes) los impulsores pueden moverse axialmente entre los difusores.

Eje

El eje de la bomba está conectado con el motor (a través del separador de gas y el sello o protector), y gira con la misma velocidad de giro del motor. El eje de la bomba gira el impulsor con la ayuda de unas llaves que se encuentran en el impulsor.

Entrada de la Bomba

La entrada de la bomba se encuentra en la parte inferior de la bomba y proporciona la entrada a los fluidos. Otros componentes en la bomba incluyen los cojinetes a lo largo del eje, los cuales dan un soporte radial al mismo.

La capacidad de flujo de la bomba eléctrica sumergible, depende de los siguientes factores:

- La velocidad de rotación que provee el motor
- El diámetro del impulsor
- El diseño del impulsor
- La altura con la que se encuentre operando la bomba
- Las propiedades de los fluidos (densidad, viscosidad, etc.)

1.2.3.2. Motor Eléctrico

El objetivo principal del motor es convertir la energía eléctrica en energía mecánica para que el eje gire. El eje está conectado a través del sello y el separador de gas y hace girar al impulsor dentro de la bomba.

Los motores BEC por lo general funcionan a aproximadamente 3600 RPM a 60 Hertz de potencia. El voltaje de operación de los motores BEC puede variar de 230 a 7000 volts. Al aumentar la longitud o el diámetro del motor el efecto puede aumentar para poder así lograr la potencia requerida. Una vez que se ha determinado el diámetro del motor para un pozo, por lo regular llegan a ser muy largos para poder obtener la potencia requerida, de hasta 10 metros.

El motor del sistema BEC es trifásico, de dos polos, con motor eléctrico de inducción tipo jaula de ardilla. Funciona bajo el principio de inducción electromagnética que establece una corriente eléctrica que induce cualquier conductor moviéndolo en relación al campo magnético generado en el estator. El campo gira con los cambios de dirección de la corriente alterna hasta que los electros magnetos cambian sus polos magnéticos dos veces por cada ciclo de la corriente alterna. La velocidad del motor se sincroniza con la velocidad del campo magnético, el cual depende de la

frecuencia y el número de polos que tenga el motor. Cada tipo de motor tiene sus curvas de rendimiento: velocidad, eficiencia, factor de potencia y amperaje en función del porcentaje de la carga. Por lo que es importante recordar los componentes de la Altura Dinámica Total (TDH).

Los componentes principales del motor se muestran en la Figura 1.8, esta muestra el arreglo básico de un motor BEC. El estator que está conectado a la carcasa del motor, es un cilindro compuesto de un gran número de delgados discos de acero llamadas laminaciones del estator. Esto permite prevenir las corrientes de Foucault en el metal del estator. Dentro de las laminaciones se encuentran la red magnética, la cual se encuentra conectada con la fuente de corriente alterna. A lo largo de esta red, el motor debe tener un sistema de aislado el cual consiste en el aislado individual de cada red, el aislado entre el estator y las bobinas y la protección contra fallas de fase

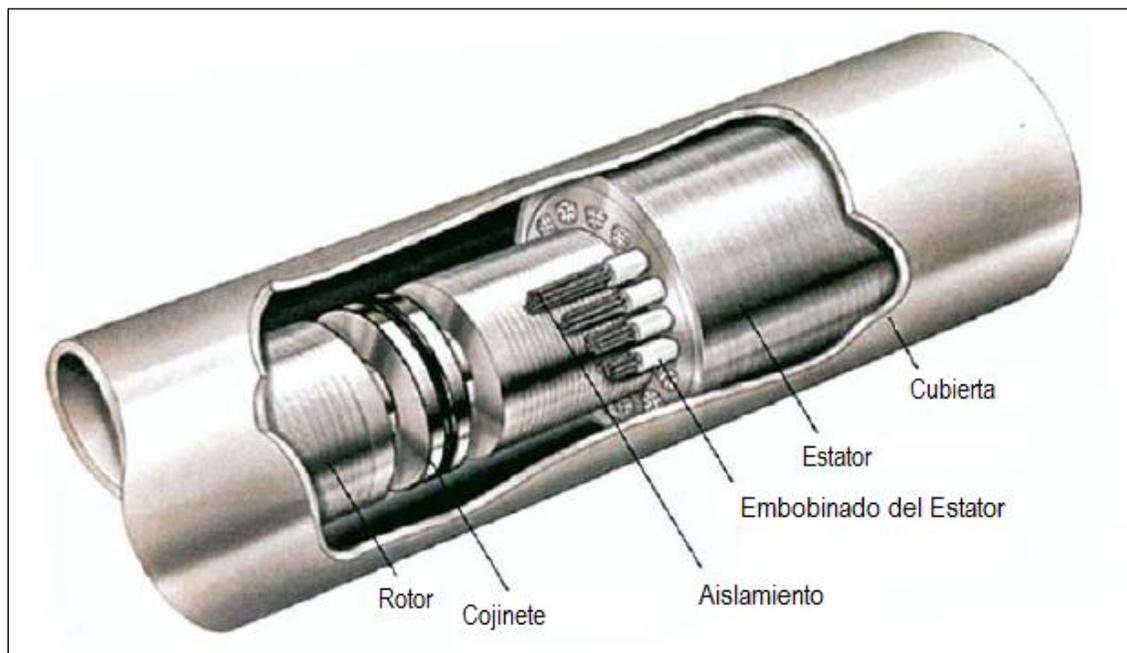


Figura 1.8 – Corte Transversal del Motor (Baker Hughes Centrilift, 2008)

El rotor consiste en laminaciones y se encuentra localizado dentro del estator, separado de este por un espacio anular. Las ranuras de las laminaciones del rotor contienen barras de cobre formando la jaula de ardilla. El campo magnético rotatorio desarrollado en las bobinas del estator induce una corriente en el rotor la cual crea el campo magnético. La interacción entre los dos campos magnéticos gira el rotor y conduce el eje del motor, el cual a su vez, está conectado con los impulsores de la bomba. El eje del motor puede ser de hasta 10 metros, por lo que es crucial eliminar las vibraciones radiales. Por eso es que hay cojinetes localizados de forma radial a lo largo de todo el eje. El motor se encuentra lleno de aceite refinado el cual le da fuerza dieléctrica,

lubricación, y lo enfría. El eje del motor es hueco para permitir que el aceite circule, y cuenta con un filtro para remover las partículas sólidas del aceite.

Los motores eléctricos utilizados en el sistema BEC, son muy diferentes a los motores eléctricos comúnmente usados en superficie, las diferencias más importantes son:

- La relación longitud – diámetro es mucho mayor que en los motores de superficie
- Son enfriados por medio del fluido del pozo y no por el aire
- Están conectados a la fuente de potencia superficial por cables muy largos, en los que ocurren grandes pérdidas de voltaje.

1.2.3.2.1. Combinaciones Tándem

Los motores se proporcionan como, sección única con la cabeza y la base o en tándem los cuales son:

- Tándem superior (con cabeza, sin base)
- Tándem centro (sin cabeza, sin base)
- Tándem bajo (sin cabeza, con base)

Estas combinaciones como se explicará más detalladamente a continuación se usan para alcanzar caballos de fuerza más altos. En la Figura 1.9, se muestran las diferentes secciones.⁴

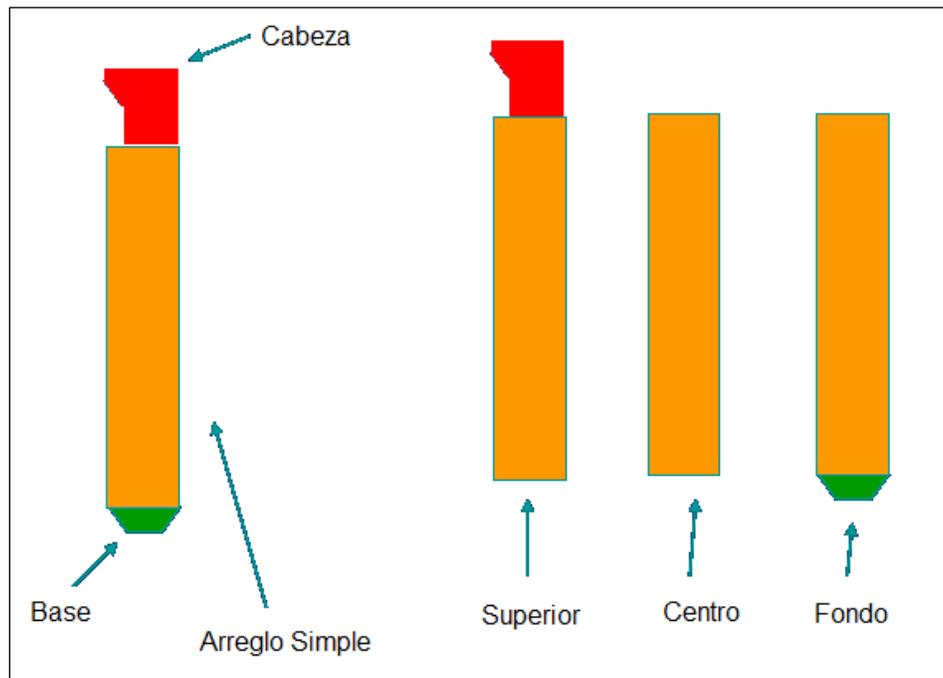


Figura 1.9 – Combinaciones de Motores Tándem (Lucero-Aranda, 2015)

Los requerimientos de amperaje pueden variar desde 12 hasta 130 amperes y se logra mayor potencia, aumentando la longitud de la sección del motor, cuando éste es sencillo, pueden tener aproximadamente 30 pies de largo y desarrollar de 200 a 250 caballos de fuerza, mientras que otros integrados en tándem, alcanzan hasta 100 pies de largo y desarrollan 1000 caballos de potencia. La única forma de aumentar la potencia del motor, es aumentando su longitud. Pero también es posible conectar dos o tres motores en arreglos tándem para poder lograr rangos de potencia más altos, esto se ilustran en las Figura 1.10. Los dos motores se encuentran mecánicamente acoplados, sin embargo trabajan de forma independiente en un sentido eléctrico. La potencia del motor puede alcanzar hasta 2,000 HP, permitiendo una producción de hasta 30,000 BPD.

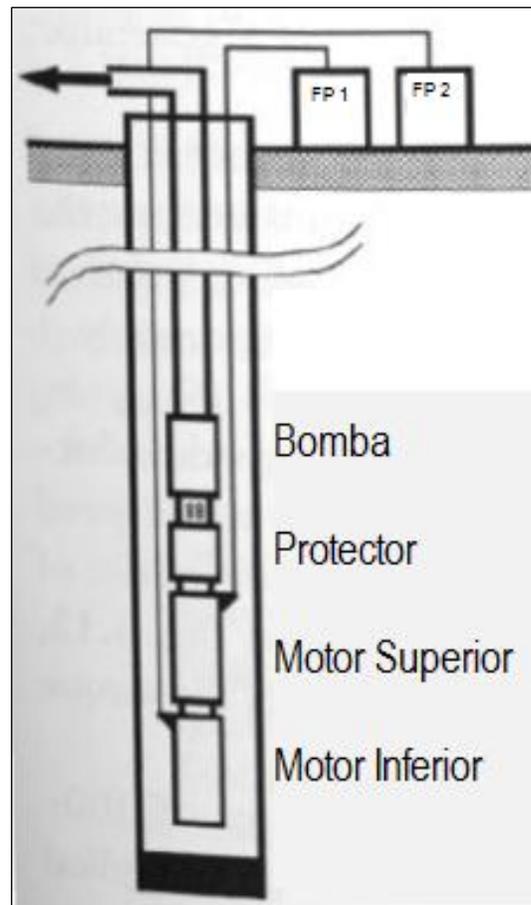


Figura 1.10 – Arreglo de Motor Tándem (Lucero-Aranda, 2015)

La profundidad de colocación del aparejo es un factor determinante en la selección del voltaje del motor debido al incremento de las pérdidas de voltaje en el cable y la reducción de amperaje requerido. En pozos muy profundos, la economía es un factor importante: con un motor de más alto voltaje es posible usar cable más pequeño y más barato. Sin embargo, puede requerirse de control de más alto voltaje y por lo tanto, más caro.

1.2.3.3. Separador de Gas

El separador de gas es un componente opcional del aparejo construido integralmente con la bomba, normalmente se coloca entre ésta y el protector. Sirva como succión o entrada de fluidos a la bomba y desvía el gas libre de la succión hacia el espacio anular. El uso del separador de gas permite una operación de bombeo más eficiente en pozos gasificados, ya que reduce los efectos de disminución de capacidad de carga en el motor producidas por la severa interferencia de gas.

Cuando se permite la entrada del gas libre dentro de la bomba centrífuga, este deteriora el funcionamiento de la misma. Esto es porque hay una gran diferencia entre la densidad relativa del líquido y del gas. La cantidad de energía cinética que pasa al fluido en la bomba centrífuga, depende en gran manera de la densidad del fluido. Ya que el líquido es más denso que el gas, este recibe una mayor cantidad de energía cinética después de la conversión de energía en las etapas de la bomba, incrementando su presión. Sin embargo, para el gas, aunque está sujeto a la misma velocidad rotacional, no puede generar el mismo incremento de presión. Por esto es que las bombas BEC siempre deben ser alimentadas con fluido en una sola fase para asegurar la correcta operación.

Bompear los fluidos del yacimiento con gas libre, puede tener los siguientes efectos en la bomba:

- La altura generada por la bomba disminuye
- La producción fluctúa; puede ocurrir cavitación con gastos mayores causando daño a las etapas de las bombas
- En pozos con RGA (Relaciones Gas – Aceite) muy altas, pueden presentarse candados de gas

1.2.3.3.1. Separador Convencional

En la Figura 1.11 se muestra el separador convencional, donde se aprecia que su operación consiste en invertir el sentido del flujo del líquido, lo que permite que el gas libre continúe su trayectoria ascendente hacia el espacio anular. Su aplicación es recomendable en pozos donde a la profundidad de colocación del aparejo, las cantidades de gas libre no son muy grandes.

Por lo tanto, en pozos con altas RGA, el separador de gas reemplaza las entradas estándares de las bombas y ayuda a mejorar el funcionamiento al separar la porción de gas libre antes de que entre en la primera etapa de la bomba. Esto ayuda a prevenir los candados de gas y mejorar la confiabilidad en el funcionamiento de los sistemas BEC.

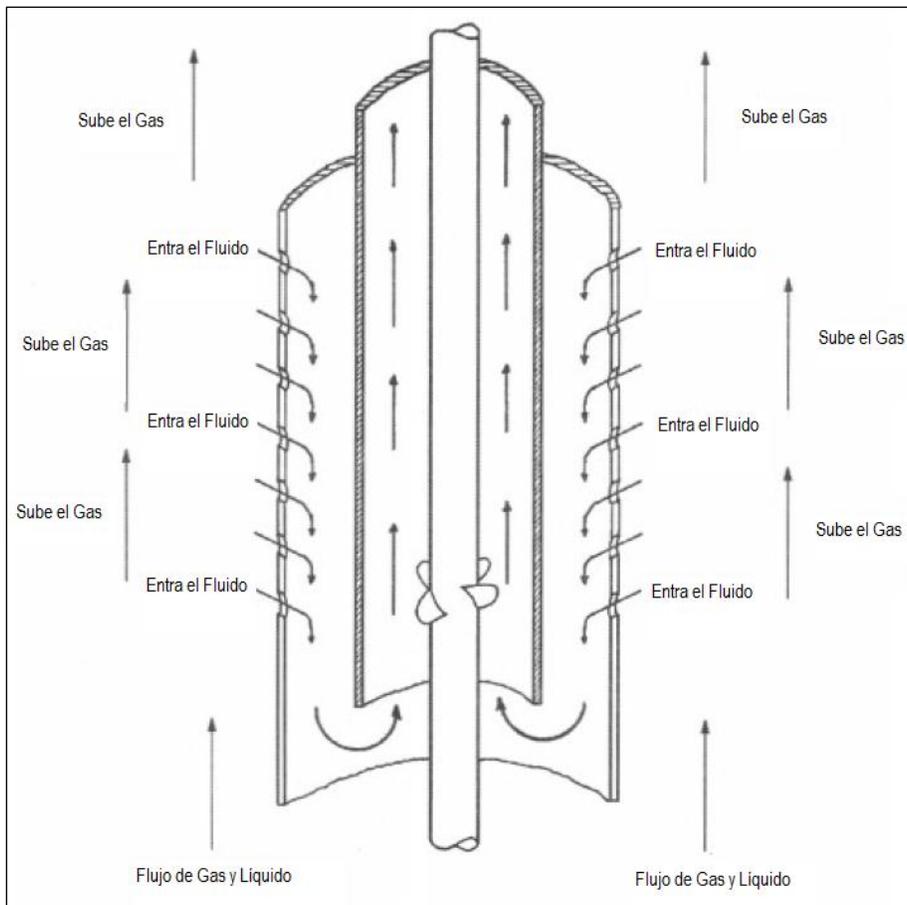


Figura 1.11 – Funcionamiento del Separador de Gas Convencional (Díaz-Zertuche, 2003)

1.2.3.3.2. Separadores Centrífugos

El tipo de separador más común usado en el BEC, son los separadores de gas centrífugos, como se muestra en la Figura 1.12. Funcionan bajo el principio de un fluido multifásico, al girar a alta velocidad se separan las fases en líquido y partículas de gas. La rotación está dada por el eje del separador el cual está accionado por el motor. La separación toma lugar en la cámara de separación. Donde el fluido más pesado es forzado a subir por la pared de la cámara y el más ligero, gas, se acumula a lo largo del eje. Después el gas se manda hacia el espacio anular y el líquido a la entrada de la bomba.

La eficiencia de separación es del 80% o más, sin embargo; esta eficiencia está afectada por el gasto, la viscosidad, y el porcentaje de gas libre. En condiciones extremas, se utilizan arreglos tándem de separadores para mejorar la eficiencia de separación.

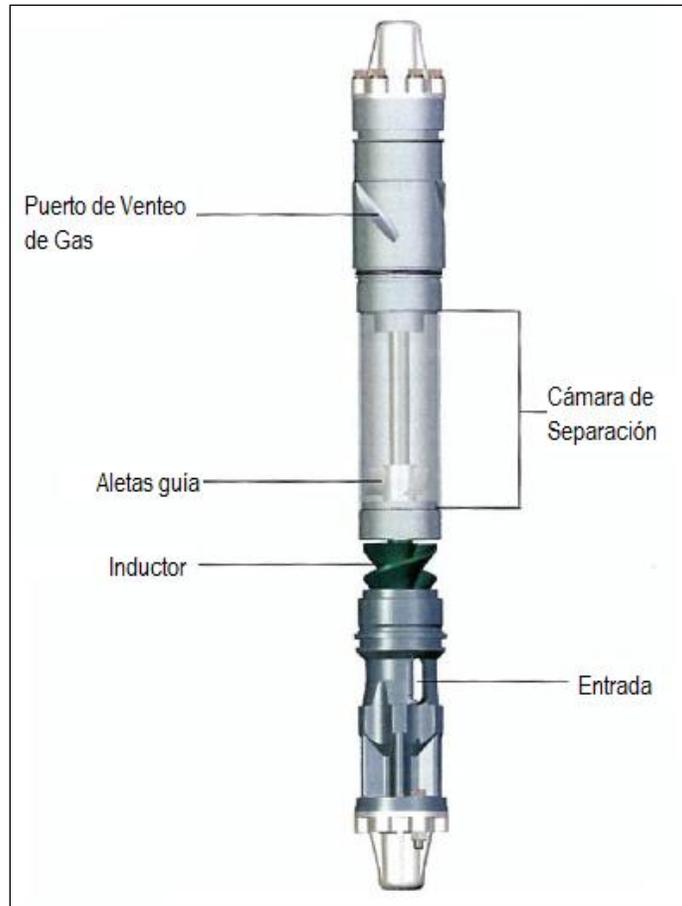


Figura 1.12 – Separador de Gas Centrifugo (Baker Hughes Centrilift, 2008)

1.2.3.3.3. Separador Vortex

Es un separador dinámico, utiliza el efecto de remolino (vortex) que se genera en el fluido al pasar por los puertos de entrada, inductor, propulsor y by-pass de descarga, la separación se lleva a cabo en base a la diferencia de densidades; como resultado de este tipo de efecto, tenemos un mejor rendimiento y durabilidad, sobre todo cuando tenemos fluidos del yacimiento severamente abrasivos, además de que presenta una mejor eficiencia de separación.

1.2.3.3.4. Manejador Avanzado de Gas (AGH) de REDA

El manejador avanzado de gas que el sistema BEC, pueda ser instalado en pozos con alta relación gas-aceite, al separar de mejor forma el gas obtenemos como resultado una mejora en la eficiencia total del sistema, en la Figura 1.13, se muestra una gráfica del incremental de producción con el manejador avanzado de gas de REDA, según pruebas realizadas por la compañía. El manejador avanzado de Gas es una bomba centrífuga de etapas múltiples altamente modificada, lo que hace

es reducir el tamaño de las burbujas de gas, cambiando así su relación con el líquido. Es recomendable para pozos con un porcentaje de gas libre desde el veinte por ciento.

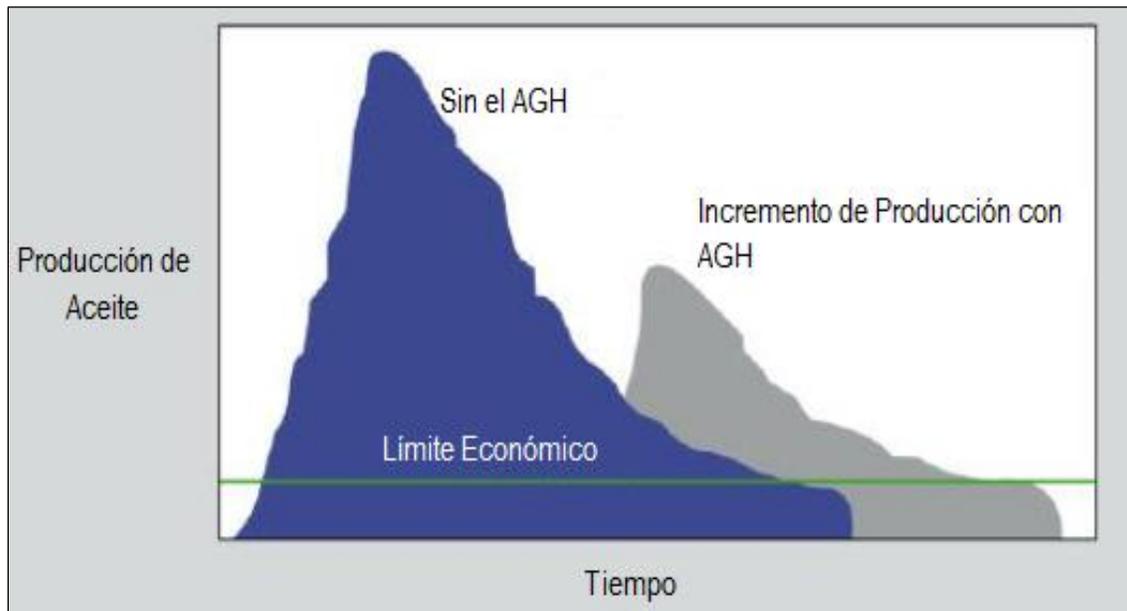


Figura 1.13 – Gráfica de Incremento de Producción con el Manejador Avanzado de Gas de REDA (Lucero-Aranda, 2015)

1.2.3.3.5. Poseidón

Schlumberger desarrolló una tecnología avanzada para el manejo del gas, llamado Poseidon, mostrado en la Figura 1.14. Tiene impulsores con paletas helico-axiales y difusores para permitir el flujo axial. Este método asegura al menos una distribución homogénea de las partículas de gas en el fluido.

Poseidon también puede ser conectado arriba de un separador de gas, cuando se puede liberar el gas en el espacio anular, o puede ser conectado arriba de una entrada estándar si el gas no puede ser liberado y tiene que pasar por la bomba. La unidad puede manejar fluido del yacimiento con un contenido de hasta 75% de gas libre. Y puede manejar rangos de flujo de entre 5,000 BPD hasta 9,000 BPD y necesita una fuente de potencia de 50 HP para operar.

Es necesario mencionar que la total eliminación del gas libre, no es necesariamente la mejor forma de bombear el pozo. Por una parte, el volumen de fluidos que entra a la bomba es menor, pero la presión que la bomba debe entregar en la descarga se incrementa, debido a la menor relación gas-aceite de la columna hidráulica en la tubería de producción.

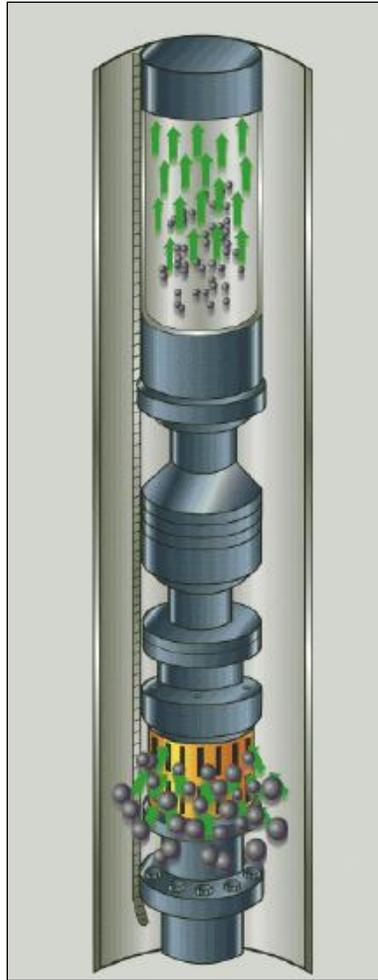


Figura 1.14 – Separador de Gas Poseidón (Schlumberger, 2009)

Entre los efectos que causa la presencia de gas libre en el interior de la bomba, están: el comportamiento de la bomba se aparta del señalado en sus curvas características, reducción de eficiencia, fluctuación de carga en el motor, posible efecto de cavitación, y otros consecuentes.

1.2.3.4. Sección de Sello o Protectores

Este componente también es llamado sección sellante, se localiza entre el motor y la bomba; está diseñado principalmente para igualar la presión del fluido del motor y la presión externa del fluido del pozo a la profundidad de colocación del aparejo. Es una pieza vital en el sistema BEC, si no es seleccionado apropiadamente puede reducir la vida útil del equipo, ya que evita el ingreso del fluido del pozo al motor ya que contaminaría el aceite del mismo.

Los componentes principales de la sección de sello son:

- Sellos mecánicos
- Elastómeros
- Cámara de laberinto
- Cojinetes de empuje

El sello o protector conecta el eje del motor con el eje del separador de gas. Sin embargo, las secciones de sello tienen otras funciones de suma importancia:

- Permite la expansión y contracción del aceite del motor. Las altas temperaturas del yacimiento y el calor generado en el motor mismo provocan la expansión del aceite del motor. Como el sello está directamente conectado con el motor, el aceite que se expande entra en el sello durante la operación normal. Durante el paro, el aceite en el motor se encoge debido a la disminución de la temperatura en el motor y parte de este aceite que previamente se almacenó en el sello, regresa al motor.
- El sello iguala la presión que hay dentro, con la presión en el espacio anular. Esta igualación de presión mantiene el fluido del yacimiento fuera del motor. Los fluidos del yacimiento que entran al motor pueden causar una falla dieléctrica y pérdida de lubricación. El fluido del yacimiento puede viajar hacia la parte de arriba de la sección sello para mantener la presión sin entrar en la unidad. El fluido del yacimiento se encuentra en la cámara superior y no puede viajar hacia las cámaras inferiores.
- Provee la conexión mecánica entre el motor y la bomba, y absorbe el empuje producido por la bomba. Este se complementa con el cojinete, el cual tiene mayor capacidad de vencer la fuerza axial neta que actúa en el eje de la bomba.

Existen dos tipos de protectores: el convencional y el de tres cámaras aislantes. El diseño mecánico y principio de operación de los protectores difiere de un fabricante a otro. La diferencia principal está en la forma como el aceite lubricante del motor es aislado del fluido del pozo.

1.2.3.4.1. Protector Convencional y Protector Tipo “D”

El protector convencional, como se muestra en la Figura 1.15, protege contra la entrada de fluido alrededor de la flecha. El contacto directo entre el fluido del pozo y del motor ha sido considerado el único medio de igualar presiones en el sistema sellado. Se ha determinado que un mejoramiento real del funcionamiento del motor sumergible puede lograrse si el aceite del motor se aísla completamente de los fluidos del pozo evitando cualquier contaminación. Este enfoque llevó al desarrollo de la sección sellante Tipo “D”, en el cual se aísla el aceite del motor del pozo por medio de un líquido inerte bloqueante.

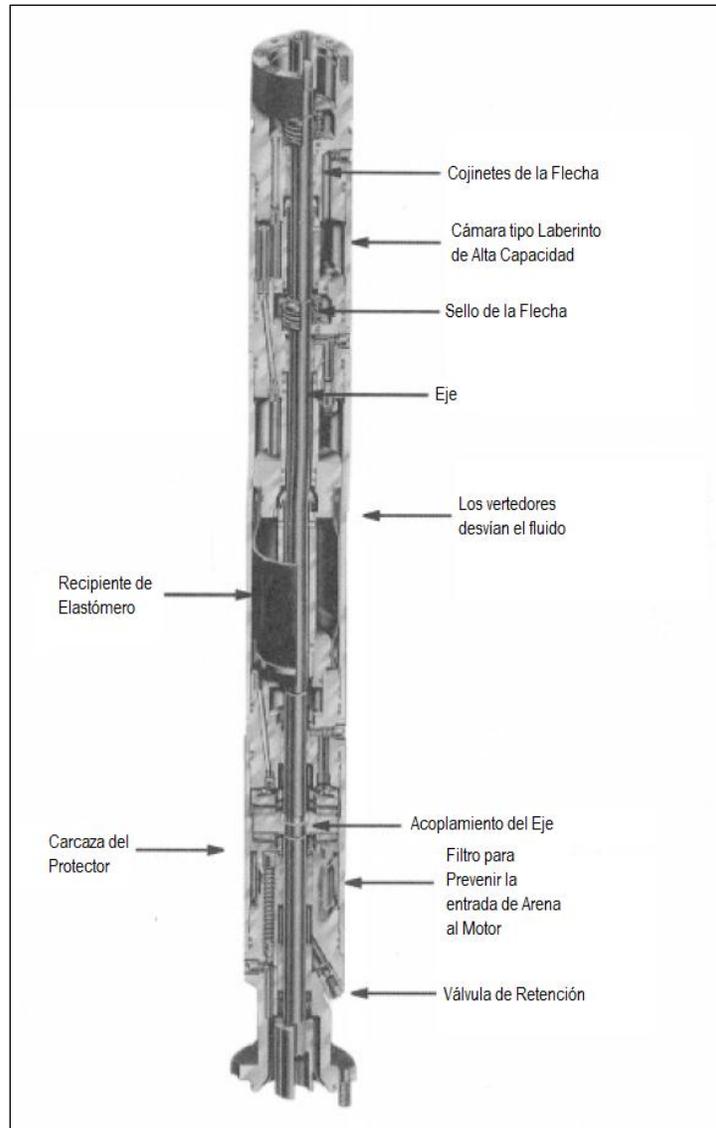


Figura 1.15 – Protector Convencional REDA (Díaz-Zertuche, 2003)

1.2.3.4.2. Protector de Tres Cámaras

Constituye realmente tres sistemas de sellos en uno. Cada cámara consiste de un sello mecánico y de un recipiente de expansión-contracción. Aunque dos de los tres sellos mecánicos fallen por alguna razón, el motor sumergible queda protegido. Este tipo de sección sellante proporciona la mejor protección disponible contra el ácido sulfhídrico u otros contaminantes del pozo. Las características y beneficios de este tipo de protector son:

- Tres sellos mecánicos ampliamente espaciados.
- Una distribución amplia de los sellos que permite una mejor disipación de calor.
- Cada sello mecánico protege su propio recipiente creando tres secciones sellantes en una unidad.

- Un tubo permite que haya flujo de aceite lubricante entre los tres recipientes.
- La barrera elástica en la cámara superior permite la contracción-expansión del aceite del motor cuando la temperatura cambia desde la superficie hasta el fondo y a la de operación.
- La barrera elástica es resistente al ataque químico y a la penetración del gas, por lo que el aceite del motor se protege efectivamente contra contaminantes
- Cada recipiente es lo suficientemente grande para absorber la expansión-contracción volumétrica de los motores más grandes existentes en el mercado.

1.2.3.5. Cable de Potencia

la energía necesaria para impulsar al motor, se lleva desde la superficie por medio de un cable conductor, el cual debe elegirse de manera que satisfaga los requisitos de voltaje y amperaje para el motor en el fondo del pozo, y que además, reúna las propiedades de aislamiento que impone el tipo de fluidos producidos. La correcta selección del cable es un aspecto muy importante para la optimización del sistema BEC, ya que es costoso, por lo general resulta ser lo más caro del sistema y las pérdidas de energía serán mayores entre más empalmes tengamos, por lo que la profundidad del pozo es un factor importante.

El cable de potencia utilizado en el sistema BEC actúa como un enlace crítico entre la superficie y el equipo subsuperficial. El cable es un cable eléctrico trifásico que va hacia el fondo en la tubería de producción.

Los cables del sistema BEC operan en condiciones extremas y deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- Su diámetro puede ser lo suficientemente pequeño para que puedan caber dentro del espacio anular entre la TP y la TR.
- Deben conservar sus propiedades dieléctricas aun cuando se encuentren expuestos a las altas temperaturas de los fluidos del yacimiento y gases.
- Deben estar bien protegidos contra el daño mecánico.

Los cables para el sistema BEC se pueden encontrar en configuraciones tanto redondas como planas, como se ilustra en la Figura 1.16.

La mayoría de los cables están compuestos de los siguientes elementos:

- Tres conductores de cobre que conducen la corriente alterna
- Aislamiento individual en cada conductor que previene de cortos circuitos y fugas de corriente

- Una cubierta que proporciona protección y una estructura fuerte, y evita el contacto del aislamiento de cada conductor con el equipo subsuperficial
- Una protección metálica que mejora la protección mecánica.

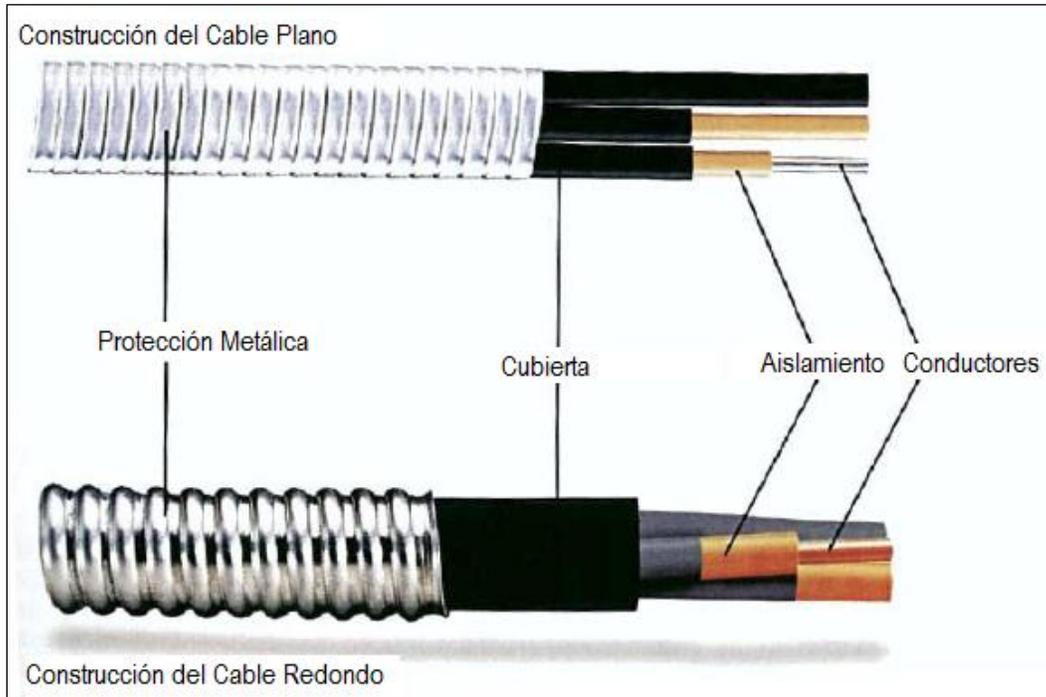


Figura 1.16 – Corte Transversal del Cable de Potencia (Baker Hughes Centrilift, 2008)

Existe en el mercado un rango de tamaños de cable, de configuración tanto plana como redonda, con conductores de cobre o aluminio, de tamaños del 2 al 6. El tamaño queda determinado por el amperaje y el voltaje del motor, así como por el espacio disponible entre las tuberías de producción y revestimiento.

Como se mencionaba anteriormente, considerando la longitud de un conductor para la aplicación de un voltaje dado, los volts por pie disminuyen conforme el alambre es más largo, como consecuencia la velocidad del electrón disminuye, lo que resulta en una reducción de la corriente, en otras palabras, “La resistencia es directamente proporcional a la longitud del conductor”.³

Cuando la sección transversal o el diámetro de un alambre es mayor, tiene un efecto contrario sobre la resistencia, ya que el número de electrones libres por unidad de longitud se incrementa con el área. Bajo esta condición, la corriente se incrementará para una fuerza electromotriz dada, ya que se mueven más electrones por unidad de tiempo, en otras palabras, “La resistencia es inversamente proporcional al área de la sección transversal del conductor”.³

La instalación del cable se realiza fijándolo en la parte externa de la tubería de producción con flejes, colocando de 3 a 4 flejes por cada lingada; en la sección correspondiente a los componentes del aparejo, es recomendable colocar flejes cada metro, debido a que esta sección es de mayor diámetro y puede dañarse durante las operaciones de introducción al pozo, por lo que comúnmente se instalan protecciones adicionales llamadas guarda cable. A lo largo de esta sección la configuración del cable es plana y se le llama extensión de la mufa, la cual constituye el contacto con el motor.

Debido a las condiciones de los pozos, los cables deben ser durables en una amplia gama de condiciones. Se logra un mejor rendimiento y durabilidad del cable al prevenir la descompresión, y el daño mecánico.

1.2.4. Accesorios del Equipo Subsuperficial

Adicionalmente al equipo y sus componentes ya descritos, el sistema BEC requiere de algunos accesorios con el propósito de asegurar una operación adecuada del equipo, los cuales serán descritos a continuación.

1.2.4.1. Extensión de Cable del Motor

Es parte del cable de potencia que va hacia de los componentes subsuperficiales del sistema BEC, hacia las terminales del motor. Esta sección del cable regularmente es plana ya que el espacio entre el espacio anular y el equipo se encuentra muy restringido. La parte superior de esta extensión del cable del motor se empalma con el cable de potencia principal y opera en ambientes muy severos debido a espacio tan restringido, a altas tensiones mecánicas y las temperaturas involucradas. La temperatura máxima se encuentra en la cabeza del motor, por lo tanto, en esta sección es donde el cable se encuentra expuesto a mayor temperatura.

1.2.4.2. Válvula de Contrapresión o Válvula Check

Esta válvula se encuentra dos tramos de tubería por encima de la bomba para mantener la columna de líquido en la tubería de producción durante los paros. La válvula check previene que los fluidos se fuguen a través de la bomba cuando el sistema se encuentra apagado. Ya que si los fluidos viajan a través de la bomba pueden causar severos daños cuando se reinicie el funcionamiento de la bomba. Esto es en esencia, que permite el flujo solo en sentido ascendente, de manera que cuando el motor deja de trabajar, impide el regreso de la columna de fluidos y evita el giro de la flecha de la bomba en sentido contrario.

1.2.4.3. Válvula de Drene

Se encuentra instalada justo encima de la válvula check, y previene que la sarta de tubería mojada se desacople. La válvula de drene contiene un tapón de break-off que después de ser accionado, abre un agujero en la tubería de producción por el cual el líquido puede fluir hacia el fondo del pozo.² Su función es establecer comunicación entre el espacio anular y la tubería de producción, con el propósito de que ésta se vacíe cuando se extrae el aparejo del pozo.

1.2.4.4. Centralizadores

Estos son utilizados para asegurar el enfriamiento adecuado y prevenir el roce del cable de potencia contra la TR al centrar el equipo del sistema BEC dentro del pozo. Los centralizadores son muy útiles sobre todo en los pozos desviados donde es común que el sistema BEC se pegue a uno de los lados de la tubería. También previenen el desgaste exterior del equipo del sistema BEC.

1.2.4.5. Sensor de Fondo de Pozo

Por lo regular es instalado por debajo del motor, y tiene los dispositivos de medición requeridos para poder monitorear de manera continua los parámetros importantes. Los transductores mandan señales a la superficie a través del cable de potencia. Los sensores de fondo modernos, utilizan transductores muy precisos: medidores de cambios de presión y dispositivos térmicos para la temperatura.

1.3. Hidráulica de la Bomba Electrocentrífuga Sumergida

1.3.1. Altura Dinámica Total o Carga Dinámica Total

La carga dinámica total, es simplemente la carga total que la bomba genera cuando está bombeando el gasto deseado. Dicha carga, expresada como longitud de columna hidráulica, es la diferencia entre la presión que la bomba entrega en su salida y la presión existente en la succión. Más específicamente, cuando se bombea un líquido sin gas, la carga dinámica total es la suma de:

$$CDT = [\text{Profundidad de colocación de la bomba}] + [\text{Presión en la cabeza del pozo}] + \dots \\ \dots + [\text{Perdidas de presión de la bomba}] - [\text{Sumergencia}]$$

Es decir, la altura o carga dinámica total se define como la profundidad de colocación de la bomba, más la presión requerida en la cabeza del pozo, más las pérdidas de presión por fricción en la

tubería de producción, menos la sumergencia; todos los términos expresados en unidades de longitud de columna hidráulica. Estos cálculos pueden hacerse utilizando la carga de columna hidráulica como unidad de presión debido a que la densidad del fluido es la misma a través de todo el sistema de bombeo.³

Donde la sumergencia se define como la longitud de columna hidráulica existente en el espacio anular, desde el nivel dinámico del fluido hasta la profundidad de colocación de la bomba. Entonces al hacer referencia al término “elevación neta”, debe entenderse que es la diferencia entre la profundidad de colocación de la bomba y la sumergencia.³

La presión entregada por la bomba es llamada altura, y puede ser medida en metros o bares. Cada etapa de la bomba en el sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido crea cierta cabeza, y esta puede ser multiplicada por el número de etapas para determinar la cabeza total entregada por la bomba. El rango de flujo de cierta bomba puede depender de la rotación de los impulsores, el diseño de las etapas, la presión contra la que está operando la bomba y las propiedades de los fluidos.²

La altura es la suma de tres componentes básicos, los cuales se ilustran el siguiente Figura 1.17:

- a. La distancia neta que el fluido debe ser levantado
- b. La pérdida de fricción en la tubería
- c. La presión de cabezal que la bomba debe vencer⁴

1.3.2. Curvas Características de la Bomba

Las curvas características de la bomba, pueden ser llamadas también curvas de rendimiento, indican la relación entre la cabeza desarrollada por la bomba y la capacidad de la bomba.

Las características que muestra la curva de la bomba son las siguientes:

- Rango de operación.
- Capacidad de carga o altura [pies].
- Eficiencia de la bomba [%].
- Efecto de la bomba, en la presión de fondo de pozo.

Generalmente podemos decir que cuando la capacidad incrementa, la altura disminuye. La bomba puede desarrollar su altura más alta cuando no hay flujo a través de la bomba; lo que significa que es cuando la válvula de descarga se encuentra cerrada. El efecto en la curva de la bomba se grafica basado en la información de las pruebas de rendimiento reales. Este es el efecto real requerido por la bomba, para poder entregar el requerimiento hidráulico necesario.

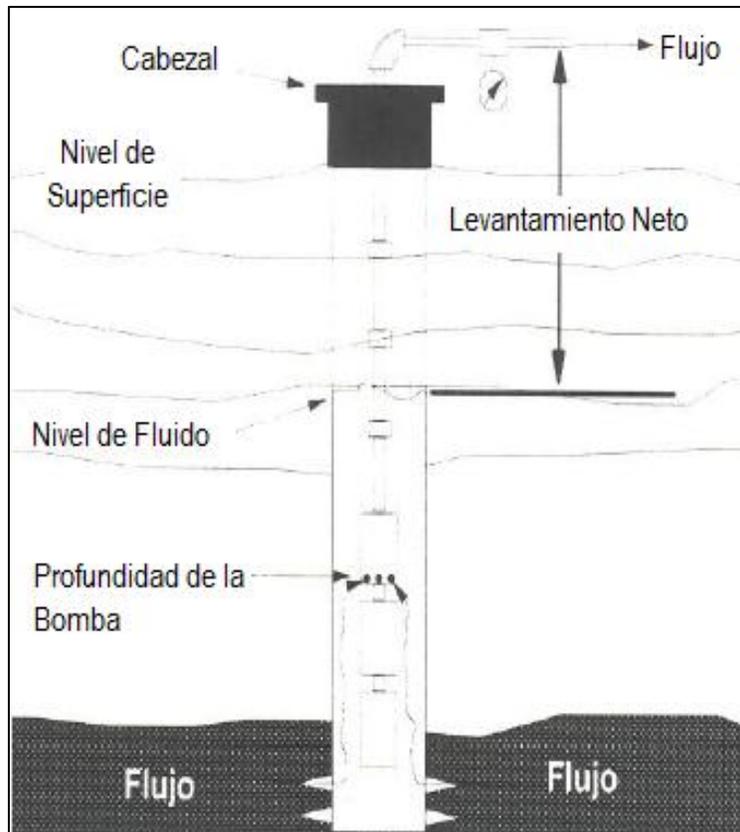


Figura 1.17 – Altura Dinámica Total (Lucero-Aranda, 2015)

Cada curva representa el comportamiento de la bomba a una velocidad particular para alturas de elevación variables, lo que en la práctica se consigue generalmente de la siguiente manera:

- Se cierra la válvula de descarga y se hace funcionar la bomba a su número normal de revoluciones por minuto, ejemplo 3500 rpm, en este caso, el gasto es cero y en la bomba se establece una presión que alcanza aproximadamente unos 5,33 pies para lo cual se requiere una potencia de 40 Hp, todo lo anterior, para 100 etapas
- Se abre progresivamente la válvula de descarga y empieza el flujo; la curva de capacidad de carga, baja progresivamente, las curvas de potencia y eficiencia van aumentando a medida que aumenta el gasto
- Continuando con la apertura de la válvula, se disminuye el valor de la carga y aumentan los valores del gasto, la eficiencia y la potencia. El valor máximo de eficiencia corresponde a los valores de gasto y carga para los cuales se construyó la bomba.

Las gráficas de curvas de comportamiento para cada bomba, las publica el fabricante, como se muestra en la que tomaremos como referencia, la Figura 1.18 en la que se muestra un ejemplo de las curvas que se van construyendo mediante pruebas sucesivas. En esta se aprecia además de las curvas de eficiencia, carga y potencia graficados contra el gasto, se incluye información respecto al

diámetro de tubería de revestimiento en que puede introducirse la bomba, tipo y número de serie de la misma, ciclaje de la corriente para alimentar el motor y número de etapas considerado en la elaboración de la gráfica, que generalmente es 1 ó 100.

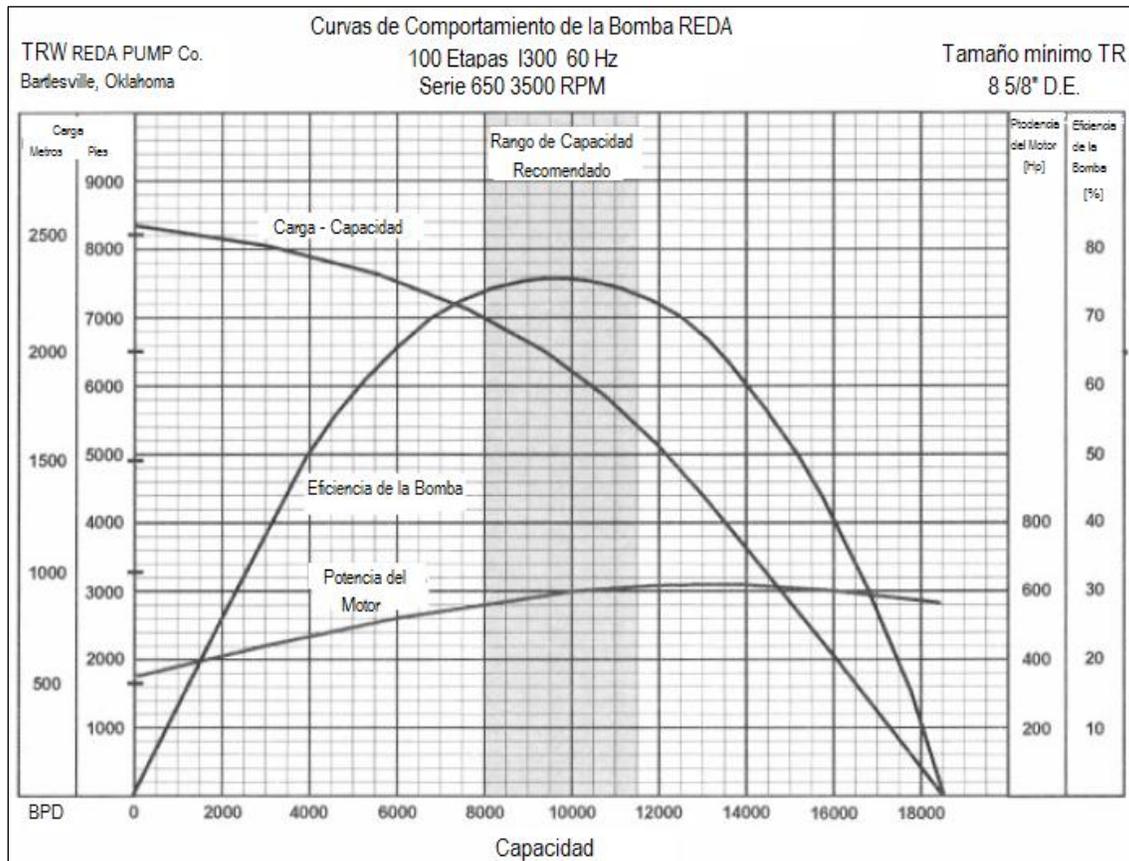


Figura 1.18 – Curvas de Comportamiento de la Bomba REDA (Díaz-Zertuche, 2003)

En cuanto a la forma de utilizar las gráficas de curvas características, se tiene que de acuerdo al ciclaje en Hertz de la corriente disponible, se selecciona un grupo de gráficas verificando que su número de serie o diámetro exterior, sea tal que puedan introducirse en la tubería de revestimiento existente en el pozo; de este grupo se selecciona una que maneje con mayor eficiencia el gasto deseado a las condiciones de profundidad de colocación de la bomba. Una vez seleccionada la gráfica, a partir de dicho gasto, se traza una línea vertical, hasta intersectar con las curvas de potencia, eficiencia y capacidad de carga de tal forma que se hagan las lecturas correspondientes.

Sin embargo, las bombas en realidad se utilizan para bombear líquidos de diferentes densidades y viscosidades, operando a otras velocidades también constantes. En estos casos es necesario tomar en cuenta el efecto de algunos parámetros a fin de predecir el comportamiento de la bomba bajo condiciones reales de operación, como los que se mencionan a continuación:

- Efecto del cambio de velocidad. El gasto varía en proporción directa a los cambios de velocidad de la bomba. La carga producida es proporcional al cuadrado de la velocidad y la potencia es proporcional al cubo de la velocidad. La eficiencia de la bomba permanece constante con los cambios de la velocidad.
- Efecto de la densidad relativa. La carga producida por un impulsor no depende de la densidad relativa. Entonces la curva de capacidad de carga no depende de la densidad relativa. La potencia varía constantemente con la densidad relativa y la eficiencia de la bomba permanece constante independientemente de la densidad relativa.
- Efectos de cambio del diámetro del impulsor. La capacidad o gasto varía directamente con el diámetro de los impulsores; la carga varía directamente proporcional con el cuadrado del diámetro y la potencia con el cubo del diámetro. La eficiencia de la bomba no cambia.

1.3.3. Empuje de la Bomba

El empuje de la bomba es una descripción de las fuerzas que actúan en los componentes de la bomba cuando los fluidos se encuentran fluyendo a través de esta. El empuje de la bomba consiste de dos componentes; el empuje del eje y el empuje hidráulico.

1.3.3.1. Empuje Hidráulico

El empuje hidráulico total consiste de dos componentes; un componente es el empuje hacia arriba y el otro componente es el empuje hacia abajo. El empuje hacia arriba es creado por la velocidad del fluido conforme este pasa a través del impulsor.

1.3.4. Leyes de Afinidad de las Bombas

Considerando el efecto del cambio de diámetro del impulsor y el efecto del cambio de velocidad como los más importantes o trascendentes, se tienen las siguientes relaciones.

Con diámetro de impulsor constante:

$$\begin{array}{ll} Q_1 = D_1 & Q_2 = D_2 \\ H_1 = (D_1)^2 & H_2 = (D_2)^2 \\ Hp_1 = (D_1)^3 & Hp_2 = (D_2)^3 \end{array}$$

Dónde:

Q_1, H_1, Hp_1, D_1 , son: Gasto, Carga, Potencia y Diámetro a la frecuencia en la cual opera, que es normalmente a 60 Hz.

Con velocidad constante:

$$\begin{array}{ll} Q_1 = N_1 & Q_2 = N_2 \\ H_1 = (N_1)^2 & H_2 = (N_2)^2 \\ Hp_1 = (N_1)^3 & Hp_2 = (N_2)^3 \end{array}$$

Dónde:

Q_2, H_2, Hp_2, N_2 , son: Gasto, Carga, Potencia y Velocidad, que se busca a la nueva frecuencia.

Estas relaciones pueden manipularse fácilmente mediante cualquier artificio matemático, generando las llamadas leyes de afinidad de las bombas. Estas relaciones son utilizadas para configurar el comportamiento de cualquier bomba de una velocidad determinada a otra, y se utilizan para condiciones de flujo similares.

1.3.5. Ventana de Operación

Como se mencionó anteriormente, el rango de operación recomendado por los fabricantes, para la marcha eficiente de la bomba corresponde a 75% y 125% del punto de máxima eficiencia. La intersección de dicho rango con la curva de capacidad genera dos puntos. En una gráfica en la que se representen las diferentes curvas de capacidad de carga (para una misma bomba a diferentes frecuencias) contra gasto, se marcan los puntos de intersección obtenidos a su respectiva velocidad y gasto. La zona comprendida entre las líneas generadas por dicho puntos, es llamada rango de eficiencia general o ventana de operación, que representa la zona en la cual debe operar la bomba cuando se realicen cambios de velocidad y la que indica el comportamiento de la bomba cuando se realicen cambios de velocidad y la que indica el comportamiento de la bomba a su más alta eficiencia. Cuando la bomba opera fuera de este rango, se producen empujes axiales sobre la flecha de la bomba, que a su vez generan desgaste y calor excesivo sobre las chumaceras. Los empujes pueden ser ascendentes o descendentes dependiendo de que la bomba trabaje por arriba o debajo del rango recomendado, respectivamente.

El uso de las leyes de afinidad se debe a que en el diseño de un aparejo de bombeo electrocentrífugo se puede utilizar un controlador de velocidad variable, el cual tiene la capacidad de cambiar la frecuencia suministrada al motor, lo cual influye directamente en la velocidad periférica de los impulsores.

1.4. Diseños Especiales de Sistemas BEC

Las aplicaciones principales incluyen operaciones en tierra y marinas en pozos que requieren un rango de flujo alto o altura, bombear agua, aceite o una mezcla. Los rangos de producción por lo

regular se encuentran entre 2,000 y 20,000 BPD, en gran medida decreciente con la profundidad, la cual tiene rangos desde 300 hasta 3,000 metros.

1.4.1. Bombeo Electrocentrífugo Sumergido – Bombeo Neumático

La combinación del bombeo neumático con una instalación de bombeo electrocentrífugo sumergido, ha sido un concepto utilizado desde casi el inicio del sistema BEC. Por lo que desde entonces, ha habido muchos avances en el diseño de equipo BEC – BN, incluyendo correlaciones de flujo multifásico para predecir los gradientes de presión.

El sistema híbrido de bombeo electrocentrífugo sumergido y bombeo neumático, ofrece numerosas posibilidades para optimizar la producción y asegurarla en los pozos petroleros. El bombeo neumático en esta instalación híbrida, provee un sistema artificial de respaldo en caso de una falla en el sistema BEC. El BN puede ser usado para descargar y estabilizar un pozo productor de aceite con gas o con producción de arena.

Otra aplicación del sistema BEC – BN, es la operación simultánea de ambos métodos de producción. Puede ser instalado un sistema BEC para prolongar la vida operacional de una instalación de bombeo neumático. El sistema BEC funciona como un refuerzo de la presión de fondo del pozo, con el fin de incrementar la presión fluyente a la profundidad del gas de inyección.

Desde el punto de vista en diseño del bombeo neumático, el sistema BEC desarrolla altas presiones de fondo fluyendo para un gasto de producción dado. La combinación simultánea de BN con el BEC permite disminuir el dimensionamiento del sistema BEC y por lo tanto, los requerimientos de potencia. El ahorro asociado con el manejo de bombas pequeñas permite diseñar bombas especiales en su construcción para el manejo de abrasivos y de gas. Para elevar más la flexibilidad del sistema BEC – BN, se considera adicionalmente un controlador de velocidad variable, VSD, ya que la potencia requerida es menor con bombas y motores más pequeños.

Los beneficios que se pueden obtener con este tipo de sistema, es la reducción de requerimientos en el dimensionamiento de bomba y motor, reduce los requerimientos de conducción eléctrica, reduce las presiones de descarga de la bomba y en general, el BN es instalado por encima del sistema BEC con la finalidad de mejorar la capacidad de diseño del mismo y reduciendo la carga debida a la columna del líquido en el interior del pozo.

1.4.2. Sistema BEC con Camisa

El motor sumergido, por lo general se encuentra arriba de los disparos, por lo que los fluidos del yacimiento al pasar enfrían en motor. Conforme va disminuyendo la presión del yacimiento, el sistema BEC puede ser puesto debajo de los disparos. Se utiliza una cubierta o camisa para el motor para dirigir los fluidos del yacimiento pasando por fuera del motor, como se muestra en la Figura 1.19.

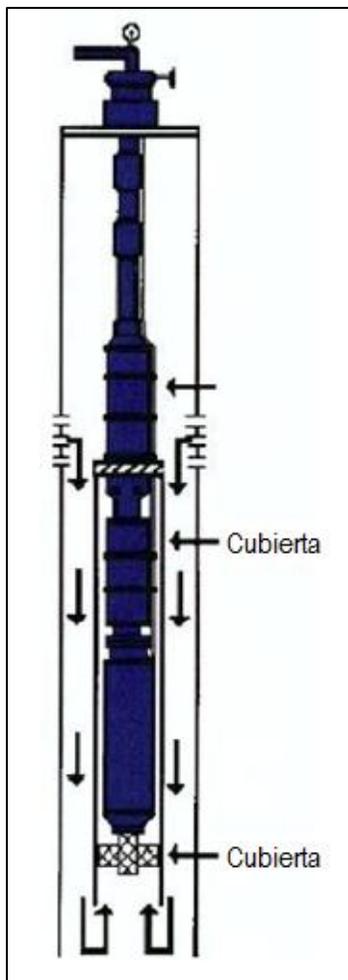


Figura 1.19 – Configuración de Sistema BEC con Camisa (Baker Hughes Centrilift, 2008)

Las cubiertas protegen la entrada de la bomba, la sección de sellado y el motor, como se muestra en la Figura 1.19, los fluidos del yacimiento son dirigidos desde los disparos por fuera de la cubierta. Y después son guiados hacia la entrada de la bomba a través del espacio anular entre el diámetro interior y el diámetro exterior.

El motor con camisa también puede ser utilizado para propósitos de separación de gas, cuando se sitúa por encima de la zona disparada. El proceso de separación utiliza el proceso natural de flotabilidad de los fluidos para separarlos. De acuerdo con la compañía Baker Hughes la producción de muchos pozos de gas ha aumentado significativamente por medio de la implementación de sistemas BEC recubiertos, con configuraciones en las que se logra bombear el nivel de agua.⁵

1.4.3. Drene Gravitacional Asistido con Vapor (SAGD) – Sistema BEC

El SAGD, por sus siglas en inglés Steam Assisted Gravity Drainage, es un proceso de recuperación térmico el cual es utilizado principalmente para producir bitumen. La producción efectiva de bitumen requiere técnicas de recuperación térmica especializadas. Los sistemas BEC han probado su efectividad en esta tarea junto con el SAGD, el cual incluye la perforación de dos pozos horizontales a algunos metros de distancia el uno del otro, como se ilustra en la Figura 1.20. El pozo de arriba es en el que se inyecta el vapor, el cual se encarga de calentar el bitumen y reduce su viscosidad. Los fluidos del yacimiento comienzan a fluir hacia abajo dentro del pozo productor y son bombeados hacia la superficie por medio del sistema BEC. El fluido del yacimiento puede encontrarse a más de 200°C por lo que se presenta un nuevo desafío, el enfriamiento del motor BEC.⁷

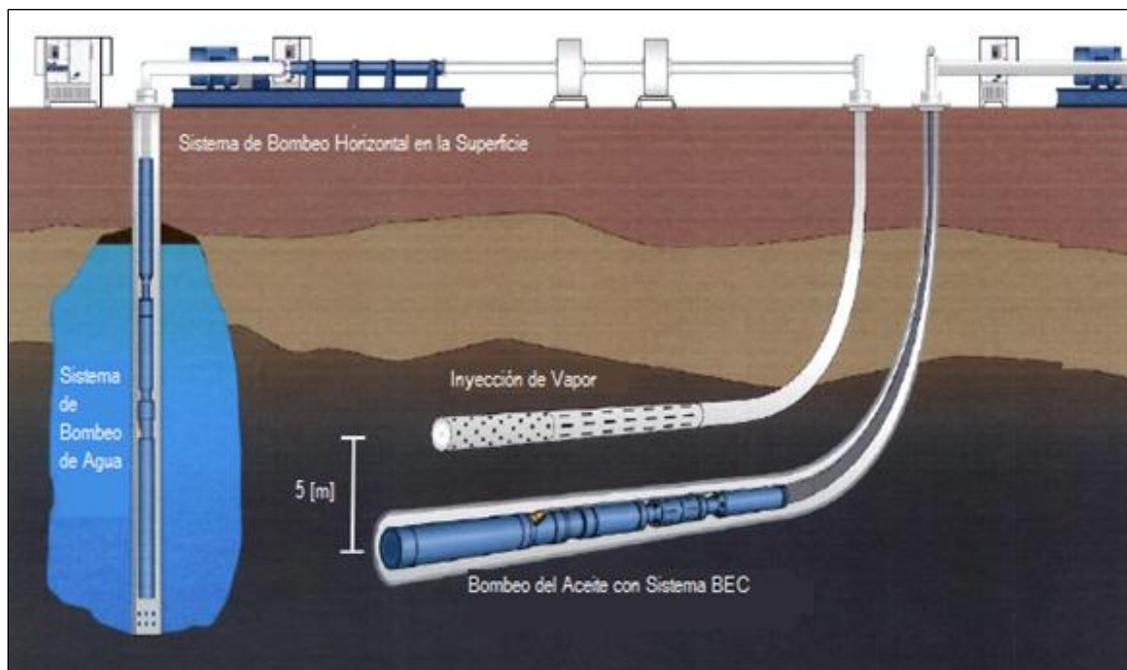


Figura 1.20 – Producción por Medio de SAGD y Sistema BEC (Baker Hughes Centrilift, 2008)

1.4.4. Sistema BEC con Empacador

En algunos países se requiere instalar empacadores en las instalaciones de Sistemas BEC debido a políticas de las regulaciones. El empacador actúa como una barrera entre el pozo y la superficie. Ver la Figura 1.21. El empacador también aísla la tubería de revestimiento por encima del mismo, de los daños de los fluidos del yacimiento, y protege al cable contra daños que podría causar el gas a alta presión. El empacador puede ser equipado de una alimentación de energía eléctrica para una mejor conexión del cable.

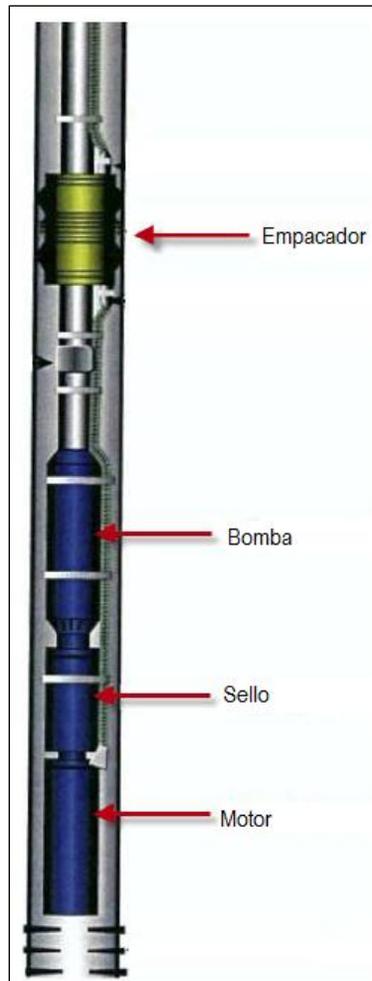


Figura 1.21 – Configuración del Sistema BEC con Empacador (Baker Hughes Centrilift, 2008)

1.4.5. Sistema BEC con Herramienta “Y”

La herramienta “Y” es una herramienta de producción en forma de una Y invertida, como se muestra en la Figura 1.22 montada en el fondo de la tubería de producción. Un lado de la herramienta Y está en línea con la TP y el otro lado contiene el equipo del sistema BEC. Esta sección provee acceso al pozo a través del BEC y se pueden lograr las siguientes funciones:

- Monitoreo fijo o con tubería flexible
- Tratamiento a la formación
- Terminación del pozo
- Toma de registros

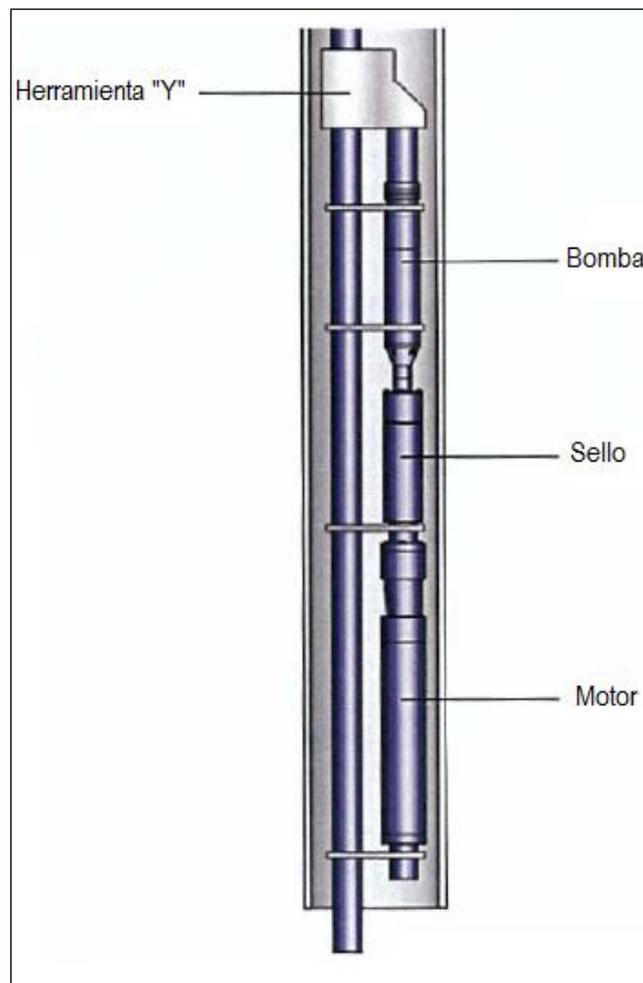


Figura 1.22 – Configuración del Sistema BEC con Herramienta “Y” (Baker Hughes Centrilift, 2008)

1.4.6. Sistema BEC Dual

La configuración de BEC dual consiste en dos bombas idénticas. La Figura 1.23 ilustra un sistema BEC dual con dos herramientas "Y", una bomba se encuentra en funcionamiento mientras la otra se encuentra en espera. Si una bomba falla la otra puede ser iniciada para continuar con la producción, dando como resultado un tiempo de inactividad mínimo. Los dos sistemas BEC son completamente independientes y cada uno cuenta con todos los componentes del sistema.⁸ Una configuración dual incrementa la disponibilidad del sistema. Los sistemas duales pueden ser benéficos si el tiempo de vida de la bomba es corto, esto es debido a que los costos de las operaciones de mantenimiento para este sistema son muy altos. Además de que se puede aprovechar el tiempo en espera del equipo de mantenimiento, mientras, el pozo sigue produciendo.⁹

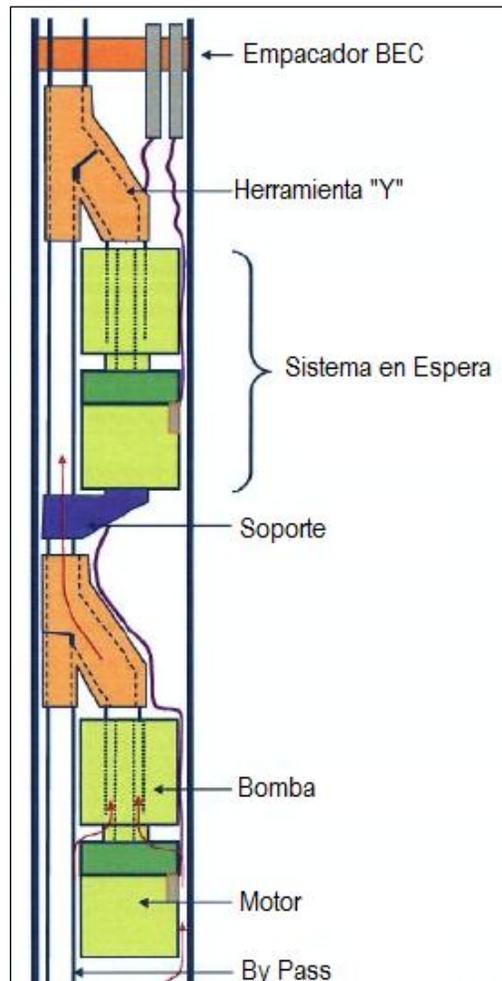


Figura 1.23 – Configuración del Sistema BEC Dual con Herramienta "Y" (Carlsen, 2009)

1.4.7. Bomba de Potencia

El sistema BEC también puede ser utilizado como bombas de potencia, cuando tenemos el caso de que la trayectoria hacia la superficie sea muy larga para llevar los fluidos desde el fondo del mar hacia la superficie. La Figura 1.24, muestra una bomba BEC instalada justo debajo del lecho marino, donde los fluidos entran en la parte superior y viajan hacia el la parte baja del sistema BEC. Esto se hace con el objetivo de que los fluidos enfríen el motor BEC antes de entrar en la bomba.

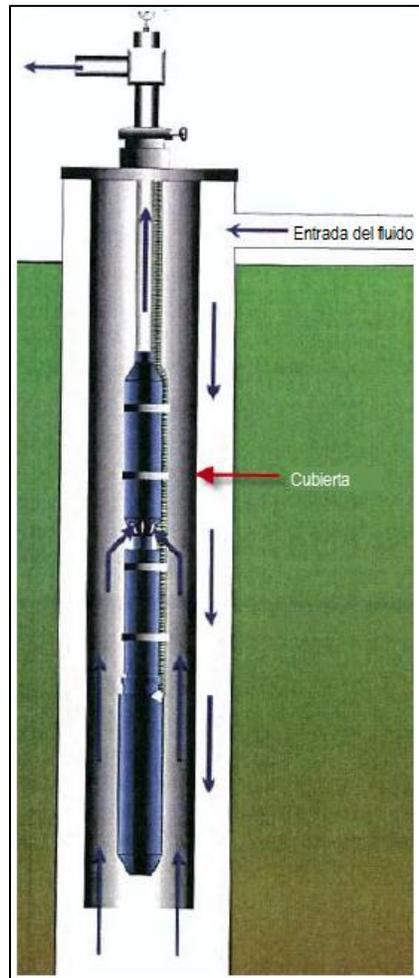


Figura 1.24 – Configuración del Sistema BEC con Bomba de Potencia (Baker Hughes Centrilift, 2008)

Si se requiere más de una bomba de potencia, estas pueden conectarse en serie o en paralelo. Si se conectan en serie la descarga de una bomba se conecta con la entrada de la siguiente. La presión aumenta de bomba a bomba sin embargo el gasto sigue siendo el mismo. Si se encuentran conectadas en paralelo, la descarga de todas las bombas llega con la misma presión y se encuentran conectados a un manifold.

Sin embargo; en este caso, si es posible lograr gastos mayores. Las bombas de potencia por lo regular son usadas para añadir presión a lo largo tuberías para bombear fluidos a las instalaciones de almacenamiento o procesamiento, también pueden ser utilizadas en proyectos de inyección de agua para aumentar la presión de los sistemas de inyección de agua.⁵

Capítulo II: Medidas de Evaluación de la Confiabilidad de los Sistemas Artificiales de Producción

2.1. Introducción

Cualquier operación de mantenimiento o reemplazo en los pozos implica gastos en los activos además de pérdida de ingresos por producción diferida por lo que los operadores siempre van a buscar la forma de evitar o disminuir al mínimo posible las mismas.

El rendimiento del tiempo de vida de los sistemas artificiales de producción afecta directamente en la frecuencia de las operaciones de mantenimiento, sus costos y la pérdida de producción. El tiempo de vida de un SAP, por sus siglas Sistemas Artificiales de Producción, es un indicador clave del rendimiento del mismo, ya que se encuentra afectado por los efectos de los cambios en las condiciones de operación, la selección del equipo y las prácticas de operación además de que económicamente hablando es tomado en cuenta tanto por vendedores como para los operadores para poder concretar muchos contratos.

Para poder lograr una reducción en los costos de las operaciones de mantenimiento se debe lograr una mejor confiabilidad en los sistemas artificiales de producción. Con el objetivo de entender si las acciones tomadas para mejorar la confiabilidad de los sistemas son efectivas, se debe monitorear el tiempo de vida de los mismos. Sin embargo, evaluar el rendimiento de la vida útil de los sistemas artificiales de producción no es tan simple como podría parecer, ya que hay muchas medidas que se usan en la industria y las tendencias por lo regular son engañosas; por lo que esas son algunas de las cuestiones que deben ser entendidas para que de esta forma se eviten dificultades, y se pueda llevar a cabo la selección de las medidas de tiempo de vida del SAP adecuadas.¹

Por lo que en este capítulo se presentaran las medidas de tiempo de vida comúnmente usadas para los sistemas artificiales de producción y se presentarán unos ejemplos para poder obtener algunas conclusiones sobre su confiabilidad para algunas aplicaciones. Sin embargo; existen grandes brechas en el conocimiento relacionado con la aplicabilidad y limitaciones de las medidas de estimación de la confiabilidad de los sistemas artificiales de producción.

Los operadores saben que al mejorar la confiabilidad de los sistemas artificiales de producción el resultado será la reducción de los costos de las operaciones de mantenimiento y producción diferida (Brookbank 1996). Confiabilidad es la probabilidad de que un elemento o sistema cumpla con su función bajo condiciones dadas por un periodo de tiempo deseado (Moltoft, 1987).

Para un mejor entendimiento, en este capítulo nos referiremos al tiempo de vida como el tiempo del sistema desde que es instalado en el pozo hasta que falla, y como tiempo de vida útil, al tiempo del sistema en funcionamiento dentro del pozo.

2.2. Componentes de Medición del Tiempo de Vida

Las medidas de tiempo de vida para un grupo de pozos se calculan basándose en un número de instalaciones de sistemas artificiales de producción, recuento de instalaciones, y su tiempo total en exposición. Al usar diferentes tiempos de exposición, el resultado para el tiempo de vida de los sistemas para el mismo grupo de pozos, es muy diferente.

2.2.1. Recuento de Instalaciones

El recuento de las instalaciones, es el número de instalaciones de sistemas artificiales de producción que han sido consideradas en el cálculo de la medida del tiempo de vida. Los siguientes términos, son los términos comúnmente utilizados para el recuento de las instalaciones:

- Todos los Sistemas. Es el total de todos los SAP, incluyendo aquellos que han sido desinstalados y los que siguen en operación.
- Sistemas en Operación. Es el número de SAP en operación.
- Sistemas Desinstalados. Es el número de SAP que han sido desinstalados del pozo (ya sea que la causa de falla sea el sistema u otra).
- Sistemas que han Fallado. Es el número de SAP que han fallado.

Este recuento de instalaciones incluye los sistemas artificiales de producción instalados, que han sido desinstalados y que han fallado a la fecha, o todos los sistemas en operación, desinstalados y que han fallado durante un periodo de tiempo definido. Para cada grupo de SAP, este recuento de instalaciones es diferente. Por esa razón, es importante utilizar la definición de recuento de instalaciones para comparar el funcionamiento del tiempo de vida entre varios grupos de SAP.¹

La identificación de fallas consistente también es importante cuando se hace la comparación del funcionamiento durante el tiempo de vida entre diferentes grupos de SAP, como se tratará con mayor detalle en el Capítulo IV de esta tesis, para los sistemas BEC en específico, esto cuando se usan medidas de tiempo de vida que se calcularon utilizando el número de “Sistemas que han fallado” (Alhanati, 2001). Una parte importante para la consistencia, es asegurar los límites del sistema al igual que las condiciones de cada sistema sean las mismas en cada caso, por ejemplo, considerar los mismos componentes en la terminación del pozo.

Algunas referencias que serán utilizadas en este capítulo, incluyen normas y estándares en el caso de esta tesis, nos basaremos en la base de datos ESP-RIFTS, por sus siglas en inglés ESP, Electric Submersible Pump; RIFTS, Reliability Information and Failure Tracking System. La cual se presenta de manera detallada en el Capítulo III de la misma, esta base de datos, estuvo a cargo de C-FER Technologies, parte de la cual fueron incorporadas a los Estándares ISO, por sus siglas en inglés International Organization for Standardization, (ISO 15136 -1, ISO 15551-1).¹ La base de datos ESP RIFTS, sin embargo, a su vez está referenciada a la ISO 14221, la cual, de la misma forma, será presentada en el Capítulo III. Para explicar de mejor forma cómo podría presentarse la situación, se recomienda consultar los ejemplos 1 y 2 del Apéndice 2.1, que se encuentra al final de la tesis.

2.2.2. Tiempo en Exposición

El tiempo en exposición es el tiempo que el sistema se encuentra expuesto en el ambiente operativo. Todos estos tiempos pueden ser calculados basándose en los diferentes tiempos en exposición del sistema ² y los siguientes son los tiempos en exposición utilizados más comúnmente:

- Tiempo de Calendario o tiempo desde que el sistema es instalado hasta que se instala el siguiente sistema.
- Tiempo en el Pozo o tiempo desde que el sistema es instalado hasta que es desinstalado.
- Duración o tiempo desde que el sistema es puesto en marcha por primera vez hasta que falla o es parado por última vez.
- Tiempo de Vida Real o tiempo en el que el sistema se encuentra operando.

Estos tiempos se encuentran ordenados por magnitud del mayor al menor. Hay muchas situaciones en las que son muy parecidos, por ejemplo, cuando los sistemas se encuentran en operación continua y son reemplazados inmediatamente. Sin embargo, en general, los tiempos en exposición son diferentes. Por esta razón, usar una definición consistente de tiempo en exposición es importante para comparar el rendimiento del tiempo de vida entre diferentes grupos de sistemas. En los ejemplos 3, 4 y 5 del Apéndice 2.1, se muestra la forma en la que podrían representar un problema.

Para los operadores que se encuentran interesados en utilizar las medidas de tiempo de vida para evaluar la confiabilidad del equipo subsuperficial, es mejor utilizar los tiempos en exposición, “Tiempo de Vida Real” o “Duración” (si es que hubo tiempo de inactividad entre que el sistema fue puesto en operación por primera vez hasta que se detuvo). Una excepción en este caso es cuando el sistema es instalado en el pozo mucho antes de que sea puesto en operación, y el operador desea considerar el efecto de este tiempo en el que el sistema se encuentra sin operar dentro del pozo en el tiempo de falla esperado. Para los operadores interesados en calcular las medidas de

tiempo de vida para evaluar la frecuencia de las operaciones de mantenimiento, es mejor utilizar el “Tiempo en el Pozo” o “Tiempo de Calendario”. Ya que estos tiempos incluyen el tiempo no operando del sistema, tales como el tiempo en espera del equipo para llevar a cabo la operación de mantenimiento. Y este tiempo no tiene relación con la confiabilidad del sistema, sin embargo, sí afecta la frecuencia de las operaciones de mantenimiento.¹

2.3. Medidas Comunes de Tiempo de Vida

Las siguientes son las medidas de tiempo de vida más comúnmente utilizadas en la industria petrolera, la Figura 2.1 muestra los tiempos de vida para varias instalaciones en un grupo de cinco pozos en un periodo de doce meses para ayudar a ilustrar cómo es que se calcula cada medida.

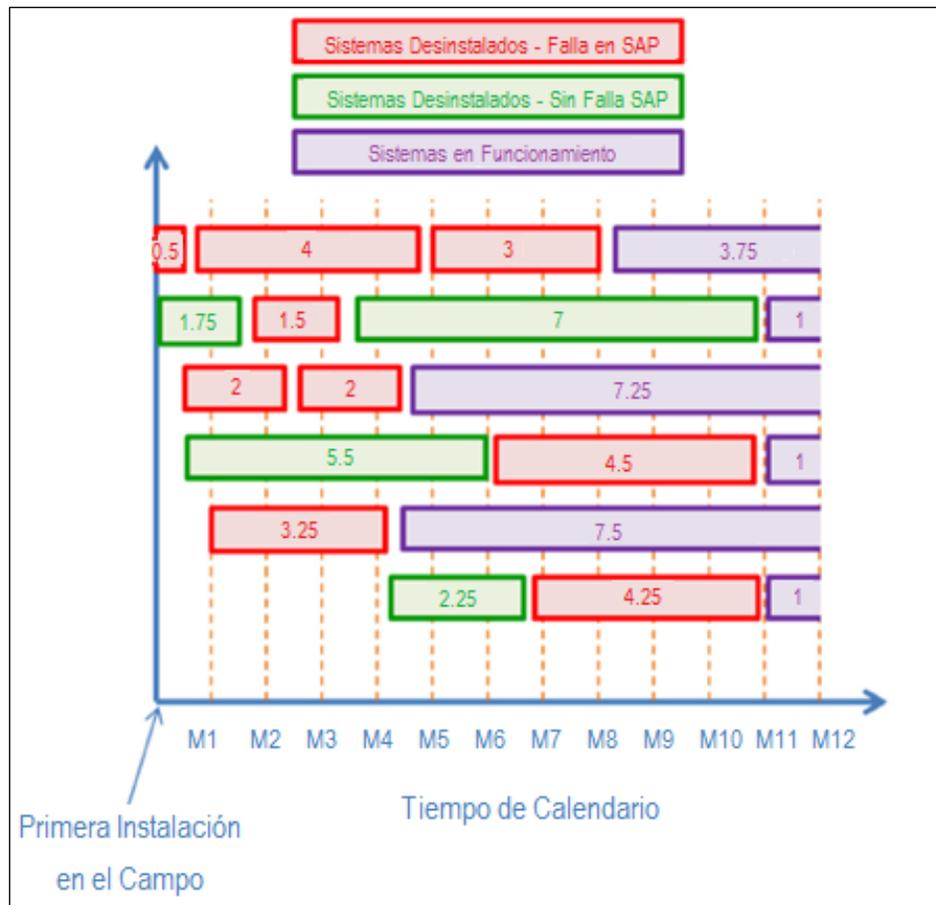


Figura 2.1 – Ejemplo de Tiempos de Vida Para Cinco Pozos en Doce Meses (Alhanati, 2008)

Para estos 5 pozos, hay 19 sistemas artificiales de producción instalados, de los cuales 13 fueron desinstalados, y 6 continuaron en funcionamiento al final del periodo. De los 13 sistemas que fueron desinstalados, sólo 9 se asociaron a la falla del SAP; de los otros 4 no se conocen las causas.

Adicionalmente se presenta una discusión acerca de cuál es la medida apropiada para el tipo de evaluación que se desea hacer.

2.3.1. Tiempo Promedio de Vida de Todos los Sistemas

Esta medida se calcula con el tiempo total de exposición de todos los sistemas dividido entre el número total de sistemas. Para el grupo de pozos del ejemplo de la Figura 2.1 tenemos:

$$\frac{63 \text{ meses}}{19 \text{ sistemas}} = 3.3 \text{ meses} \dots\dots\dots (1)$$

2.3.2. Tiempo Promedio de Vida de los Sistemas en Operación

Esta medida de tiempo de vida se calcula con el total de tiempo en exposición de los sistemas en operación, dividido entre el total de los sistemas. Para el grupo de pozos de la Figura 2.1:

$$\frac{21.5 \text{ meses}}{6 \text{ sistemas}} = 3.6 \text{ meses} \dots\dots\dots (2)$$

2.3.3. Tiempo Promedio de Vida de los Sistemas que Fueron Desinstalados

Se calcula con el tiempo total en exposición de los sistemas que fueron desinstalados, dividido entre el número de los sistemas que fueron desinstalados. Para el ejemplo:

$$\frac{41.5 \text{ meses}}{13 \text{ sistemas}} = 3.2 \text{ meses} \dots\dots\dots (3)$$

2.3.4. Tiempo Promedio de Vida de los Sistemas que Fallaron

Se calcula con el tiempo total en exposición de los sistemas que fallaron, dividido entre el número de los sistemas que fallaron. Para el ejemplo:

$$\frac{25 \text{ meses}}{9 \text{ sistemas}} = 2.8 \text{ meses} \dots\dots\dots (4)$$

2.3.5. Tiempo Medio de Falla (MTTF)

MTTF, por sus siglas en inglés Mean Time to Failure. Se calcula con el tiempo total en exposición de todos los sistemas, dividido entre el número de sistemas que fallaron. Esto por lo tanto representa el tiempo promedio que un sistema se encuentra en operación hasta que falla. Si el tiempo en operación, no incluye el tiempo en espera de la plataforma, MTTF es un buen indicador de la confiabilidad de los sistemas artificiales de producción. Para el ejemplo tenemos:

$$\frac{63 \text{ meses}}{9 \text{ sistemas que fallaron}} = 7 \text{ meses} \dots\dots\dots (5)$$

2.3.6. Tiempo Medio para Desinstalar un Sistema (MTTP)

MTTP, por sus siglas en inglés Mean Time to Pull. Esta medida de tiempo de vida para SAP, se calcula como el total de tiempo en exposición de todos los sistemas dividido entre el número de sistemas que fueron desinstalados o desinstalados. Por lo tanto representa el tiempo promedio en el que un sistema se encuentra en operación hasta que es desinstalado. Si no considera el tiempo en espera del equipo para realizar las operaciones de mantenimiento, el MTTP es un buen indicador de la confiabilidad, sobretodo del equipo subsuperficial. El MTTP es calculado regularmente usando el “Tiempo en el Pozo”, el cual puede incluir una cantidad sustancial de tiempo en espera de la plataforma o equipo para llevar a cabo las operaciones de mantenimiento. En este caso, este solo representa el tiempo promedio entre operaciones de mantenimiento o reacondicionamientos (asumiendo que los sistemas son reemplazados inmediatamente después de que son desinstalados). Para el ejemplo tenemos:

$$\frac{63 \text{ meses}}{9 \text{ sistemas desinstalados}} = 4.8 \text{ meses} \dots\dots\dots (6)$$

2.3.7. Rango de Falla (Fallas por Pozo por Año)

Esta medida de tiempo de vida, se calcula con el número de sistemas que fallaron dividido entre el total del tiempo en exposición. Así como para el MTTF, si no incluye el tiempo en espera de la plataforma, es un buen indicador de la verdadera confiabilidad del sistema. El rango de falla, es comúnmente calculado con el “Tiempo de Calendario”. En este caso, solo representa que tan seguido se lleva a cabo una operación de mantenimiento debido a una falla del sistema, y está afectado por el tiempo en espera de la plataforma o equipo necesario para llevar a cabo la operación. (Vandevier 2010; Sawaryn 2003). Para el ejemplo:

$$\frac{9 \text{ sistemas que fallaron}}{63 \text{ meses}} = 0.14 \text{ fallas por pozo por año (7)}$$

2.3.8. Rango Entre Operaciones de Mantenimiento (Operaciones de Mantenimiento por Pozo por Año)

Es calculado con el número de sistemas que fueron desinstalados, dividido entre el total del tiempo en exposición. Al igual que para el MTTP, si el tiempo en exposición no incluye el tiempo en espera por el equipo necesario para llevar a cabo la operación de mantenimiento, es un buen indicador sobretodo de la confiabilidad del equipo subsuperficial. El Rango entre Operaciones de Mantenimiento, regularmente es calculado con el “Tiempo de Calendario”, en este caso sólo representa que tan seguido se lleva a cabo una operación de mantenimiento, y es afectado por el tiempo en espera del equipo para llevar a cabo la operación de mantenimiento. Para el ejemplo:

$$\frac{9 \text{ sistemas quitados}}{63 \text{ meses}} = 0.14 \text{ operaciones de mantenimiento por pozo por año(8)}$$

Frecuentemente, se utiliza el acrónimo MTBF en lugar de MTTF. Dependiendo de la fuente, la “B” puede tener dos significados diferentes: Antes (Before) o Entre (Between). Si es “Antes”, entonces esta medida es equivalente al Tiempo Medio de Falla, MTTF. Sin embargo, si es “Entre”, entonces la diferencia es el tiempo en exposición utilizado: para el MTTF, se utiliza el tiempo en exposición en el que no se incluye la espera del equipo necesario para llevar a cabo las operaciones de mantenimiento; en el MTBF, si se incluye el tiempo en espera.²

2.4. Ventana Móvil

Algunas de estas medidas pueden ser calculadas utilizando una “ventana móvil” en el tiempo. Esto permite que los cambios recientes en la medida sean más aparentes, ya que al utilizar la ventana los datos se encuentran menos opacados por los datos anteriores. Por ejemplo al utilizar la ventana móvil en el MTTF, este es calculado dividiendo el total para todos los sistemas dentro de una “ventana” (periodo de tiempo) definida, entre el número de fallas en el mismo periodo. Esto es análogo al concepto de calcular el rango de falla dividiendo el número de fallas en el año anterior entre el tiempo en exposición de este año. En este capítulo, sólo se aplicará la ventana móvil al Tiempo Medio de Falla (MTTF) y al Tiempo Medio para Desinstalar un Sistema (MTTP).

2.4.1. Tamaño de la Ventana que se Utiliza en las Medidas

Esta sección se refiere al MTTF y fallas, pero aplican las mismas recomendaciones y conclusiones para el MTTP y operaciones de mantenimiento. Como ya se mencionó, calcular el MTTF usando una ventana móvil, permite observar cambios en la vida útil promedio de forma más notoria, esto es debido a que están menos afectados por los datos anteriores.

La cuestión principal al usar la ventana móvil, es ¿De qué tamaño debe ser? Hay dos factores que lo determinan. El primero, entre más grande sea la ventana, más fallas va a contener, y por lo tanto habrá menos incertidumbre en la estimación el tiempo promedio de vida. Segundo, entre más grande sea la ventana, incluirá datos más antiguos en el cálculo de MTTF, y por lo tanto será más difícil ver el cambio en la vida útil promedio. Estos dos factores deben ser balanceados uno con el otro.

Sin embargo, no hay beneficio al hacer la ventana muy pequeña, aun en campos muy grandes en los que puede haber un gran número de fallas en una ventana muy pequeña de tiempo. Muchas acciones pueden resultar en un cambio en la vida útil promedio sólo afectando nuevas instalaciones (por ejemplo, cambios en la selección del equipo o cambios en las prácticas de instalación). Si ocurre algún cambio, y por lo tanto resulta en un cambio de la vida útil promedio, el número de sistemas instalados antes del cambio va a confundir cualquier cálculo del MTTF hasta que el tiempo sea igual a 2 o 3 veces el tiempo antes del MTTF.

Dado lo anterior, los autores recomiendan que el tamaño de la ventana sea al menos aproximadamente igual al tiempo esperado para el valor de MTTF, y se aumente si el campo es pequeño y el número de fallas en la ventana es muy pequeño para permitir una incertidumbre razonable. Es irracional esperar que un cambio pequeño en el tiempo promedio de vida útil pueda ser detectado con cierto grado de certidumbre. Por ejemplo, si se observa un 5% de cambio en el MTTF, debería haber más de 1000 fallas en cada uno de los valores MTTF calculados comparado con el que muestra un 90% de seguridad en el que el cambio observado no es solo un efecto aleatorio.

2.5. Distribuciones del Tiempo de Vida

Para un grupo de sistemas artificiales de producción, pueden presentarse fallas en diferentes tiempos de la operación, los tiempos de falla se dan después de un cierto tiempo de vida con una distribución estadística dada. En muchos campos, los tiempos de falla muestran una distribución exponencial, como menciona Brookbank. Cuando este es el caso, se ha demostrado que el Tiempo

Medio de Falla (MTTF) es la medida estadística que estima de mejor forma el tiempo de vida de los sistemas. Sin embargo, este no es siempre el caso, en particular cuando se presentan fallas prematuras o daño por uso excesivo de acuerdo a un tiempo en el equipo.

Cuando se está evaluando la confiabilidad de los sistemas artificiales de producción, hay interés en más aspectos que solo tener una buena estimación del tiempo promedio de vida del sistema, como conocer la probabilidad de falla del sistema a un tiempo dado durante la operación. Se debe notar que particularmente para las distribuciones de las fallas más comunes, el tiempo promedio de vida útil es muy distinto a la media o P50.

2.6. Simulaciones de Monte Carlo

Se ha utilizado el método de simulación de Monte Carlo para evaluar la capacidad de las medidas de tiempo de vida para obtener el tiempo de vida útil “real” de los sistemas artificiales de producción, así como el tiempo entre operaciones de mantenimiento “real” para un grupo de pozos. Los tiempos de vida de los sistemas que fallaron, fueron escogidos de manera aleatoria de una distribución exponencial con una media conocida. Para considerar el efecto de los sistemas que fueron desinstalados sin que la causa fuera la falla del SAP, el tiempo de desinstalación, conocido como tiempo de censura, fue escogido también de una distribución exponencial (diferente a la distribución de los sistemas que fallaron), con una media conocida. Si el tiempo de censura era menor que el tiempo de falla, se consideraba que el sistema había sido desinstalado sin haber fallado al tiempo de censura. En el caso contrario, el sistema se quitaba inmediatamente después de haber fallado, sin haber llegado al tiempo de censura. Los sistemas fueron reemplazados inmediatamente después de ser desinstalados, sin importar si la causa de la desinstalación fuera falla o no. Esto es análogo a tener equipo subsuperficial dentro del pozo, diferente al sistema artificial de producción que puede fallar, y requiere tiempo para llevar a cabo la operación de mantenimiento antes de que el sistema falle. En el Apéndice 2.2, se muestran los detalles de estos cálculos.

2.6.1. Caso 1. Estimando el Promedio de Vida “Real” del Sistema y el Tiempo Entre Operaciones de Mantenimiento Reales

Simulación del “caso base” para ver cómo se comporta cada medida a lo largo del tiempo. Un campo de tamaño constante y pozos equipados con SAP de una confiabilidad constante.

- En el campo se comenzó la producción de 500 pozos en el tiempo cero
- El tiempo de vida promedio se estableció en 600 días
- El tiempo medio de censura se estableció en 2400 días, en los cuales aproximadamente el 20% de los sistemas habían sido desinstalados a causa de falla

- El tiempo entre operaciones de mantenimiento esperado fue de 480 días (para el tiempo de falla y tiempo de censura se utilizaron distribuciones exponenciales, lo cual puede ser demostrado matemáticamente)
- La simulación se hizo para 10,000 días (alrededor de 27 años).

La Figura 2.2, muestra la evolución de algunas de las medidas de tiempo de vida más comunes a través del tiempo

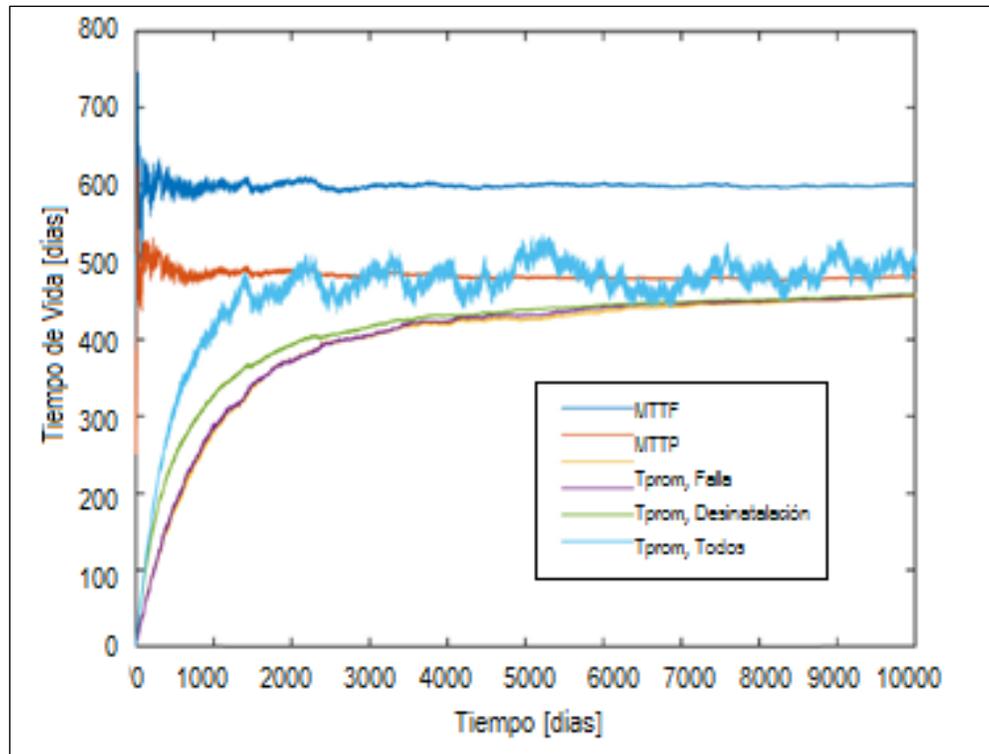


Figura 2.2 – Medidas de Tiempo de Vida a través del Tiempo, Caso 1 (Alhanati, 2008)

En la simulación el MTTF, fue el tiempo esperado de 600 días, al igual que el tiempo entre operaciones de mantenimiento de 480 días.

Podemos notar que para tiempo promedio de los sistemas que fallaron, el tiempo promedio de los sistemas que fueron desinstalados y el tiempo promedio de todos los sistemas, todos se acercan a la línea del MTTP hasta los 100 días con una variación de aproximadamente un 5%. El tiempo promedio de todos los sistemas en uso, varía aleatoriamente cerca de los tiempos esperados para las operaciones de mantenimiento.

Estas cuatro medidas parecen estimar apropiadamente el tiempo promedio para las operaciones de mantenimiento, pero solo después de un largo tiempo después de que empezó la operación. No son

buenos indicadores para el promedio de vida de los SAP, por lo tanto no deberían ser utilizados para evaluar la confiabilidad de los SAP.

La ventana con periodo de tiempo de un año para el MTTF y MTTP se muestra en la Figura 2.3, aquí podemos observar una cantidad más grande de variaciones aleatorias en los resultados (comparando con la Figura 2.2), pero ambas varían alrededor de los valores esperados de 600 días para el MTTF y 480 días para el MTTP.¹

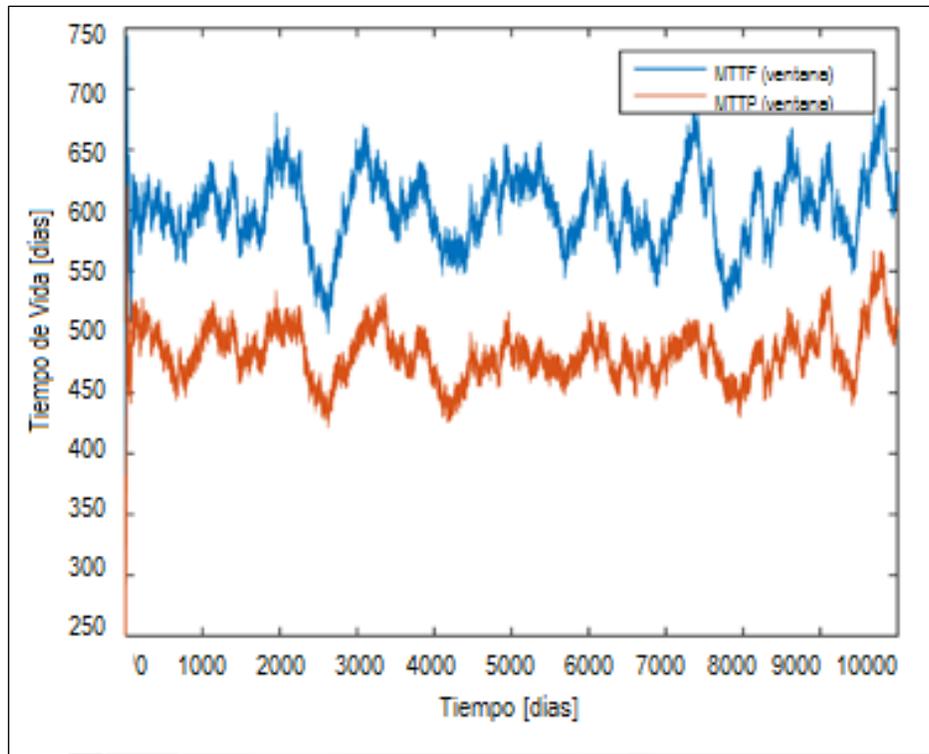


Figura 2.3 – Medidas de Tiempo de Vida a través del Tiempo con Ventana, Caso 1 (Alhanati, 2008)

2.6.2. Caso 2. Estimando el Cambio Entre el Tiempo de Vida Promedio “Real” y el Tiempo Entre Operaciones de Mantenimiento “Real”

Se simuló un campo de tamaño constante, pero con la confiabilidad de los SAP variante para los sistemas instalados después de un punto dado en el tiempo, para ver como el cambio en las medidas del tiempo de vida influyen en la confiabilidad.

- Las condiciones fueron las mismas que para el caso 1, excepto que después de 5,000 días cada sistema que había fallado fue cambiado por un sistema con mayor tiempo de vida promedio real
- Al mismo tiempo, se hizo un cambio en el tiempo de censura de acuerdo con la misma proporción del sistema (aproximadamente 20%) fueron desinstalados con falla

- El nuevo tiempo de censura fue de 800 días, y el tiempo de cierre medio fue de 3,200 días
- Estos resultados para el nuevo tiempo entre operaciones de mantenimiento fue de 640 días.

En la Figura 2.4 se muestra el resultado para las medidas del tiempo de vida, y la Figura 2.5 muestra los resultados para la ventana de un año para el MTTF y MTTP, con el tiempo promedio de funcionamiento de los sistemas en operación¹

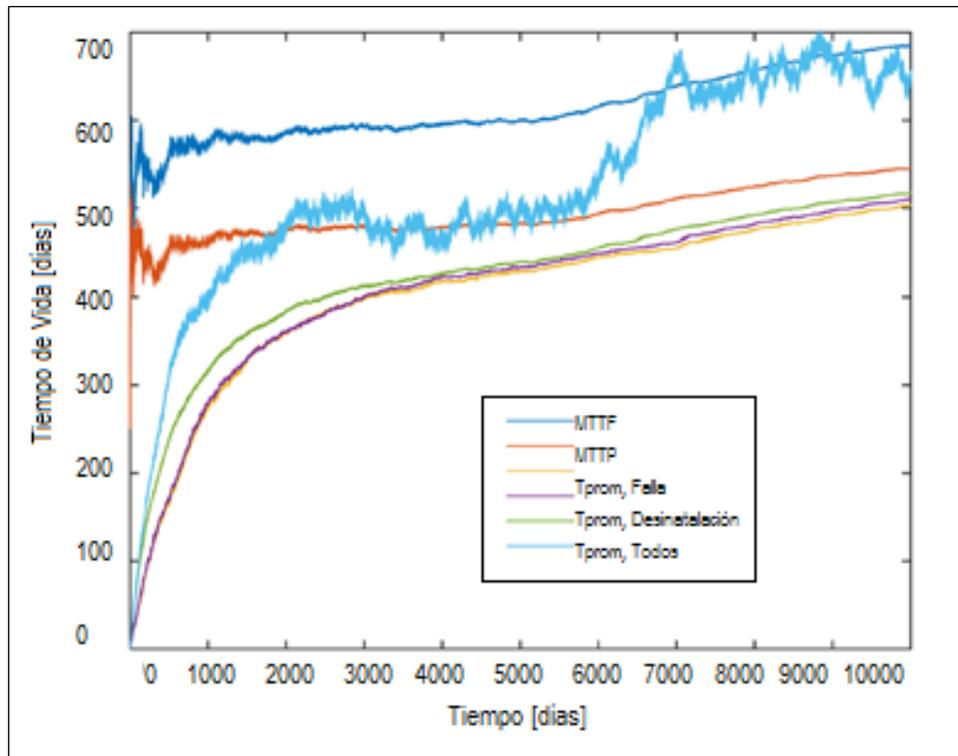


Figura 2.4 – Medidas de Tiempo de Vida a través del Tiempo, Caso 2 (Alhanati, 2008)

Los resultados de la simulación muestran que las curvas de MTTF y MTTP acumulados, cambian con respecto a los valores constantes, pero no es claro el tiempo de vida útil del SAP y el tiempo entre las operaciones de mantenimiento.

El tiempo promedio de vida útil de los sistemas en operación muestra un cambio, y este llega al nuevo valor para el tiempo entre operaciones de mantenimiento. Sugiere otra vez que el tiempo promedio de vida útil de los sistemas en operación puede estimar de forma adecuada el tiempo promedio entre las operaciones de mantenimiento para muestras constantes (es diferente si cambia el tamaño).

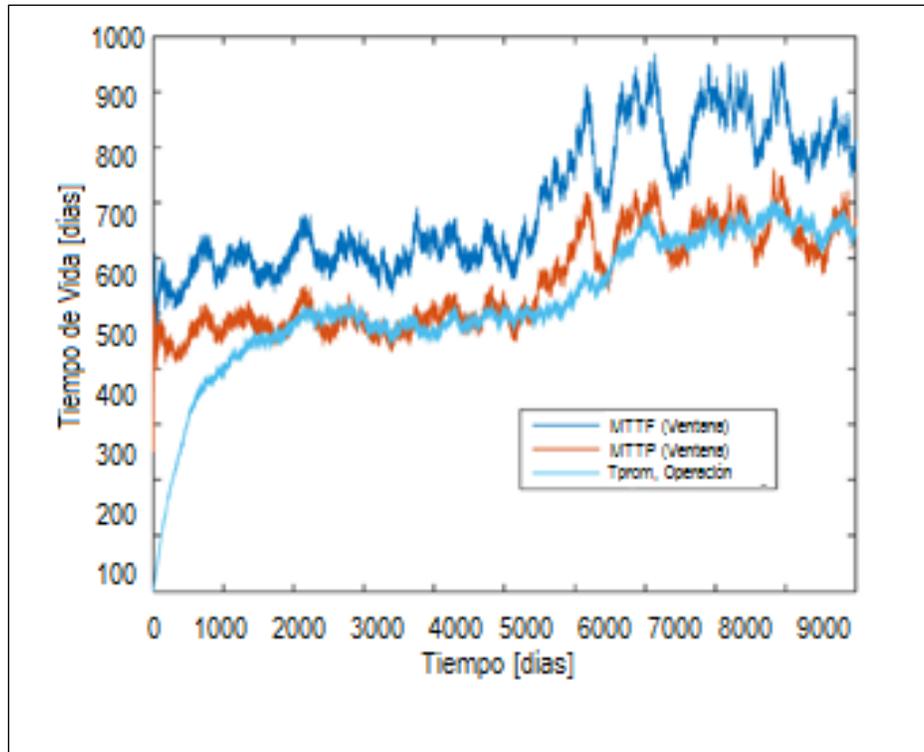


Figura 2.5 – Medidas de Tiempo de Vida a través del Tiempo con Ventana, Caso 2 (Alhanati, 2008)

La ventana con un periodo de tiempo de un año para MTTF y MTTP muestra el cambio a los nuevos valores esperados con una pequeña variación de tiempo. La ventana de un año para el MTTP alcanza el nuevo valor esperado para el tiempo promedio de vida útil de los sistemas en operación más rápido.¹

2.6.3. Caso 3. Efecto del Cambio de Tamaño en la Muestra en el Cálculo del Tiempo Promedio Real Para la Vida Útil de los Sistemas y el Tiempo Entre Operaciones de Mantenimiento

- El número de los pozos activos cambia a lo largo del tiempo en la simulación
- El cambio del número de pozos primero, es de acuerdo al nuevo programa de perforación y después de acuerdo a los sistemas que son desinstalados y no son reemplazados
- El objetivo es observar cómo afectan a las medidas de tiempo de vida del sistema el cambio del tamaño del campo
- El promedio de vida de los SAP y tiempo entre operaciones de mantenimiento es el mismo que para el primer caso
- En el tiempo cero, no hay pozos activos
- Durante los primeros 5 años (de 1825 a 2920 días), la perforación aumenta a 1,000 pozos por año
- No se perforan pozos después de este tiempo

- Los sistemas que fallan o son desinstalados se reemplazan de inmediato, hasta el día 4,000
- Después no se reemplazan sistemas, pero los sistemas que estaban funcionando, continúan en funcionamiento

La Figura 2.6 se muestra el número de pozos en operación contra el tiempo; la Figura 2.7 muestra los resultados para las medidas de tiempo de vida, y la Figura 2.8 muestra los resultados de la ventana de un año para MTTF y MTTP, de acuerdo con el tiempo promedio de vida útil de los sistemas en operación.¹

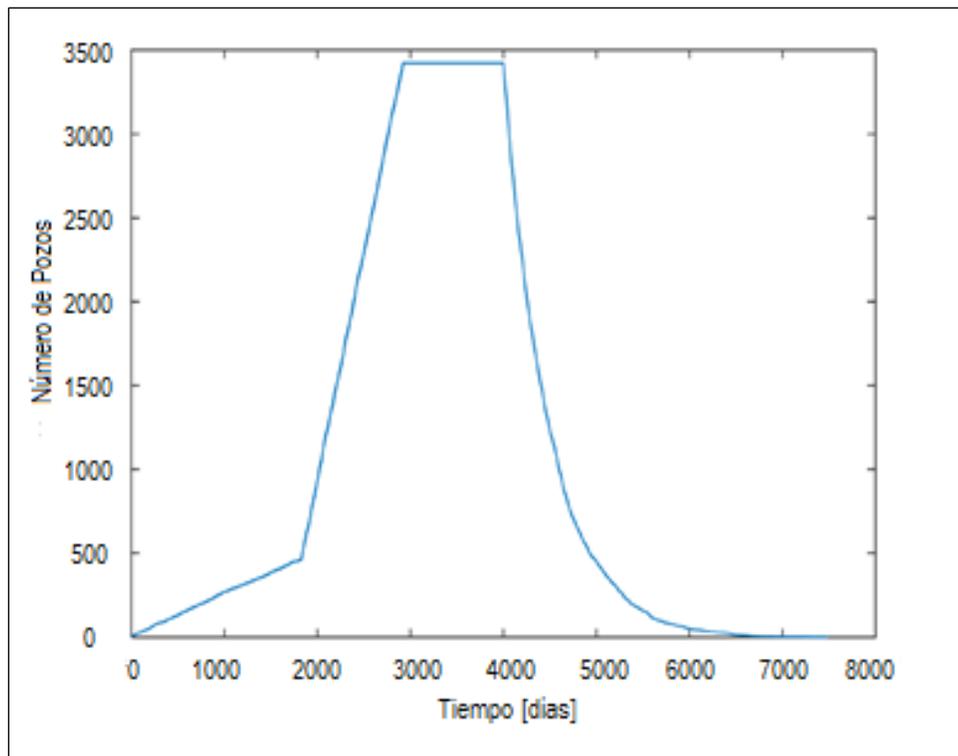


Figura 2.6 – Número de Pozos Activos a través del Tiempo, Caso 3 (Alhanati, 2008)

Los resultados para MTTF y MTTP se acercan a los valores esperados de 600 y 480 días respectivamente. Los valores para el tiempo promedio de vida de los sistemas que fallaron y el tiempo promedio de los sistemas que fueron desinstalados, tiende a acercarse al valor esperado de 480 días, sin embargo sufre una inmersión al principio del periodo en el que se comienzan a perforar más pozos. Este efecto solo es temporal, cuando ya no se instalan más sistemas, la medida alcanza el mismo valor que el MTTP.

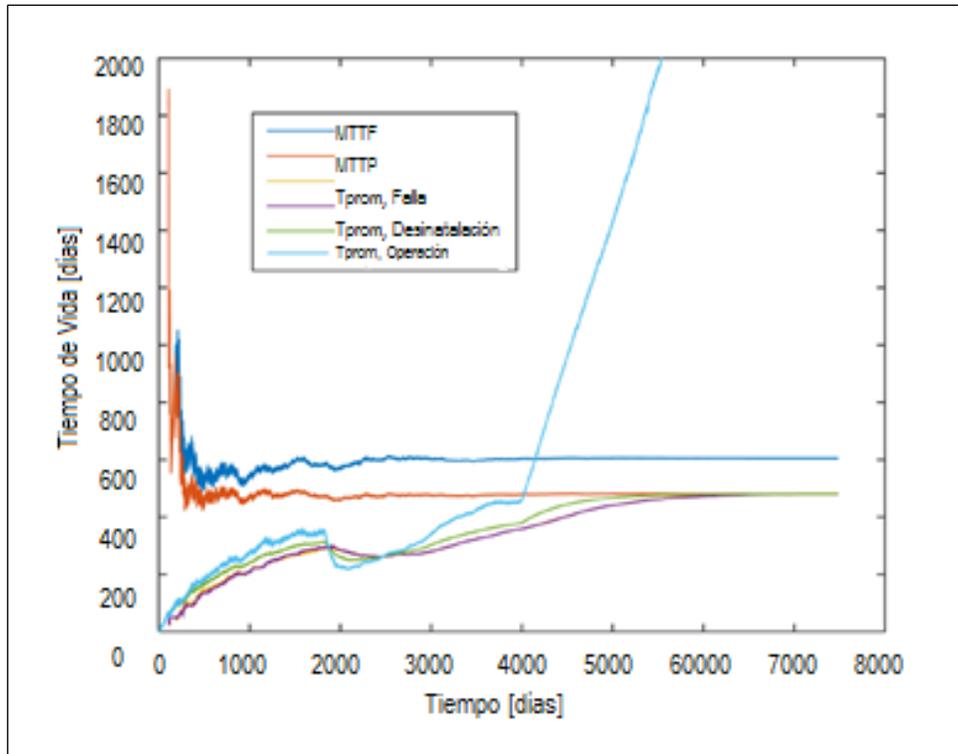


Figura 2.7 – Medidas de Tiempo de Vida a través del Tiempo, Caso 3 (Alhanati, 2008)

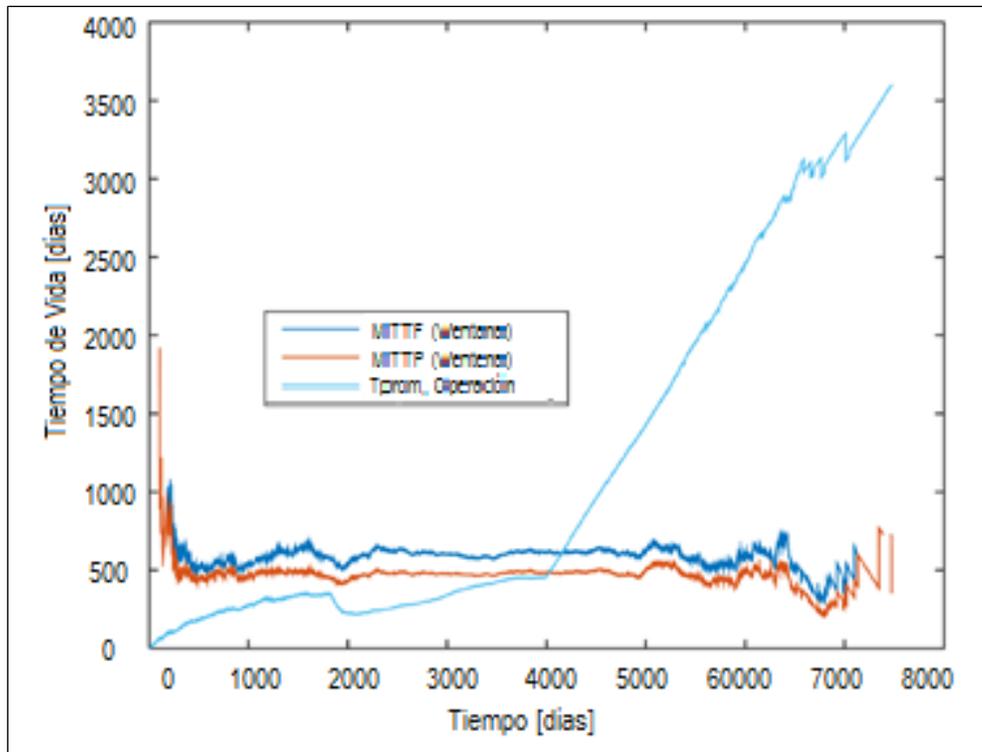


Figura 2.8 – Medidas de Tiempo de Vida a través del Tiempo con Ventana, Caso 3 (Alhanati, 2008)

El tiempo promedio de vida de los sistemas en operación, es más afectado por el cambio en el número de pozos activos. Muestra una inmersión más grande cuando se instalan más sistemas de acuerdo con el programa. Cuando ya no se instalan más sistemas, hay un gran incremento instantáneo en el tiempo de vida.

Es como se esperaba: cuando se perforan más pozos y se instalan los nuevos sistemas, hay una cantidad proporcional de sistemas “nuevos” con un corto tiempo en funcionamiento, disminuyendo el tiempo promedio de vida de los sistemas en funcionamiento; de manera inversa, cuando no se instalan nuevos sistemas, el promedio aumenta.

Las mediciones en la ventana muestran una variación más grande al principio de la vida del campo. Esto es porque hay algunas fallas o sistemas que son desinstalados en este periodo. Lo que da una mayor incertidumbre a los resultados.

2.7. Medidas de Tiempo de Vida Recomendadas

Basándose en los resultados anteriores, se hacen recomendaciones sobre las mediciones del tiempo de vida de los sistemas para los siguientes dos objetivos: estimar la vida promedio real de los sistemas artificiales de producción instalados y estimar la frecuencia entre las operaciones de mantenimiento.

2.7.1. Tiempo Medio de Falla (MTTF) y Rango de Falla (Fallas por Pozo por Año)

Cuando ambas medidas se calculan con los tiempos en operación, sin incluir los tiempos en espera de mantenimiento, MTTF y el rango de falla son los mejores indicadores de la confiabilidad de un SAP. Y puede ser comprobado matemáticamente, como se ilustra en los ejemplos anteriores con las simulaciones Monte Carlo, MTTF es el mejor para estimar el tiempo promedio de vida real de un sistema. Si se están buscando señales de cambios en la confiabilidad del sistema y el tiempo promedio de vida a lo largo del tiempo, usando una ventana en el MTTF, o rango de falla; la aproximación es mejor.

Como ya se mencionó se debe tener cuidado cuando se están interpretando tendencias en los rangos de falla calculados usando el tiempo de calendario, ya que está siendo afectado por el tiempo en espera en operaciones o para operaciones de mantenimiento, el cual no está relacionado directamente con la confiabilidad del sistema.¹

2.7.2. Tiempo Medio para Desinstalar un Sistema (MTTP) y Rango de Operaciones de Mantenimiento (Operaciones de Mantenimiento por Pozo por Año)

Cuando se calculan con los tiempos en operación sin incluir el tiempo en espera debido a operaciones de mantenimiento, el MTTP y el Rango de Operaciones de Mantenimiento, son los mejores indicadores del tiempo entre operaciones de mantenimiento y los rangos de los mismos. Junto con el promedio del tiempo de inactividad del sistema, son medidas útiles para evaluar de manera más específica y acertada, las pérdidas de producción y costos operativos asociados a fallas y operaciones de mantenimiento de los SAP. Si estas medidas son calculadas sin incluir el tiempo en espera por operaciones de mantenimiento, el MTTP es la mejor medida para estimar el tiempo promedio real de vida útil de todo el equipo subsuperficial en el pozo.

Si se buscan señales de cambios a través del tiempo, se debe usar la ventana para mejores aproximaciones.

2.7.3. Otras Medidas

Como se ilustra en los ejemplos de las simulaciones anteriores con Monte Carlo, las medidas de tiempo de vida útil: tiempo promedio de vida de todos los sistemas, tiempo promedio de vida de los sistemas en operación, tiempo promedio de vida de todos los sistemas desinstalados y tiempo promedio de vida de los sistemas que fallaron, no son buenas calculando el tiempo medio real de vida de los sistemas artificiales, por lo tanto no son buenos indicadores de la confiabilidad de los SAP.

Si la muestra es estable y no hay cambios en la confiabilidad de los sistemas, estos valores se acercaran eventualmente al mismo valor que el MTTP. Este muestra que son afectados por otras operaciones de mantenimiento en el pozo (por razones diferentes a la falla del sistema) y por lo tanto, no son buenos indicadores de la confiabilidad del SAP.

Comparado con el MTTP, toman mucho más tiempo para indicar los cambios en la confiabilidad de equipo subsuperficial. Adicionalmente, la medida, tiempo promedio de vida útil de los sistemas en operación puede ser significativamente afectada por los cambios en el número total de SAP. Por lo que estas medidas deben ser consideradas como complementarias, para ayudar a tener un panorama completo de la operación, y no como indicadores principales de la confiabilidad de los sistemas artificiales de producción.

2.8. Incertidumbre en las Medidas del Tiempo de Vida

Es importante considerar la incertidumbre en el tiempo promedio de vida y el tiempo entre operaciones de mantenimiento. Como se ilustra con las simulaciones Monte Carlo, aun cuando el tiempo medio real de la vida útil del sistema y el tiempo entre operaciones de mantenimiento fuera constante, hay variaciones al calcular los valores estimados para el MMTF y MTTP, así como para las demás medidas. La incertidumbre en las estimaciones puede ser calculada con el método mostrado por Sawaryn (asumiendo que los tiempos de falla y tiempos entre operaciones de mantenimiento sigan una distribución exponencial).

Una pequeña serie de resultados para el intervalo de 90% de veracidad se muestra en la Tabla 2.1, en la que el límite de estos intervalos es expresado como porcentajes por encima y por debajo de los valores calculados para MTTF y MTTP. El valor real de la media tiene un 90% de probabilidad de caer dentro del rango de los valores calculados para MTTF y MTTP.

N	- %	+ %
5	- 45.5%	154%
10	- 36.3%	84.3%
25	- 25.9%	43.8%
50	- 19.6%	28.3%
100	- 14.5%	18.9%
250	- 9.60%	11.3%
500	- 6.95%	7.81%
1,000	- 5.00%	5.42%
2,000	- 3.57%	3.79%

Tabla 2.1 – Intervalos de Confiabilidad del MTTF para un Número de Fallas Especifico (Alhanati, 2008)

Por ejemplo, si se calcula el MTTF basado en 50 fallas en 1,000 días, hay un 90% de probabilidad de que el valor real de la vida útil del sistema este entre 804 y 1283 días. Por otro lado, si se tienen solo 5 fallas, el rango puede ser de 546 a 2,540 días.

Como se puede ver, la incertidumbre es más grande para los campos en los que hay un número menor de fallas o sistemas que fueron desinstalados. Mientras que existen otras técnicas (mencionadas al final) que pueden ser utilizadas para muestras pequeñas, sin embargo; no se debe

esperar obtener una gran exactitud para la estimación del tiempo de vida promedio o tiempo entre operaciones de mantenimiento para muestras pequeñas.

La Figura 2.9 muestra un ejemplo de una ventana de un año para el MTTF, con un intervalo del 90% de confianza se muestra como una banda sombreada alrededor del valor calculado para el MTTF. (Sólo tenemos el 90% de seguridad de que el valor real del tiempo promedio de la vida útil caiga dentro del área sombreada) los datos para este caso son los mismos que para el Caso 1, excepto que sólo hay 100 pozos en el campo. Para los primeros 365 días, el tamaño efectivo de la ventana es más pequeño, debido a que no hay datos antes del tiempo cero. Por lo tanto, hay algunas fallas y mejor certidumbre tiempo después. La línea roja muestra el tiempo promedio de vida real de 600 días, y la mayoría del tiempo, el intervalo de seguridad sombreado contiene este valor. Graficando el MTTF con el intervalo de seguridad en este caso es una práctica útil, ya que nos recuerda que los cambios en las medidas calculadas, no siempre reflejan cambios en la confiabilidad, a menos que el cambio sea mayor que la incertidumbre.

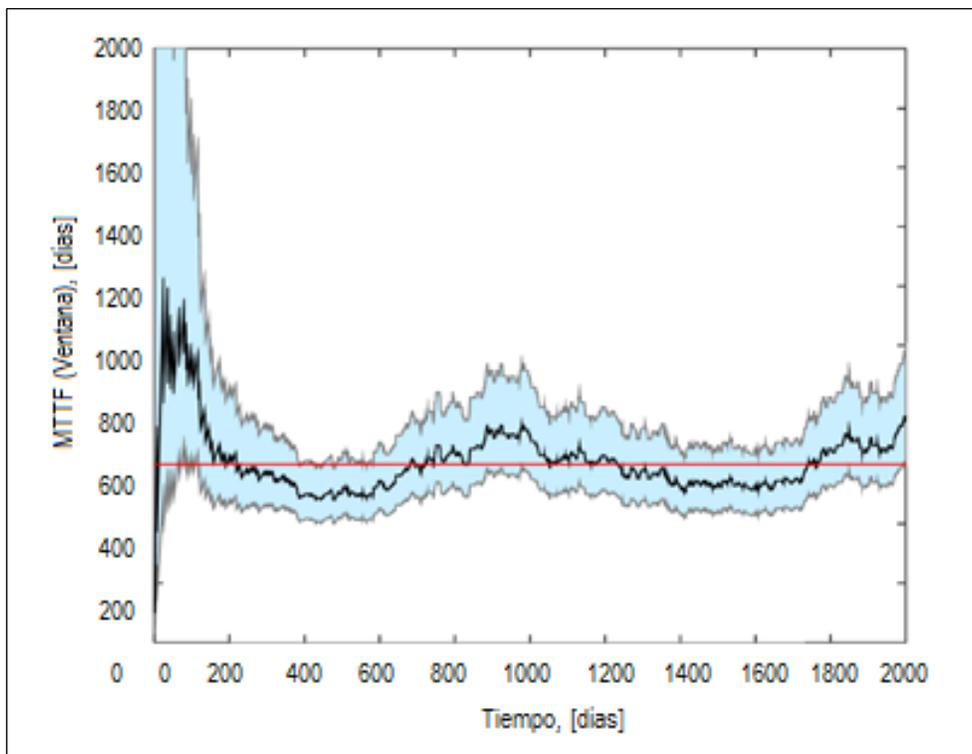


Figura 2.9 – Intervalo de Confiabilidad en el MTTF a través del Tiempo (Alhanati, 2008)

2.9. Conclusiones Acerca de las Medidas del Tiempo Medio de Vida de los Sistemas Artificiales de Producción

- Cuando se compara el tiempo de vida útil de dos grupos de sistemas, es importante usar definiciones consistentes del tiempo en operación, del recuento de la instalación realizada, y de que es lo que constituye la falla cuando se calculan las medidas de tiempo de vida del sistema.
- MTTF es el mejor para calcular la vida útil de un SAP, y por lo tanto es el mejor indicador de la confiabilidad verdadera de los SAP. Sin embargo, cuando se calcula el MTTF para estos propósitos, el tiempo en operación no debe incluir el tiempo de la operación de mantenimiento.
- Se debe tener mucha precaución cuando se interpretan las tendencias de los Rangos de Falla cuando se calcularon con el tiempo de calendario, ya que de esta forma, se encuentran afectados por el tiempo promedio en espera debido a las operaciones de mantenimiento, el cual no está relacionado con la confiabilidad del equipo.
- Para el MTTP, cuando se calcula usando el “tiempo en el pozo” es buen indicador estimando el tiempo promedio entre operaciones de mantenimiento, asumiendo que los sistemas son reemplazados inmediatamente después de que son desinstalados.
- La incertidumbre cuando se estima el valor promedio de tiempo de vida de los sistemas y el tiempo entre operaciones de mantenimiento basado en el MTTF y MTTP, es función del número de fallas (MTTF) o de operaciones de mantenimiento (MTTP).
- MTTF y MTTP puede ser calculado usando una ventana de tiempo, en el que solo los tiempos en operación y fallas u operaciones de mantenimientos son considerados dentro de la ventana para los cálculos. Esto permite que los cambios para el MTTF y MTTP a través del tiempo, sean más fácilmente detectados.
- El tamaño óptimo de la ventana para los cálculos de MTTF y MTTP es justo del tamaño suficiente en el que se incluyan suficientes fallas para dar una certeza razonable. Haciendo la ventana más pequeña que el valor de MTTF o MTTP, no añade valores adicionales.

Capítulo III: Metodología Para el Reporte de Fallas de los Sistemas de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido

El uso de sistemas de seguimiento y monitoreo de fallas de los sistemas de bombeo electrocentrifugo es muy común. A continuación presentaremos un resumen de los mismos como una mejor introducción al tema de reporte de fallas, comenzando con la importancia de la existencia de una metodología del reporte de fallas.

De la literatura y de información obtenida a partir de reportes tanto de operadores como de vendedores de equipos, ha resultado como punto en común que la mayoría de las bases de datos existentes como los sistemas de seguimiento de fallas solo pueden reportar las características básicas de las fallas, como por ejemplo, fecha de instalación y fecha de falla, fecha en que se desinstaló el equipo, componente que falló en el sistema, fabricante del equipo y modelo. También a través del estudio, ha sido muy evidente que la estructura de las bases de datos depende mucho del propósito inicial con el que se realizó, por ejemplo, algunas bases de datos son elaboradas por ingenieros enfocados en los componentes del sistema, dejando de lado el análisis de la falla y sus causas así como la optimización de la producción y viceversa.

Mientras que algunas de las bases de datos contienen información del “Razón para Ser Desinstalado”, el “Modo de Falla” o la “Causa de Falla”, no ha sido estandarizada la forma de reportar las fallas con respecto a modos de falla o las causas. Muy pocas bases de datos o reportes incluyen información del pozo y las condiciones bajo las que se encontraba operando el sistema. Una metodología utilizada por BP en el Mar del Norte es muy común, en la que se incluyen dos bases de datos: una de la producción por medio de un reporte de la producción diaria, y otra con la información de la falla del sistema BEC.

Se han presentado diferentes formas en las que se lleva a cabo el análisis de la falla con el sistema BEC, estas son comúnmente presentadas a través de la comparación de la frecuencia de falla y el Tiempo Medio entre las Fallas (MTBT), y la tendencia del tiempo de vida útil. Las distribuciones comparativas de las fallas en los diferentes componentes, diferentes tipos de equipos y sus modelos, o entre los diferentes fabricantes de los mismos y por último las plataformas o campos en los que se encontraban operando. Las tendencias con respecto al tiempo también han sido utilizadas para establecer la evolución o comportamiento del tiempo de vida de los sistemas BEC. Se han llevado a cabo muchos intentos para poder predecir las fallas en el futuro, por medio del ajuste de la información a través del tiempo a distribuciones estadísticas. Tanto Brookbank como Sawaryn a lo largo de sus estudios, han notado que, sin embargo, este tiene que ser realizado de forma muy cuidadosa sobre todo si se están interpretando las tendencias históricas del “Tiempo de Vida”.¹

Como ya se mencionó de manera específica en el Capítulo II de esta tesis, existen diferentes formas de estimar y utilizar tanto el Tiempo Promedio de Falla (MTTF), como el Tiempo Promedio Entre Fallas (MTBF), lo cual da lugar a muy grandes diferencias tanto en los resultados de estas interpretaciones como en las conclusiones.

Sawaryn, también notó la importancia de incluir todos los sistemas BEC dentro del análisis de las fallas, incluir los sistemas en operación, para que así, los sistemas que funcionaron por más tiempo, puedan ser evaluados de forma correcta con respecto a su tiempo de vida útil. De la misma forma, vamos a notar que, aunque no resulte obvio, un incremento en el Tiempo Promedio entre Fallas, no significa necesariamente un incremento en la confiabilidad del sistema, por ejemplo, en las primeras etapas de la vida de un campo, el Tiempo Promedio entre Fallas calculado, puede incrementar por el simple hecho de que los sistemas BEC que llevaban más tiempo en operación afectan a esta medida de tiempo calculada.

La Práctica Recomendada para la desinstalación de sistemas (RP, por sus siglas en inglés: Recommended Practice) de la API, sugiere una estructura para el reporte de las fallas de los sistemas BEC. La RP, se enfoca en la estandarización de las formas en la que se llevó a cabo la desinstalación y las observaciones realizadas durante la misma, esto con el objetivo de facilitar la transferencia de información de las diferentes bases de datos. La Práctica Recomendada también señala una de las más grandes deficiencias de los sistemas de seguimiento de las fallas de sistemas BEC: mientras “La información pertinente con respecto a la terminación del pozo, rangos de producción, y equipo BEC es muy importante para poder determinar la causa de la falla, desafortunadamente, las bases de datos no incluyen esta información”.²

3.1. Desafíos al Compartir la Información de las Fallas de los Sistemas BEC

Como ya fue comentado, uno de los principales desafíos al compartir información acerca de las fallas en los sistemas BEC tal como, tiempo de vida, observaciones de la desinstalación, etc.; y otra información pertinente como, las condiciones de operación del sistema, especificaciones del equipo, etc., de una forma eficaz, a través de los diferentes sistemas de seguimiento de fallas en la industria a nivel mundial, es asegurar la consistencia en la información.

Muchos operadores y fabricantes en la industria también han remarcado la importancia de tener una consistencia en la aproximación de la confiabilidad de los sistemas de seguimiento de las fallas. Con este fin, la consistencia debe ser definida en 2 parámetros, tanto cuantitativa como cualitativamente, y la información reportada debe ser consistente con las mismas, así como también la forma en la que las fallas deben ser descritas.

Establecer un conjunto de datos es esencial para establecer relaciones que sean congruentes y resulten de utilidad entre los tipos de fallas observados, el equipo utilizado, los fluidos producidos, las prácticas de operación, entre otros. Sin embargo, hay que tener en cuenta, que este conjunto de datos también debe reducirse al mínimo, por ejemplo: limitando los parámetros que

- a. Van a tener un uso inmediato o potencial para el análisis
- b. Sean de fácil consulta y se puedan encontrar fácilmente de los reportes de campo o bases de datos

A pesar de que la información debe reducirse al mínimo para que la consulta pueda ser práctica, debe ser comprensible, de calidad y suficiente para poder llevar a cabo el análisis. Por lo tanto, definir esta lista de parámetros resulta difícil debido a que debe satisfacer estos dos objetivos opuestos.

También es necesario establecer una terminología común y formato para clasificar las fallas; esto asegura que todos los usuarios tengan interpretaciones similares de la falla, y que el conjunto de datos y el análisis se lleve a cabo de la misma forma. Estableciendo un conjunto de datos común para la terminología es un desafío, ya que las fallas por lo general son descritas en términos cualitativos y a la vez se encuentran influenciadas por la experiencia del observador. La interpretación de las bases de datos de las fallas es lo que ha presentado un mayor número de problemas con respecto a la calidad de los datos que se reportan.

Ahora entonces podemos resumir los desafíos que se presentan al compartir la información con respecto a las fallas presentadas en los sistemas BEC:

- Consistencia en el reporte de la información (parámetros cualitativos y cuantitativos)
- Terminología y formato común de clasificación de fallas
- Experiencia tanto de quien reporta, como de quien interpreta las fallas
- A pesar la información existente, no siempre resulta de beneficio debido a la posible diferencia en la interpretación

Por lo tanto, ahora podemos notar la gran importancia de establecer entre los participantes en la base de datos, como es ESP-RIFTS, que es con la que trabajaremos, cuales son los tipos de fallas observadas, el equipo utilizado, fluidos producidos, prácticas de operación, así como tener una terminología común y un formato para poder clasificar las fallas. Ya que esto va a asegurar que todos los participantes tengan interpretaciones similares de los eventos, y el conjunto de datos y análisis se encuentren realizados de una manera consistente.

Alhanati define el conjunto de datos generales como El requerimiento mínimo de datos se muestra en la Tabla 3.1. También se presenta con comparativo con la información mínima requerida por ESP-RIFTS en la Tabla 3.2. Además de información general tanto del campo, como del pozo que contiene información de mucha importancia para la instalación de cada BEC en específico, la cual incluye:

- Información de tiempo de vida útil: Fecha de instalación, fecha de falla y fecha en que se desinstaló.
- Instalación, ambiente, datos de información y producción: Operador, propiedades y gastos de los fluidos, temperatura y presión en la cabeza y el fondo, horas en producción, número de reinicios, tiempos en reparaciones, etc.
- Equipo BEC instalado: Fabricante, modelo, tipo, metalurgia, elastómeros, revestimientos y cuando sea posible, número de serie, etc.
- Información de la Falla: Con la nomenclatura estándar, descrita a continuación.

Grupo	Información		Tipo de Información	Unidades del SI	Unidades US
Información del Pozo	Nombre del Pozo		Texto		
	Localización de la Cabeza del Pozo		Texto	Plataforma, tierra, costa	
	Zona Productiva		Texto		
	Tipo de Terminación		Texto	TR, liner, empacamiento de grava, etc.	
	Nombre del Yacimiento(s)		Texto		
	Tipo de Yacimiento		Texto	Carbonatos, tipo	
	Mecanismo de Producción		Texto	Primaria, inyección de agua, inyección de CO ₂ , etc	
	Diámetro de TR		Número	mm – kg/m	pg – lb/pie
	Diámetro de TP		Número	mm – kg/m	pg – lb/pie
	¿Empacador?		Binario	Sí, no	Sí, no
	Profundidad del Empacador, si lo tiene		Número	m	pie
	¿Herramienta Y?		Binario	Sí, no	Sí, no

	Medición de PSD (MD)		Número	m	pie
	Medición de PSD Vertical (TVD)		Número	m	pie
	Inclinación a la PSD		Número	m	pie
Información del Campo	Nombre del Activo		Texto		
	Nombre del Campo		Texto		
	Plataforma o Grupo de Pozos		Texto		
	Localización Geográfica		Texto	País, provincia, región	
	Tipo de Campo		Texto	Tierra, Marino	
Datos de Tiempo de Vida (Fechas)	Número de Periodo de Producción		Número		
	Fecha de Instalación		Fecha	mm/dd/aa	mm/dd/aa
	Fecha de Puesto en Operación		Fecha	mm/dd/aa	mm/dd/aa
	Estado del Periodo		Texto		
	Fecha de Falla/Apagado		Fecha	mm/dd/aa	mm/dd/aa
	Fecha en que fue Desinstalado		Fecha	mm/dd/aa	mm/dd/aa
	Tiempo en Operación Real		Fecha	mm/dd/aa	mm/dd/aa
Información de los Fluidos	Densidad del Aceite		Número	°API	°API
	Temperatura de Fondo		Número	°C	°F
	Presión de Burbuja		Número	Kpa	lb/pg2
Información de la Falla	¿Falló el sistema BEC?		Binario	Sí, no	Sí, no
	Modo de Falla: General		Texto		
	Modo de Falla: Específico		Texto		
	Primario	Elementos que fallaron	Texto		
		Descripción de Falla	Texto		
	Secundario	Elementos que fallaron	Texto		
		Descripción de Falla	Texto		

	Causa de Falla: General		Texto		
	Causa de Falla: Específico		Texto		
	Comentarios de la Falla		Texto		
Información del Equipo Superficial	Fabricante		Texto		
	Tipo		Texto		
	Calidad de Potencia		Texto		
Información del Equipo Subsuperficial	Bomba(s)	Fabricante	Texto		
		Tipo de Bomba	Texto		
		Etapas	Número	Número de Etapas	Número de Etapas
		Estado de la Bomba	Texto		
		Número(s) de Serie	Texto		
	Protector/Sellos(s)	Fabricante	Texto		
		Tipo de Sello	Texto		
		Condición del Sello	Texto		
		Número(s) de Serie	Texto		
	Motor(es)	Fabricante	Texto		
		Tipo de Motor	Texto		
		Potencia del Motor	Número	kW	HP
		Estado del Motor	Texto		
		Número(s) de Serie	Texto		
	Entrada/Separador de Gas	Fabricante	Texto		
		Tipo de Separador	Texto		
		Estado de la Entrada o Separador	Texto		

		Número(s) de Serie	Texto		
	Cable	Fabricante	Texto		
		Modelo y Tamaño del Cable	Texto		
		Estado del Cable	Texto		
		Número(s) de Serie	Texto		
		Tipo de Empalmes	Texto		
		Extensión del Cable	Texto		
		Empacadores	Texto		
	Fabricante del Sistema de Monitoreo		Nombre		
	Comentarios del Equipo		Texto		
Información de Operación y Producción	Rango de Flujo Total		Número	m3/d	bpd
	Producción de Agua		Número	%	%
	Presión de Entrada		Número	kPa	lb/pg2
	Porcentaje de Gas en la Entrada de la Bomba		Número	%	%
	Presión de Cabeza		Número	kPa	lb/pg2
	Presión en la Cabeza de la TR		Número	kPa	lb/pg2
	Presión Estática		Número	kPa	lb/pg2
	RGA		Número	m3/m3	pie3/bbl
	Porcentaje de Producción de Arena		Número	%	%
	¿Sólidos/Contaminantes?		Texto	Sí, no	Sí, no
	CO2		Número	%	%
	H2S		Número	%	%
	Frecuencia		Número	Hz	Hz
	Volts		Número	Volts	Volts
	Corriente		Número	Amps	Amps

	Número de Reinicios		Número		
Comentarios	Comentarios Adicionales		Texto		

Tabla 3.1 – Conjunto de Datos Generales Según Alhanati (Alhanati, 2007)

Grupo	Parámetro	Descripción
Información del Campo	Nombre del Activo	Nombre de la unidad operativa, grupo o campo, etc.
	Nombre del Campo	Nombre del campo productor de aceite
	Nombre de la Plataforma o Grupo de Pozos	Nombre del grupo de pozos
	Localización Geográfica (País)	Nombre del país en el que se encuentra el campo
	Localización del Centro de Abastecimiento de Componentes BEC	País, provincia o estado, lugar más cercano para el abastecimiento de componentes BEC
	Localización del Equipo de Desmontaje del Sistema BEC	País, provincia o estado, lugar más cercano donde el sistema BEC desinstalado puede ser mandado para las pruebas de fábrica. Si hay más de un lugar cercano, especificar la principal.
	Tipo de Campo	Terrestre, marino, ambos.
Información de los Fluidos	Densidad del Aceite a Condiciones Estándar	Densidad del aceite en grados API a presión y temperatura estándar
	Temperatura de Fondo	Temperatura del fluido a condiciones de yacimiento
	Presión de Burbuja	Presión de burbuja del aceite a temperatura del yacimiento.
	Viscosidad del Aceite Muerto a Condiciones Estándar	Viscosidad del aceite muerto a condiciones estándar
	Viscosidad del Aceite Vivo a Condiciones de Yacimiento	Viscosidad del aceite vivo a condiciones de yacimiento. Si no se cuenta con el dato, la viscosidad del aceite vivo a condiciones de yacimiento deberá ser calculada.
Información del Pozo	Nombre del Pozo	Nombre con el cual se identifica el pozo
	Tipo de Pozo (Geometría)	Vertical, desviado, horizontal, multilateral, o con sidetrack.
	Localización de la Cabeza del Pozo	Debajo del mar, en plataforma, o en tierra.
	Nombre del Yacimiento o Zona Productora	Nombre de los yacimientos de los cuales se está produciendo. Sólo durante el periodo de producción actual
	Tipo de Yacimiento	Carbonatos, arenas consolidadas, arenas no consolidadas, evaporitas.

	Mecanismo de Producción del Yacimiento	Acuífero asociado, gas en solución, inyección de agua, algún método de recuperación secundaria o mejorada.
	Tipo de Terminación	TR perforada, pozo descubierto, o con liner ranurado.
	Tipo de Control de Arena	Tipo de control de arena instalado en el pozo durante el periodo de producción por ejemplo: empacamiento de arenas, liner ranurado. Si no hay control de arena, indicar: ninguno.
	Diámetro Exterior de la TR de Explotación	Diámetro nominal de la TR de explotación
Datos de Tiempo de Vida (Fechas)	Número de Periodo de Producción	Periodo de producción en el que se encuentra el pozo
	Fecha de Instalación	Fecha en la que el Sistema BEC fue instalado
	Fecha de Puesto en Operación	Fecha en la que el sistema BEC fue Puesto en Operación por primera vez. Si no es dada, deberá ser asumida como la misma que la Fecha de Instalación
	Estado del Periodo	Completo o Sigue en Operación
	Fecha de fin del Periodo	Fecha en la que el Sistema BEC falló, fue apagado, o la última fecha en la que se recuerda que el sistema BEC seguía en operación. Si no es dada, asumirla como la misma Fecha en que fue Desinstalado.
	Fecha en que fue Desinstalado	Fecha en la que el sistema BEC fue desinstalado
	Tiempo en Operación Real	Días que el sistema realmente se encontró en operación. Si no es dada, debe ser asumida igual a la Duración
Información de la Falla (De acuerdo con la Nomenclatura Estándar)	¿Falló el sistema BEC?	¿Falló el sistema BEC? Sí/No. Este parámetro debe ser consistente con el Estado del Periodo.
	Modo de Falla: General	El motivo por el que el Sistema BEC fue desinstalado
	Modo de Falla: Especifico	Motivo específico por el que el sistema BEC fue desinstalado
	Componente Primario de Falla	Componente primario que causó la falla, debe ser definido después de que se haya llevado a cabo la investigación
	Descriptor Primario de Falla	Descriptor de falla primario de la falla del sistema o componente, el cual debe ser definido después que se haya llevado a cabo la investigación

	Descriptor de la Falla Secundaria	Descriptor de falla secundario de la falla del sistema o componente, el cual debe ser definido después que se haya llevado a cabo la investigación
	Causa de Falla: General	Categoría de la Causa: Circunstancias durante el diseño, manufactura o uso que dieron pie a la falla, los cuales deben ser definidos después que la investigación se haya llevado a cabo.
	Causa de Falla: Especifico	Causa Específica: Circunstancias durante el diseño, manufactura o uso que dieron pie a la falla, los cuales deben ser definidos después que la investigación se haya llevado a cabo
	Comentarios de la Falla	Notas específicas relacionadas con la falla. Incluyendo la descripción del contaminante si es que "contaminación" es el descriptor de falla.
Información del Equipo Subsuperficial	Tipo de Panel de Control	Tipo de panel de control: Switch board, Variador de frecuencia/ regulador de velocidad
	Fabricante del Panel de Control	Nombre del vendedor o fabricante de los componentes del panel de control
	Fuente de Potencia	Línea local, generador de campo, generador de pozo.
	Calidad de la Potencia	Excelente, buena, promedio, baja, pobre.
Información del Equipo Subsuperficial	Fabricante de la Bomba	Nombre del vendedor o fabricante de los componentes de la bomba
	Tipo de Bomba/Modelo	Modelo o tipo de bomba de acuerdo al catálogo
	Número de Etapas	Número de etapas de la bomba
	Estado de la Bomba	Metalurgia, elastómeros, cubiertas.
	Número(s) de Serie de la Bomba	Número de serie único que identifica una bomba de cualquiera otra
	Bomba era nueva o usada	Cuando fue instalada, la bomba era nueva, o usada (sin mantenimiento o mantenimiento menor), o Reparada (usada y en condiciones de ser reutilizada)
	Condiciones en las que fue Desinstalada	La bomba es Reutilizable o No Reutilizable para otra aplicación en su estado actual
	Fabricante de los Sellos(s)	Nombre del vendedor o fabricante de los componentes de los sellos
	Tipo/Modelo de Sello	Modelo o tipo de bomba de acuerdo al catálogo
	Condición del Sello	Metalurgia, elastómeros, cubiertas.
	Número(s) de Serie	Número de serie único que identifica este sello en específico de cualquier otro

	Sellos eran nuevos o usados	Cuando fueron instalados, los sellos eran nuevos, o usados (sin mantenimiento o mantenimiento menor), o Reparados (usados y en condiciones de ser reutilizada)
	Condiciones en las que fueron Desinstalados	Los sellos son Reutilizable o No Reutilizable para otra aplicación en su estado actual
	Fabricante del Motor	Nombre del vendedor o fabricante de los componentes del motor
	Tipo/Modelo de Motor	Modelo o tipo del motor de acuerdo al catálogo
	Potencia Nominal del Motor @60Hz	Potencia Nominal del Motor @60Hz
	Estado del Motor	Metalurgia, elastómeros, cubiertas.
	Número(s) de Serie	Número de serie único que identifica el motor de cualquier otro
	Motor era nuevo o usado	Cuando fue instalado, el motor era nuevo, o usado (sin mantenimiento o mantenimiento menor), o Reparado (usado y en condiciones de ser reutilizado)
	Condiciones en las que fue Desinstalado	El motor es Reutilizable o No Reutilizable para otra aplicación en su estado actual
	Fabricante de la Entrada de la Bomba	Nombre del vendedor o fabricante de los componentes de la entrada de bomba
	Tipo de Entrada de la Bomba	Modelo o tipo de la entrada de la bomba de acuerdo al catálogo
	Estado de la Entrada de la Bomba	Metalurgia, elastómeros, cubiertas.
	Número(s) de Serie	Número de serie único que identifica la entrada de la bomba de cualquiera otra
	Entrada era nueva o usada	Cuando fue instalada, la entrada de la bomba era nueva, o usada (sin mantenimiento o mantenimiento menor), o Reparada (usada y en condiciones de ser reutilizada)
	Condiciones en las que fue Desinstalada	La entrada de la bomba es Reutilizable o No Reutilizable para otra aplicación en su estado actual
	Fabricante del Cable	Nombre del vendedor o fabricante de los componentes del cable
	Tamaño del Cable (AWG)	Tamaño del cable de acuerdo a la AWG, American Wire Gauge
	Tipo/Modelo del Cable	Modelo o tipo del cable de acuerdo al catálogo
	Armadura del Cable	Galvanizada, modelada, acero inoxidable, etc.
	Número(s) de Serie	Número de serie único que identifica el cable de cualquier otro

	Tipo/Modelo de la Extensión del Cable	Modelo o tipo de la extensión del cable de acuerdo al catálogo
	Cable era nuevo o usado	Cuando fue instalado, el cable era nuevo, o usado (sin mantenimiento o mantenimiento menor), o Reparado (usado y en condiciones de ser reutilizado)
	Condiciones en las que fue Desinstalado	El cable es Reutilizable o No Reutilizable para otra aplicación en su estado actual
	Tipo/Modelo del Penetrador de la Cabeza de Pozo	Modelo o tipo del penetrador de la cabeza de pozo del cable de acuerdo al catálogo
	Tipo/Modelo del Empacador del Penetrador	Modelo o tipo del empacador del penetrador de cable de acuerdo al catálogo
	Fabricante del Sistema de Monitoreo	Nombre del vendedor o fabricante de los componentes del Sistema de monitoreo
	Empacador era nuevo o usado	Cuando fue instalado, el empacador era nuevo, o usado (sin mantenimiento o mantenimiento menor), o Reparado (usado y en condiciones de ser reutilizado)
	¿Empacador Instalado?	¿El Empacador fue Instalado con el Sistema BEC?
	Profundidad del Empacador	Profundidad medida desde la superficie al empacador. Si no hay empacador instalado, entonces dejar en blanco
	¿Herramienta Y instalada?	¿El sistema BEC fue instalado con Herramienta Y?
Información de Operación y Producción	Rango de Flujo Total	Gasto total que es producido de líquidos a condiciones estándar
	Producción de Agua	Gasto de agua en % del total de líquidos producidos.
	Presión de Entrada a la Bomba	Presión de producción en la entrada de la Bomba. Si no es dada, se debe calcular
	Nivel de Fluido Produciendo	Medida la profundidad del nivel del espacio anular
	Temperatura de Entrada a la Bomba	Temperatura del fluido producido en la entrada de la bomba. Si no es dado, Temperatura de la Entrada de la Bomba será asumida como la Temperatura en el Yacimiento
	Porcentaje de Gas en la Entrada de la Bomba	Entrada de gas libre a la bomba en %
	Presión de Cabeza	Presión de los fluidos producidos en la Cabeza
	Presión en la Cabeza de la TR	Presión en la Cabeza del espacio anular TP – TR
	Presión Estática (última medida)	Presión Estática (última medida) en la entrada de la Bomba

	RGA	RGA de producción. Alternativamente, el gasto de producción de gas a condiciones estándar.
	Porcentaje de Producción de Arena	Concentración en % de la arena producida
	¿Sólidos/Contaminantes?	Presencia y relativa severidad de los sólidos o contaminantes: Sí, no, ligero, moderado o severo.
	¿Asfaltenos?	Presencia y relativa severidad de Asfaltenos: Sí, no, ligero, moderado o severo.
	¿Arena?	Presencia y relativa severidad de arena: Sí, no, ligero, moderado o severo.
	¿Corrosión?	Presencia y relativa severidad de la Corrosión: Sí, no, ligero, moderado o severo.
	CO2	Presencia y relativa severidad del CO2: Sí, no, ligero, moderado o severo.
	H2S	Presencia y relativa severidad del H2S: Sí, no, ligero, moderado o severo.
	pH del Agua	Acidez del agua producida – tiene a indicar la corrosividad
	Salinidad del Agua [ppm]	Concentración de clorhidrato – indicador de densidad y corrosividad del agua
	¿Emulsiones?	Presencia y la severidad relativa del problema de emulsión: Ninguno, Sí, está presente, ligera, moderada o Severa
	Frecuencia del Motor	Frecuencia promedio del Motor
	Voltaje del Motor	Voltaje promedio del Motor
	Corriente del motor	Corriente promedio del motor
	Número de Reinicios durante el periodo	Número total de reinicios durante el periodo de producción
	Presión de Inyección del Vapor en Superficie	Presión de inyección del Gas
	Presión de Venteo del Gas	Presión de Venteo del Gas
	Gasto de Gas Venteado	Gasto de Gas Venteado
	Etapas del Ciclo de SAGD	Etapas del ciclo de SAGD en el momento de la medida de producción: Circulación, SAGD.
	Comentarios del Periodo	Tratamiento de corrosión, etc.
Prácticas (o respuestas a preguntas de algún campo de la formato)	Algún procedimiento o práctica verbal, prácticas asociadas con el diseño, manufactura, transporte, inspección, instalación, operación, desinstalación o análisis de falla	

	Monitoreo del Sistema BEC (SCADA/Operador/otro)	
	Control Manual o Automático	

Tabla 3.2 – Conjunto de Datos Generales y Conjunto Mínimo de Datos* de ESP-RIFTS
(C-FER Technologies, 2012)

*El Conjunto Mínimo de Datos se encuentra en la misma Tabla 3.2, sin embargo, sólo son los datos que se encuentran sombreados.

3.2. Nomenclatura Estándar de Fallas de Sistemas BEC Propuesta por Francisco Alhanati

En esta parte se plantean las bases de cómo es que se desarrolló posteriormente la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS, ya que fue desarrollada por C-FER Technologies, que pertenece al mismo autor. Mostrando de esta manera, la evolución en la misma.

3.2.1. Nomenclatura Estándar de Fallas de Sistemas BEC

La información acerca de las fallas en sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido por lo regular es clasificada y almacenada en un gran número de formatos diferentes con códigos diferentes. Mientras la mayoría tanto de operadores como de fabricantes tienen códigos internos los cuales utilizan de forma interna entre ellos para el monitoreo y seguimiento de las fallas, estos “estándares” no son utilizados ni aceptados la industria en general.

La Nomenclatura Estándar para Fallas de Sistemas BEC propuesta por Alhanati, pretende establecer una terminología y una estructura para la clasificación, el registro y el almacenamiento de los atributos asociados con las fallas de dichos sistemas. Esta propuesta se encuentra basada en dos guías muy importantes para la industria, las cuales son la API RP 11S1 “Recommended Practice for ESP Teardown Report” (nomenclatura para componentes, partes y posibles desmontajes), y la International Standar ISO 14224 “Petroleum and Natural Gas Industries – Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment” (Definiciones detalladas y atributos de la falla) sin embargo esta estandarización, sólo incluye el equipo superficial del sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido que se muestra en la Figura 3.1.

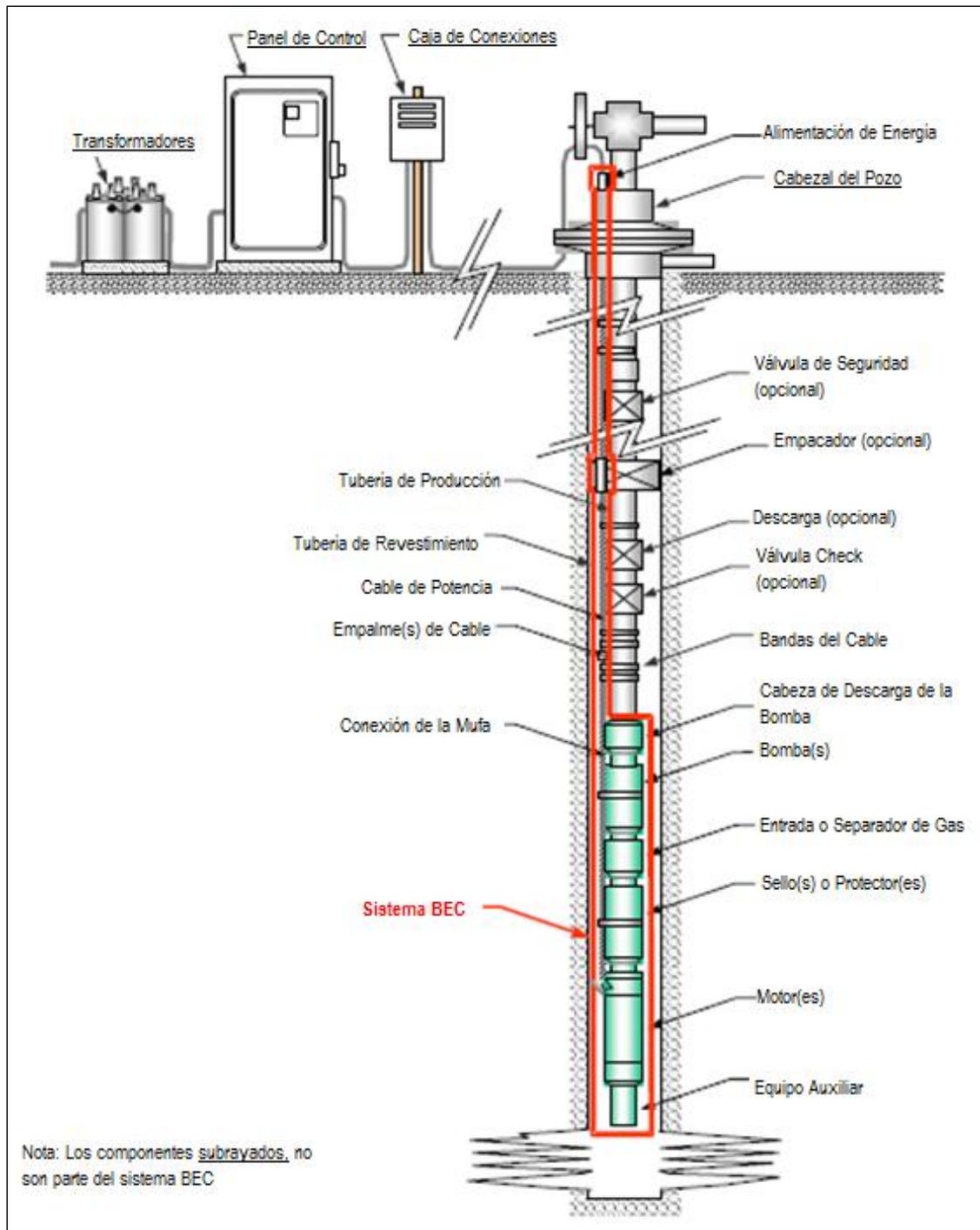


Figura 3.1 – Delimitación del Sistema de Bombeo Electrocentrifugo Sumergido (C-FER Technologies, 2012)

3.2.1.1. Definiciones de Falla de Acuerdo a la ISO 14224

De acuerdo a la ISO 14224, de manera muy general, se utilizan las siguientes definiciones de falla:

- a. Falla: Es el fin de la habilidad de un componente para llevar a cabo su función requerida

- b. Modo de Falla: la manera en la que se observó que se presentó la falla
- c. Componente que falló: Cualquier parte, componente o sistema que pueda ser considerado individualmente (algún componente principal, como la bomba o el motor; o una parte de algún componente)
- d. Descriptor de falla: La causa aparente observada de la falla, o del elemento que falló
- e. Causa de la falla: Las circunstancias durante el diseño, manufactura o uso que lo llevó a la falla

3.2.1.2. Modo de Falla

El modo de falla es la evidencia principal de la falla del equipo subsuperficial. Por lo regular es el resultado de una condición de operación anormal identificada por el operador a través de monitoreo superficial, ya sea un sistema de monitoreo o control, o una prueba de pozo. El Modo de Falla puede ser estabilizado una vez que el operador ha determinado que cual es el componente subsuperficial que ha fallado. Regularmente, el sistema debe ser parado si es que se requiere una reparación o sustitución del componente del sistema que ha fallado.

En la Tabla 3.3, se presenta una lista de varios ejemplos de posibles Modos de Falla en instalaciones de sistemas BEC. Se debe notar que muchos operadores utilizan el término Modo de Falla como “Razón para ser Desinstalado” sin embargo, este último, además de las fallas del sistema BEC, incluye también muchas otras razones por las que fue necesaria una operación de mantenimiento, tales como acidificaciones u operaciones de “re terminación” del pozo.

Modo de Falla General	Modo de Falla Específico	Comentarios
Flujo	Sin flujo a superficie	Según las pruebas de pozo
	Poco flujo a superficie	
Eléctrica	Corriente alta	
	Corriente baja	Fusibles fundidos
	Alto voltaje	Según las medidas en superficie
	Bajo voltaje	
	Mal aislamiento	
	Fase desbalanceada	
Componentes Subsuperficiales	Corto circuito	
	Mucha vibración	Según los indicadores del equipo subsuperficial
	Alta temperatura del embobinado del motor	

	Baja capacitancia dieléctrica del aceite del motor	
Otra		
Desconocida		

Tabla 3.3 – Modo de Falla (Alhanati, 2007)

3.2.1.3. Componente que Falló

De acuerdo con la definición de Falla, anteriormente descrita, el Componente que Falló (por ejemplo, puede referirse a un componente principal, tal como la bomba o el motor; al igual a una parte del componente, como un sello o un eje) el cual, ha perdido su capacidad de llevar a cabo cierta función con la que cumplía. En la mayoría de los casos, el componente ha sido sujeto de inspección o pruebas de fabricación en las cuales ha fallado a las especificaciones requeridas. En la Tabla 3.4 se enlistan los principales componentes subsuperficiales del sistema BEC, y muchas partes asociadas que pueden ser clasificadas como Componente que Falló.

Componentes del Sistema BEC y sus Partes Asociadas						
Componente que falló	Bomba	Entrada de la Bomba o Separador de Gas	Sello	Motor	Cable	Otro
Partes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cabeza ▪ Base ▪ Protector ▪ Eje ▪ Coples ▪ Pantalla ▪ Cojinetes de Soporte del Eje ▪ o-Rings ▪ Limpiadores del Impulsor ▪ Difusores ▪ Impulsores ▪ Anillos de Elastómero 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cabeza ▪ Base ▪ Protector ▪ Eje ▪ Coples ▪ Cojinetes Radiales ▪ Sección de Inducción ▪ Sector de Separación/ Rotor ▪ Anillos de Elastómero 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cabeza ▪ Base ▪ Protector ▪ Eje ▪ Coples ▪ Ensamble de los Cojinetes del Impulsor ▪ Ensamble de la cámara ▪ Sellos mecánicos ▪ Válvulas de Alivio ▪ Cámara laberinto ▪ O-rings ▪ Aceite 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cabeza ▪ Base ▪ Protector ▪ Eje ▪ Coples ▪ Ensamble de los Cojinetes del Impulsor ▪ Ensamble de los cojinetes del Rotor ▪ Estator ▪ Ensamble del Conector del Pothead ▪ Rotores ▪ Aceite ▪ O-rings 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cabeza del Pozo ▪ Cable Principal ▪ Penetrador del Empacador ▪ Extensión del Cable al Motor ▪ Empalmes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Instrumentos de Fondo de Pozo

Tabla 3.4 – Componentes que Fallaron (Alhanati, 2007)

3.2.1.4. Descriptores de Falla

Los descriptores de falla, es una causa aparente u observada del Componente que Falló. Estas observaciones son generalmente hechas cuando el sistema BEC es desinstalado al llevar a cabo las pruebas de banco o mientras se desarma y se inspecciona. Hay algunos síntomas, o señales observadas de daño a los componentes del sistema o sus partes, los cuales pueden ser el resultado tanto directa o indirectamente, de la falla del sistema. Los “códigos de observación” se encuentran descritos en la API RP 11S1. En la Tabla 3.5 se enlistan muchas de las posibles Descripciones de Falla para los componentes principales del sistema BEC y sus partes asociadas. Debe notarse que algunos Descriptores de Falla pueden no ser aplicables para todas las partes; por ejemplo, la bomba no puede haber presentado un corto circuito.

Descriptor de Falla General	Descriptor de Falla Detallado		Comentarios
Falla Mecánica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fugas ▪ Falla en la prueba de presión ▪ Atascamiento (no rota) ▪ Perforaciones ▪ Rotura, quemadura ▪ Torcedura ▪ Pandeo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abolladura ▪ Rotura (separado, rallado, rasgado) ▪ Fracturado, agrietado ▪ Desconexión (pérdida) ▪ Torcido ▪ Colapsado ▪ Alineación u helgadura defectuosos 	Por lo regular, es el resultado de fuerza, presión o torque
Falla del Material	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Quemadura ▪ Corrosión (de todos los tipos) ▪ Desgaste ▪ Erosionado ▪ Agrietado 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hinchado ▪ Derretido ▪ Endurecido ▪ Deleznable ▪ Decolorado ▪ Sobrecaentado 	Por lo regular se relaciona a las características físicas del material tales como el color, la dureza, la terminación, etc.
Falla Eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Corto circuito ▪ Circuito abierto (desconexión, cable roto) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Falla de la potencia (ej. Alto voltaje) 	Fallas relacionadas con el suministro y la transmisión de la potencia eléctrica
Influencia Externa	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Depositación de parafinas ▪ Depositación de asfaltenos ▪ Depositación de solidos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Depositación de óxido ▪ Fluido contaminado 	Fallas causadas por eventos o sustancias externas, por ejemplo, el control, la instrumentación, parafinas, asfaltenos, corrosión, arena, sulfuro de hierro
Otros			
Desconocido			

Tabla 3.5 – Descriptores de Falla (Alhanati, 2007)

3.2.1.5. Causas de Falla

La causa de falla está asociada con las circunstancias durante el diseño, manufactura o uso, las cuales pudieron dar pie a la falla. Como describe la ISO14224, la identificación de la Causa de Falla normalmente “requiere más profundización en la investigación, para descubrir los errores humanos o factores organizacionales que fueron influencia en la falla del sistema, componente o parte, y la explicación técnica y secuencia de eventos que conducen a la modalidad, componente y descriptores de falla observados”. En la Tabla 3.6 se enlistan las posibles Causas de Falla para un sistema BEC.

Causa de Falla General	Causa de Falla Específica	Comentarios
Relacionado al Diseño	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Capacidad del equipo inadecuado ▪ Selección del material inadecuado ▪ Configuración del sistema inadecuada 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bombeo de flujo inadecuado o capacidad de altura, capacidad de la potencia del motor, etc. ▪ Equipo inadecuado ▪ Metalurgia inadecuada
Relacionado a la Fabricación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Problema de manufactura ▪ Control de calidad inadecuado 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fallas relacionadas con una fabricación inadecuada
Relacionado con el Diseño o el Transporte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Almacenamiento inadecuado ▪ Transporte inadecuado 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fallas relacionadas con un manejo inadecuado del equipo
Relacionado con la Instalación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Procedimiento de ensamblaje ▪ Procedimiento de instalación 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fallas relacionadas con una instalación inadecuada
Relacionado con la Operación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Procedimiento de operación ▪ Uso normal y falla 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fallas relacionada con procedimientos de operación inadecuados o entrenamiento insuficiente o inadecuado del personal
Relacionado con el Yacimiento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fluidos del yacimiento ▪ Rendimiento del yacimiento 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Condiciones del yacimiento inesperadas, dando lugar a incrustaciones de parafinas, asfaltos, arenas, etc. ▪ Condiciones de yacimiento inesperadas, dando lugar a una producción mayor o menor, con una RGA mayor o mayor producción de agua
Otro		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Clima, guerra, ataque terrorista, etc. ▪ Falla de los instrumentos o control
Desconocido		

Tabla 3.6 – Causas de Falla (Alhanati, 2007)

Aplicando la Nomenclatura Estándar. La mayoría del tiempo, los componentes de un evento o un registro de falla, por ejemplo, el modo, componente, descriptores y causas, se agrupan en una o dos clases de falla; como podría ser “razón para ser desinstalado: bajo flujo hacia la superficie debido a

el taponamiento de la bomba con asfaltenos”. De acuerdo con la propuesta estándar, este registro de falla puede ser descrito de la siguiente manera: Componente que Falló: Bomba; Modo de Falla; Bajo flujo hacia la superficie; Descriptores de Falla: Incrustaciones; y la Causa de Falla: yacimiento o fluidos.

3.2.2. Equipo Usado

Una situación difícil que es común en todos los sistemas de seguimiento de fallas de sistemas BEC es, como utilizar el equipo usado. Después de que un sistema BEC ha sido desinstalado, los componentes pueden ser enviados a las pruebas de banco. Si los componentes pasan las especificaciones requeridas, pueden ser clasificados como en condición de reutilización.

Alternativamente, los operadores y/o fabricantes pueden concluir que un componente o sistema BEC ha cumplido con un tiempo de vida “razonable”, “aceptable”, o “esperado” y por lo tanto, puede decidir no mandarlo a las pruebas de banco o a la inspección realizada después de ser desinstalado. En estos casos, el operador o fabricante puede decidir que el sistema o componente debe ser desarmado, o enviado a “reparación” o “renovación”.

Para el propósito de esta iniciativa de compartir la información en la industria a nivel mundial, nos encontramos con componentes que han sido desinstalados, sin embargo pueden reutilizarse, estos no han sido considerados como los Componentes que Fallaron, sin embargo deben ser etiquetados como componentes “usados”. Por otro lado, los componentes que han sido desarmados o mandados a reparación sin ninguna inspección deben seguir siendo tratados como Componentes que Fallaron, esto es debido a que han sido clasificados como no adecuados para su reutilización, o que no tienen la capacidad de llevar a cabo la función con la que cumplían, en su estado actual.

3.2.3. Sistemas en Operación

Otro tema que recurrentemente resulta controversial, tanto en el seguimiento de fallas de sistemas BEC como en el análisis es si se debe considerar y cómo considerar los sistemas que se encuentran en operación y los sistemas que fueron desinstalados por razones diferentes a fallas del sistema BEC. El problema de no incluir estos sistemas en el análisis es que en realidad no se puede medir el potencial de tiempo de vida útil de los sistemas, el cual podría mejorar las estadísticas.

En la Figura 3.2 se muestra la tendencia del Tiempo Medio a la Falla (MTTF) con el tiempo para un campo con pozos, con sistemas BEC, ambos, considerando y sin considerar los sistemas en operación. Debe notarse que mientras para uno se puede concluir que el tiempo de vida disminuye

cuando los sistemas en operación no son considerados, en el otro se hace la conclusión opuesta cuando los sistemas en operación se incluyen en el análisis.

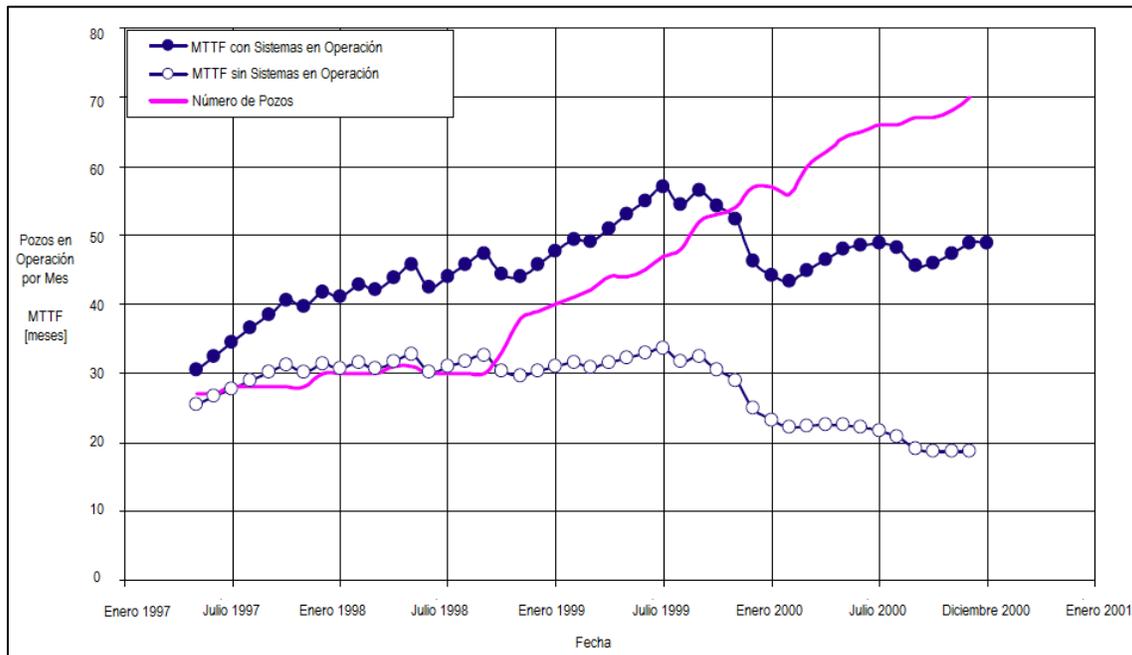


Figura 3.2 – Ejemplo de las Tendencias Estimadas del MTTF, Considerando y sin Considerar los Sistemas en Operación (Alhanati, 2007)

3.3. Nomenclatura Estándar de Fallas de Sistemas BEC Propuesta por C-FER Technologies para ESP-RIFTS JIP

La estandarización que se presentará a continuación fue preparada como parte de un trabajo que fue dirigido por C-FER Technologies, 1999 Inc. Para los participantes de ESP-RIFTS JIP. Todos los esfuerzos razonables fueron hechos para asegurar que el trabajo se ajustara de forma que fuera aceptado en las prácticas científicas, ingenieriles y ambientales.

3.3.1. Acerca de ESP-RIFTS JIP

El ESP- RIFTS Joint Industry Project, JIP (por sus siglas en inglés que significa Proyecto Conjunto de la Industria), se enfoca en el desarrollo de una red de información a nivel mundial de la industria de los Sistemas de Bombeo Electrocentrifugo Sumergible, (ESP, por sus siglas en inglés Electric Submersible Pump) y la Confiabilidad de la Información y los Sistemas de Monitoreo de Fallas (RIFTS, por sus siglas en inglés Reliability Information and Failure Tracking System), el cual pretende facilitar el proceso de compartir información acerca del Tiempo de Vida y las Fallas de los

sistemas BEC, y por lo tanto, la consistencia en el análisis que se lleve a cabo para los datos reunidos por diferentes compañías ya sea operadoras o de servicios.

El esfuerzo hecho, fue de acuerdo, tanto como sea posible, con la Norma Estándar Internacional ISO 14224 y la Norma API RP 11S1, las cuales ya fueron presentadas en rasgos generales anteriormente en este mismo capítulo. En general, las definiciones y los atributos de las clasificaciones de las fallas, fueron tomados de la ISO 14224, mientras que la nomenclatura para las observaciones de los componentes, partes y posibles paros fueron tomadas de la API 11S1.³

3.3.2. Alcance

Cada evento de falla de un sistema BEC puede ser identificado por un número de atributos, y cada uno de estos atributos descritos, nos proporciona una parte de información. Las diferentes categorías de los atributos que en conjunto constituyen un registro de fallas de sistemas BEC único, generalmente incluye:

- El identificador de pozo
- Fechas de instalación, inicio, falla y en la que fue desinstalado
- Monitoreo de la desviación del pozo e información de la terminación
- Información de producción y operación en el periodo de tiempo anterior a la falla (gastos, cabeza de pozo y temperatura y presión de fondo, amperaje, Hz, etc.)
- Información del equipo BEC (fabricante, tipo, modelo, número de serie, metalurgia, etc.)
- Información específica de la falla

Esta Nomenclatura Estándar de Falla para Sistemas BEC, nos da una terminología para poder así clasificar, reunir y almacenar información específica de las fallas de los sistemas BEC, por ejemplo: la información relacionada con las categorías mencionadas anteriormente, para el uso dentro de ESP-RIFTS JIP.

Aunque no se encuentra cubierto dentro de esta Estándar, la importancia del seguimiento de toda la información que ya fue mencionada. Debe tomarse en cuenta que mientras que en la API RS 11S1 solamente se cubren las observaciones con respecto a los paros, también reconoce la importancia de la recolección de otra información, mencionado lo anterior, nos referiremos a esta otra información como "Información Pertinente".³

Un sistema de seguimiento de fallas para los sistemas BEC debe influir registros no solo de los sistemas que fallaron, sino también de los sistemas que se encuentren en operación en ese momento. Esta es considerada como una buena práctica, y permite el análisis de la información

“censurada”. El sistema de seguimiento también debe incluir registros de los equipos de bombeo eléctrico sumergido que fueron detenidos por razones diferentes a una falla en el mismo sistema, tales como operaciones de mantenimiento, fugas en la tubería, cambios en el Sistema Artificial de Producción, etc.

Esta Estándar acerca de la Nomenclatura de Fallas de los Sistemas de Bombeo Electrocentrifugo Sumergido, sólo cubre el equipo subsuperficial del BEC, a cual nos referiremos, en lo sucesivo, como “Sistema BEC”. El equipo superficial y el suministro de energía, por lo tanto, están excluidos. La Figura 3.1, muestra a grandes rasgos un diagrama del equipo que se considera, y en la Figura 3.3, se muestra una jerarquía del equipo considerado.

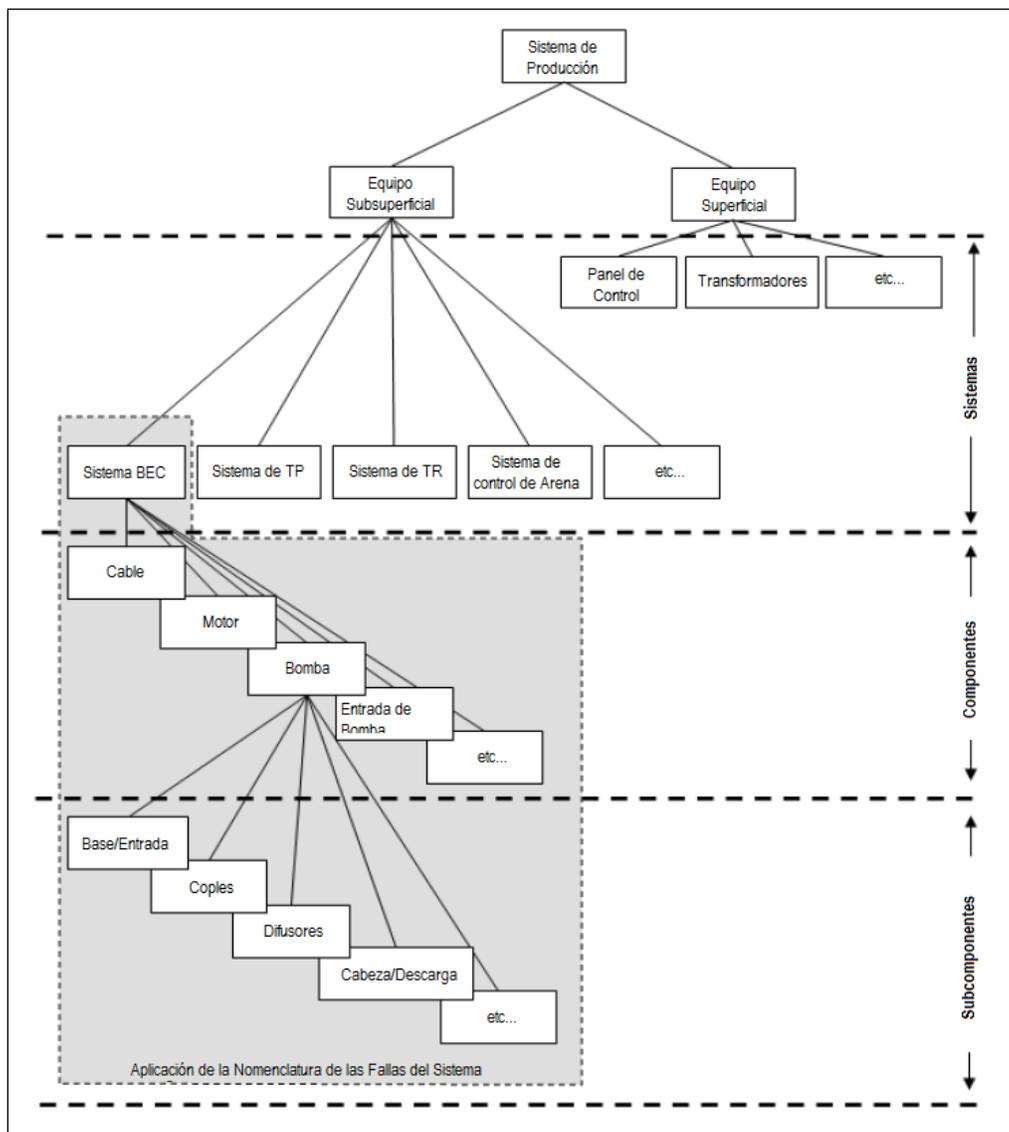


Figura 3.3 – Jerarquía del Equipo y Consideraciones de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)

Sin embargo, se recomienda que la información que sea relevante del equipo superficial tal como el tipo y modelo, así como la calidad de la potencia suministrada, sea incluida en el sistema de seguimiento de fallas de sistemas BEC.

3.3.3. Definiciones

Para propósitos de un mejor entendimiento de esta Nomenclatura Estándar, se presentan las siguientes defunciones de la ISO 14224, con algunas ligeras modificaciones, las cuales serán aplicadas:

- Falla: Fin de la capacidad de un componente de llevar a cabo su función requerida.
- Razón para ser Desinstalado: Motivo por el cual el Sistema BEC fue desinstalado.
- Componente que Falló: Cualquier parte, componente, dispositivo, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema que pueda ser considerado individualmente el cual haya fallado.
- Descriptor de Falla: La causa aparente u observada de falla (del Componente que Falló).
- Causa de Falla: las circunstancias durante el diseño, manufactura o uso las cuales dieron pie a la falla
- Estado de Operación: El estado del componente en el cual cumple con su función requerida.
- Función Requerida: Función o combinación de funciones de un componente las cuales son consideradas necesarias para que cumpla con su servicio requerido.
- Confiabilidad: La probabilidad de que un componente cumpla con su función requerida, bajo ciertas condiciones, para un intervalo de tiempo dado.

Las siguientes definiciones fueron añadidas a esta Nomenclatura Estándar específicamente para el monitoreo de la confiabilidad de los datos de sistemas BEC:

- Sistema BEC: El ensamblado de los componentes subsuperficiales que en conjunto comprenden una unidad de bombeo electrocentrifugo, por ejemplo: aquellos componentes que comprende el sistema mostrado en la Figura 3.1.
- Componente Primario que Falla: El Componente del Sistema BEC que Falla, el cual es responsable del inicio o la raíz de la falla del Sistema BEC.

3.3.4. Estructura de la Información de Falla

En la base de datos ESP-RIFTS, la información específica para las fallas de sistemas BEC debe ser clasificada de acuerdo a los siguientes atributos:

- Razón para ser Desinstalado
- Componente que Falló
- Componente Primario de Falla

- Descriptor de Falla y
- Causa de Falla

3.3.4.1. Razón Para Ser Desinstalado

Como ya fue definida, la Razón para ser Desinstalado, es el motivo por el que el Sistema BEC es desinstalado. La Razón para ser Desinstalado puede ser definida una vez que el operador ha determinado que el Sistema BEC debe ser desinstalado del pozo debido a probables fallas en el sistema de bombeo electrocentrifugo u otras circunstancias.

En la Tabla 3.7 se muestran las posibles Razones de Desinstalación del sistema de bombeo electrocentrifugo sumergido.

Razón Para Ser Desinstalado: General	Razón Para Ser Desinstalado: Especifica	Descripción
Medición o detección en los instrumentos de medición subsuperficiales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta temperatura en el embobinado del motor ▪ Mucha vibración ▪ Baja capacitancia dialéctica del aceite del motor ▪ Desconocido 	Sospecha de falla indicada por medidas de la instrumentación de medición subsuperficial
Eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta corriente ▪ Alto voltaje ▪ Baja corriente ▪ Baja impedancia o resistencia ▪ bajo voltaje ▪ Fase desbalanceada ▪ Corto circuito ▪ Desconocida 	Sospecha de falla indicada por medidas eléctricas anormales o eventos anormales, por ejemplo: fusibles fundidos
Flujo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Poco flujo a superficie ▪ No hay flujo a superficie ▪ Desconocida 	Sospecha de falla indicada por medidas de flujo anormales
Mantenimiento o Reparación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reparación en TR ▪ Reparación en TP ▪ Reparación del mecanismo de control de arena ▪ Reparación de algún otro componente subsuperficial ▪ Limpieza de pozo 	El sistema es desinstalado para poder llevar a cabo operaciones de mantenimiento en el pozo o en algún otro componente subsuperficial

Reterminación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cambio del sistema artificial de producción o redimensionamiento del BEC ▪ Cambio de pozo ▪ Cambio o modificación de la zona productora ▪ Estimulación 	El sistema BEC fue desinstalado para llevar a cabo operaciones de reterminación en el pozo
Suspensión	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abandono permanente ▪ Abandono temporal ▪ Shut in 	El sistema fue desinstalado debido a que la producción del pozo ha sido suspendida
Otras	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Otra ▪ Económica ▪ Toma de registros en el pozo 	El sistema fue desinstalado debido a que el pozo ha sido suspendido
Desconocida	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desconocida 	La razón para que el sistema fuera desinstalado, es desconocida

Tabla 3.7 – Posibles Razones de Desinstalación (C-FER Technologies, 2012)

3.3.4.2. Componente que Falló

El componente que falló es cualquier parte, componente, dispositivo, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema que puede ser considerado individualmente el cual ha fallado. Los componentes específicos en esta Nomenclatura Estándar son los componentes del sistema de bombeo electrocentrífugo, por ejemplo, sellos, bombas, entradas, cables y los subcomponentes, tales como, los impulsores, ejes, anillos.

Tal y como ya fue definido, un sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido, es el ensamblaje de los componentes del mismo sistema que se encuentran dentro de los límites que ya fueron definidos y mostrados en la Figura 3.1 y Figura 3.3. La Tabla 3.8 que se presenta a continuación, contiene una lista de los componentes principales, y subcomponentes asociados, los cuales pueden ser sujeto de falla.

Ensamble del Sistema BEC		
Componente	Subcomponente	
Cable BEC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cable principal ▪ Extensión del cable al motor ▪ Penetrador del empacador cola de cochino ▪ Conexión de la mufa 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Empalmes ▪ Penetrador de cabeza de pozo ▪ Subcomponentes desconocidos

Motor BEC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Base ▪ Uniones ▪ Válvula de llenado ▪ Filtro ▪ Cabeza ▪ Protector ▪ Guías para conectar motor ▪ Aceite 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ O-rings ▪ Cojinetes del Rotor ▪ Rotores ▪ Eje ▪ Estator ▪ Cojinete de Empuje ▪ Subcomponentes desconocidos ▪ Barniz protector
Bomba BEC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Base ▪ Uniones ▪ Difusores ▪ Cabeza o Descarga ▪ Protector ▪ Impulsores 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ O-rings ▪ Eje ▪ Cojinetes de soporte del Eje ▪ Elastómeros ▪ Impulsores rotatorios ▪ Subcomponentes desconocidos
Entrada a la Bomba BEC*	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Base ▪ Uniones ▪ Difusores ▪ Puertos de descarga ▪ Cabeza ▪ Protector ▪ Impulsores ▪ Sección de inducción 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Puertos de entrada ▪ O-rings ▪ Cojinetes radiales ▪ Sección de separación o rotor ▪ Eje ▪ Elastómeros ▪ Impulsores rotatorios ▪ Subcomponentes desconocidos
Sello BEC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bag chamber ▪ Base ▪ Difusores ▪ Puertos de descarga o Válvula de llenado ▪ Cabeza ▪ Protector ▪ Cámara tipo laberinto ▪ Mecanismo de sellado 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aceite ▪ O-rings ▪ Cojinetes radiales ▪ Válvulas de alivio ▪ Eje ▪ Cojinete de empuje ▪ Subcomponentes desconocidos
Otros componentes del sistema BEC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensores de fondo de pozo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cubierta o protector
Desconocido	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desconocido 	
* Incluyendo separadores de gas y manejadores de gas		

Tabla 3.8 – Posibles Componentes que Fallaron (C-FER Technologies, 2012)

Como se puede notar, hay mucha consistencia entre las partes incluidas en la Tabla 3.8, y los que considera la API RP 11S1. Las observaciones acerca de las condiciones de todos los componentes subsuperficiales del sistema BEC y sus partes asociadas, por ejemplo: los reportes de la forma en

que fueron desinstalados, deben ser incluidos en los informes de monitoreo del sistema, como se presentará en el subtema de Descriptores de Falla.

3.3.4.2.1 Componente Primario de Falla

Como ya se definió, el Componente Principal del Falla es el Componente del sistema BEC que falló, responsable del inicio de la falla del sistema BEC. Por lo tanto, esta es la raíz de la falla del sistema dada por una secuencia de eventos interrelacionados que dan lugar a la Falla del Sistema de Bombeo Electrocentrífugo. Así podemos entonces remontarnos en la secuencia de estos eventos que dieron lugar a la falla del sistema e identificar cual fue el componente que inició la falla, o componente primario de falla, que por lo regular para llegar a este punto, se requiere una investigación más profunda.

Sin embargo, hay que tener en cuenta también que el Componente Primario de Falla, no es necesariamente el que se encuentra más dañado en el sistema, tampoco es el componente por el cual la falla fue evidente en el equipo subsuperficial o la Razón para ser Desinstalado.

3.3.4.3 Descriptores de Falla

Los considerados como descriptores de falla, son aquellas causas aparentemente observadas de la falla del Componente que Falló. Estas observaciones probablemente son hechas durante la desinstalación del equipo subsuperficial del sistema de bombeo eléctrico sumergido, o mediante los análisis llevados a cabo posteriormente. Siempre encontraremos algunos síntomas principales, o señales perceptibles del daño de los componentes del sistema BEC o sus partes, las cuales pueden haber resultado en la falla del sistema. Los “códigos de observación” descritos en la API RP 11S1, mostrados en la Tabla 3.9, donde se enlistan los posibles Descriptores de Falla para los componentes principales del sistema BEC y sus partes asociadas. Debe tomarse en cuenta que algunos de los Descriptores de Falla pueden no ser aplicables para algunas de las partes.

Categoría	Descriptores de Falla		Comentarios
Eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Falla de la prueba hipot ▪ Impedancia o resistencia alta ▪ Impedancia o resistencia baja 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Circuito abierto ▪ Corto circuito ▪ Fase desbalanceada 	Fallas relacionadas con el suministro y la transmisión de energía eléctrica
Externa	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cubierta Externa ▪ Cubierta Interna ▪ Contaminación 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Atascado al cerrar ▪ Atascado al abrir ▪ Incrustaciones 	Fallas causadas por eventos externos o sustancias, por ejemplo: parafinas, asfaltenos, corrosión, arena, ácido sulfhídrico

Material	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Frágil ▪ Quemado ▪ Corroído ▪ Decolorado ▪ Erosionado/dañado por presión 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Endurecido ▪ Derretido ▪ Sobrecalentado ▪ Hinchado ▪ Deteriorado 	Por lo regular, relacionadas con las características físicas del material, por ejemplo: el color, la dureza, etc.
Mecánica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Doblado ▪ Roto o fracturado ▪ Pandeado ▪ Reventado o roto ▪ Colapsado ▪ Agrietado ▪ Dañado ▪ Abollado ▪ Desconectado ▪ Falla en la prueba de presión ▪ Falla en la prueba de vibración ▪ Alineación u holgura defectuosa 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fugas ▪ Flojo o girando ▪ Baja eficiencia ▪ Perforado ▪ Rayado o raspado ▪ Aplastado ▪ Atascado ▪ Rasgado ▪ Torcido ▪ Vibración o marcas de fricción ▪ Vibración o Desbalanceado 	Por lo regular estas fallas, son el resultado de fuerza, presión o torque
Otra	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rechazo de mantenimiento ▪ Pérdida 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Otras 	
Desconocida	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desconocida 		

Tabla 3.9 – Posibles Descriptores de Falla (C-FER Technologies, 2012)

3.3.4.4. Causas de Falla

La Causa de Falla está asociada a las circunstancias durante el diseño, la manufactura o el uso, los cuales han dado lugar a la falla. Como se menciona en la ISO 14224, la identificación de la Causa de Falla por lo regular requiere investigación más a fondo para poder identificar los factores tanto humanos u organizacionales, como la causa técnica. La siguiente Tabla 3.10, muestra las posibles Causas de Falla.

Causa de Falla: General	Causa de Falla: Específica	Comentarios
Diseño o Selección del Sistema	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Selección del equipo ▪ Selección de materiales del equipo ▪ Uso de información inadecuada para el diseño y selección ▪ Selección de equipo - Capacidad de presiones y Capacidad volumétrica ▪ Configuración del Sistema 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diseño o selección incluyendo el uso inadecuado de información o errores en los cálculos ▪ Capacidad o flujo de la bomba, capacidad de potencia del motor, etc., inadecuados ▪ Selección inadecuada del equipo ▪ Selección inadecuada del material

<p>Manufactura</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pruebas de equipo ▪ Problema de fabricación ▪ Selección de materiales ▪ Control de calidad ▪ Diseño mecánico 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diseño mecánico de partes o componentes inapropiado ▪ Fabricación o ensamblado de partes o componentes inapropiado ▪ Pruebas de equipo o control de calidad inapropiados
<p>Almacenamiento y Transporte</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Empacamiento o contención ▪ Almacenamiento ▪ Transporte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Manejo inapropiado o inadecuado del equipo durante su almacenamiento o transporte
<p>Instalación</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema de ensamblaje ▪ limpieza del pozo ▪ Instalación – Servicio al BEC ▪ Instalación – Equipo de instalación ▪ Daño al reiniciar ▪ Equipo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Procedimientos inadecuados durante la instalación o la preparación del pozo ▪ Sistema de ensamblaje inadecuado, incluyendo los empalmes de cable y conexiones de bridas
<p>Operación</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Método de recuperación mejorada o estrategia de producción ▪ Monitoreo inadecuado ▪ Procedimiento de operación ▪ Operación de otros pozos en el campo ▪ Tratamiento de pozo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Procedimientos de operación inapropiados o monitoreo inadecuado ▪ Prácticas de administración de yacimiento
<p>Yacimientos o Fluidos</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Asfaltenos ▪ Temperatura de fondo de pozo ▪ Gas libre ▪ Arenas ▪ Falla del yacimiento ▪ Incrustaciones ▪ Parafinas ▪ Producción de Agua ▪ Alta afluencia ▪ Baja o no afluencia 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Condiciones inesperadas del yacimiento dando lugar a: <ol style="list-style-type: none"> 1. Taponamiento por incrustaciones, parafinas, asfaltenos, arena, etc. 2. Productividad más alta o baja de lo esperada, RGA mayores o producción de agua
<p>Terminación</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fallas en los disparos, liner o pozo en pozo descubierto ▪ Control de Arena inapropiado o falló ▪ Falla de la terminación del pozo ▪ No asociado a fallas del equipo subsuperficial del BEC 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fallas de la terminación de pozo, por ejemplo: TR, TP, empacador, válvula de seguridad, liner.

Otra	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Clima u oceanografía ▪ Desastre natural ▪ Interrupción de suministro de corriente o alumbrado ▪ Baja calidad de potencia eléctrica ▪ Falla del equipo superficial ▪ Sabotaje o vandalismo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Clima, guerra, ataques terroristas, etc. ▪ Fallas en la instrumentación de control
Desconocida	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desconocida ▪ Normal 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Causa de falla desconocida
Uso y Desinstalación Normales o Esperados	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Uso y Desinstalación Normales o Esperados 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La vida útil del equipo alcanzó o superó sus expectativas
Limitación Tecnológica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Limitación Tecnológica 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La tecnología BEC actual no es capaz de operar confiablemente para una operación específica
Construcción del Pozo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No hay sección tangencial 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El pozo no fue diseñado o perforado para el uso de un sistema BEC

Tabla 3.10 – Posibles Causas de Falla (C-FER Technologies, 2012)

3.3.5. Determinando Cuando la Falla Ocurre

La falla tiene lugar cuando un componente ha perdido su capacidad de llevar a cabo su Función Requerida. Por lo que se encuentra implícito que deben conocer las Funciones Requeridas que han sido claramente establecidas, lo cual involucra la identificación de tanto las funciones necesarias para poder cumplir con el funcionamiento requerido, como el nivel esperado de desempeño de cada función. El nivel esperado de desempeño define el límite entre las condiciones de operación satisfactorias y no satisfactorias y generalmente será diferente entre operaciones, aplicaciones e incluso en la misma aplicación conforme cambian las condiciones con el tiempo.

En la Figura 3.4 se muestra un diagrama de bloques del sistema de bombeo electrocentrífugo con sus componentes principales y sus correspondientes funciones requeridas. Una de las Funciones Requeridas principales de un sistema BEC es generar presión y flujo. Otras funciones como las que se muestran en la Figura 3.4, como por ejemplo la compresión de gas pueden ser o no consideradas como requeridas, dependiendo de la configuración u aplicación del sistema BEC.

Es importante que todas las Funciones Requeridas y sus niveles esperados de desempeño se encuentren claramente definidos y entendidos para poder permitir al personal de operación la identificación de las Fallas.

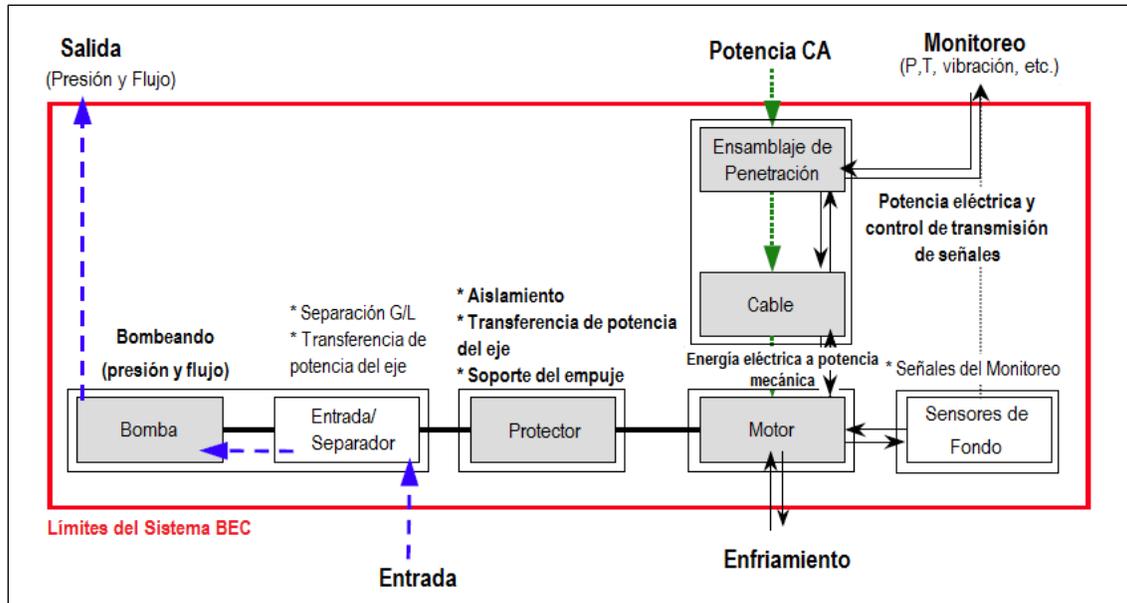


Figura 3.4 – Diagrama de Bloques del Sistema de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido (C-FER Technologies, 2012)

3.3.5.1. Fallas del Sistema BEC

Una falla del sistema BEC, es cuando el sistema ha perdido su capacidad de llevar a cabo sus Funciones Requeridas. En este caso, se identificó como la evidencia principal de la falla del equipo subsuperficial y fue la Razón para ser Desinstalado.

3.3.5.2. Condiciones de los Componentes y las Partes del Sistema BEC

Para propósitos del proyecto de ESP-RIFTS, “perspectiva de vida útil” es usado para describir la condición de los componentes y las partes del sistema BEC. Por lo tanto, los componentes y las partes son consideradas como no reusables cuando cualquiera de las siguientes dos condiciones se cumple: el componente falla mientras se encuentra en operación o si se considera que el componente se encuentra en condiciones inadecuadas en su estado actual para su reutilización para llevar a cabo su función.

Por lo tanto, los componentes que son considerados como “no reutilizables” incluyen:

- Componentes que hayan fallado durante la operación, por ejemplo: perdió su capacidad de llevar a cabo su función requerida
- Componentes que han sido sometidos en pruebas de fábrica o inspecciones y han fallado en cumplir con las especificaciones requeridas

- Componentes que requieren reparación o han sido desinstalados y requieren reparaciones, de forma que no pueden ser reutilizados en su estado actual
- Componentes que no han fallado durante la operación, que no han sido sometidos a pruebas de fábrica o inspecciones pero se encuentran clasificados como no reutilizables. Estos componentes pueden ser descartados simplemente porque se considera que han alcanzado un tiempo de vida razonable o se cree que se ha reducido su confiabilidad.

Los componentes o partes que no han fallado durante la operación, que no han fallado durante pruebas de fábrica o inspecciones, que han cumplido con las especificaciones requeridas, y son considerados en condiciones apropiadas para su reutilización, entonces se consideran como Reutilizables. Esto incluye componentes y partes que solo requieren el mantenimiento mínimo regular antes de su reutilización. Un ejemplo de mantenimiento mínimo regular puede incluir, pero también de forma limitada, cambios de aceite, el lavado o secado y la limpieza o pintura del motor BEC o sellos del sistema BEC.

3.3.6. Pasos Involucrados en la Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS

En esta sección describiremos como aplicar la Nomenclatura Estándar de Fallas para Sistemas de Bombeo Electrocentrifugo Sumergido para la determinación de los elementos a los que se le atribuye la falla para poder recopilar la información de Fallas en Sistemas BEC.

El sistema de seguimiento de fallas para los sistemas de bombeo electrocentrifugo, debe llevar un registro de los sistemas BEC que han fallado, sistemas BEC que se encuentren actualmente en operación y sistemas BEC que fueron detenidos o desinstalados por razones diferentes a una falla en el sistema de bombeo eléctrico sumergido. Por lo que se presentarán la Figura 3.5 y la Figura 3.6 presentan unos diagramas de flujo que ilustran de mejor manera como debe ser recopilada la información acerca de la atribución de las fallas para todas las condiciones anteriores. Los pasos que se muestran en los diagramas de flujo, se describen a continuación:

3.3.6.1. Paso 1: Establecimiento de los Valores Iniciales de la Atribución de las Fallas

Un periodo de producción comienza cuando el sistema BEC es instalado. Antes de que el sistema sea iniciado en funcionamiento, no habrá información con respecto a los atributos de la falla mientras el sistema de bombeo electrocentrifugo se encuentre en un estado funcional. Por lo tanto, en la pregunta: ¿La falla se atribuye a una falla del sistema BEC?, debe responderse “No”, mientras que todas las demás opciones deben encontrarse en blanco.

3.3.6.2. Paso 2: Determinando la Razón Para ser Desinstalado

Las atribuciones de falla deben de ser determinadas justo en el momento en el que parezca que el sistema BEC ha fallado o cuando sea detenido por otra razón diferente a una falla del mismo sistema. En este punto, debe tomarse la decisión acerca de quitar o no el sistema de bombeo electrocentrífugo del pozo, y la Razón para ser Desinstalado generalmente será notoria y disponible para poder ser reportada. Las características de la falla: Razón para ser Desinstalado: General y Razón para ser Desinstalado: Específica, deben ser asignados de acuerdo con la Tabla 3.7.

También debe ser considerado que una falla no necesariamente termina en la desinstalación del sistema BEC del pozo o siquiera en el paro de producción; por lo que un sistema de bombeo eléctrico sumergible puede haber fallado y seguir en operación. Sin embargo, si se sospecha de una falla del sistema BEC, la sospecha de falla también debe ser registrada.

3.3.6.3. Paso 3: Determinando Si el Sistema BEC Falló

1. *El Sistema de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido parece haber fallado*

Si el sistema BEC parece haber fallado, en la pregunta: ¿La falla se atribuye a una falla del sistema BEC?, debe responderse, tentativamente, “Sí”. Este atributo puede ser cambiado basándose en los resultados de la investigación de falla, de acuerdo con el Paso 5.

Hasta que el sistema BEC sea desinstalado del pozo y se lleve a cabo la investigación de falla, el Componente Primario de Falla y la Causa de Falla serán, por lo general, desconocidos. Para estos dos atributos de falla, tanto para el Componente Primario de Falla como para la Causa de Falla: General y Causa de Falla: Específica deben ponerse en todas las opciones “Desconocido”. Y Continuar con el Paso 4 seguido por la parte 1 del Paso 5.

2. *El Sistema de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido fue Detenido por Alguna Otra Razón*

Si el sistema BEC es detenido por razones diferentes que la sospecha de falla del mismo sistema, la pregunta: ¿La falla se atribuye a una falla del sistema BEC?, debe dejarse como: “No”. De manera similar, los atributos de falla: Componente Primario de Falla como para la Causa de Falla: General y Causa de Falla: Específica, deben dejarse todos en blanco. Continuar con el Paso 4, seguido por la parte 2 del Paso 5.

3.3.6.4. Paso 4: Determinando las Condiciones de los Componentes, los Componentes que Fallaron y los Descriptores de Falla

En general, los Componentes que Fallaron y sus Descriptores de Falla asociados no deben ser aparentes hasta después de que el sistema haya sido desinstalado del pozo. En muchos casos, los Componentes que Fallaron y sus Descriptores de Falla asociados solo pueden ser evidentes después de una inspección más a fondo y/o pruebas. Sin embargo, después de que el sistema de bombeo eléctrico sumergible ha sido detenido y hasta que el sistema BEC haya sido desinstalado del pozo, estos atributos de falla, como por ejemplo: condición del motor al ser desinstalado y Motor: Descriptor de Falla Primario), deben ser llenados con “Desconocido”.

Basándose en las observaciones hechas durante la desinstalación y las inspecciones posteriores, las condiciones del componente como por ejemplo: la condición del motor al ser desinstalado, deben ser puestas como “Reutilizable” o “No Reutilizable” usando la nomenclatura para la “perspectiva de tiempo de vida” que fue descrita en el subtema 3.3.5 del presente trabajo.

De la misma forma, basándose en las observaciones hechas durante la desinstalación y las inspecciones posteriores, al Descriptor de Falla Primario y los Descriptores de Falla Secundarios de cada sistema de bombeo electrocentrifugo pueden asignárseles valores de acuerdo con los mostrados en la Tabla 3.9. Los descriptores que presenten el mayor daño o los que sean predominantes, son los que deben ser denominados como Descriptor de Falla Primario. Debe tenerse en cuenta que el Descriptor de Falla Primario puede ser asignado a un componente aunque haya sido considerado como reusable, por ejemplo: La bomba se ha usado por un periodo largo de tiempo y se encuentra desgastada, sin embargo sigue cumpliendo con su función de manera aceptable.

3.3.6.5. Paso 5: Determinando el Componente Primario de Falla y la Causa de Falla

1. El Sistema de Bombeo Electrocentrifugo Sumergido parece haber fallado

Siempre va a ser necesario algún nivel de investigación para poder determinar el Componente Primario de Falla y la Causa de Falla, así como para definir la acción necesaria para remediar el problema y para la prevención de fallas de este tipo en el futuro. Hasta que se halla llevado a cabo la investigación acerca de la falla, los atributos de falla: Componente Primario de Falla, Causa de Falla: General y Causa de Falla: Específica, deben dejarse en la opción “Desconocido”.

Si el sistema BEC ha sido detenido a causa de una sospecha de falla del mismo sistema de bombeo eléctrico sumergido, en la pregunta: ¿La falla se atribuye a una falla del sistema BEC?, debió haberse respondido, tentativamente, “Sí”. En el Paso 4. Sin embargo, si durante la investigación se encuentra que el sistema BEC se encontraba funcionando de acuerdo a sus Funciones Requeridas. Entonces en la pregunta: ¿La falla se atribuye a una falla del sistema BEC?, debe responderse, “No”. Además de que los atributos de falla: Componente Primario de Falla y Causa de Falla deben de ser cambiados. El Componente Primario de Falla, se puede poner como “Falla no relacionada al sistema BEC” o dejarse en blanco, y la Causa de Falla puede dejarse en blanco. Si la opción de Componente Primario de Falla se puso “Falla no relacionada al sistema BEC”, el Descriptor de Falla Primario y el Descriptor de Falla Secundario deben de ser descritos especificando que el componente que falló, no es parte del Sistema BEC. Por ejemplo, el sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido, puede parecer haber fallado y puede desinstalarse a causa de una baja producción en la superficie. Sin embargo, si se encuentra que la baja producción era a causa de un pozo en la tubería de producción y que el sistema BEC se encuentra en buenas condiciones para seguir operando, entonces no fue el sistema de bombeo Eléctrocentrífugo lo que falló.

No obstante, si el componente que falló no es parte del sistema BEC, por ejemplo: el sistema de control de arena, pero resulta en una falla del sistema BEC, entonces en el campo: ¿La falla se atribuye a una falla del sistema BEC?, debe responderse, “Sí”. Además, en este caso, el Componente Primario de Falla, es un componente del sistema de bombeo electrocentrífugo.

Generalmente, una vez que se ha llevado a cabo la investigación acerca de la falla, el Componente Primario de Falla puede ser determinado en base a la correspondiente parte de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS, junto con sus Descriptores de Falla tanto Primario como Secundario, correspondientes. Los atributos de falla: Causa de Falla: General y Causa de Falla: Específica, deben ser asignados de acuerdo a la Tabla 3.10, que es la correspondiente.

2. *El Sistema de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido fue Detenido por Alguna Otra Razón*

Si el sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido fue detenido por una razón diferente a una sospecha de Falla en el Sistema BEC, por lo general no se hará una investigación más profunda al respecto acerca de la falla y por consecuencia, no habrá Componente Primario de Falla o Causa de Falla. Por lo que estos campos deben dejarse en blanco.

3.3.6.6. Diagrama de Flujo de los Pasos Involucrados en la Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS

A continuación, en la Figura 3.5 y la Figura 3.6 se presentarán los diagramas de flujo correspondientes a los procedimientos descritos anteriormente, y en el Apéndice 3.1 de este trabajo de tesis, se encuentran ejemplos de la aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP- RIFTS.

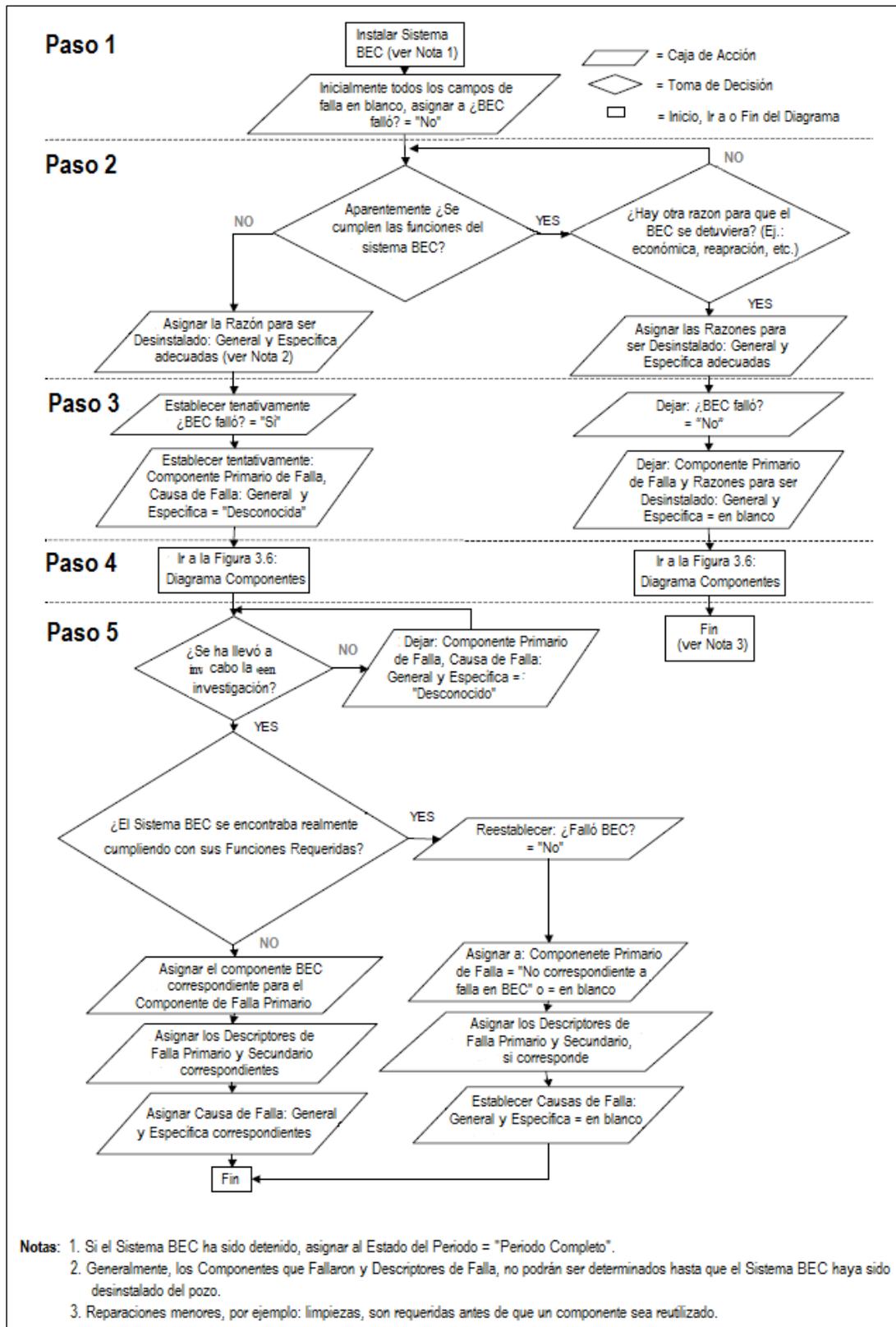


Figura 3.5 – Pasos para la Aplicación de la Nomenclatura Estándar de Falla de ESP-RIFTS: Diagrama de Flujo del Sistema (Granados-Pérez, 2015)

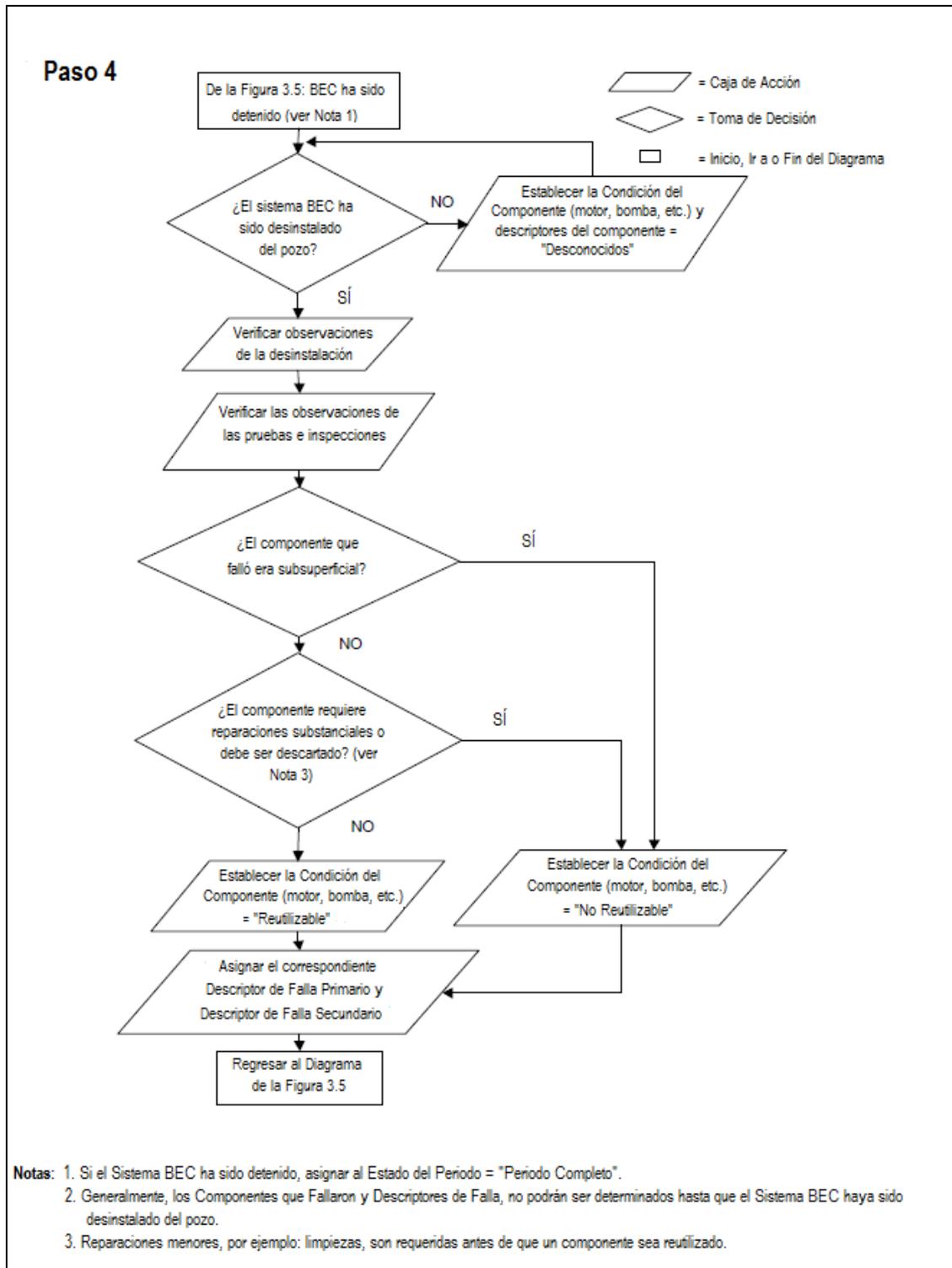


Figura 3.6 – Pasos para la Aplicación de la Nomenclatura Estándar de Falla de ESP-RIFTS: Diagrama de Flujo de los Componentes (Granados-Pérez, 2015)

Capítulo IV: Análisis de Fallas de Sistemas de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido

4.1. Definición de Falla

La ISO 14224: Industrias de Petróleo y Gas Natural: Recopilación e Intercambio de Información de Confiabilidad y Mantenimiento del Equipo, define falla como: el término de la capacidad de un componente para realizar sus funciones requeridas.¹

4.1.1. Fallas de Sistemas BEC

Como ya fue presentado en el Capítulo III de esta tesis, la base de datos llamada ESP-RIFT fue creada para poder crear una encuesta de fallas en los sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido. El objetivo del proyecto ESP RIFTS es de mejorar significativamente la vida útil de los sistemas BEC. El proyecto ESP- RIFTS se encuentra actualmente en la Fase XV. Su base de datos contiene actualmente información de aproximadamente 105,600 instalaciones BEC en operaciones a nivel mundial.

Antes de presentar los resultados de los análisis de falla que son llevados a cabo por lo regular después de que el sistema BEC es desinstalado, se presenta una explicación de la incertidumbre de los resultados y las especificaciones de la consulta. Cada uno de los 13 operadores, puede tener diferentes opiniones de lo que implica una falla, ya sea de cualquier tipo. Esto puede implicar que tal vez algunos operadores opinen que una falla de terminación es una falla de instalación y viceversa. Lo que significa que no se puede asegurar que la información sea completamente precisa, como es explicado con mayor detalle en el Capítulo III.

4.2. Fallas Comunes en Sistemas BEC

4.2.1. Fallas Eléctricas

En la mayoría de los casos la causa principal de las fallas eléctricas no está relacionada con el sistema eléctrico como podría pensarse. Sin embargo, los problemas estrictamente eléctricos también pueden dar pie a fallas. Ya que el sistema eléctrico está conectado en serie, el componente más débil puede ser el factor crítico:

- a. Problemas con la fuente de energía incluyendo fases desbalanceadas, picos de tensión, presencia de armónicos, caída de rayos, etc. y sus efectos principales son el sobrecalentamiento del motor BEC y el cable.
- b. Los controladores del motor generalmente son seguros en la operación normal, sin embargo bajo condiciones extremas (altas o bajas temperaturas, mucha humedad, etc.) puede fallar.

Como ya se describe en el Apéndice 3.1, existen muchos problemas eléctricos relacionados con cortos circuitos los cuales pueden tener causas muy diversas junto con sus raíces de causa totalmente diferentes entre sí. El motor puede tener un corto circuito debido a alguna de las siguientes razones; el aceite no está limpio (contaminado con agua, con partículas), una gran cantidad de ruido del transformador puede provocar el desgaste del aislamiento y esto puede contaminar al aceite. ²

Por otro lado, los cables pueden sufrir un corto circuito debido a las descargas eléctricas en la parte del aislamiento. Este fenómeno es principalmente observado cuando hay altos voltajes. Sobre todo hay que tener en cuenta también cuando los cables usados en el sistema BEC no cumplen con las especificaciones de la Comisión Internacional de Electrotécnica (IEC, International Electrotechnical Commission), respecto a las descargas eléctricas.

Y que las causas de los cortos circuitos pueden ser muchas y muy diferentes, algunas de las cuales son:

- Baja calidad del aislamiento del cable
- Irrupción de agua
- Exceso de ruido proveniente del transformador causando daño en el cable.

Si el cable que se encuentra dentro del pozo presenta fallas eléctricas, lo cual, inmediatamente va a provocar un apagón del sistema.

Las posibles causas de la falla del cable son:

- Daño mecánico (aplaste, cortaduras, etc.) durante las operaciones de introducción del equipo
- Corrosión
- Deterioro del aislamiento debido a las altas temperaturas o los gases provenientes del yacimiento
- Las corrientes por encima del límite de diseño pueden incrementar la temperatura del cable provocando fallas en el aislamiento.

4.2.2. Fallas en la Bomba

Los sistemas BEC operan en ambientes difíciles y se encuentran sujetos a los efectos perjudiciales de la corriente del pozo. Los cojinetes de la bomba se encuentran lubricados por los fluidos bombeados, por lo tanto su tiempo de vida es mucho más corto que el de los cojinetes del motor, los cuales están lubricados por aceite de alta calidad.

Las principales causas de las fallas de la bomba se encuentran enlistadas a continuación:

- El desgaste por el empuje “hacia arriba”, se presenta cuando la bomba está operando a gastos mayores que el gasto máximo recomendado. En las bombas tipo flotante, los impulsores se encuentran rozando con los difusores lo cual puede provocar una sobrecarga que puede provocar la destrucción de una etapa de la bomba. La producción de sólidos acelera este proceso.
- Desgaste por empuje “hacia abajo” por lo regular ocurre cuando la bomba opera con gastos menores que el gasto mínimo recomendado y también es acelerado por la producción de sólidos.
- Las incrustaciones de la formación pueden incrustarse o incluso bloquear las etapas de la bomba.

4.2.3. Fallas en el Motor

La mayoría de las fallas en el motor, son de naturaleza eléctrica. Sin embargo, muchas otras condiciones pueden ser la causa primaria de la falla del motor:

- La sobrecarga del motor causa el calentamiento del cableado del motor; lo cual puede causar daño o la quemadura del motor. Regularmente la sobrecarga es causada por:
 - Densidad relativa del fluido del yacimiento alta, lo cual puede causar que la altura dinámica total sea mayor de la considerada
 - Fallas de las bombas que dan como resultado el aumento de los requerimientos de potencia
 - Voltaje irregular (alto, bajo o desbalanceado) en la terminal del motor
- Las fugas en los protectores permiten la entrada de los fluidos del yacimiento al motor causando una contaminación gradual del aceite del motor, lo cual puede causar un corto circuito y quemadura del mismo.
- Enfriamiento insuficiente. El enfriamiento es insuficiente cuando; la velocidad de flujo después del motor, es menor que la requerida para una transferencia del calor generado por el motor eficiente.

4.2.4. Fallas en el Sello

Las fallas en la sección de sello pueden ser atribuidas a los siguientes factores:

- La ruptura o el daño de los sellos mecánicos en esta sección pueden provocar que los fluidos del yacimiento se filtren dentro del motor, y esto puede ser resultado de las vibraciones transmitidas a la sección por parte de la bomba cuando ya se encuentra muy desgastada y la selección inadecuada ya sea del equipo o de las instalaciones
- El cojinete principal del sistema en el sello puede fallar cuando la bomba opera con empuje, ya sea hacia abajo o hacia arriba, excesivos.
- Los sellos tipo laberinto pueden fallar en pozos desviados (más de 30 grados).

4.2.5. Fallas en el Eje

Las fallas típicas en el eje se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Fallas en la capacidad de torsión se presentan cuando se excede el límite de torque del eje. La deformación puede ser permanente e incluso se puede llegar a romper el eje.
- El giro de torsión en el eje absorbe la energía mientras se inicia el sistema, si el giro de torsión es mayor que el permitido en las partes conectadas, estas partes pueden dañarse.
- El desgaste del cojinete, es más común cuando se están produciendo sólidos y por lo tanto la holgura de los mismos aumenta. Esto va a provocar que la estabilidad en el eje disminuya y por lo tanto las vibraciones van a aumentar.
- La pérdida de lubricación alrededor de los cojinetes de la bomba puede ser provocada por el roce metal-metal, lo cual hace que las temperaturas aumenten, y los materiales de los cojinetes se deshagan y peguen en una parte, dejando sin protección al eje expuesto a daños o ruptura.

4.3. Análisis de las Fallas de Acuerdo a su Causa

Aunque existe la Nomenclatura Estándar para los miembros de ESP-RIFT, no todos los miembros proporcionan el conjunto de datos general que se requiere, como fue presentado en el Capítulo III, también existe la posibilidad de cumplir con el Conjunto Mínimo de Datos, por lo que la información acerca de la falla varía en cuanto a calidad y precisión. Por otro lado también debemos tener en cuenta que la Nomenclatura Estándar y la Base de Datos de ESP-RIFTS sólo consideran los componentes subsuperficiales del sistema BEC, por lo tanto el equipo de suministro de energía eléctrica se encuentra excluido.

Existen 5 diferentes niveles en los cuales se puede calificar la base de datos de los miembros, los cuales son los siguientes:

- a. Calificada. Son los datos que cumplen relativamente con el Conjunto Mínimo de Datos y han sido calificados por C-FER Technologies y los miembros de ESP-RIFTS.
- b. Incompleta. – No se cuenta con fechas o Información de Falla. Datos que no cuentan con Tiempo de Operación, fechas de inicio del sistema y fechas de desinstalación o paro del sistema, además de información de la falla como por ejemplo: Se desconoce si el sistema BEC realmente falló o cuánto tiempo ha estado en operación.
- c. Incompleta. Datos que están muy incompletos en relación con el Conjunto Mínimo de Datos, pero que el miembro pretende o tiene la oportunidad de completar.
- d. Histórico. Datos históricos incompletos que además, no podrán ser completados debido a que la información se encuentra perdida o no está disponible.
- e. Datos Inconsistentes. Son datos que parecen ser inconsistentes o incorrectos y por lo tanto requieren de investigación más detallada ya sea por parte de C-FER Technologies o por el miembro de ESP-RIFTS, con el fin de poder corregir la información.

La confiabilidad de la información depende en gran manera de la calidad de datos recolectados. La calidad de estos datos es definida por la ISO 14224, en específico de la siguiente manera:

- Información completa en relación a la especificación
- Consistente de acuerdo al conjunto de definiciones y formatos ya definidos
- Precisión de la información con respecto a la instalación actual que se describe

Estas tres características son cubiertas por ESP-RIFTS de la siguiente manera:

- a. Que esté completa se checa comparando la información del periodo de producción con el Conjunto de Datos Mínimo. Un periodo de producción que cubre con el 100% de los parámetros requeridos en el Conjunto Mínimo de Datos, es considerado como completo.
- b. La consistencia de la información se checa al comparar la información del periodo de producción con:
 - Cumpla con la terminología descrita en la Nomenclatura Estándar, por ejemplo: que el Componente que Falló se encuentre considerado entre los posibles componentes que podrían fallar en la Nomenclatura Estándar.
 - Otra información con respecto a los periodos de producción, por ejemplo: Tiempo de Vida Útil.
 - Datos anteriores de otros periodos de producción, por ejemplo: Los tiempos coincidan, del anterior con el actual.
 - Leyes básicas de ingeniería y ciencias, por ejemplo: El gasto de líquido bombeado se encuentra dentro del rango del sistema BEC.

- Los datos proporcionados se encuentran dentro de rangos posibles y creíbles, por ejemplo:
La producción de agua se encuentre entre valores de 0 a 100%
- c. La precisión de los datos es checada al comparar la información del periodo de producción con la información original que fue provista por el miembro de ESP-RIFTS.

De acuerdo con ESP-RIFTS, existe una base de datos de retroalimentación la cual puede ser utilizada por los miembros para detectar posibles errores, las herramientas que pueden utilizar para mejorar la calidad de sus datos son las siguientes:

- Memorandos de procesamiento de información. Estos memorandos de procesamiento de datos son creados después de que la información ha sido calificada y se han encontrado inconsistencias y diferentes supuestos sobre esta información.
- Carta de Reporte de ESP-RIFTS. La carta de reporte es generada después de que se indica que tan completa es la información que ha sido actualizada en la base de datos.
- Tabla de Estado de la Información. Esta tabla es actualizada después de cada actualización de la información, en la cual se indica en qué etapa del procedimiento se encuentra cierta información que provee alguno de los miembros.

El análisis que se lleva a cabo en la base de datos considera información calificada la cual es lo más precisa posible ya que se descartan todos aquellos datos que son inconsistentes o se encuentran incompletos. En la Tabla 4.1, se muestra la clasificación de los datos de los resultados de los análisis de la base de datos de ESP-RIFTS con la cual se trabajará en la sección siguiente, está basada en información de 6 compañías, 8 divisiones de los datos, 17 campos petroleros, 135 pozos y 211 sistemas de bombeo electrocentrifugo sumergido.

Clasificación de Datos	Número de Datos
Datos de Compañías	6
Datos de Divisiones	8
Datos de Campos	17
Datos de Pozos	135
Datos de Periodo de Producción	211

Tabla 4.1 – Clasificación de los Datos de Consulta (Stale, 2010)

A partir de este análisis de resultados el cual será tomado podremos entender de mejor forma como es que el sistema BEC puede fallar dentro de ciertas circunstancias, las cuales se presentan en un porcentaje de rango de falla ilustradas en la Figura 4.1. Por lo que es importante recordar la definición de Rango de Falla, que se encuentra descrita a mayor detalle en el Capítulo II, el cual

ESP-RIFTS define como: El número total de fallas observadas dentro de un grupo de periodos de producción, dividido entre la suma del Tiempo de Vida Útil de todos los sistemas BEC del grupo al que pertenece.

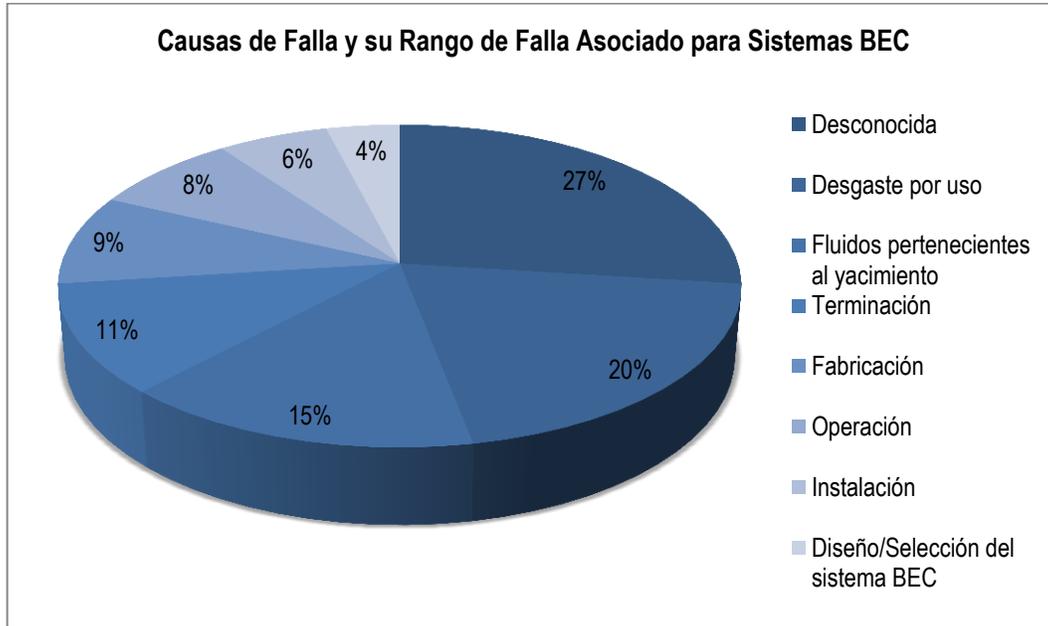


Figura 4.1 – Posibles Causas de Falla y su Rango de Falla Asociado Para Sistemas BEC (Granados-Pérez, 2015)

De acuerdo con Takacs, la parte más débil del sistema BEC es el sistema eléctrico. Sin embargo, las fallas eléctricas en la mayoría de los casos, son originadas por problemas mecánicos los cuales son la verdadera Causa Primaria de Falla. Por lo tanto, cada falla debe ser analizada de manera adecuada para poder identificar cual es la verdadera causa que dio lugar a la falla. Como se mostró en la Figura 4.1, existen muchos factores diferentes los cuales pueden ser el motivo de la generación de la falla de alguno de los componentes del sistema, en esta parte describiremos como es que cada uno de estos factores pueden originar las fallas en el sistema. El resultado de los análisis encontró que el Tiempo Medio de Falla (MTTF) del sistema BEC es de 946 días, lo cual es aproximadamente 2.5 años.

4.3.1. Fallas Relacionadas a la Terminación

Comenzaremos por las fallas de la terminación, que representan un 11% del total de fallas de la base de datos utilizada, las cuales por lo general no están relacionadas a componentes del sistema BEC como tal, sino a componentes de la terminación los cuales dan pie a la falla de uno de los componentes del sistema de bombeo electrocentrífugo. De acuerdo con ESP-RIFTS, la causa de falla específica relacionada con la terminación que da lugar a fallas en el sistema BEC es el control

de arena. Sin embargo, otras causas de falla relacionada con la terminación son: el colapso de la tubería de revestimiento, fallas en la tubería de producción, las cuales resultan en daños al cable.

Algunos ejemplos de las causas de falla relacionadas con la terminación pueden ser:

- Falla de los disparos o de la colocación o diseño del liner.
- Falla en el sistema de control de arena.
- Falla en el diseño de terminación del pozo.

Estas fallas ocasionadas por errores en la terminación pueden dar lugar a fallas en cualquiera de los componentes del sistema BEC como veremos a continuación, en las siguientes secciones del presente Capítulo IV, por lo que se muestran en la Figura 4.2, el porcentaje de falla en de cada Componente de Falla Primario del sistema BEC relacionado con fallas de la terminación y en la Tabla 4.2 mostramos el porcentaje de falla de los componentes del sistema BEC, junto con su Descriptor de Falla Primario y el número de registros que se tiene de acuerdo con la base de datos utilizada, todas estas, para esta sección, relacionadas con fallas de la terminación. Recordemos también como se vio en el Capítulo III que tanto los Componentes Primarios de Falla como los Descriptores Primarios de Falla, de acuerdo con la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS, deben ser del sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido.

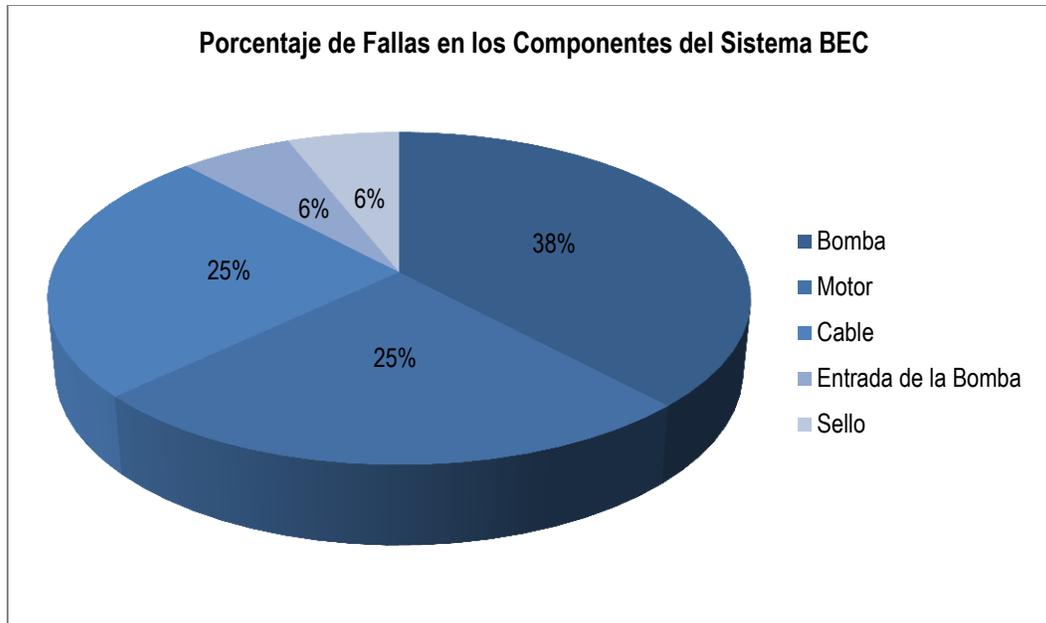


Figura 4.2 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas en la Terminación (Granados-Pérez, 2015)

Componente Primario de Falla	Porcentaje	Descriptor Primario de Falla	Número de Registros de la Base de Datos
Bomba	38%	Dañada	2
Motor	25%	Corto circuito	2
		Fase Desbalanceada	1
Cable	25%	Dañado	2
		Corto circuito	2
Sello	6%	Sin Información	-
Entrada de la Bomba	6%	Desconectada	1

Tabla 4.2 – Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas en la Terminación (Stale, 2010)

4.3.1.1. Bomba

Como se muestra en la Figura 4.2, los resultados de los análisis mostraron que la bomba tiene el rango de falla más alto cuando se trata de causas de falla relacionadas con la terminación. De acuerdo con la Tabla 4.2, de acuerdo con la base de datos utilizada, existen dos registros de bombas dañadas, las dos fueron dañadas a causa de la alta producción de arena, y por lo tanto, el resultado de un diseño de control de arena inadecuado.

4.3.1.2. Motor

De la Tabla 4.2 podemos ver que dos motores presentaron corto circuito a causa de una falla que está relacionada con la terminación. Esto es de acuerdo con el resultado del análisis porque el sistema BEC fue expuesto a una corriente alta y por lo tanto el motor tuvo un corto circuito. También podemos ver en la misma tabla que se encuentra registrado un motor con fase desbalanceada. Para este segundo caso, la tubería de producción colapsó y el sistema BEC tuvo que ser dejado en el pozo.

4.3.1.3. Cable

Para el caso de falla en el cable, tenemos registrados en la base de datos con la que se está trabajando, dos casos de cable del sistema BEC dañado, en ambos casos el cable tuvo un corto circuito. En la Tabla 4.2, podemos observar que el daño en los cables de acuerdo con el análisis realizado fue debido a que el protector de los mismos fue sometido a mucha presión.

4.3.1.4. Entrada de la Bomba

Como podemos ver en la Tabla 4.2, en la base de datos, solo fue registrada una falla de la entrada de la bomba a causa de una falla en la terminación del pozo. Esta falla fue causada específicamente por un sistema de control de arena inadecuado, la arena entró causando problemas al eje de la entrada de la bomba.

4.3.1.5. Solución

Como ya habíamos mencionado antes, la causa más común por la que las fallas en la terminación causan fallas en el sistema BEC, es un mal o inadecuado control de arena. Por lo tanto, es importante asegurarse de que el control de arena, el cual en la mayoría de los casos consiste en un empacamiento de grava sea del tamaño adecuado, se encuentre instalado correctamente, y no tenga problemas de fabricación.

Debido a que el objetivo del empacamiento de grava es precisamente prevenir la intrusión de arena dentro del pozo, una falla en este sistema de protección va a causar la entrada de sólidos en la bomba, la misma que causará un efecto perjudicial en la bomba ya que esta no está diseñada para el manejo de sólidos, tema en el cual se profundizará en este mismo Capítulo IV, en la sección 4.4.

4.3.2. Fallas Relacionadas a la Instalación

Las fallas en la instalación, que representan un 6% del total de fallas de la base de datos utilizada, por lo regular se encuentran relacionadas al daño del sistema BEC el cual ocurre durante la instalación del sistema dentro del pozo. La falla específicamente más común relacionada con la instalación en los sistemas de bombeo electrocentrifugo sumergido registrada en la base de datos de ESP-RIFTS con la que se está trabajando, es la mala técnica de empalme del cable, por lo regular el empalme con el penetrador de la cabeza de pozo. Como podemos ver en la Figura 4.3, el análisis también muestra que el cable es el componente del sistema BEC que tiene los más grandes rangos de falla cuando ésta es ocasionada por una falla en la instalación.

Algunos ejemplos de causas de falla en el sistema BEC, relacionados con una instalación inapropiada pueden ser los siguientes:

- Ensamblaje del sistema BEC
- Montaje del Equipo
- Limpieza del pozo
- Servicio de campo para el sistema BEC

- Prueba del equipo
- Optimización de pozo
- Reutilizar equipo dañado

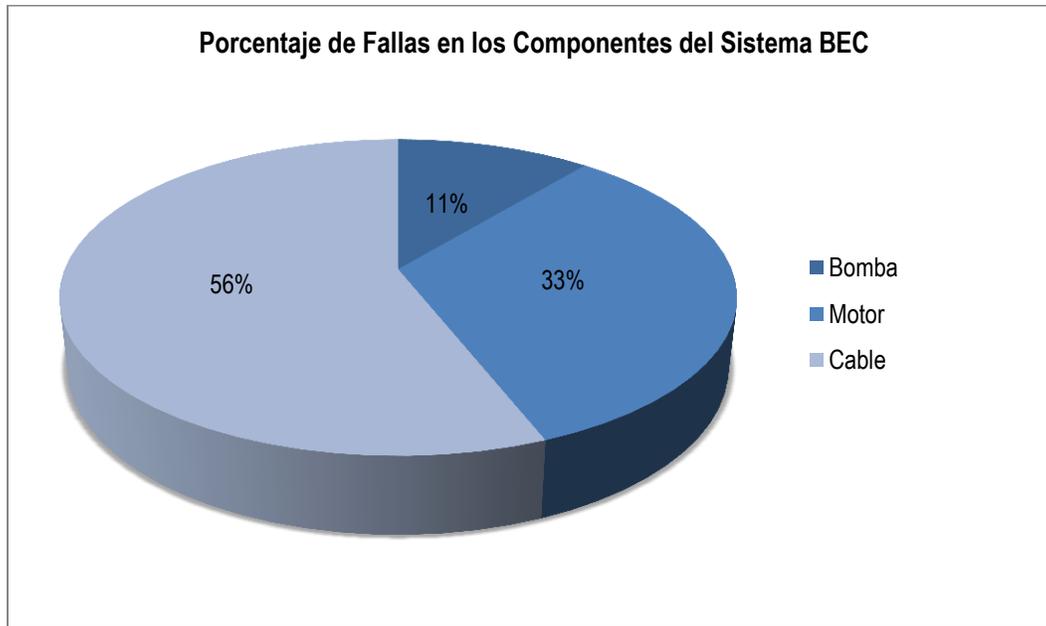


Figura 4.3 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas en la Instalación (Granados-Pérez, 2015)

Las fallas ocasionadas por una mala instalación, también pueden dar lugar a fallas en cualquiera de los componentes del sistema BEC, en la Figura 4.3, se muestra el porcentaje de falla de cada Componente de Falla Primario del sistema BEC relacionado con fallas de la instalación y en la Tabla 4.3 mostramos el porcentaje de falla de los componentes del sistema BEC, junto con su Descriptor de Falla Primario y el número de registros que se tiene de acuerdo con la base de datos utilizada, todas estas, para esta sección correspondiente a las fallas en la instalación del sistema.

Componente Primario de Falla	Porcentaje	Descriptor Primario de Falla	Número de Registros de la Base de Datos
Bomba	11%	Desgastada	1
Motor	33%	Corto circuito	3
Cable	56%	Corto circuito	2
		Dañado	2

Tabla 4.3 – Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas en la Instalación (Stale, 2010)

4.3.2.1. Bomba

En la Tabla 4.3, de acuerdo con la base de datos, podemos observar en una de las bombas que fallaron, que el Descriptor de Falla Primario de esta bomba es el desgaste, esto es debido a que se reinstaló una bomba que ya había sido utilizada y debido a que causo una falla en el sistema, podemos inferir que no fue sometida a las pruebas de fábrica necesarias ni se le dio el mantenimiento que requería para que pudiera volver a ser instalada.

4.3.2.2. Motor

En esta sección, se encuentran en la base de datos, tres motores reportados con falla debido a un error en la instalación, los tres motores presentaron un corto circuito. El análisis consultado acerca de fallas no incluye respuestas específicas acerca de que fue lo que pasó, solamente indica que ocurrió durante un servicio a pozo del sistema BEC. Además de que existen muchos factores los cuales pueden causar un corto circuito en el motor, como será descrito a mayor detalle en el subtema 4.4, de este mismo capítulo.

4.3.2.3. Cable

Para el caso del cable de acuerdo con la base de datos podemos observar en la Tabla 4.3, que se registraron cuatro cables que presentaron un corto circuito. Estas fallas sucedieron durante el servicio a pozo del sistema BEC. Uno de los cables tuvo problemas con el conector eléctrico en la cabeza de pozo, el segundo de los cables presentó la falla en el empalme que se encontraba de la misma forma, en la cabeza del pozo, el tercero también presentó la falla en el empalme, sin embargo fue uno de los empalmes que se encontraban dentro del pozo en alguno de los colgadores de cable de la tubería de producción.

Sin embargo para el cuarto cable que presentó una falla la cual fue a causa de un corto circuito al igual que con los tres anteriores, no se encontró explicación; ESP-RIFTS tampoco pudo encontrar información directamente del cable dañado. En la parte 4.4, de este mismo capítulo se presentará una descripción más detallada de como ocurren los cortos circuitos en el cable.

4.3.2.4. Solución

La instalación adecuada de todos y cada uno de los componentes del sistema BEC es crucial para en un principio, evitar fallas. También es importante que todas las personas involucradas en el trabajo de instalación de equipo sigan de manera exhaustiva el procedimiento de instalación.

De acuerdo con la norma API 14222, que trata acerca de la estandarización de los procesos de instalación de sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido, el personal encargado debe ser advertido de que los componentes para este sistema en específico, pueden ser dañados con suma facilidad. Además de que deben tener un amplio conocimiento de los procedimientos de manejo y se debe contar con la supervisión adecuada durante el proceso para así poder asegurar que la operación de instalación vaya de acuerdo con el plan. La estándar API también incluye guías para el servicio a pozos dado al sistema BEC. Las instalaciones deben ser adecuadas con el equipo de instalación de ser necesario, durante la instalación para que el sistema pueda ser introducido de manera precisa en el centro del pozo y evitar posibles daños. Dado que los empalmes del cable son la causa principal de falla, se debe tener mucho cuidado cuando se realiza el empalme de cada sección de cable. Adicionalmente, se debe tener la revisión adecuada en los empalmes del cable ya que es un paso muy importante para poder prevenir una mala instalación.

4.3.3. Fallas Relacionadas a la Fabricación

Como hemos visto en los casos anteriores de fallas en el sistema de bombeo eléctrico sumergido, causadas por errores en la terminación e instalación; en la parte de fallas causada por una mala fabricación, también tenemos un componente del sistema BEC el cual tiene el mayor rango de falla, el cual para este caso, es el cable. La razón más común de falla en el cable, de acuerdo con la base de datos de ESP-RIFTS es el corto circuito. Estas fallas, representan un 9% del total de fallas de la base de datos utilizada.

Algunos de los ejemplos de las causas de falla en el sistema asociadas a errores en la fabricación, pueden ser:

- Mala selección de material a utilizar en la fabricación para cierta aplicación
- Una fabricación o ensamblaje de los componentes, inapropiados
- Un control de calidad deficiente o pruebas de los componentes inadecuadas

Estas fallas ocasionadas por una mala fabricación, dan lugar a las fallas en cualquiera de los componentes del sistema BEC que es la parte que analizamos en esta tesis, en la Figura 4.4, podemos observar de manera gráfica, el porcentaje de falla en de cada Componente de Falla Primario del sistema BEC relacionado con fallas de fabricación y en la Tabla 4.4 mostramos el porcentaje de falla de los componentes del sistema BEC, junto con su Descriptor de Falla Primario y el número de registros que se tiene de acuerdo con la base de datos utilizada, todas estas, para esta sección, relacionadas con fallas de la terminación.

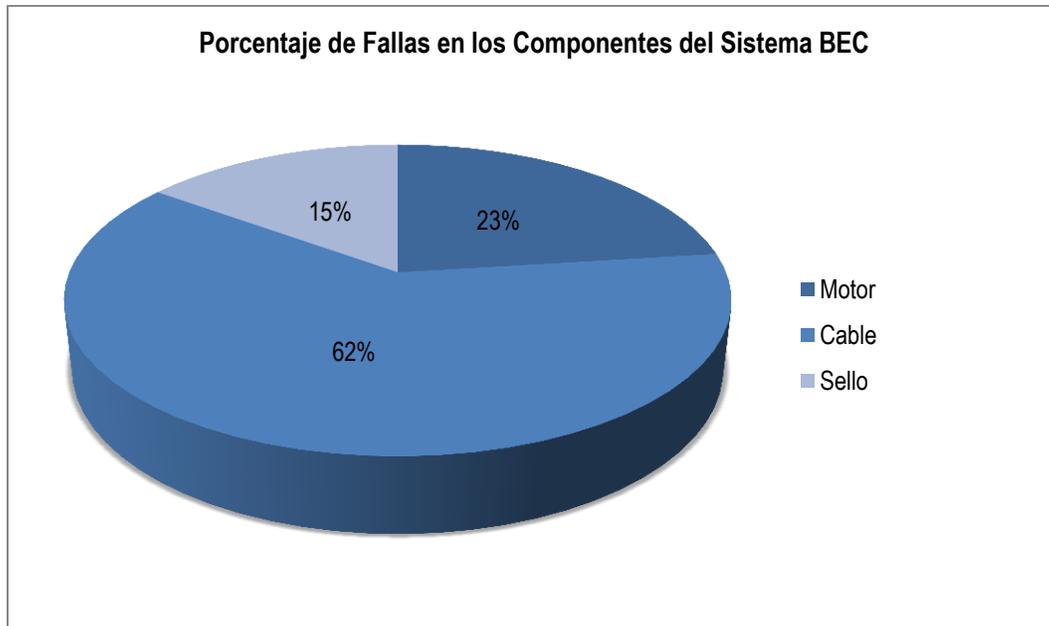


Figura 4.4 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas en la Fabricación (Granados-Pérez, 2015)

Componente Primario de Falla	Porcentaje	Descriptor Primario de Falla	Número de Registros de la Base de Datos
Motor	23%	Corto circuito	4
Cable	62%	Corto circuito	14
Sello	15%	Contaminada	2

Tabla 4.4 – Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas en la Fabricación (Stale, 2010)

4.3.3.1. Motor

Para este caso, como podemos ver, tenemos la falla de cuatro motores a causa de fallas en la fabricación por parte del vendedor, en estos cuatro casos el Descriptor de Falla Primario para los motores fue un corto circuito.

4.3.3.2. Cable

Como podemos observar, tanto en la Figura 4.4 como en la Tabla 4.4, el componente del sistema BEC que presentó mayor número de problemas registrados en la base de datos de ESP-RIFTS con relación a una falla en la fabricación, fue el cable; dándonos un total de catorce casos. En el

subtema 4.4, de este mismo capítulo se presentarán las posibles causas por la que el cable puede fallar.

4.3.3.3. Sello

Para el caso de las fallas relacionadas con errores o una mala fabricación solamente se registraron dos casos de sellos los cuales estaban contaminados, en ambos casos el sello fue invadido, perdiendo su función, además de que el motor tuvo un corto circuito.

4.3.3.4. Solución

El análisis de los resultados mostró que se registraron problemas de corrosión en la cubierta del motor como uno de los problemas principales en estas fallas por lo que esto nos da motivos para pensar que los materiales de la cubierta y posiblemente otros no fueron elegidos de manera que pudieran soportar el ambiente corrosivo al que estarían expuestos y esta fue por consecuencia la razón de las fallas.

Si el cable de potencia presentó un corto circuito, quiere decir que todo el equipo subsuperficial del sistema BEC tuvo que ser desinstalado del pozo, por lo que es muy importante que los componentes del sistema electrocentrifugo sumergido hayan sido probados en cuanto a su operación, de manera adecuada antes de que sean instalados dentro del pozo. Si la operación de chequeo del equipo subsuperficial no se lleva a cabo de manera adecuada esto será una causa muy probable de falla asociada a defectos de fabricación. La prueba de full string, debe llevarse a cabo tanto en la fábrica con la locación en la que será instalado lo cual nos dará como resultado una mejora en el control de calidad, lo cual nos permitirá evitar fallas, al menos relacionadas con defectos de fábrica. Es importante remarcar que la prueba de full string, actualmente se lleva a cabo cuando el pozo en el que será instalado el sistema es terrestre, debido a las dificultades presentes en locaciones marinas.

4.3.4. Fallas Relacionadas al Desgaste por Uso

En esta categoría tenemos los reportes de falla dados en el sistema BEC por el desgaste debido al uso, el cual es normal y esperado, estas fallas representan un 20% del total de fallas de la base de datos utilizada, en esta parte podemos ver, como se muestra en la Figura 4.5, que las fallas en los diferentes componentes del sistema se encuentran repartidas de forma más equitativa que en cualquier otra causa de falla, como pudimos ver en fallas por fabricación o instalación en las que solo tenemos presentes tres componentes del sistema los cuales presentan fallas. Y como veremos

a continuación tanto en la descripción de falla de cada componente del sistema como en la Tabla 4.5, estas fallas son en general, también de naturaleza eléctrica.

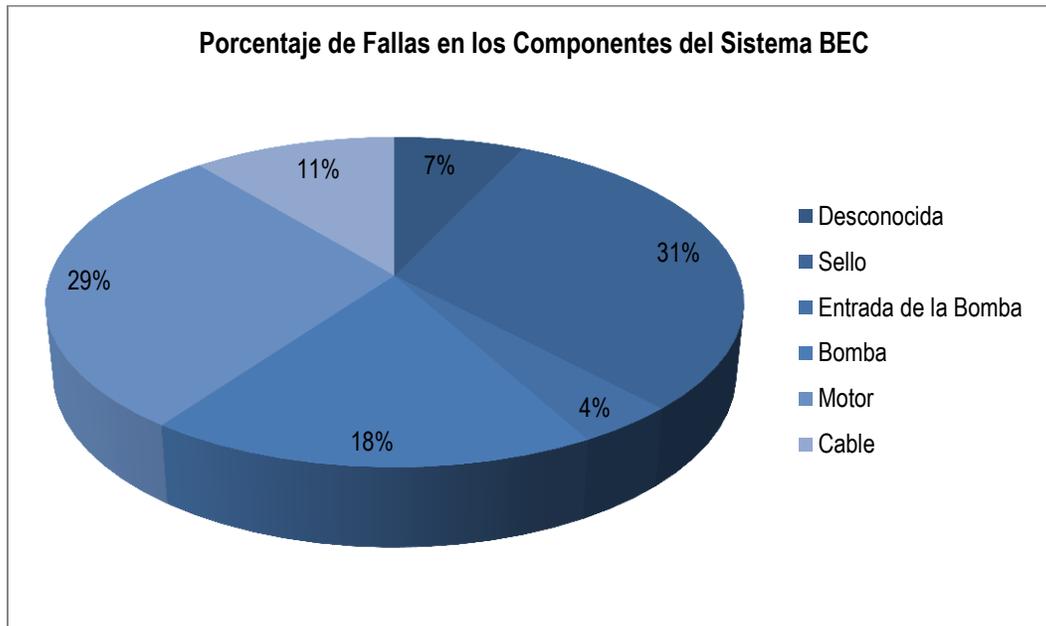


Figura 4.5 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas Causadas por el Desgaste por Uso (Granados-Pérez, 2015)

Componente Primario de Falla	Porcentaje	Descriptor Primario de Falla	Número de Registros de la Base de Datos
Bomba	18%	Baja eficiencia	3
		Desgaste por uso	1
		Rotura o Fractura	1
Motor	29%	Corto circuito	5
		Fase Desbalanceada	1
		Contaminado	1
		Corroído	1
Cable	11%	Corto circuito	2
		Baja impedancia o resistencia	2
Sello	31%	Contaminado	7

		Corroído	1
Entrada de la Bomba	4%	Rotura o Fractura	1

Tabla 4.5 – Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas Causadas por el Desgaste por Uso (Stale, 2010)

4.3.4.1. Bomba

Para el caso de desgaste por el uso de la bomba, como se muestra en la anterior Tabla 4.5, tenemos tres registros de fallas por baja eficiencia, lo cual en realidad no representa una falla. Las bombas fueron quitadas del pozo debido a que no producían el gasto deseado en superficie. El análisis registrado en la base de datos de ESP-RIFT acerca del desgaste por uso de la bomba, mostraba que además del tiempo en funcionamiento de la bomba, mostraba un mayor desgaste debido a la alta producción de arena. En la parte 4.4. de este capítulo, se presentará la explicación de cómo es que afecta al sistema BEC la producción de arena.

4.3.4.2. Motor

En este caso, como muestra la Tabla 4.5, tenemos el reporte de cinco motores los cuales fallaron por un corto circuito, la causa del corto circuito de tres de estos motores es que fueron a tierra, sin embargo de los otros dos motores que fallaron, se desconoce la causa. Sin embargo, en la Tabla 4.5, se muestra un registro de una falla en un motor por fase desbalanceada sin tener más información de que se contaminó con fluido de producción, por lo cual se puede pensar que el fluido producido en el pozo en el que estaba operando este sistema BEC, contenía partículas abrasivas. El efecto de las partículas abrasivas en el sistema BEC también será presentado en el subtema 4.4. del presente Capítulo IV.

El registro del motor que presenta como Descriptor Primario de Falla la contaminación del motor, tenía un comentario adjunto en la base de datos de ESP-RIFTS, el cual decía que el sistema BEC había tenido falla a tierra y posteriormente ya no había sido posible reiniciarlo. La parte tanto inferior como superior de la bomba, y el eje del manejador avanzado de gas presentaban holgura en un lado y excedían en la parte superior. La camisa inferior de la bomba no se encontraba cubriendo la parte del cojinete de la cabeza de la bomba, la entrada de la bomba había colapsado y el aceite en el protector tándem y motor se encontraba sucio. El registro indicaba que la corrosión de la bomba era debida a un pozo que se encontraba en la cubierta del motor.

4.3.4.3. Cable

En el registro de la base de datos, encontramos dos casos de cables que presentaron corto circuito debido al desgaste por el uso, como se muestra en la Tabla 4.5, para estos casos, no había ninguna explicación acerca de lo ocurrido, en otro de los registros la extensión de cable al motor había presentado falla a tierra. También podemos observar que tenemos dos casos de cables en los que la causa de falla fue la baja impedancia o baja resistencia, sin embargo no había una explicación más a fondo de lo ocurrido o causas en la base de datos.

4.3.4.4. Sello

Se encontraron muchos registros en la base de datos acerca de sellos contaminados, 7; además de uno con problemas de corrosión. Los comentarios incluidos en el registro, indicaban en resumen, lo siguiente:

- La protección del cable mostraba corrosión
- El motor presentaba falla a tierra lo cual dio pie después a el corto circuito y esto era consecuencia de la contaminación por agua
- El sistema BEC falló, después de que la alarma indicara un exceso de corriente
- Corrosión severa

4.3.4.5. Entrada de la Bomba

En la base de datos para el caso en específico de falla debida al desgaste por el uso, encontramos un registro de una entrada de bomba que se encontraba rota o fracturada. Sin embargo, no había ninguna otra explicación al respecto de esta falla.

4.3.4.6. Solución

Como ya hemos podido notar a lo largo de este análisis, casi todas las fallas se deben a la producción de arena y corrosión. Lo cual nos debe dar una razón para pensar que los materiales que son escogidos para la fabricación de los componentes del sistema BEC para una aplicación dada, no cuentan con las propiedades requeridas para poder manejar los ambientes severos a los que son sometidos, acerca de lo cual se dará una explicación más detallada en la sección 4.4 del presente capítulo.

4.3.5. Fallas Relacionadas a la Operación

Para el caso de fallas en sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido relacionadas con una operación inadecuada, este tipo de fallas, representa el 8% del total de acuerdo con la base de datos utilizada. Para el análisis encontramos como se muestra a continuación en la Figura 4.6, que el componente con un rango de falla mucho mayor en este caso y en comparación con los demás componentes, es el motor, y en la Tabla 4.6 mostramos el porcentaje de falla de los componentes del sistema BEC, junto con su Descriptor de Falla Primario y el número de registros que se tiene de acuerdo con la base de datos utilizada.

Algunos ejemplos de las causas de falla en el sistema BEC debidas a una mala operación, son las siguientes:

- Monitoreo insuficiente o inadecuado
- Procedimiento de operación mal diseñado o accionado. Por ejemplo: se encontró que el sistema fue detenido y reiniciado en muchas ocasiones en las que era innecesario
- Tratamiento de pozo. Como ejemplo para este caso se inyectaban inhibidores.

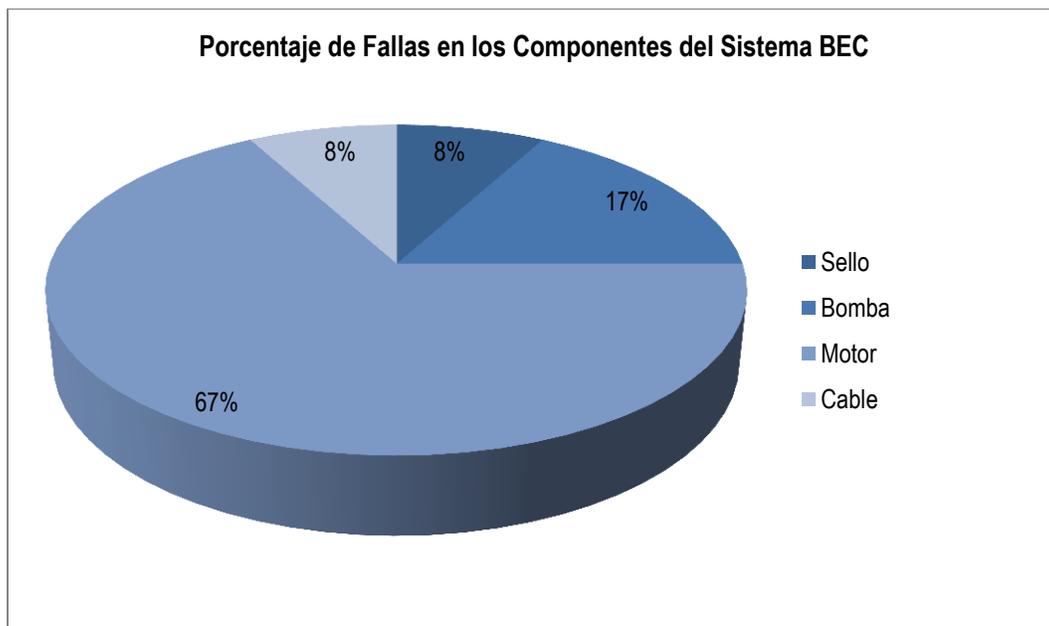


Figura 4.6 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas Durante la Operación (Granados-Pérez, 2015)

Componente Primario de Falla	Porcentaje	Descriptor Primario de Falla	Número de Registros de la Base de Datos
Bomba	17%	Atascamiento	1
Motor	67%	Corto circuito	3
		Fase Desbalanceada	1
		Corroído	4
		Desconocido	1
Cable	8%	Corto circuito	1
Sello	8%	Corroído	1

Tabla 4.6 – Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas Durante la Operación (Stale, 2010)

4.3.5.1. Bomba

Como se muestra en la Tabla 4.6, para este caso, fue reportado un caso en el que la bomba se encontraba atascada. La causa de falla de acuerdo con la base de datos y el análisis llevado a cabo por ESP-RIFTS, fue debida a la producción de arena que fue consecuencia de un monitoreo insuficiente.

4.3.5.2. Motor

Para las fallas en el motor causadas por una operación inadecuada encontramos en la base de datos tres casos los cuales habían presentado un corto circuito en el motor. Dos de estas fallas se presentaron a causa de la corrosión en el protector o cubierta del motor, la otra falla fue consecuencia de un mal procedimiento de operación. Otro de los motores falló por la presencia de fase desbalanceada, sin embargo la fase desbalanceada fue la causa de un monitoreo inadecuado, y los últimos cuatro fallaron por corrosión.

4.3.5.3. Cable

Solamente un cable falló, a causa de un corto circuito y esto fue porque la extensión del cable al motor falló a tierra.

4.3.5.4. Sello

La corrosión también fue la causa de la falla del sello relacionada con una operación deficiente lo que provocó que se corroyera; la corrosión era tan severa que se encontró en la sección del sello un pozo.

4.3.5.5. Solución

Como ya mencionamos anteriormente y pudo ser notorio en los análisis anteriores, el motor es el componente del sistema BEC más afectado, y éste falla principalmente por corrosión o por un corto circuito. Sin embargo, si la corrosión de la cubierta o protector del motor es tan severa que logra hacer un pozo, entonces los fluidos del yacimiento entrarán al motor y provocarán un corto circuito. Se debe hacer una selección del material adecuada con respecto a su resistencia a la corrosión para, de esta forma poder evitar estas fallas.

También se debe priorizar y no restarle importancia al entrenamiento de los operadores, el cual debe de ser adecuado y suficiente, para así poder tener la seguridad de que el motor está siendo operado a un rango de frecuencia adecuado. Adicionalmente se debe poner atención a los aspectos definidos al respecto en la API RP 11S

Chequeo antes de que el sistema sea puesto en operación: Se debe tener total certeza de que la línea de flujo esté conectada por completo, que todas las válvulas se encuentren en los rangos de presión apropiados y que estén bien instaladas, ya que cada válvula tiene su propia posición de operación. También se deben llevar a cabo chequeos eléctricos, de fase a tierra, fase a fase, adicionalmente de que las lecturas del chequeo fase a fase deben encontrarse balanceadas.

Puesta en operación del sistema BEC: Es recomendado que la tubería de producción se encuentre llena antes de que se inicie el sistema, lo que significa que las instalaciones deben estar equipadas con tubería de producción que tenga tanto válvulas check como válvulas de drene o alivio. Ya que se hayan llevado a cabo todos los chequeos requeridos, entonces sí, poner en marcha el sistema BEC. Para el control del rango de descarga de la bomba, la bomba debe estar restringida por un estrangulador, pero tampoco debe ser iniciada con el estrangulador o la válvula completamente cerrados.

Recolección de los datos de operación: Información de operación correcta:

- Se requiere de monitoreo del sistema bajo condiciones de operación normales
- Al contar con esta información, podremos obtener datos útiles cuando se presente algún problema en el pozo en condiciones de operación anormales
- También será de gran utilidad para rediseñar el tamaño del sistema de manera precisa, si es requerido

Analizar los datos de operación: El análisis de los datos de operación debe ser considerado tanto como de los datos de instalación permanente del pozo, como por ejemplo: longitud y diámetros de la tubería de producción, diámetros de la tubería de revestimiento, profundidad de perforación, características de los fluidos, etc. así como de las pruebas de producción realizadas al pozo. Una vez que la bomba se encuentra dentro del pozo y operando, debe seguir analizándose para así poder determinar su funcionamiento adecuado.

4.3.6. Fallas Relacionadas a los Fluidos del Yacimiento

Para este caso de las fallas relacionadas a los fluidos del yacimiento, como podemos observar en la Figura 4.7, el componente del sistema de bombeo electrocentrifugo sumergido que resulta mayormente dañado, es la bomba. Las fallas debido a los fluidos del yacimiento, representan el 15% del total de acuerdo con la base de datos utilizada para el análisis.

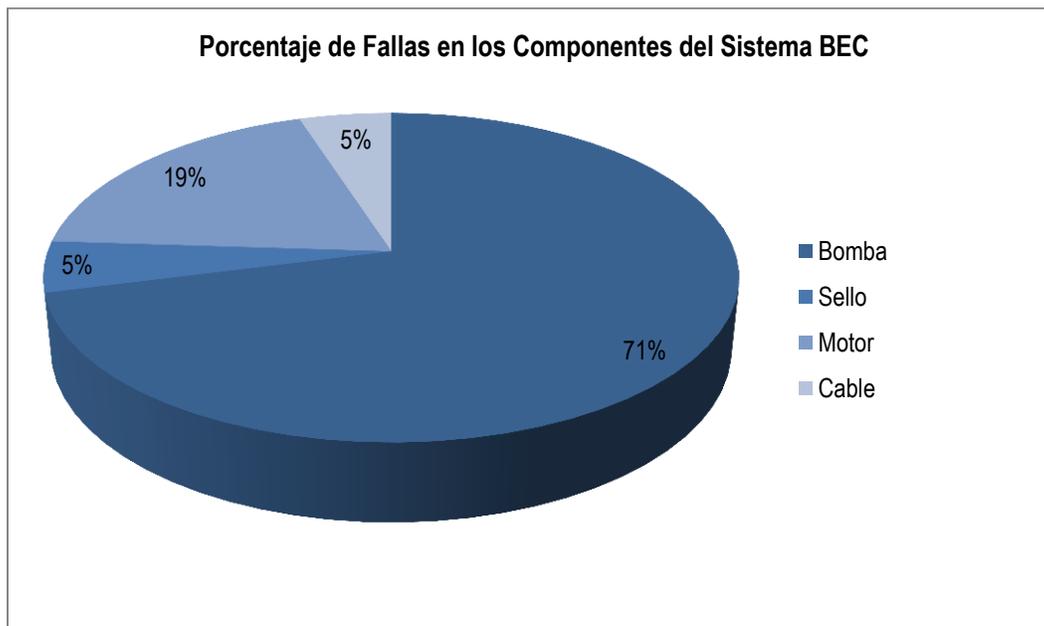


Figura 4.7 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con los Fluidos del Yacimiento (Granados-Pérez, 2015)

Algunos de los ejemplos de las fallas que pueden ocurrir debido a los fluidos del yacimiento, son los siguientes:

- Presencia de asfaltenos en el fluido del yacimiento
- La temperatura de fondo de pozo se encuentra alrededor de 90°C
- Gas libre en el flujo hacia el pozo y la bomba principalmente
- Contenido de arena en el fluido del yacimiento
- Formación de incrustaciones
- Parafinas en el fluido del yacimiento
- Alta producción de agua en el fluido que llega al pozo
- Poco o sin presencia de flujo hacia el pozo.

Las fallas ocasionadas por los fluidos del yacimiento que entran dentro del pozo, también dan lugar a las fallas en cualquiera de los componentes del sistema BEC, en la Figura 4.7, se presenta el porcentaje de falla en cada Componente de Falla Primario del sistema BEC de acuerdo a las fallas que se relacionan a los fluidos del yacimiento y en la Tabla 4.7 mostramos el porcentaje de falla de los componentes del sistema BEC, junto con su Descriptor de Falla Primario y el número de registros que se tiene de acuerdo con la base de datos utilizada, relacionadas con fallas por los fluidos del yacimiento.

Componente Primario de Falla	Porcentaje	Descriptor Primario de Falla	Número de Registros de la Base de Datos
Bomba	71%	Atascamiento	11
		Incrustaciones	2
		Erosionada/Desgaste por presión	2
		Ruptura/Fractura	1
Motor	19%	Fuga	1
		Fase Desbalanceada	1
Cable	5%	Ruptura/Fractura	1
Sello	5%	Corroído	2

Tabla 4.7 – Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionados con los Fluidos del Yacimiento (Stale, 2010)

4.3.6.1. Bomba

En este caso para las fallas que se presentaron en la base de datos las cuales fueron relacionadas a los fluidos del yacimiento, tenemos que todos los Descriptores de Falla Primarios que se muestran

en la Tabla 4.7, de acuerdo con la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS, la cual ya fue presentada en el capítulo anterior, fueron debido a la presencia de arena en el fluido. Como ya se mencionó en el Capítulo I, las bombas electrocentrífugas sumergidas pueden tener impulsores rotatorios y estacionarios. El manejo de arenas que se ha observado en las bombas con impulsores rotatorios puede causar un desgaste del cojinete radial, el desgaste del cojinete puede ser por empuje y desgaste por erosión, de lo cual se hablará con mayor detalle en el subtema 4.4.

4.3.6.2. Motor

Como podemos observar en los indicadores de la Tabla 4.7, encontramos un registro en la base de datos en el que un motor falló a causa de una fase desbalanceada y el otro motor que presentó falla, fue a causa de una fuga, sin embargo; no se contaba con más información al respecto del motor con falla debida a fase desbalanceada, para el caso del motor con fuga, ésta fue a causa de la severa corrosión.

4.3.6.3. Cable

En la Tabla 4.7, podemos observar que hubo una falla en un cable que se rompió o fracturó. La causa de falla es, de acuerdo con la base de datos de ESP-RIFTS la producción de arena. En el mismo sistema en el que se presentó esta falla en el cable, también se encontraron incrustaciones y corrosión en el sello inferior y el motor.

4.3.6.4. Sello

En la base de datos encontramos que se encontraron dos sellos, en los cuales el Descriptor de Falla Primario, fue la corrosión, sin embargo no había mayor explicación acerca de las causas de la corrosión en el sello.

4.3.6.5. Solución

A continuación presentaremos una breve explicación acerca de cómo proteger los componentes subsuperficiales del sistema BEC contra las condiciones de operación y los ambientes severos en los cuales se encuentran los sistemas de bombeo electrocentrifugo sumergido:

Corrosión: La corrosión tanto en la bomba como en los protectores o cubiertas de motor, pueden tener efectos bastante perjudiciales en el sistema BEC. Para protegerlo en contra de la corrosión, es

esencial que se elijan los materiales adecuados para el protector del motor y se utilicen capas de barnices especiales para proteger su superficie.

Incrustaciones: Los depósitos que forman las incrustaciones en la cubierta del motor, van a causar eventualmente la obstrucción del motor, provocando que el efecto de enfriamiento producido por el fluido del yacimiento sea nulo, lo cual puede resultar en el sobrecalentamiento del motor e incluso, que éste se quemara. Las capas de barniz especial que son aplicadas en el protector del motor, por lo regular son la solución a este problema. La formación de incrustaciones en las etapas de la bomba reduce el gasto de líquido y también puede resultar en un atascamiento total de la bomba.

Producción de arena o fluidos abrasivos: Los efectos y problemas provocados por la producción de arena y fluidos abrasivos, puede ser solucionada al elegir el material adecuado y tipo de bomba.

Altas temperaturas en el pozo: Las altas temperaturas presentes en el pozo, pueden tener efectos perjudiciales en el motor, el cual se puede calentar y quemarse. Por lo tanto es esencial para evitar este tipo de efectos adversos en la bomba, que se elija la bomba adecuada para el manejo de las temperaturas del pozo en el que será instalado el sistema BEC.

Formación de gas: Como ya sabemos la formación de gas dentro del pozo puede causar un bloqueo en la bomba. Este problema puede ser evitado al elegir el manejador de gas o separadores adecuados, los cuales serán capaces de resistir la cantidad de gas que se encuentre presente. El gas libre también puede causar problemas en el cable de potencia al migrar dentro de este; para evitar este problema, se debe seleccionar un cable que cuente con el aislamiento adecuado.

Alta viscosidad: Los fluidos con alta viscosidad, requieren un motor más potente, esto es debido a sus densidades relativas. Adicionalmente, se debe de considerar que la eficiencia de la bomba va a disminuir conforme la fricción en la tubería de producción aumente, lo cual también dará lugar a que los requerimientos del motor, sean mayores. Para asegurarse de que el sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido, sea capaz de entregar el gasto deseado, se debe seleccionar tanto un motor como una bomba con las especificaciones adecuadas.

4.3.7. Fallas Relacionadas al Diseño del Sistema o a la Selección de sus Componentes

Como hemos visto en todas las causas a las que puede ser relacionada una falla en el sistema BEC, el diseño o la selección adecuada del mismo son de suma importancia, para poder cumplir con los requerimientos necesarios, ya que para el caso de la base de datos utilizada, un 4% del total de las fallas, fue a causa de un mal diseño o selección de los componentes a utilizar.

Algunos ejemplos de causas de falla en el sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido, asociadas a un mal diseño o selección del sistema, pueden ser:

- Selección equivocada del equipo para una aplicación específica.
- Bomba que tenga una capacidad de flujo insuficiente o con una altura inadecuada.
- Capacidad de potencia eléctrica del motor inadecuada
- Selección y uso de materiales de bajo grado.
- El diseño o selección inapropiada del sistema BEC incluye también el uso de datos inadecuados o errores en los cálculos.

En la Figura 4.8, se presenta el porcentaje de falla en cada Componente de Falla Primario del sistema BEC relacionado con fallas que se relacionan a un mal diseño o selección del sistema BEC y en la Tabla 4.8 mostramos el porcentaje de falla de los componentes del sistema BEC, junto con su Descriptor de Falla Primario y el número de registros que se tiene de acuerdo con la base de datos utilizada, relacionadas con fallas relacionadas a la selección y diseño del sistema BEC.

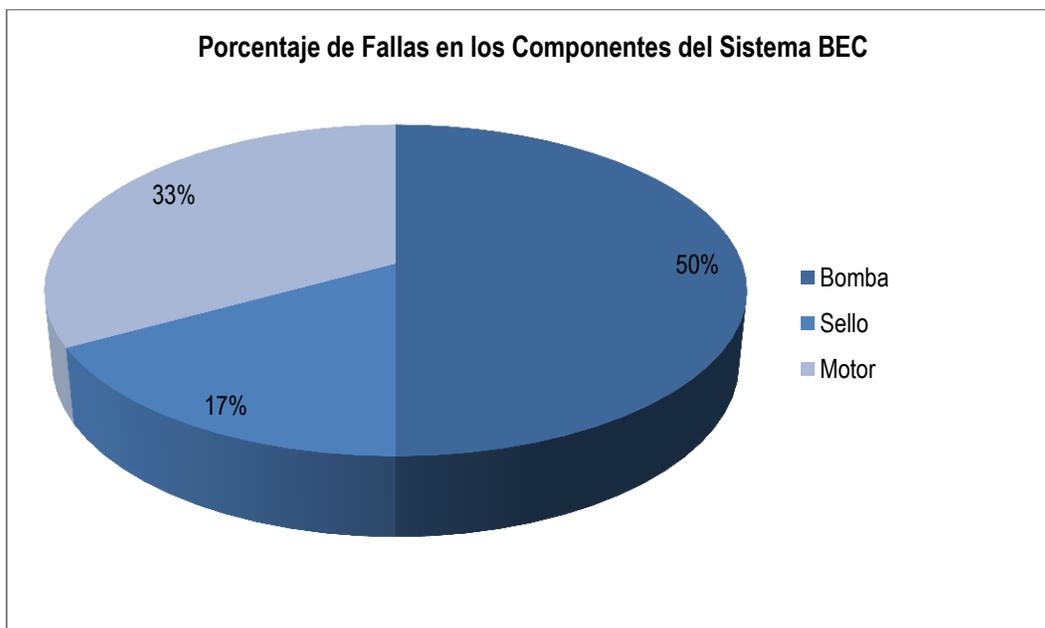


Figura 4.8 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con el Diseño del Sistema o Selección de Componentes (Granados-Pérez, 2015)

Componente Primario de Falla	Porcentaje	Descriptor Primario de Falla	Número de Registros de la Base de Datos
Bomba	50%	Fuga	2
		Atascamiento	1
Motor	33%	Corto circuito	2
Sello	17%	Roto o Fracturado	1

Tabla 4.8 – Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con el Diseño del Sistema o Selección de Componentes (Stale, 2010)

4.3.7.1. Bomba

Como podemos ver en la Figura 4.8, la bomba es el componente del sistema BEC que tiene un mayor rango de falla en relación a un mal diseño. En la Tabla 4.8, encontramos el registro de dos bombas las cuales fallaron al comenzar a fugar; esto fue a causa de que las cubiertas de motor se encontraban corroídas. También podemos ver que se identificó un atascamiento de bomba; el cual fue a causa de la formación de incrustaciones.

4.3.7.2. Motor

En la Tabla 4.8, podemos observar que se encontraron dos registros en la base de datos en los cuales se reportaba la falla del motor a causa de un corto circuito. Para el primer motor, encontramos en la parte de los comentarios que la falla fue a causa de la producción de arena y se encontró daño a causa de la erosión, lo que significa que el desgaste causado por la erosión por la producción de arena provocó que el fluido entrara en el motor a través de los pozos en la cubierta del motor lo cual provocó el corto circuito. Esto nos da una razón para pensar que el corto circuito fue ocasionado a causa de la contaminación por aceite como resultado de que la sección de sello se encontraba operando de manera ineficiente.

4.3.7.3. Sello

Para esta sección solamente se relacionó la falla de un sello con un mal diseño o selección inadecuada del componente, este se encontraba roto o fracturado; de acuerdo con la base de datos, el eje del sello era lo que se encontraba roto.

4.3.7.4. Solución

Es de suma importancia llevar a cabo de manera apropiada el diseño del sistema BEC para de esta forma poder prevenir fallas a causa de un mal diseño del sistema o selección de los componentes. El factor inicial más importante para el éxito en la optimización del Tiempo de Vida Útil del Sistema BEC, es la selección del tamaño adecuado del mismo. Esto implica que la unidad debe encontrarse operando dentro de la ventana de operación recomendada y al mismo tiempo, cumplir con el gasto esperado, y ser capaz de manejar los demás aspectos como son la temperatura y la RGA, etc.

Si el sistema BEC se encontrara operando fuera de la venta operativa recomendada, el desgaste de la bomba será más rápido, dando lugar a fallas prematuras tanto en la bomba como en el motor. Por lo tanto, la información confiable acerca de la capacidad productiva del pozo y la información precisa de las propiedades del fluido como son la viscosidad, RGA, y temperatura, son importantes para poder llevar a cabo la selección adecuada del sistema BEC.

4.4. Factores Comunes de Causa de Falla en Sistemas BEC

4.4.1. Producción de Sólidos

Como pudimos ver en la parte 4.3. del presente capítulo, de acuerdo con el análisis de resultados tanto del Desgaste por Uso como de los Problemas causados por los Fluidos del Yacimiento, la producción de arena causa muchas fallas, por lo que en esta parte veremos de manera más profunda las consecuencias en los sistemas de bombeo electrocentrifugo sumergido, de la producción de arena.

El análisis de fallas utilizado en esta parte es confiable, ya que la información que contiene es consistente, fueron desechados los registros que no eran consistentes o se encontraban incompletos, que no contaban con el Tiempo de Vida Útil o información de la falla, en la Tabla 4.9 y la Tabla 4.10 se muestra un resumen de los registros de fallas relacionadas con la producción de arena y las que no lo están.

Problemas Severos de Sólidos	
Clasificación de Datos	Número de Datos
Datos de Compañías	5
Datos de Divisiones	12
Datos de Campos	15

Datos de Pozos	166
Datos de Periodo de Producción	283

Tabla 4.9 – Clasificación de los Datos de Consulta de Sistemas BEC con Problemas Severos de Producción de Arena (Stale, 2010)

Sin Problemas de Sólidos	
Clasificación de Datos	Número de Datos
Datos de Compañías	8
Datos de Divisiones	12
Datos de Campos	25
Datos de Pozos	284
Datos de Periodo de Producción	663

Tabla 4.10 – Clasificación de los Datos de Consulta de Sistemas BEC sin Problemas de Producción de Arena (Stale, 2010)

Como podemos observar en las dos tablas anteriores, los resultados para las fallas en sistemas BEC que no se encuentran relacionadas con problemas debido a la presencia de sólidos, son más del doble que los datos correspondientes a las fallas de sistemas BEC relacionados a la presencia de sólidos. De la misma forma, como podemos ver en la Figura 4.9, cuando un sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido se encuentra sujeto a una alta producción de arena, la bomba es el componente del sistema BEC que tiene el rango de falla más alto. Por otro lado, si comparamos con los resultados de la Figura 4.10, correspondientes a las fallas no asociadas con la presencia de sólidos, podemos ver que presenta una distribución más equitativa entre los componentes del sistema BEC. Es importante recordar en esta parte que la definición de problemas severos de sólidos por C-FER Technologies es: “Cantidad sustancial de sustancias o problemas observados, de los que se cree o se tiene la certeza que ocasionarán problemas”².

A partir de lo que podemos concluir que la presencia de sólidos tiene una gran influencia en el Tiempo de Vida Útil de la bomba, en la Figura 4.11, podemos ver también que las bombas utilizadas en pozos con problemas severos de sólidos, tienen un considerablemente bajo Tiempo Medio de Falla (MTTF), que los otros sistemas los cuales no son expuestos a la presencia de sólidos. La diferencia es de 489 días, a favor de los sistemas de bombeo electrocentrífugo que se encuentran operando en pozos sin problemas severos de sólidos.

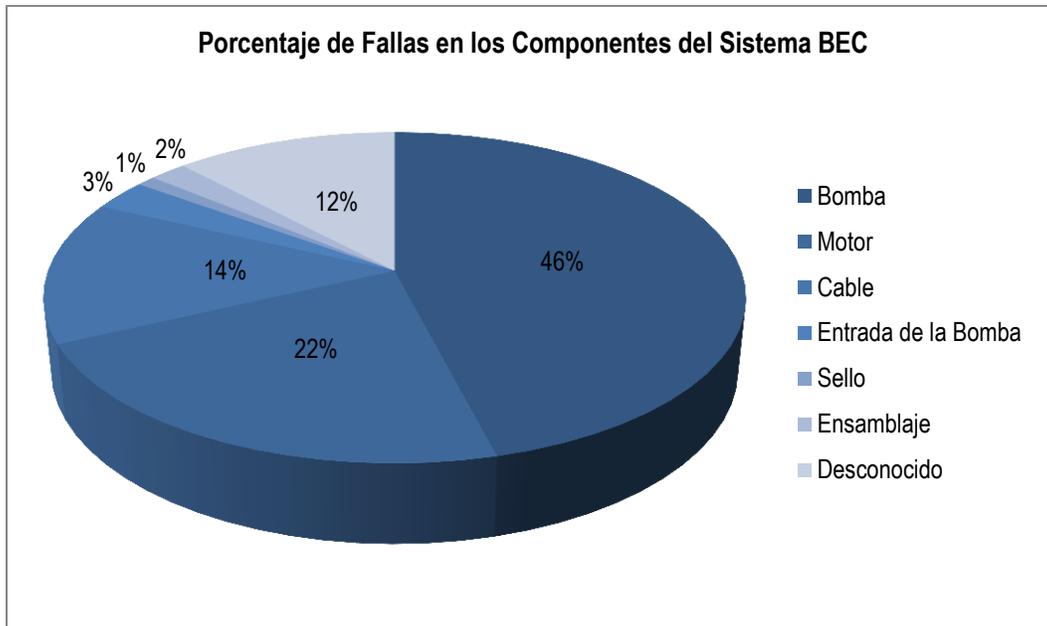


Figura 4.9 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC con Problemas Severos de Producción de Arena (Granados-Pérez, 2015)

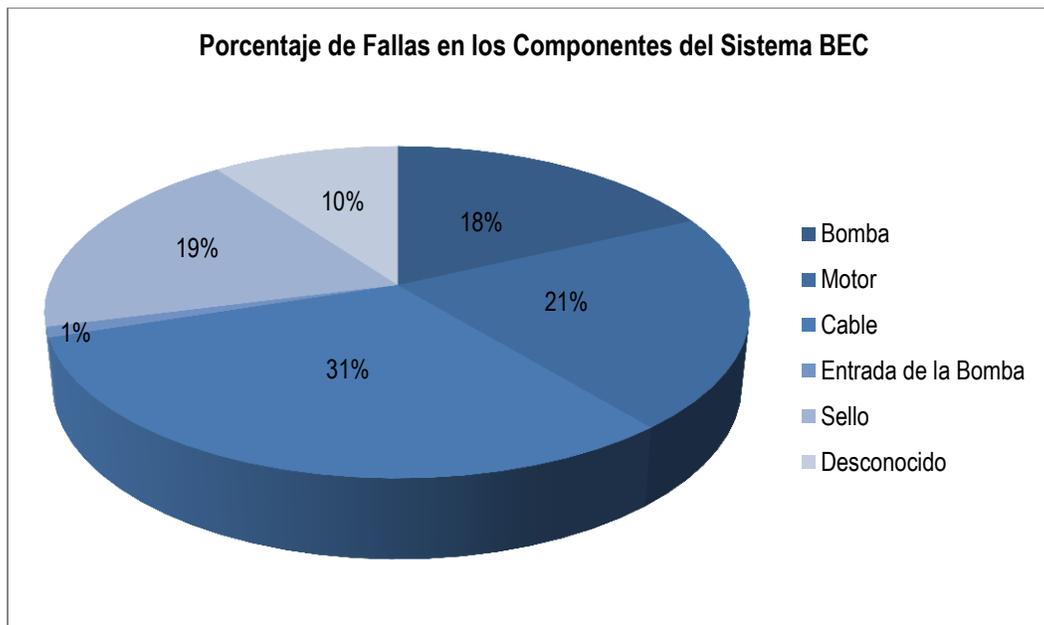


Figura 4.10 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC sin Problemas de Producción de Arena (Granados-Pérez, 2015)

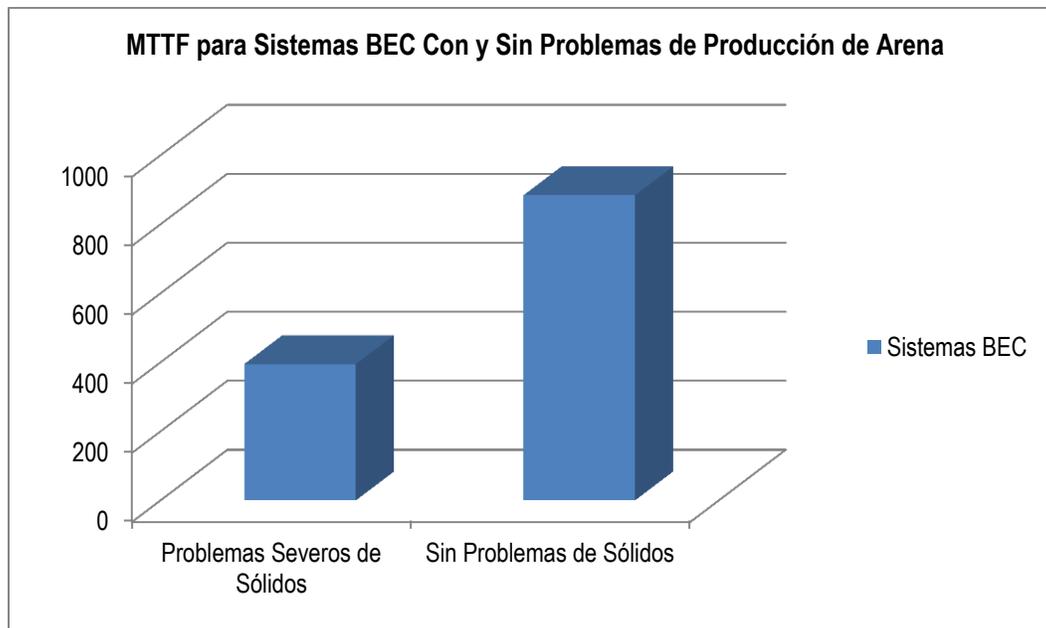


Figura 4.11 – Comparación Gráfica del MTTF para Sistemas BEC Con Problemas Severos y Sin Problemas de Producción de Arena (Stale, 2010)

Como ya vimos en el Capítulo I, la bomba en los Sistemas BEC es una bomba centrífuga o axial que rota a alta velocidad con partes tanto estacionarias como rotatorias las cuales son lubricadas por el paso de los fluidos de producción. Debido a que el fluido del yacimiento que entra en la bomba, comúnmente contiene partículas sólidas, la acción abrasiva de estas partículas puede dañar con mucha facilidad las partes móviles de la bomba. La pérdida de metal causada por la abrasión o erosión en las etapas de la bomba o en los cojinetes, pueden dar lugar a un daño crítico en la bomba. Adicionalmente a que las bombas BEC también pueden tener componentes para el manejo o separación de gas, los cuales también serán dañados por la producción de la arena que es arrastrada por el fluido de producción. Sin embargo, otros sólidos diferentes a la arena, tales como sulfuro de hierro, carbonato de calcio, entre otros, pueden causar daño por abrasión en las bombas.

Las propiedades características de aceite producido a partir de yacimientos los cuales nos presentarán producción de arena pueden ser resumidas de la siguiente manera:

- Generalmente, la producción de arena comienza cuando se produce a gastos altos
- La producción de arena incrementa después de que el agua ha irrumpido en el pozo
- Los cambios en los rangos de flujo pueden resultar en el comienzo o aumento de la producción de arena.

Los sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido, por lo regular son utilizados en pozos que presentan altos gastos de fluido y bajas presiones de fondo, también son comúnmente utilizados en operaciones de inyección de agua, las cuales frecuentemente implican operaciones cíclicas. Debido

a que estas áreas de aplicación coinciden con las causas principales que acabamos de enlistar acerca del comienzo o aumento de la producción de arena, los sistemas BEC son particularmente propensos a problemas de arena. Las partículas de arena pasan a través de la bomba causando el desgaste del metal de las diferentes partes de la bomba, por lo que podemos clasificar el daño por arena de las siguientes formas, las cuales serán descritas a continuación: Erosión y Abrasión

La erosión se presenta en la superficie de un metal cuando es golpeado por partículas de materiales abrasivos que son arrastrados por los fluidos. La abrasión tiene lugar cuando tenemos partículas entre el roce de dos superficies. La magnitud del daño causado por estos dos tipos de desgaste a las superficies depende de los siguientes factores: el tamaño y forma de las partículas sólidas, y la diferencia en la dureza del material afectado y el material de las partículas sólidas. La dureza del material dañado comparada con la agresividad de las partículas, tiene un efecto directo en la magnitud del daño causado. Ya que las partículas abrasivas no cortarán algo que sea más duro que ellas, los materiales utilizados en las bombas que serán utilizadas en ambientes abrasivos deben tener un nivel de dureza más alto que el del material abrasivo del fluido producido. Por lo tanto, es recomendado escoger materiales que puedan soportar el desgaste por abrasión, y/o utilizar capas de barniz especial protector para las áreas que se encuentren expuestas a estos tipos de materiales.

En la Figura 4.12, podemos ver la escala de Mohs, adaptada para poder utilizarse para comparar la dureza de los materiales, el material con el número más alto dañará a un material con un número de dureza relativa menor, podemos ver que la arena tiene una dureza mayor que el acero y el níquel; sin embargo no puede dañar materiales con mayor como lo son la zirconia y el carburo de tungsteno. Además de que dentro del pozo vamos a encontrar presentes otros materiales como carbonato de calcio, sulfato de hierro los cuales son mucho menos duros que la arena; por lo que esta es la razón por la que nos referimos a la arena como la sustancia más abrasiva presente en los pozos petroleros.

La forma y tamaño de las partículas también es de suma importancia y afecta el daño causado por las mismas ya sea abrasión o corrosión. El desgaste por abrasión es mayor cuando el tamaño de la partícula es menor comparado los espacios entre la bomba los cuales permiten que estas quepan. El desgaste causado por la corrosión por otro lado, es proporcional al tamaño de la partícula, la angulosidad y velocidad de la misma. Cuando se refiere a la forma de la partícula, las partículas irregulares o angulosas causan mayor daño que las partículas redondeadas, lisas o de tamaños similares.

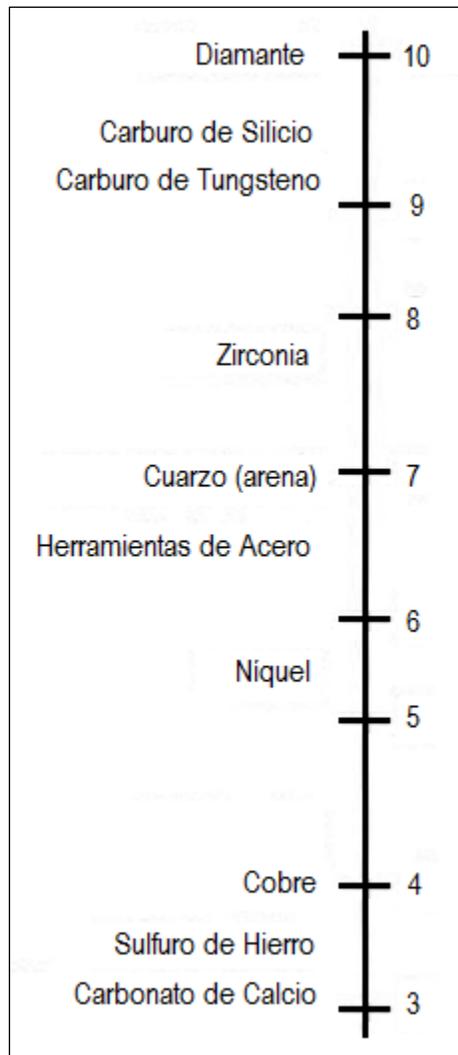


Figura 4.12 – Escala de Mohs (Modificado de Takacs, 2009)

El daño causado por arenas en las bombas BEC puede ser clasificado de acuerdo con la severidad del mismo, en las siguientes categorías:

Erosión en las etapas de la bomba: Tiene lugar cuando las partículas sólidas se encuentran chocando con las superficies del metal de manera similar al arenamiento en los materiales. La magnitud de este tipo de desgaste es proporcional a la angulosidad de las partículas y la velocidad de flujo debido a que el daño potencial de los sólidos se encuentra directamente relacionado con la energía cinética. Como ya fue mencionado, entre más grandes y angulosas sean las partículas, causarán más daño que las partículas pequeñas y más redondeadas. Los sólidos causan más daño en los puntos en los que tiene lugar un cambio en la dirección de flujo, lo que significa específicamente para la bomba del sistema BEC, en la entrada del difusor y del impulsor. La erosión también puede tener lugar alrededor de los anillos del difusor, donde los sólidos son movidos por el

arrastre viscoso de los fluidos que se encuentran estacionarios. Las etapas de la bomba pueden ser consideradas como erosionadas sin embargo esto muy pocas veces da lugar a falla debido que es muy probable que la bomba falle por otras razones antes de que se encuentre completamente erosionada.

Abrasión en los cojinetes radiales: Este tipo de erosión también es conocida como desgaste radial, es causada por la abrasión en los cojinetes radiales de la bomba. Por lo regular, la función principal de los cojinetes radiales es dar soporte al eje de la bomba. Estos cojines tienen una holgura radial fija; el tamaño de la holgura depende del diseño de la bomba y las tolerancias que pueda tener. Las holguras normalmente son lo suficientemente grandes para permitir la entrada de las partículas de arena en el espacio entre el cojinete y el área de trabajo. Las partículas más grandes, después de que entran entre el espacio de separación, rayan y se incrustan en la superficie del cojinete. Por lo tanto, el desgaste radial causará que el espacio entre el cojinete y el eje aumente; lo que resultará en la inestabilidad radial del eje. El eje comenzará a rotar excéntricamente, causando un incremento preferencial en el desgaste de uno de los lados del cojinete.

Además, debido a las altas cargas axiales que se encontrarán presentes actuando alrededor del eje, este comenzará a pandearse lo cual inducirá la vibración a lo largo del mismo. Dichas vibraciones serán transmitidas a la sección de sello, y la falla en el sello resultará en la entrada de los fluidos de producción en el motor causando un corto circuito. El desgaste radial aumentará sustancialmente con el aumento de los rangos de flujo debido a que al aumentar, una mayor cantidad de partículas de arena son arrastradas por el fluido.

Abrasión en los impulsores rotatorios y los difusores estacionarios: La abrasión en los impulsores rotatorios (desgaste axial) tiene lugar en los difusores estacionarios y la superficie de acoplamiento en las etapas de la bomba. Si los sólidos se encuentran atrapados entre los impulsores, esto puede dar como resultado el desgaste de los impulsores o el desgaste por el choque metal-metal entre el impulsor y el difusor. Las bombas con impulsores fijos eliminan por completo el contacto entre el difusor y el impulsor y por lo tanto se encuentran también protegidas en contra del daño abrasivo.

En el caso de las bombas con impulsores flotantes, la fuerza axial es absorbida por las partes rotatorias del impulsor que flotan libremente. El espacio entre las aletas no es fijo, este varía con la magnitud del impulsor y la viscosidad del fluido. La bomba se encuentra en una condición de empuje hacia abajo cuando se encuentra operando dentro del rango de capacidad recomendado, y los espacios entre las aletas son por lo regular, muy pequeños como para permitir la entrada de arena. Si la bomba se encuentra en una condición de empuje hacia arriba, entonces los espacios entre las

aletas son lo suficientemente grandes para permitir la entrada de grandes granos de arena, lo cual puede dar lugar al desgaste de las aletas y al desgaste o abrasión de las etapas.

4.4.1.1. Propuestas de Solución

La estrategia más lógica en contra de la entrada de sólidos, es asegurarse de que los materiales en puntos críticos como son las etapas de la bomba, sean más resistentes que la arena, ya que la arena es el componente más agresivo y abrasivo que encontraremos en los fluidos provenientes del yacimiento. Sin embargo, para materiales blandos como el hule del que se encuentran hechos los cojinetes, puede optarse el uso de caucho que debido a sus propiedades puede resistir el daño por sólidos; debido a la elasticidad natural del caucho, los sólidos que entren en los espacios del cojinete no lograrán desgastar ningún material. Adicionalmente, las partículas sólidas tampoco pueden incrustarse en los cojinetes debido a las mismas propiedades de elasticidad del caucho.

Erosión en las etapas de la bomba: Los fabricantes deben utilizar materiales que tengan de dureza como mínimo una aleación del 18% de níquel tanto en los difusores como en los impulsores, en lugar de otros materiales que pueden resultar más económicos y son más suaves como el hierro gris para así poder minimizar el desgaste debido a la erosión. El carburo de tungsteno es el ideal debido a que tiene una dureza cercana a la del diamante, y por lo tanto una muy alta resistencia al desgaste; el carburo de tungsteno tiene también una alta resistencia de fractura, alta conductividad térmica y alta resistencia a la corrosión. Además de que también pueden ser aplicadas capas de barniz especial resistentes a la erosión en las superficies que se encuentren expuestas.

Abrasión en los cojinetes (Desgaste radial): Para combatir esta categoría de desgaste, la elección de los materiales también es importante. Como ya fue mencionado, la abrasión axial será encontrada en las aletas de los impulsores de las bombas flotantes. Los cojinetes principales se encuentran situados por lo regular en el protector y deben estar hechos de materiales muy resistentes. El desgaste de los impulsores en las bombas flotantes puede ser reducido adicionalmente al elegir los materiales adecuados, al aumentar su área superficial.

Abrasión en los impulsores rotatorios y difusores estacionarios (Desgaste axial): La abrasión radial es la categoría que ocasiona el daño más severo de los diferentes tipos de daños causados por arena, por lo que se dará una explicación más detallada y recomendaciones para reducirla.

Los cojinetes radiales con propiedades especiales de elasticidad como por ejemplo el caucho, pueden ser colocados en el buje dentro del orificio del difusor, colocados a intervalos regulares en la bomba para disminuir el desgaste radial. En la elasticidad de los cojinetes, cuenta con surcos

longitudinales dentro de su superficie donde los sólidos pueden colocarse hasta que sean llevados por el flujo de la bomba. Los cojinetes especiales deben ser colocados en los intervalos más pequeños que sea posible para asegurarse de que el eje de la bomba mantiene su estabilidad radial.

Para reducir el desgaste axial, puede ser aplicado el endurecimiento de las superficies que se encuentran propensas al desgaste. En este proceso, se insertan placas especiales hechas de los materiales de la más alta dureza para que el desgaste tanto radial como axial, sean minimizados, también son aplicados para asegurar la estabilización tanto radial como axial. Sin embargo, los materiales resistentes a la abrasión son muy costosos, por lo que en lugar de recubrir todas las etapas de la bomba con materiales resistentes a la abrasión, una solución puede ser: recubrir solamente algunas etapas en la parte superior y la parte inferior de la bomba.

Normalmente se puede pensar que al usar metales extremadamente resistentes como el carburo de tungsteno o cerámicas, se incrementará la resistencia a la abrasión de las partes de la bomba, sin embargo; la aplicación de dichos materiales en los cojinetes de las bombas es algo que no puede llevarse a cabo, es ineficiente debido a que se vuelven frágiles y pueden ser fácilmente dañados si se concentra la carga en un solo punto o una línea. Los cojinetes en el sistema BEC, son colocados de forma que encajen con las partes que están cubriendo, lo cual causa líneas de carga, las cuales pueden resultar en falla si se usaran materiales que no son elásticos, estos cojinetes tienen un potencial para poder mejorar la utilización de materiales más duros en su fabricación y aplicación.

Otro de los componentes del sistema BEC además de la bomba que es afectado por la producción de sólidos son los separadores de gas que son también muy vulnerables al desgaste por abrasión debido a sus grandes fuerzas centrífugas que tienen lugar en la cámara de separación. Las partículas sólidas golpean la cubierta del separador con una velocidad significativa y causan corrosión. Una solución para evitar la vulnerabilidad de estas partes del separador, es fabricarlos con materiales resistentes.

La Figura 4.13, muestra a que concentraciones de arena y las bombas recomendadas a utilizar: bombas de compresión normales (con impulsores fijos), bombas flotantes fabricadas con materiales resistentes a la abrasión, y bombas de compresión fabricadas con materiales resistentes a la abrasión. Dependiendo de la agresividad de la abrasión, se pueden utilizar las siguientes reglas generales para seleccionar la bomba adecuada:

- Bombas con impulsores flotantes no son recomendadas si el fluido del yacimiento contiene arena
- Para condiciones de abrasión leves, las bombas con impulsores fijos pueden ser aplicadas sin arreglos adicionales

- Bajo condiciones muy severas del yacimiento, las bombas que deben ser utilizadas son bombas flotantes con materiales resistentes a la abrasión
- Para aplicaciones en las que encontramos condiciones extremadamente agresivas, serán requeridas bombas con materiales resistentes a la abrasión e impulsores fijos

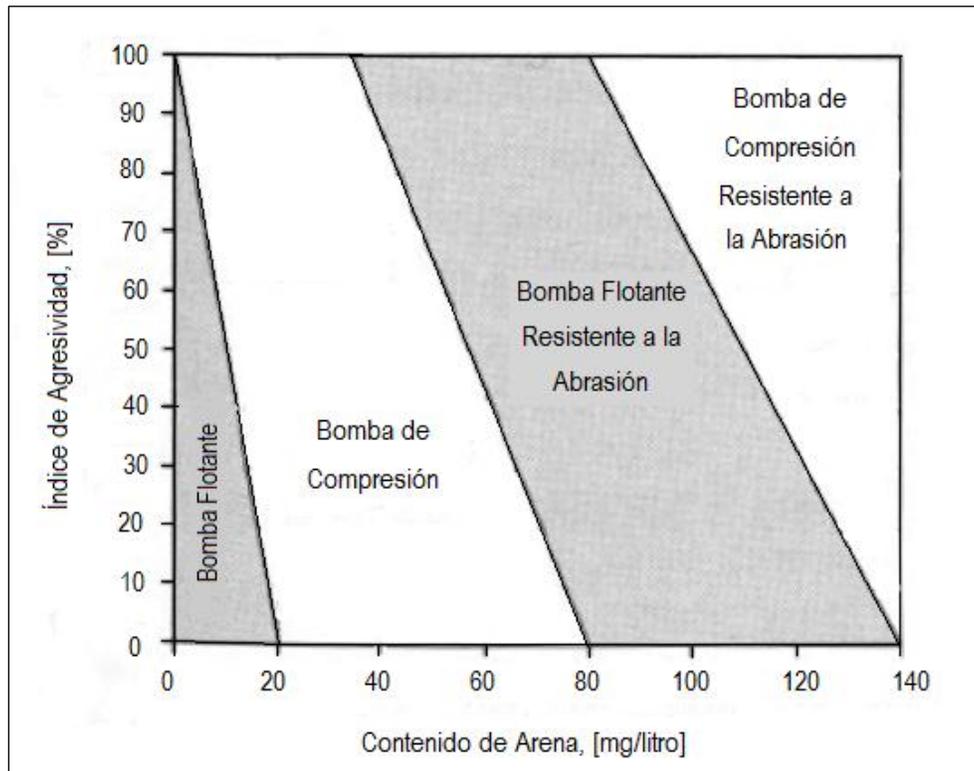


Figura 4.13 – Selección de la Bomba para Aplicaciones Abrasivas (Takacs, 2009)

Ya que el sistema de bombeo electrocentrífugo es puesto en el fondo de la tubería de producción, puede absorber grandes cantidades de arena hacia la bomba cuando es puesta en operación. Por lo tanto, debe tenerse especial cuidado cuando se pone en operación un sistema BEC cuando el ambiente que encontraremos en el pozo es abrasivo. Además de que las bombas con impulsores flotadores, siempre deben operar en la región de empuje hacia abajo, se deben utilizar pantallas o filtros de arena.

Soluciones de los Fabricantes a los Problemas de Arena

Es muy común que los vendedores o fabricantes, ofrezcan soluciones para combatir el problema de los sólidos, las cuales por lo regular van relacionadas con el uso de cojinetes especiales, recubrimientos especiales y el uso de materiales especiales para las partes vulnerables; o también, bombas con impulsores fijos y filtros para prevenir la entrada de sólidos en la bomba. Sin embargo

Lea & Mokhatab establecieron que las operaciones serían más fáciles si los sólidos pudieran ser transportados por la bomba y por lo tanto no sería necesario detener la producción para limpiar los filtros.

Podemos encontrar ya algunas opciones que se encaminan en ese rumbo, como por ejemplo: Wood Group ESP, ofrece la opción de bombas resistentes o radialmente estabilizadas para las aplicaciones en ambientes abrasivos, además de diferentes tipos de recubrimientos. Estos recubrimientos que son aplicados con una capa de barniz especial, pueden proteger tanto de la abrasión como de la formación de incrustaciones y escamas en el material.

También Baker Hughes Centrilift ofrece diferentes opciones relacionadas con el manejo de arena, como las siguientes:

- Estabilización en Aplicación Normal; SND, por sus siglas en inglés, Stabilized Normal Duty; Consiste en Cojinetes duros tanto en la cabeza como en la base de la bomba, y uno adicional en medio.
- Estabilización en Aplicación Difícil; SHD, por sus siglas en inglés, Stabilized Heavy Duty; Consiste en cojinetes duros en la cabeza y la base, además de otros cojinetes duros espaciados de acuerdo con el rango longitud – diámetro l/d. Este soporte es solamente radial.
- Estabilización en Aplicación Severa; SSD, por sus siglas en inglés, Stabilized Severe Duty; Este tipo de aplicación de estabilización más reforzada, consiste en cojinetes duros en la cabeza y la base, adicionalmente a una “manga” de cojinetes de recubrimiento en las bridas. Las “mangas” se encuentran como recubrimiento radial, además de estar en el difusor para el flujo mezclado con arena.
- Estabilización en Aplicación Extrema; SED, por sus siglas en inglés, Stabilized Extreme Duty. Este es el tipo de estabilización con mayor soporte que ofrece Baker Hughes Centrilift, está derivado del ODIS SP, bomba para manejo de arena; por sus siglas en inglés, Super Sand Pump. Cuenta con cojinetes de recubrimiento en las etapas, de forma radial y para el manejo del flujo mezclado con arena.

Estas opciones han sido innovadas con un nuevo diseño de bomba, el cual es más resistente a la abrasión. La nueva línea de bombas Centurion incorpora una apertura más grande entre las etapas para ayudar a prevenir el problema de los sólidos y las incrustaciones.

Por parte de Schlumberger, REDA ofrece bombas con una gran cantidad de modificaciones, tales como materiales más duros con los que pueden ser fabricadas las bombas los cuales contienen una mayor cantidad de níquel y cromo. También ofrecen difusores cúbicos y cojinetes para el final del

eje. Weatherford, por su parte, ofrece la opción de poder fabricar bombas especiales para condiciones de operación severas.

4.4.2. Vibración en los Sistemas BEC

Debido a que el equipo subsuperficial del sistema BEC tiene una relación longitud del eje – diámetro muy grande; como sabemos todos los componentes: motor, sello, separador de gas y bomba, se encuentran conectados por un eje de diámetro muy pequeño. Adicionalmente, cada uno de estos componentes incluyen partes que se encuentran rotando a altas velocidades, por lo tanto existe un gran potencial de vibración en el equipo subsuperficial del sistema de bombeo electrocentrífugo. Las vibraciones se originan en uno de los componentes del sistema y se transmiten por todo a través del eje que los conecta a todos

4.4.2.1. Modos de Vibración

Los modos de vibración en el sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido, de acuerdo con la API 11S8, pueden ser los siguientes:

- Axial. La vibración axial afecta la bomba, el motor y la sección de sello por el empuje de los cojinetes.
- Lateral. Las vibraciones laterales tienen lugar de manera lateral como su nombre lo dice, con respecto a la longitud de los componentes subsuperficiales del sistema BEC y afecta mayormente a los cojinetes radiales de la bomba. Este tipo de vibración puede dar lugar a enormes consecuencias, esto debido a que los largos y delgados ejes que encontramos en las aplicaciones del sistema de bombeo electrocentrífugo son muy sensibles a la estabilidad radial. Si la estabilidad radial es perdida, esto puede dar lugar eventualmente, a una falla.
- Torsional. Este tipo de vibraciones puede ser un problema durante el inicio del funcionamiento del sistema cuando se está cambiando la velocidad de la bomba. Este tipo de vibraciones puede dar lugar a torceduras en el eje.
- Una combinación de los tres.

4.4.2.2. Fuentes de Vibración

Desbalance de Masas.

Las vibraciones pueden ser causadas por un desbalance de masas el cual es debido a:

- Partes rotatorias con materiales no homogéneos. Puede incluir pozos que fueron provocados por errores o cambios durante el proceso de fundición, intrusiones de sólidos provenientes del

yacimiento en el fluido de producción en los materiales forjados o de aluminio, intrusiones de escoria o variaciones en la densidad del material.

- Partes rotatorias con configuraciones asimétricas. Las cuales pueden incluir asimetría debida a cambios en el proceso de fundición, o superficies rugosas causadas durante el forjado.
- Excentricidad en los ejes o cojinetes. Las fuentes de excentricidad pueden ser: cojinetes no circulares o concéntricos al eje, ejes doblados o inclinados, espacios entre las partes rotatorias los cuales dan lugar a las excentricidades, y expansión térmica.

Desalineación

La desalineación puede dar como resultado grandes vibraciones axiales. Existen dos tipos de desalineaciones los cuales pueden tener lugar; la desalineación angular y la desalineación por descompensación.

La desalineación angular es cuando las líneas centrales de dos ejes chocan en algún ángulo. Por otra parte la desalineación por descompensación, es cuando las líneas centrales de los ejes se encuentran paralelas pero desplazadas una de la otra. Si los coples o los cojinetes del eje se encuentran desalineados, esto puede resultar en vibraciones perpendiculares en el eje (vibración transversal). También debemos tener presente que se puede presentar un modo de vibración axial si los coples flexibles tienen una desalineación angular. Entre más largos sean los ejes, son más grandes las posibilidades de que se presenten tales vibraciones. De acuerdo con la API 11S8, la desalineación puede presentarse en ambas direcciones, tanto axial como radial. Si la amplitud de las vibraciones axiales es mayor al 50% de la vibración radial mayor, entonces se puede inferir que tenemos presente una desalineación en el eje, o este se encuentra doblado o torcido.

Flujo Inducido

El flujo a través del sistema de bombeo electrocentrífugo puede causar vibraciones en la bomba. La causa de este tipo de vibración por lo regular es la turbulencia; sin embargo la turbulencia será la mínima si la bomba se encuentra operando dentro de su ventana operacional. El flujo multifásico y los fluidos asimétricos que pasan en la bomba pueden inducir el desbalance hidráulico. También se sabe que puede ocurrir cuando los fluidos que se encuentran en circulación con gaseosos o altamente viscosos.

Fricción mecánica

El contacto entre las partes rotatorias y las partes estacionarias puede inducir a la vibración. El sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido también es sensible a efectos ocasionados por causas eléctricas como la inestabilidad del suministro de corriente y el cambio en las velocidades de la bomba, las cuales también pueden causar vibraciones.

Existen otros motivos por los que puede presentarse vibración son:

- Remolinos de aceite pueden causar vibraciones en los cojinetes que no sean demasiado duros.
- Si los cojinetes no se encuentran bien colocados o asegurados, puede dar lugar a la rotación de los cojinetes la cual causa la vibración.

4.4.2.3. Control de Vibración

De acuerdo con la API 11S8, existen dos categorías principales en las que el control de vibración puede agruparse: reducción en la fuente de vibración y reducción en la respuesta a la vibración.

4.4.2.3.1. Reducción de la Fuente de Vibración

- Balace de las masas que se encuentran rotando. La vibración que es ocasionada por los componentes que se encuentran rotando desbalanceados, comúnmente puede ser reducida al balancearlos.
- Balace de fuerzas magnéticas. El diseño y la fabricación adecuados tanto del rotor como del estator minimizará la vibración producida en el motor eléctrico.
- Control del espaciado entre componentes. La vibración ocasionada por el roce de los componentes entre ellos mismos, puede ser reducida al evitar los grandes espacios entre los cojinetes y asegurándose que los componentes se encuentren dimensionados con tolerancias aceptables.
- Control de la rectitud de los ejes. Debido a que los ejes se encuentran rotando, al controlar la rectitud de los mismos, vamos a prevenir este tipo de vibración.

4.4.2.3.2. Reducción en la Respuesta a la Vibración

- Alteración de la frecuencia normal. La resonancia puede tener una gran y perjudicial influencia en la vibración, la cual puede ser reducida al cambiar la frecuencia normal del sistema. Esto puede lograrse usándose variadores de velocidad para operar la frecuencia la cual no debe llevar a las velocidades críticas.

- Amortiguación adicional. La vibración que es ocasionada por la resonancia se encuentra ampliamente relacionada a la amortiguación que está siendo empleada. Se pueden utilizar diferentes técnicas para incrementar la cantidad de amortiguación; sin embargo debe considerarse que la amortiguación adicional reduce la eficiencia del sistema BEC.

Se pueden identificar diferentes causas de falla de acuerdo con la frecuencia de las vibraciones observada. En la Tabla 4.11, podemos observar las frecuencias relativas típicas de las velocidades de rotación en el sistema de bombeo electrocentrifugo, además de las probables causas de problemas. Entre más alta sea la velocidad a la que se encuentra operando el sistema BEC, más alta será la vibración causada por desbalance. Las fuerzas debidas al desbalance, son proporcionales a la frecuencia de operación elevada al cuadrado, este es un aspecto en el que se debe poner atención cuando el sistema BEC se encuentre operando con variador de frecuencia.

Partes del Sistema BEC	Frecuencias Típicas (en relación con la velocidad de rotación)	Causas Probables
Ejes y rotores	1 o 2 por rpm	Torcedura del eje.
Todas las partes rotatorias	1 por rpm	Desbalance de masas o, desbalance hidráulico, o rotor descentrado.
Coples, ejes, cojinetes	De 1 a 2 por rpm, en ocasiones 3 por rpm	Desalineación del cople o, desalineación del cojinete del eje.
Cojinete de la camisa	< 1/2 por rpm	Remolinos de aceite en cojinetes, remolinos de aceite más comúnmente en la cámara de sellado.
Cojinete anti-fricción	> 5 por rpm	Fricción excesiva, lubricación deficiente, arreglo demasiado justo.
Fricción mecánica	1/3 o 1/2 por rpm	Contacto entre superficies estacionarias y rotatorias
Rotación de cojinetes en los muñones	1/2 por rpm	Giro del muñón junto con el eje
Motor	1 por rpm	Excentricidad del rotor

Tabla 4.11 – Análisis de Vibración en el Sistema BEC (API 11S8, 2008)

También existen las velocidades críticas en los sistemas de bombeo electrocentrifugo sumergido, estas pueden ser tanto torsionales como laterales. De ser posible, el sistema BEC no debe operar cerca de estas velocidades críticas por largos periodos de tiempo. Este problema se presenta frecuentemente durante la puesta en operación del sistema de bombeo electrocentrifugo, o cuando el sistema se encuentra operando en un rango de velocidades altas.⁶

4.4.2.4. Medidores de Vibración

4.4.2.4.1. Acelerómetros

Un acelerómetro o sensor de aceleración, está pensado para realizar una medida de aceleración o vibración, proporcionando una señal eléctrica según la variación física, en este caso la variación física es la aceleración o la vibración.

Los acelerómetros son muy lineales en cuanto a la amplitud, lo que significa que tienen rangos dinámicos muy grandes. Son relativamente insensibles a la temperatura y las influencias magnéticas, sin embargo el calor excesivo puede causar daño. Los acelerómetros son comúnmente utilizados para medir vibraciones con altas frecuencias, ya que mide vibraciones de frecuencias desde 10, hasta 12000 Hertz. Estos son utilizados por lo regular para medir frecuencias de hasta un tercio de su máximo, los registros de frecuencias por encima de este límite, por lo regular serán afectados por la respuesta de la resonancia, sin embargo pueden ser utilizados si se considera el efecto que produce la resonancia y se corrige. Es importante que al instalarse el acelerómetro, se considere la ruta de vibración desde la fuente hasta el acelerómetro más corta posible.

4.4.2.4.2. Sondas de Proximidad

Las sondas de proximidad, que también son llamadas: transductores de desplazamiento o sonda de corriente Eddy, requiere de un acondicionamiento para un amplificador de señal para generar una salida de voltaje proporcional a la distancia entre la sonda y el eje. Estas operan bajo un principio magnético, y por lo tanto son sensibles a anomalías magnéticas en el eje, así que es importante asegurarse que el eje no se encuentre magnetizado para asegurar que la señal de salida no se encuentre contaminada.

También es importante recordar que la sonda mide el desplazamiento relativo entre el cojinete y la camisa, y por lo tanto el nivel total de la medida de vibración, no corresponden solamente al eje o la cubierta. La frecuencia de respuesta, va desde 0 hasta 1000 Hertz. Existen sondas de proximidad que pueden ser instaladas dentro de la cubierta del motor para medir el desplazamiento relativo ente el eje y la cubierta; sin embargo, no son instaladas en sistemas BEC por la dificultad que implica.

4.4.2.4.3. Sondas de Velocidad

Las sondas de velocidad se encuentran hechas de bobinas de alambre y un imán, acomodados de forma que si se mueve la cubierta, el imán tienda a permanecer estacionario debido a su inercia.

Debido al movimiento relativo entre el campo magnético y el embobinado, una corriente es inducida la cual es proporcional a la velocidad de movimiento. La sonda por lo tanto, produce una señal directamente proporcional a la velocidad de vibración.

La unidad es auto generadora y por lo tanto no necesita acondicionamiento electrónico para su funcionamiento, además de que tiene una salida de baja impedancia lo cual la hace relativamente insensible a la inducción por el ruido. Sin embargo, a pesar de estas ventajas, la sonda de velocidad tiene también muchas desventajas: es pesada y compleja, además de que tiene una frecuencia de respuesta pobre, de 10 a 1000 Hertz, esto es debido a que el imán tiene una frecuencia natural de aproximadamente 10 Hertz. Para evitar grandes picos en la respuesta, esta resonancia debe ser altamente amortiguada. Una forma de hacerlo es que el amortiguante sea sensible a la temperatura, lo que causa que la respuesta de la frecuencia y de fase sean dependientes de la temperatura.

El método para el monitoreo de la vibración en los sistemas BEC que es utilizado en la actualidad, son acelerómetros colocados en el indicador del motor el cual se encuentra debajo de la cubierta del motor como puede observarse en la Figura 4.14. La forma en la que se llevan a cabo las medidas tanto en dirección radial como tangencial se muestran en la Figura 4.15, la dirección radial es medida del acelerómetro al centro del eje, y la tangencial es medida tangente al eje.

4.4.2.5. Requerimiento de Medición de Vibración en los Componentes del Sistema BEC

Bomba

Las pruebas de vibración en la bomba pueden ser llevadas a cabo junto con la prueba de aceptación de la bomba de acuerdo a la API RP-11S2. El requerimiento mínimo de las mediciones que deben ser tomadas es:

- En el punto medio de la cubierta
- En la parte superior del cojinete radial
- En la parte inferior del cojinete radial
- Es importante tener en cuenta que el rango de operación de la bomba debe mantenerse constante mientras son tomadas las medidas.



Figura 4.14 – Esquema de la Ubicación del Acelerómetro en el Sistema BEC (Baker Hughes Centrifugal, 2008)

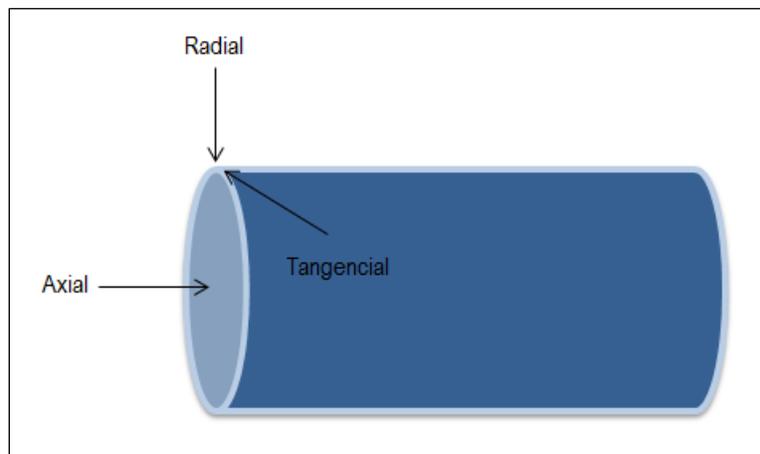


Figura 4.15 – Alineación de los Ejes de Vibración (White, 1997)

Separador de Gas

El requerimiento mínimo de mediciones que deben ser tomadas en el separador de gas son:

- En el punto medio de la cubierta
- En la parte superior del cojinete radial
- En la parte inferior del cojinete radial

Correspondientes a la sección del separador de gas.

Sello

El requerimiento mínimo de mediciones que deben ser tomadas en la sección sello son:

- En el punto medio de la cubierta
- En la parte superior del cojinete radial
- En la parte inferior del cojinete radial

Correspondientes a la sección sello del sistema de bombeo electrocentrifugo sumergido.

Motor

El requerimiento mínimo de medición que deben ser tomadas en el separador de gas son:

- En el punto medio de la cubierta
- En la parte superior del cojinete radial
- En la parte inferior del cojinete radial

Correspondientes al motor.

4.5. Análisis de Posibles Causas de Falla Durante el Transporte e Instalación del Sistema BEC

El transporte del Sistema BEC desde que sale de fábrica hasta que llega al pozo es muy importante para poder tener un buen Tiempo de Vida Útil de los componentes. Esta parte es muy importante y no debe pasarse por alto debido a que muchas veces los problemas presentados durante el transporte del sistema no son reportados y en muchas ocasiones lleva a falla. A continuación se presentarán los problemas más frecuentes en el transporte del sistema BEC.

4.5.1. Falta de Supervisión

Durante la instalación, el transporte y manejo de los equipos de bombeo electrocentrifugo sumergido, existen procedimientos que deben ser cumplidos para evitar que los sistemas sufran

daños perjudiciales para la operación y el Tiempo de Vida Útil. En muchos casos se observa que en la supervisión hay exceso de confianza al delegar responsabilidades a terceros. La repercusión en los sistemas BEC es negativa, por consiguiente afecta la rentabilidad del proyecto debido a fallas prematuras por falta de supervisión.

4.5.1.1. Recomendaciones Para la Supervisión

- a. Realizar una supervisión directa, ya que no todo el personal conoce la importancia y el costo del sistema BEC.
- b. Reportar cualquier daño que sufra el sistema de bombeo electrocentrífugo, ya que en ocasiones pueden presentarse problemas debido a fallas mecánicas de los equipos que realizan la operación de transporte.
- c. Realizar todas las pruebas necesarias en coordinación con el fabricante y el operador para descartar cualquier falla en el sistema BEC.

4.5.2. Falta de Comunicación y Coordinación Durante Cambios de Guardia

La falta de comunicación o coordinación durante las operaciones del sistema de bombeo electrocentrífugo pueden ocasionar problemas debido a que no se informa el estado actual del sistema o el cuidado que se debe tener para el manejo del mismo. En otros casos, también puede ocurrir la confusión de sistemas cuando varios sistemas BEC serán instalados en diferentes pozos en una misma locación. Esta falta de comunicación puede ocasionar daños que pueden causar fallas en el Sistema BEC.

4.5.2.1. Recomendaciones Para la Comunicación y Coordinación Durante Cambios de Guardia

- a. Capacitación del personal que se encargará de los procesos
- b. Mejora de la comunicación en los cambios de guardia
- c. Comunicación entre el personal de perforación, logística y la compañía fabricante para evitar problemas durante las operaciones del sistema BEC.

4.5.3. Almacenamiento de Equipo y Accesorios Eléctricos

Todos los equipos y accesorios eléctricos tales como el cable, los penetradores, cintas de empalme, elastómeros, durante el transporte, almacenamiento y en el pozo deben estar lo suficientemente protegidos contra la lluvia, humedad, aceites; para evitar fallas como consecuencia de equipo y

accesorios eléctricos en mala condición. La repercusión y el impacto económico pueden llegar a ser muy grandes.

4.5.3.1. Recomendaciones Para el Almacenamiento de Equipo y Accesorios Eléctricos

- a. Empacar de manera apropiada los accesorios eléctricos antes de ser enviados al pozo
- b. Si existen accesorios o equipo eléctrico que del cual no se sepa con certeza su condición física o eléctrica, se recomienda no usarlo y enviarlo al taller de pruebas del fabricante para su inspección
- c. Cuando los accesorios y equipos se encuentren en almacenamiento o en el pozo es extremadamente importante que se haga de manera adecuada, con la protección suficiente para que estos puedan cumplir sus funciones y por lo tanto, contribuir a un buen tiempo de vida útil del sistema BEC
- d. Solicitar y tener a disposición el equipo de perforación necesario para la instalación de estos componentes

Por otra parte los accesorios eléctricos de los que no se tiene certeza de su buena condición tanto física como eléctrica, existen las pruebas Hipot, las cuales deben llevarse a cabo en los talleres especiales de pruebas del fabricante o del operador, si cuenta con este; para poder certificar su condición eléctrica, y dependiendo de los resultados, estos accesorios o equipos eléctricos puedan volver al almacén o ser descartados de manera definitiva para la operación en el sistema BEC.

4.5.4. Falta de Procedimientos

Para el desarrollo de todos los procesos logísticos en el sistema BEC, tanto superficial como subsuperficial, existen procesos determinados los cuales deben ser seguidos tanto por el cliente como por el contratista, para así poder asegurar la confiabilidad del equipo durante la operación del sistema de bombeo electrocentrifugo.

Todos los componentes y accesorios deben encontrarse almacenados de manera apropiada, lo cual facilitará la correcta y ágil identificación de modelos y tipos de equipos, facilitará el retiro de sistemas BEC cuando son enviados a pozo o a taller de pruebas, y la realización de pruebas puntuales cuando son requeridas además de observar fallas que puedan detectarse a simple vista.

Las repercusiones que puede traer el no aplicar los procedimientos determinados, pueden ser: reducción del Tiempo de Vida Útil del sistema BEC, incremento de costos tanto de personal como de administración y en equipo para el acomodo del sistema de bombeo electrocentrifugo.

4.5.4.1. Recomendaciones Para la Aplicación de los Procedimientos

- a. Preparar y aplicar los procedimientos de las diferentes etapas de la logística como el manejo, transporte, descarga y almacenamiento.
- b. Estandarizar las prácticas operativas
- c. Involucrar personal de campo y administrativo en la revisión de los procedimientos para que todas las posibles fallas puedan ser identificadas.
- d. Actualizar y optimizar constantemente los procedimientos

4.5.5. Falta de Repuestos en el Pozo

El problema de la falta de repuestos durante la instalación, introducción y puesta en operación del sistema BEC regularmente tiene lugar en nuevas aplicaciones o aplicaciones con muchos años sin reparaciones u operaciones de mantenimiento al sistema de bombeo electrocentrífugo; por lo cual debe realizarse una revisión anticipada de equipos, accesorios y materiales a utilizar para determinado proceso. Las repercusiones de este problema implica: pérdidas de tiempo del equipo de perforación, producción diferida, gastos innecesarios de transporte (aéreo, terrestre o marítimo) para conseguir el repuesto, exposición del pozo a posibles situaciones anormales de fondo, atraso del plan de desarrollo, movimiento innecesarios de equipo, entre otras, y por consecuencia en los costos del proyecto.

4.5.5.1. Recomendaciones Para la Disposición de Repuestos

- a. Revisar con anticipación el equipo, accesorios y materiales que se necesiten para la etapa de operación del sistema BEC que se esté llevando a cabo
- b. Mantener controladas las presiones en el pozo si es necesario esperar por algún repuesto
- c. Revisar los requerimientos de los programas de diseño y confirmar con el sistema BEC disponible para ser utilizado
- d. Realizar todas las pruebas que se permita hacer al sistema BEC y sus componentes antes de instalarlos.

4.6. Análisis de Posibles Causas de Falla Durante el Ensamblaje del Sistema BEC

4.6.1. Golpeo del Sistema BEC con el Equipo de Perforación o Reparación

Para el armado del Sistema BEC como para los demás procedimientos, es indispensable seguir los procedimientos establecidos tanto en el manejo de los componentes, la manipulación y los cuidados adecuados al bajarlo al pozo. En ningún momento se debe dar lugar a que el sistema BEC sufra golpes contra el equipo de perforación, por lo tanto los movimientos deben ser bien coordinados con todo el personal que se encuentre llevando a cabo la operación. Un golpe en el sistema de bombeo electrocentrifugo puede afectar partes internas del mismo, lo que nos lleva a la misma consecuencia: fallas prematuras, y Tiempos de Vida Útiles menores.

4.6.1.1. Recomendaciones Para Evitar el Golpeo del Sistema BEC

- a. Tener una estrecha supervisión de las maniobras realizadas
- b. Reportar de manera inmediata cualquier golpe que el sistema BEC haya sufrido
- c. Si el armado del sistema BEC se lleva a cabo de noche, contar con la iluminación suficiente
- d. Seguir los procedimientos establecidos de izaje para el sistema BEC
- e. No utilizar cadenas de hierro para levantar el sistema BEC ya que pueden maltratarlo innecesariamente además de sufrir deslizamientos. Es recomendado utilizar tiras de nylon
- f. Seguir las normas de seguridad aplicables para maniobras de equipo pesado
- g. Verificar el buen funcionamiento del equipo con el que se llevará a cabo el manejo del Sistema BEC

4.6.2. Desplazamiento de los Ejes del Sistema BEC Durante la Conexión

Este problema ocurre principalmente durante las conexiones de los componentes del sistema BEC, esto es debido a que el eje se encuentra suspendido del elevador y choca con una esquina del acoplamiento del mismo sistema, el cual se encuentra suspendido en la parte inferior con la grampa sobre la mesa rotaria. Las maniobras de conexión del sistema BEC deben llevarse a cabo de manera coordinada,

Es importante notar que en el diseño del sistema de bombeo electrocentrifugo, los ejes están diseñados con un rango permisible de desplazamiento dependiendo del tipo, fuera de estos límites y si ha sido por efecto de un mal acoplamiento es cien por ciento seguro que tendremos una falla prematura en el sistema BEC en el momento en el que este entre en operación, lo cual de la misma

manera que los anteriores, repercutirá tanto en la Vida Útil del Sistema como en los costos del proyecto.

4.6.2.1. Recomendaciones Para Evitar el Desplazamiento de los Ejes del Sistema BEC Durante la Conexión

- a. Realizar una reunión previa al armado del sistema BEC con todo el personal involucrado en la operación y mencionar el cuidado que se debe tener para el sistema de bombeo electrocentrífugo
- b. Tomar el tiempo necesario para realizar las conexiones del sistema BEC de manera segura
- c. En caso de haberse golpeado el sistema BEC durante las conexiones, se recomienda no bajar el equipo al pozo ya que debe ser sometido a las pruebas correspondientes por el fabricante

4.6.3. Falta o Exceso de Torque a los Pernos Durante las Conexiones

Cuando se llevan a cabo las conexiones de los componentes del sistema BEC, el torque que se aplica a los pernos se encuentra determinado de acuerdo al tamaño del perno. Existen torquímetros que se utilizan en las instalaciones para poder medir el torque óptimo que se debe aplicar durante las instalaciones de los componentes del sistema.

La falta de torque a los pernos es muy peligrosa debido a que cuando el sistema es bajado al pozo, se encuentra expuesto a ciertos alargamientos o maniobras abruptas de freno además de la vibración, lo cual ocasionará que los pernos se vayan desenroscando progresivamente, llegando incluso a desenroscarse, originando problemas de pesca e incluso pérdida del sistema. Por otro lado, el exceso de torque en los pernos ocasiona que las arandelas de presión se rompan y por lo tanto el perno no quedará lo suficientemente apretado, también puede ocurrir que por exceso de torque se dañe la rosca de equipo y no logre hacer buen sello.

4.6.3.1. Recomendaciones Para Evitar la Falta o el Exceso de Torque a los Pernos Durante las Conexiones

- a. Usar el torquímetro.
- b. Fijar el tamaño óptimo dependiendo del perno.
- c. En las conexiones que hayan sido dañadas es recomendable pasar el corrector de roscas.
- d. Realizar un doble chequeo de los pernos antes de bajar el sistema BEC al pozo

4.6.4. Instalación del Sistema BEC en Condiciones Climáticas Adversas

El sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido tiene componentes y partes eléctricas en el motor, además del cable de potencia. De la misma forma existen partes eléctricas cuando se instalan los sensores de fondo que van conectados en la parte inferior del motor BEC.

Por lo tanto, la instalación del sistema BEC es recomendable que se lleve a cabo bajo condiciones climáticas favorables, sin mucha lluvia o humedad. El problema en este tipo de operaciones se presenta cuando se continúa con la instalación del sistema con lluvia, lo cual es muy riesgoso ya que las conexiones eléctricas son muy sensibles y pueden presentar falla del sistema. Esto se presenta debido a que al haber intrusión de agua o humedad ocasionará el desbalance, el cual como ya vimos en la parte anterior del presente capítulo, es uno de los principales Descriptores de Falla en fallas eléctricas del sistema BEC

4.6.4.1. Recomendaciones Para la Instalación del Sistema BEC en Condiciones Climáticas Adversas

- a. La principal recomendación es no llevar a cabo la instalación del sistema BEC bajo condiciones climáticas adversas.
- b. Cuando la instalación del sistema BEC sea interrumpida por lluvia, proteger todos los componentes y principalmente las conexiones eléctricas para evitar la entrada de agua en el mismo.
- c. Antes de reiniciar la operación de instalación, realizar las mediciones eléctricas para confirmar las lecturas con las iniciales.
- d. Antes de reiniciar la operación de instalación, verificar que los componentes no se encuentren conectados para evitar accidentes con el personal.

4.7. Análisis de Posibles Causas de Falla Durante la Introducción del Sistema BEC

La introducción del sistema de bombeo electrocentrífugo, es la etapa en la que se baja el sistema al pozo, la cual requiere de un especial cuidado y supervisión, principalmente en pozos desviados u horizontales. Llevar a cabo de manera adecuada esta operación, contribuirá de manera significativa a obtener el Tiempo de Vida Útil del sistema BEC calculado. Por otra parte, cuando se presentan problemas en la introducción del sistema BEC dentro del pozo, en algunas ocasiones llega a ser necesario el cambio parcial y hasta total del sistema, ocasionando incrementos en los costos y tiempos del proyecto.

4.7.1. Geometría del Pozo

El desconocimiento de la geometría del pozo es uno de los problemas principales que ha sido observado en la introducción de sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido, esto repercute en no tomar las medidas preventivas necesarias a la hora de llevar a cabo la operación lo que lleva a incremento de tiempos y costos y en situaciones extremas, a la pérdida del sistema BEC e incluso, del pozo.

Entre las técnicas utilizadas costa afuera para asegurar una buena introducción del sistema BEC, es la bajada previa de un simulador de fondo con los mismos diámetros que los del sistema de bombeo electrocentrífugo que será introducido hasta la profundidad donde se colocará la bomba.

4.7.1.1. Recomendaciones Acerca de la Geometría del Pozo

- a. Informar a los involucrados en la introducción del sistema la geometría del pozo además de las zonas de alto riesgo antes de que la operación sea llevada a cabo.
- b. Tomar en cuenta el drift de la tubería de revestimiento y no el diámetro interno para realizar los cálculos de diseño del sistema BEC.
- c. Asegurarse de que la tubería de revestimiento se encuentre en buenas condiciones, de no ser así llevar a cabo las reparaciones pertinentes antes de la introducción del sistema BEC.
- d. Verificar que el pozo se encuentre limpio.
- e. Contar con los registros direccionales o de geometría de pozo para verificar las zonas de alta desviación.

4.7.2. Alta Velocidad de Introducción

La introducción del sistema de bombeo electrocentrífugo debe iniciarse después de que se haya verificado que la torre de perforación de encuentre bien alineada y el sistema BEC esté centrado en el pozo de acuerdo con el cable de potencia.

Es importante mencionar que dentro del equipo subsuperficial del sistema BEC tenemos accesorios y conexiones eléctricas, y el material de protección para los cables y la extensión del motor es resistente a la corrosión; sin embargo no es una buena protección contra fallas mecánicas. Por lo tanto el sistema BEC debe ser introducido de forma adecuada para evitar este tipo de problemas, entre los cuales podemos mencionar los siguientes:

- Exceso de fricción en los protectores o cubiertas de los componentes con la tubería de revestimiento, ya que puede causar la rotura de la cubierta externa.

- Fricción constante del cable de potencia, la cual puede ocasionar que el aislamiento del cable se vaya debilitando y por lo tanto causar fallas.
- Daño de la tubería flexible que se introduce con el cable o externamente, ya que se perderá la operación de inyección afectando la optimización del sistema BEC y ocasionando incremento en los costos. En algunos casos se utiliza tubería de media pulgada para el control de la válvula de seguridad y la válvula de venteo debido a que en aplicaciones costa afuera se debe operar con ambas válvulas.
- Exceso de vibración de los componentes subsuperficiales cuando se detiene bruscamente el equipo que se encuentra introduciendo el sistema BEC dentro del pozo, lo cual puede afectar el torque de las conexiones.

4.7.2.1. Recomendaciones Para Evitar una Alta Velocidad de Introducción

- a. Mantener siempre alineado el pozo con el sistema BEC que se esté introduciendo. Es conveniente tomar el tiempo pertinente para llevar a cabo correcciones de alineamiento.
- b. Evitar tratar de ganar tiempo en la operación bajando a excesiva velocidad, ya que perjudicará los componentes subsuperficiales del sistema BEC.
- c. Verificar constantemente que la posición del cable se encuentre bajando alineado con la tubería.
- d. Contar con la supervisión adecuada de la operación, además de informar a los encargados de la operación la importancia y cuidados del sistema BEC.
- e. Reducir la velocidad de introducción a menos de la promedio en zonas de alto riesgo.

4.7.3. Realización de los Empalmes Gruesos

El número de empalmes requeridos en el sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido depende en gran manera de la profundidad a la que se vaya a colocar la bomba, la disponibilidad de cable, geometría de pozo, debido a que se tiene que cambiar de cable redondo a cable plano, el grado de desbalance, entre otros factores. Los empalmes que encontraremos en el sistema BEC son los siguientes:

- Empalme cable de potencia – cable de potencia.
- Empalme cable de potencia – cable de extensión del motor.
- Empalme cable de potencia – cable del penetrador del empacador.
- Empalme cable de potencia – cable de la mufa.

Todos los empalmes deben ser hechos de acuerdo a los procedimientos determinados por los fabricantes de los sistemas BEC, y que en la actualidad se han estandarizado. En situaciones

especiales y en condiciones muy adversas como en el caso de alta temperatura, existen algunas alternativas que serán mencionadas en las recomendaciones de esta parte para optimizar el tiempo de vida de los empalmes.

Dentro de los problemas que se presentan en sistemas BEC con respecto a los empalmes, son las fallas prematuras de los equipos durante la introducción del sistema o cuando está en operación debido a que los empalmes fueron hechos con demasiado espesor ocasionando que en espacios reducidos de la tubería de revestimiento se debiliten por el aplastamiento constante o haya problemas de levantamiento del protector del cable o daño a la parte interna del aislamiento, esta situación es aún más crítica cuando el empalme demasiado grueso, tiene que pasar por un cople de la tubería de producción y este, es de mayor diámetro.

El diagnóstico de los problemas debidos a la mala ejecución de un empalme, se realiza mediante la medición periódica de las lecturas eléctricas tanto de fase a tierra como de fase a fase. Y como ya vimos a detalle en el Capítulo III de esta tesis, cuando el cable se encuentra desbalanceado o a tierra, la única alternativa es desinstalar el equipo.

4.7.3.1. Recomendaciones Para Evitar Empalmes Gruesos

- a. Antes de realizar un empalme, llevar a cabo los cálculos necesarios para determinar en qué posición del equipo subsuperficial o de la tubería de producción va a quedar el empalme.
- b. Realizar el empalme correctamente de acuerdo a los procedimientos establecidos por el fabricante y dentro de los rangos permisibles de espesor, teniendo en cuenta el diámetro de la tubería de producción y los diferentes diámetros de las tuberías de revestimiento por las que va a pasar.
- c. Verificar que los extremos de los empalmes queden bien soldados y protegidos, esto es muy importante para evitar que cuando se baje el cable de potencia con el empalme y con la constante de fricción, uno o los dos extremos se levanten y en ocasiones el extremo se incruste en la parte interna del empalme, dando como resultado una falla.
- d. Actualmente existen compañías que fabrican protecciones externas a lo largo de todo el empalme que se instala de forma similar a los protectores metálicos. Esta es una buena alternativa para evitar problemas en los empalmes, pero es importante que esta opción solo es aplicable cuando la geometría del pozo lo permite.

4.7.4. Accesorios o Componentes Complementarios Mal Instalados

Durante la introducción del sistema BEC hay diferentes accesorios que se instalan tales como los flejes, guardacables, protectores de caucho, protectores metálicos, tubería flexible externa, centralizadores, protectores, entre otros.

Entre los componentes complementarios al sistema BEC estándar tenemos algunos como sensores de fondo, tubería flexible, herramienta Y, camisa del motor, filtros de arena, entre otros.

En cuanto a la protección del cable de potencia se usan flejes o protectores metálicos, o en algunos casos, ambos, estos deben ser instalados con el suficiente torque para que puedan cumplir su función de fijar el cable a la tubería de producción ya que el cable de potencia es pesado debido a las protecciones tanto internas como externas. La operación de ajuste de este tipo de accesorios como los flejes o los protectores se realiza con equipos manuales o neumáticos para facilitar la operación, teniendo rangos de operación de tal forma que se pueda realizar el ajuste adecuado al cable sin dañar la parte interna del cable de potencia.

Las fallas presentadas en la instalación del sistema BEC por lo regular son por falta de flejes o el mal ajuste de los mismos o de los protectores, ya que el cable por su mismo peso va cediendo y se va descolgando, a medida que se va introduciendo el cable se cuelga y va originando colgaduras de cable, si es que hay espacio suficiente. El problema es aún mayor cuando el sistema tiene que pasar por la boca del liner hay cambio en la geometría del pozo, cuando esto ocurre hay dos posibles alternativas:

- El cable se atascará en el liner, el cable fallará a tierra y por lo tanto todo el sistema BEC debe ser desinstalado.
- En un caso aun peor, puede ocurrir que el sistema BEC con el cable enrollado se atasque originando un trabajo de pesca, y en algunos casos se podrá recuperar y en otros se llega hasta a perder el pozo. En ambas alternativas las consecuencias económicas son grandes.

4.7.4.1. Recomendaciones Para la Instalación de Componentes Complementarios o Accesorios

- a. Verificar el torque aplicado a los pernos cuando los protectores metálicos sean instalados.
- b. En caso de los flejes, ajustar manualmente o con el equipo neumático, sin exceder la presión para evitar daños al cable de potencia.

- c. La instalación de los flejes o protectores debe realizarse de acuerdo con la posición adecuada y la longitud de espaciamiento correcta.
- d. Evitar alargamientos o tensionamiento innecesarios del cable.

4.7.5. Daño al Cable de Potencia

Durante la operación de introducción del sistema BEC con el cable de potencia, se utilizan cuñas hidráulicas, cuñas de diferentes medidas, protector de caucho debajo de la mesa rotaria, elevadores de diferentes medidas además de otros equipo auxiliares que pueden encontrarse en el piso de perforación. La operación para realizar las conexiones debe hacerse de la manera mejor coordinada posible, ya que siempre debe haber una persona vigilando la posición del cable para que en ningún momento haya problemas de aplastamiento ya sea por las cuñas o por la tubería.

En este tipo de complicaciones muchas veces cuando el cable es golpeado, no se reporta por lo que se continúa con la introducción del sistema BEC dentro del pozo, y es muy probable que se presenten fallas. Algunas de las consecuencias de este problema son las siguientes:

- Si el problema se resuelve con reparaciones o con empalmes, se está adicionando un pinto de riesgo innecesario dentro del sistema BEC.
- Los costos del equipo de perforación aumentan debido a las pruebas y reparaciones necesarias que deben llevarse a cabo.

Para realizar el diagnóstico cuando se presenta un problema de golpe o aplastamiento del cable de potencia, se recomienda:

- a. Revisar la cubierta correspondiente a la parte afectada y quitar esa sección.
- b. Revisar la parte interna del cable.
- c. Tomar las mediciones eléctricas; fase a fase y fase a tierra.
- d. En el caso de que la parte afectada sea solo una fase, la alternativa es hacer la reparación de esa sección.
- e. En el caso de que las dos fases se encuentren dañadas, se recomienda cortar el cable y realizar un empalme.

4.7.5.1. Recomendaciones Para Evitar Daño del Cable de Potencia

- a. Explicar a todo el equipo de trabajo que estará involucrado en la operación los cuidados especiales que deben tenerse para evitar golpear el cable de potencia.

- b. La supervisión de la operación debe ser constante por todas las partes involucradas, la operadora, perforador, fabricante; sin delegar las responsabilidades correspondientes a cada uno.
- c. No apresurar las operaciones de forma que no se pueda tener control y cuidado adecuado de la operación.
- d. La persona encargada del manejo del cable debe tener la experiencia y conocimientos adecuados.
- e. Si el problema ocurre al cable de extensión del motor, la recomendación es sustituirlo, para no poner en riesgo el sistema BEC completo y la operación.
- f. No proponer como solución al problema un empalme, cuando exista otro empalme cerca, ya que la distancia entre empalmes debe ser de entre 800 a 1000 pies (aproximadamente de 244 a 305 metros).
- g. Verificar que se cuente con todo el equipo necesario para la introducción del sistema BEC, y que este se encuentre en condiciones óptimas.
- h. Cambiar lo menos posible el personal que se encuentre a cargo de la operación. La inexperiencia del personal en este tipo de operaciones puede costar grandes pérdidas económicas al proyecto e incluso la cancelación del mismo.

Una de las últimas etapas de la introducción del sistema BEC dentro del pozo, es instalar el penetrador en la bola colgadora para después asentarla en el colgador. La posición correcta de colocación debe ser alineada a la línea de flujo, posición que debe quedar fija a la tubería de producción al instalar el colgador. El problema se presenta cuando no se realiza el procedimiento adecuado y el penetrador del cabezal de producción queda instalado en la sección opuesta, originando los siguientes problemas:

- Dificultad en instalar el cabezal de producción alineado con la línea de flujo.
- Dificultad para instalar el cable superficial.
- Fricción del cable superficial con el cabezal de producción o con las bajantes del sistema, ocasionando recalentamiento en el cable y por lo tanto un posible punto de falla.

Algunas de las recomendaciones pertinentes para tomar en cuenta con respecto a la instalación del colgador en específico, son las siguientes:

- a. Antes de instalar la bola colgadora en la tubería de producción revisar la posición de la línea de flujo con respecto al cabezal de producción.
- b. No aplicar exceso de torque al instalar la bola colgadora.
- c. No aplicar exceso de torque al penetrador
- d. No dejar el cable superficial en contacto con el cabezal de producción o con las bajantes, para evitar el recalentamiento del cable, y por lo tanto corto circuito.

4.7.6. Fricción de los Flejes o Protectores con los Preventores

Durante la operación de bajada del sistema de bombeo electrocentrífugo, se usan los preventores, mejor conocidos como BOP's, por sus siglas en inglés Blow Out Preventer, los cuales son instalados debajo de la mesa rotaria y de la línea de flujo con la finalidad de tener control del pozo. Las medidas y capacidades de los preventores son diversas dependiendo del tipo de trabajo que se va a realizar y los diámetros de las tuberías.

En el caso específico de la aplicación de sistema BEC, es muy importante conocer las medidas del preventor y el diámetro máximo del sistema de bombeo electrocentrífugo que va a ser instalado. El problema se presenta cuando no se toman en cuenta estas medidas, lo cual causa fricción la cual en casos graves causa la destrucción de los flejes lo cual a su vez ocasiona lo siguiente:

- Debilitamiento del ajuste de los flejes y el cable de potencia.
- El cable puede llegar a descolgarse por su mismo peso y la falta de flejes.
- Posible atascamiento del sistema BEC, para lo que será necesario un trabajo de pesca.
- La velocidad de introducción del sistema BEC debe ser reducida.

Este tipo de problemas trae consecuencias tales como incremento de costos, producción diferida, y en muchos casos pérdidas de producción a largo plazo debido a que por la limitante de los preventores, se tenga que cambiar el diseño de la bomba y utilizar una de menor potencia.

4.7.6.1. Recomendaciones Para Evitar la Fricción de los Flejes o Protectores con los Preventores

- a. Incluir dentro del programa de diseño del sistema de bombeo electrocentrífugo todas las dimensiones de los preventores.
- b. Verificar en el pozo las dimensiones que fueron especificadas para el diseño del sistema BEC.
- c. Centrar totalmente el equipo de perforación antes de comenzar con la introducción del sistema BEC.
- d. Si se tienen dudas acerca de la fricción del sistema BEC al momento de pasar por los preventores, se recomienda verificar, y continuar con la introducción hasta que se tenga la certeza de que no hay fricción que pueda dañar los flejes.

4.7.7. Problemas al Pasar por la Boca del Liner

La introducción del sistema BEC está expuesta a los cambios inherentes de la geometría del pozo tales como diferentes diámetros de tubería de revestimiento, secciones en las que esta tubería ha

sido reparada, secciones de alta desviación, entre otros. En estos casos se debe poner especial cuidado en la introducción del sistema BEC, ya que cada geometría de pozo debe cumplir con ciertos procedimientos preventivos y se deben evitar problemas posteriores más graves como son los trabajos de pesca, pérdida del sistema de bombeo electrocentrífugo o en casos extremos, la pérdida definitiva del pozo.

En muchos casos, durante la operación de introducción del sistema BEC, al pasar por la boca del liner, los cables de potencia se dañan lo que lleva a que el sistema tenga que ser sacado para cambiar el cable. Durante la introducción del sistema BEC, en especial cuando va a pasar por una boca de liner, debe monitorearse desde el indicador de peso en el tablero del perforador, ya que si hay problemas al pasar por el liner, este mostrara una ligera pérdida de peso.

4.7.7.1. Recomendaciones Para Pasar por la Boca del Liner

- a. Verificar los tamaños y los pesos de las secciones de las diferentes tuberías de revestimiento por las que va a pasar el sistema BEC antes de comenzar con su introducción.
- b. Disminuir la velocidad de introducción al pasar por las bocas de liner, al pasar por secciones de alta desviación, y al pasar por secciones de la tubería de revestimiento que hayan sido reparadas.
- c. Realizar las mediciones eléctricas correspondientes al cable de potencia antes y después de pasar por la boca del liner.
- d. Verificar el indicador de peso de la sarta con el sistema BEC antes, durante y después de pasar por la boca del liner.
- e. Si al pasar por la zona se detecta pérdida de peso de la sarta de la tubería de producción con el sistema BEC, se recomienda no continuar con la introducción del mismo.

4.8. Análisis de Posibles Causas de Falla Durante la Recuperación del Sistema BEC y la Inspección Preliminar del Pozo

Al igual que todas las operaciones en la industria petrolera y en especial, en las que involucran el sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido, deben seguirse ciertos procedimientos y debe ponerse especial atención, de la misma forma aplica para la recuperación del sistema BEC, el objetivo de estos procedimientos es recuperar el sistema BEC, además del cable y la tubería de producción en su totalidad y en buena condición. Ya que además de por problemas en la introducción del sistema, por las cuales se deba recuperar; la desinstalación se lleva a cabo cuando el sistema ha fallado y como ya vimos en el Capítulo III es importante la recuperación del sistema para poder estudiar la causa de falla y poder enriquecer nuestra base de datos de fallas en sistemas

de bombeo electrocentrífugo sumergido a través de la Nomenclatura Estándar y entonces, poder evitar futuras fallas.

De la misma forma, la inspección preliminar que se lleva a cabo en el pozo, ya que esta nos proporciona las primeras variables para poder identificar la posible causa de falla del sistema BEC además de las medidas técnicas que deben ser tomadas para el diseño del sistema de bombeo electrocentrífugo que sustituirá al que se está desinstalando.

La decisión de desinstalar el sistema BEC, por lo regular se toma por las siguientes causas:

- Problemas en las lecturas eléctricas del cable de potencia en la introducción del sistema BEC en los que se encuentra desbalanceado, fuera de los rangos permisibles para operar.
- Problemas en las lecturas del sensor de fondo, ya es de suma importancia contar con buenas lecturas para poder tener una correcta evaluación del pozo.
- Fallas en alguno de los componentes subsuperficiales del sistema BEC ya sea mecánico, eléctrico, de diseño, manufactura, del pozo; para conocer más detalles al respecto, revisar la parte 4.3 del presente capítulo.

Las dificultades más frecuentes en la recuperación del Sistema BEC son lo que describiremos a continuación.

4.8.1. Alta Velocidad de Recuperación

La recuperación del sistema BEC debe llevarse a cabo con el mayor cuidado posible debido a que en esta operación hay componentes o accesorios que pueden ser golpeados como el cable de potencia, extensión del motor, empalmes, flejes, centralizadores, entre otros. Por otra parte, como ya se había mencionado, hay que tener en cuenta que los equipos recuperados son mandados a los talleres de pruebas de los fabricantes para se inspeccionados y en su caso, reparados; además de que el objetivo principal es obtener la recuperación total del sistema para poder realizar un análisis real y confiable de la Causa de Falla.

Los problemas que se presentan a causa de una alta velocidad en la operación de recuperación del sistema BEC, son los siguientes:

- Golpear constantemente el sistema BEC y el cable de potencia, lo cual repercute en los costos, además de que debido a los golpes que el sistema de bombeo electrocentrífugo puede sufrir, el análisis de Causa de Falla puede ser distorsionado.

- Caída del cable de potencia al pozo. Este problema se presenta cuando no es posible recuperar los flejes, lo cual ocasiona que el cable por su propio peso se vaya colgando hasta llegar a un momento en el que caiga al pozo.
- La alta velocidad se encuentra estrechamente relacionada con la fricción constante del sistema BEC con la tubería de revestimiento.

4.8.1.1. Recomendaciones Para Evitar una Alta Velocidad de Recuperación

- a. Verificar que la torre de perforación se encuentre centrada en la mesa rotaria antes de comenzar la operación de recuperación del sistema BEC. Esta verificación se debe llevar a cabo de manera periódica, en caso de ser necesario realizar las correcciones de centralización.
- b. Recuperar el sistema BEC a una velocidad controlada.
- c. Informar al personal que se encuentre realizando la operación el procedimiento a seguir y los cuidados que se deben tener.
- d. En caso de que se note que no salen los flejes del cable de potencia, se recomienda instalar flejes antes de desenroscar el tramo de tubería correspondiente para evitar que el cable caiga al pozo por el peso.

4.8.2. Problemas al Desinstalar la Bola Colgadora

Dentro de la operación de la desinstalación de la bola colgadora, uno de los problemas más frecuentes es la mala conexión de la junta utilizada para la desinstalación de la misma, ocasionando el deterioro de las roscas de la bola colgadora, este problema es causado debido a que la operación de conexión y ajuste se realiza en posición inclinada. Al dañarse las roscas, la única alternativa de solución es utilizar un pescante para poder desinstalarla.

Otro problema es causado por el exceso de torque al utilizar llaves hidráulicas, por lo que en ambos casos la bola colgadora debe ser reemplazada, lo cual dificulta la operación ya que en zonas de difícil acceso, se debe detener la operación y esperar por el reemplazo.

4.8.2.1. Recomendaciones Para Desinstalar la Bola Colgadora

- a. Realizar la colocación de la junta para desinstalar la bola colgadora de forma perpendicular.
- b. Realizar el ajuste manual con las llaves para no exceder el torque recomendado por el fabricante.
- c. No utilizar las llaves hidráulicas.

- d. Contar con los datos de peso de toda la sarta de producción incluyendo el cable de potencia, para corroborar que se está levantando el peso original.
- e. Contar siempre con un repuesto de la bola colgadora, principalmente en zonas de difícil acceso.

4.8.3. Atascamiento de la Tubería de Producción con el Cable de Potencia

Para que el sistema BEC pueda ser recuperado sin problemas, se deben tener en cuenta muchos factores como los que a continuación se enlistan:

- Todos los componentes y accesorios del sistema BEC deben de haber sido instalados de manera correcta, y en su caso con el torque correspondiente óptimo.
- Haber instalado de manera correcta los protectores del cable a la tubería de producción.
- No haber dejado caer elementos ajenos al pozo durante la introducción o recuperación del sistema BEC.
- Dejar el espaciado adecuado entre el sistema BEC y todas las diferentes secciones de la tubería de revestimiento.
- Asegurarse de que la tubería de revestimiento se encuentre en buen estado.
- Verificar que los empalmes no hayan sido hechos demasiado gruesos.
- En el caso de que el pozo sea direccional, asegurarse de que el sistema BEC haya sido colocado en una sección uniforme, con la misma inclinación.
- Hay que considerar que el problema de arena, visto a detalle en la sección anterior de este capítulo, también puede dificultar la operación de recuperación del sistema BEC.

El problema de atascamiento ocurre cuando falla uno o todos los puntos mencionados anteriormente, por lo tanto se debe analizar el problema de atascamiento antes de que proceda a una supuesta solución.

4.8.3.1. Recomendaciones en Caso de Atascamiento de la Tubería de Producción con el Cable de Potencia

- a. No tratar de desatascar el sistema BEC con movimientos, ya sean ascendentes o descendientes, hasta que se analice el problema y se tenga un procedimiento específico a llevar a cabo.
- b. Revisar el historial del pozo, principalmente en los trabajos de reparación de tubería de revestimiento, pescados dejados dentro del pozo, y otros factores que se considere puedan afectar la recuperación del sistema BEC.
- c. Realizar los cálculos adecuados de los espacios que hay entre el pozo y el sistema BEC.

- d. Verificar el grado, tipo, peso y drift de todas las secciones de la tubería de revestimiento por las que pasará el sistema de bombeo electrocentrifugo al ser recuperado.
- e. Revisar el material del que se encuentran fabricados los accesorios externos como flejes y protectores de cable.
- f. Calcular el peso de la sarta de producción con el cable de potencia y los accesorios.
- g. No realizar ningún giro de la sarta de producción, ya que los mismos accesorios externos pueden ocasionar que el cable se enrede más y complicar aún más la operación de recuperación del sistema.
- h. Contar con la información de la máxima tensión que puede ser aplicada al sistema BEC, principalmente en las conexiones.

La operación de tensión de la sarta se efectúa con la torre de perforación, en caso de tener éxito, la tubería debe recuperarse junto con el cable, de lo contrario se debe detener la operación, ya que el cable podría estar enredándose en el fondo del pozo y posteriormente causar problemas.

Una alternativa es mantener el cable tensionado con el malacate, sin embargo la operación de jalar el cable debe mantenerse bien controlada, ya que el cable de potencia tiene un máximo permisible de estiramiento, el cual no se debe pasar para evitar rotura del mismo. Si la alternativa funciona, hay que ir sacando lentamente la tubería y el cable sin rotar la sarta, si es necesario colocar flejes de seguridad antes de desenroscar la tubería.

En casos extremos es necesario sacar solo la tubería de producción rompiéndose el cable, lo que queda de cable debe ser sacado utilizando herramientas de pesca y por lo regular será recuperado por pedazos y la operación durará varios días, dependiendo de la longitud del cable de potencia que se encuentre en el pozo.

4.8.4. Exceso de Torque en la Tubería de Producción

Cuando se está recuperando el sistema BEC, se están realizando varias operaciones simultáneas, tales como la separación del cable de potencia, el asentamiento de la tubería de producción en la mesa rotaria con las cuñas y en la separación de los tramos de tubería al desenroscarlos. Este proceso no debe presentar ningún problema cuando todo el equipo utilizado para la operación se encuentra en buen estado cumpliendo con sus funciones; así como si el torque aplicado a la tubería de producción en la operación de introducción fue el adecuado.

El problema se presentará cuando durante la introducción de tubería se haya aplicado un exceso de torque. Este problema también puede ser a causa de los manómetros descalibrados y por lo tanto se

aplica el torque equivocado, además de que otras operaciones no usan torquímetro como ya fue recomendado anteriormente.

Con lo referente al tipo de aceite y el coeficiente de fricción utilizados para la lubricación, cuando el aceite o grasa utilizados no es de buena calidad, el ajuste de la tubería de producción se verá afectado.

4.8.4.1. Recomendaciones Para Evitar el Exceso de Torque en la Tubería de Producción

- a. Aplicar el torque óptimo dependiendo el tipo de tubería de producción que se esté utilizando.
- b. Calibrar los manómetros que serán utilizados como indicadores.
- c. Usar aceite o grasa lubricante de buena calidad.
- d. Evitar que caigan objetos o herramientas al pozo, ya que complicarán el proceso de recuperación del sistema provocando atascamiento.

4.8.5. Recuperación Parcial de Accesorios

Como ya sabemos, en el sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido son instalados diversos accesorios tales como flejes, guardacables, centradores, protectores o cubiertas, grampas, entre otros. Todos estos accesorios deben ser instalados de manera adecuada, con la finalidad de cumplir una función específica, además de que no presenten una dificultad al recuperar los componentes subsuperficiales del sistema con sus correspondientes accesorios. Por lo tanto, durante la instalación e introducción del sistema, se debe llevar un control exacto de la cantidad de accesorios que intervienen en la terminación, con la finalidad de verificar esa cantidad al recuperar el sistema BEC. Los problemas que pueden presentarse con la recuperación de accesorios, son los siguientes:

- Pérdida de los accesorios debido a la corrosión, por ejemplo, los guardacables de acero galvanizado instalados en pozos con mucha producción de agua.
- Flejes caídos en el pozo.
- Protectores del cable de potencia fuera de su posición original de instalación.
- Centrador del motor caído en el pozo.
- Protectores de caucho incompletos, debido a la cristalización, entre otros problemas.

Cualquiera de los problemas anteriores pueden complicar la recuperación de los componentes subsuperficiales del sistema BEC. En el caso de que los flejes se estén quedando en el pozo, la recuperación del cable de potencia debe realizarse de manera cuidadosa e instalando nuevos flejes.

Para el caso de la recuperación de protectores de caucho incompletos, antes de instalar un nuevo sistema BEC, el pozo debe ser limpiado ya que los residuos de caucho pueden entrar en las etapas de la bomba BEC produciendo atascamiento del eje y ocasionando falla e incremento de costos.

4.8.5.1. Recomendaciones en Caso de la Recuperación Parcial de Accesorios

- a. Aplicar el torque apropiado a los accesorios instalados, además de contar con los equipos necesarios para el ajuste óptimo y un juego de repuesto de los mismos.
- b. Hacer limpieza al pozo cuando se hayan perdido los flejes, guardacables, hayan caído restos de caucho, entre otros; se debe procurar limpiar todas las secciones de la tubería de revestimiento hasta el fondo. Para mejor esta operación, se pueden utilizar pastillas viscosas.
- c. Observar y controlar en las presas de lodo los tipos de sólidos que son recuperados, o si el fluido recuperado se encuentra limpio. El objetivo es mantener el pozo limpio para la instalación del siguiente sistema BEC, por lo tanto es conveniente invertir tiempo en el acondicionamiento y limpieza del pozo para evitar futuras fallas del sistema BEC.
- d. Para toda operación del sistema BEC se recomienda utilizar acero inoxidable tanto en flejes, guardacables, y tubería de inyección química y de las válvulas de seguridad y venteo.
- e. En pozos desviados o con espacio entre el sistema BEC y la tubería de revestimiento reducido, se debe tener un mejor control de la operación de recuperación, para evitar la fricción de los accesorios del sistema BEC con la tubería de revestimiento causando el desprendimiento de los mismos y su caída al pozo.
- f. Durante la operación de recuperación del sistema BEC, se debe llevar un control estricto de los accesorios recuperados y relacionar con los accesorios instalados.

4.8.6. Falta de Supervisión y Detección de las Fallas en las Partes Externas

Durante toda la operación de recuperación del sistema BEC, es indispensable tener una supervisión adecuada para poder monitorear la condición en la que salen los componentes del sistema electrocentrifugo, el cable de potencia y la tubería de producción, principalmente cuando el equipo que está siendo recuperado se está desinstalando por Causa de Falla asociada al sistema BEC. Las consecuencias que puede traer una falta de supervisión en la recuperación del sistema electrocentrifugo sumergido pueden ser:

- No detectar fallas externas que se presentan en cable, parte externa de los componentes del sistema BEC o tubería de producción.
- Problemas de corto circuito en el cable puede ocasionar que se rompa por completo y se quede en el pozo.

- Problemas de atascamiento si no se identifican a tiempo problemas como por ejemplo, que no se están recuperando adecuadamente los flejes.

4.8.6.1. Recomendaciones Para la Supervisión y Detección de Fallas en las Partes Externas

- a. Observar y verificar en el piso de perforación la condición en la que salen los componentes del sistema BEC, el cable y la tubería de producción.
- b. La velocidad de recuperación debe ser moderada.
- c. Para cada caso en específico, se debe tomar la acción de solución correspondiente para evitar problemas de atascamiento o de pesca.
- d. Si se detecta extrema corrosión en el sistema BEC, debe ser sacado lentamente y utilizar equipo adicional de protección como collarines, así como las grampas del fabricante para evitar que se desprenda al pozo.

4.8.7. Problemas Relacionados a la Protección del Sistema BEC Recuperado del Pozo

Todos los componentes del Sistema BEC que se recuperen del pozo, deben ser empacados de forma que se encuentren protegidos para el transporte por las siguientes razones:

- El análisis de fallas del sistema BEC debe realizarse sin que este haya sufrido ningún cambio o distorsión al empacarse en sus cajas metálicas en el pozo. Por ejemplo, si el motor falló por corto circuito y en el pozo no fue guardado de manera adecuada por lo que durante la lluvia hubo intrusión de agua en el motor.
- Al no ser guardados de forma correcta, pueden sufrir corrosión o acumulación de óxido ya que se encuentran fuera del pozo, lo cual no permite llevar a cabo el desarmado de las piezas en forma normal ya que se encuentra en el taller de pruebas, y por lo tanto no se puede llevar a cabo la inspección para realizar el análisis de pruebas de forma adecuada.
- Algunos de los equipos que son desinstalados han estado en operación por muy poco tiempo, por lo que después de ser llevados al taller de pruebas y realizar los estudios y adecuaciones necesarias, algunos vuelven a ser instalados, por lo que deben evitarse daños innecesarios.
- El empacamiento adecuado del sistema BEC impacta de forma significativa en los componentes que podrán ser recuperados y reutilizados.

4.8.7.1. Recomendaciones para la Protección del Sistema BEC Recuperado del Pozo

- a. Guardar inmediatamente los componentes del sistema BEC que es desinstalado en sus respectivas cajas. No dejar el sistema de bombeo electrocentrífugo expuesto a las condiciones atmosféricas.

- b. Realizar el empacamiento de la misma forma en la que el sistema BEC se encuentra cuando llega nuevo.
- c. Realizar la identificación del sistema BEC en la parte externa de la caja y realizar el reporte de la descripción.
- d. No golpear los componentes del sistema BEC recuperados. Evitar que se distorsione el análisis de falla.
- e. No tardar más de lo necesario el envío del sistema BEC al taller de pruebas del fabricante.
- f. Realizar el transporte de manera adecuada del pozo hacia el destino.⁶

Capítulo V: Modelos para el Análisis de Fallas

La administración exitosa de una aplicación de sistemas electrocentrífugos sumergibles, requiere de una estimación adecuada del número de fallas esperado en función del tiempo, además de la determinación de la incertidumbre asociada al cálculo. El conocimiento de la incertidumbre es requerido para poder establecer riesgos efectivos y las estrategias que serán aplicadas para las operaciones de mantenimiento y el impacto que estas tendrán en el ámbito económico. Aunque la literatura de la industria petrolera cuanta con debates acerca de los modelos y métodos para la estimación del número de fallas esperado para el sistema BEC, muy pocos se han llevado a cabo acerca de la confiabilidad de estas estimaciones.

En este capítulo presentaremos detalles de cómo debe llevarse a cabo la elección del modelo adecuado, los parámetros y las variaciones de cómo afectan los criterios económicos de los diferentes pozos los límites de confianza de las estimaciones. Esto en base a lo ya aplicado.

Uno de los puntos principales encontrados, es que debido a la incertidumbre inherente en el continuo reemplazo de los sistemas BEC y en la estimación de los tiempos de vida, pueden llevarse a cabo las estimaciones del número de fallas para el total de sistemas que se encuentren en un campo con una incertidumbre considerable. Este efecto, como ya pudimos ver en el Capítulo II, la estimación del Tiempo de Vida Útil, es particularmente alta durante los primeros años de vida del campo. Bajo estas circunstancias, la distribución del número de fallas presenta una pendiente sesgada, y es posible que se presente una diferencia de hasta aproximadamente un 60% entre el número de fallas estimado y el número de fallas reportado.

Los modelos estadísticos también tienen la capacidad de diferenciar el funcionamiento del sistema de bombeo electrocentrífugo entre diferentes tecnologías aplicadas y fabricantes de los mismos sistemas. Por lo que también debemos tener en cuenta que las diferencias entre los Tiempos de Vida calculados, ya que pueden no ser una evidencia concluyente de las características técnicas o de los fabricantes para poder determinar si son superiores o inferiores. Basados en estos resultados, se sugieren algunas acciones para poder reducir la incertidumbre de los cálculos y mejorar la administración del campo.

Para los campos que emplean el sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido como sistema artificial de producción principal, los costos de las reparaciones para reemplazar los sistemas fallados, por lo regular representan una gran parte de los costos de operación. Además de que debemos tener en cuenta que existen grandes diferencias entre los rangos de falla predichos antes de comenzar con la operación del campo y los observados ya que la operación ha comenzado, lo

cual puede afectar de manera significativa la evaluación económica del proyecto. Debido a esto, es importante llevar a cabo una estimación precisa del número de fallas esperado en cada etapa del desarrollo del proyecto, no solamente al principio, como en muchos casos se acostumbra; además de su incertidumbre asociada.

El número de factores que afectan el Tiempo de Vida Útil ya han sido identificados, como pudimos verlo a mayor detalle en el Capítulo IV. En algunos casos, se han hecho intentos para poder incorporar estos factores en los modelos estadísticos de la información de falla para poder predecir el número esperado de fallas para un determinado periodo de tiempo a futuro. Los modelos paramétricos involucran principalmente las distribuciones exponencial y de Weibull. Se han llevado a desarrollos de estos modelos, sin embargo muy pocos han sido analizados con respecto a la confiabilidad de las predicciones resultantes del uso de los mismos y las circunstancias bajo las cuales pueden ser aplicables de manera válida. Para poder definirlo de una mejor forma, en la segunda parte de este capítulo, se presenta una revisión de los modelos y los procesos de predicción que han sido desarrollados. Comenzaremos con una introducción de conceptos previos de Probabilidad que serán utilizados a lo largo del capítulo para poder familiarizarnos y entender de manera adecuada el planteamiento de los modelos.

5.1. Conceptos Previos de Probabilidad

La teoría matemática de la probabilidad nos da las herramientas básicas para construir y analizar modelos matemáticos de fenómenos aleatorios. En el estudio de estos fenómenos, tratamos con un experimento del cual el resultado no es predecible con antelación. En ciencias e ingeniería, los fenómenos aleatorios comprenden una amplia variedad de situaciones. En términos generales, pueden ser agrupados en dos clases principales. La primera se refiere a los fenómenos físicos o naturales que involucran incertidumbre. La incertidumbre añade complejidad a la solución del problema, debido a la falta de información, conocimiento o entendimiento de todas las posibles causas y efectos.

La segunda clase de problemas que son ampliamente estudiados a través de modelos probabilísticos, involucra todos aquellos que tienen una gran variabilidad. Existe un gran número de variables impredecibles de un intervalo a otro, y en muchas ocasiones estas variables tienen otros parámetros que las pueden afectar. Esta propiedad nos obliga a adoptar un punto de vista probabilístico, y la teoría de la probabilidad nos da una herramienta poderosa para poder analizar los problemas de este tipo.

Nuestro interés en el estudio de estos fenómenos aleatorios, es poder definir a grandes rasgos los eventos que pueden ocurrir. Por lo tanto, los eventos y combinaciones de eventos juegan el rol principal en la teoría de la probabilidad. Las matemáticas de los eventos son muy parecidas a la teoría de conjuntos, por lo tanto implica conceptos básicos de la misma y operaciones algebraicas.

En la teoría de la probabilidad, tenemos un experimento cuyo resultado depende de las posibilidades, el cual es llamado experimento aleatorio. Se asume que todos los posibles distintos resultados son conocidos y son elementos del espacio de muestra. Cada posible resultado es llamado punto de muestreo, y un evento generalmente se refiere a un subconjunto del espacio de muestra que tiene uno o más puntos de muestreo.¹

5.1.1. Términos Probabilísticos

Espacio muestral o espacio muestra. En un experimento aleatorio es el conjunto de todos los posibles resultados del experimento, y se le denota generalmente por la letra griega Ω . A un resultado en particular se le denota por la letra ω .

Variable Aleatoria. Para poder construir un modelo para una variable aleatoria, asimos que es posible asignar un valor real para cada uno de los posibles resultados. Para poder lograrlo, debemos definir la variable aleatoria como una función del espacio muestral en el conjunto de los números reales. Una variable aleatoria es una transformación X del espacio de resultados Ω , al conjunto de los números reales, esto es:

$$X : \Omega \rightarrow R$$

Función Densidad. Se llama función densidad de una variable aleatoria, a toda función $f(x)$ que satisfaga las siguientes propiedades, sin necesidad de tener una variable aleatoria de por medio.

$$f(x) \begin{cases} \geq 0, \text{ para toda } x \in R \\ \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \end{cases}$$

Función de Distribución. Sea X una variable aleatoria cualquiera. La función de distribución de X , denotada por $F(x)$, se define como la probabilidad:

$$F(x) = P(X \leq x)$$

Esto es, la función de distribución evaluada en un número x cualquiera es la probabilidad de que la variable aleatoria tome un valor menor o igual a x . La función de distribución es importante porque siempre puede definirse dicha función para cualquier variable aleatoria a través de ella, quedan representadas todas las propiedades de la variable aleatoria. También se le conoce como función de probabilidad acumulada.

Distribución o Distribución de Probabilidad. El término distribución o distribución de probabilidad de una variable aleatoria se refiere de manera equivalente a cualquiera de los siguientes conceptos: a la función de probabilidad o de densidad $f(x)$, a la función de distribución $F(x)$, o a la medida de probabilidad inducida por X .

Función Generadora de Probabilidad. Sea X una variable discreta con posibles valores dentro del conjunto de los números reales positivos. A la función $G(t)$, se le llama la función generadora de probabilidad de X . Esta función se define como una serie de potencias en t con coeficientes dados por los valores de la función de probabilidad.

Método de Simulación de Monte Carlo. Bajo el nombre de Simulación de Monte Carlo se agrupan una serie de procedimientos que analizan distribuciones de variables aleatorias usando simulación de números aleatorios. En el método Monte Carlo, el objeto de la investigación es el objeto en sí mismo, un suceso aleatorio o pseudo-aleatorio que es el que se usa para estudiar el modelo. En algunos casos, como lo será para fallas del sistema BEC y se verá en la siguiente parte de este capítulo, la aplicación del método Monte Carlo se usa para analizar problemas que no tienen un componente aleatorio explícito; en estos casos un parámetro determinista del problema se expresa como una distribución aleatoria y se simula dicha distribución.

Propiedad de Markov. La propiedad de Markov se cumple cuando, para cualquier entero $n \geq 0$, y para cualquiera estado x_0, \dots, x_{n+1} , se cumple:

$$p(x_{n+1} | x_0, \dots, x_n) = p(x_{n+1} | x_n)$$

Teoría de Renovación Estadística. La teoría o proceso de renovación, es una sucesión infinita de variables aleatorias T_1, T_2, \dots , que son positivas, independientes e idénticamente distribuidas.

Ley de Potencia. El modelo de la Ley de Potencia es un método popular en la estadística para analizar la confiabilidad de sistemas complejos reparables.²

5.1.2. Distribución Exponencial

Decimos que una variable aleatoria continua X tiene una distribución exponencial con parámetro $\lambda > 0$, cuando su función de densidad es:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & \text{sí } x > 0 \\ 0 & \text{sí } x \leq 0 \end{cases}$$

Esta distribución se usa para modelar tiempos de espera para la ocurrencia de un cierto evento.

A continuación en la Figura 5.1, mostramos la forma más común (bathtub) en la distribución exponencial, la cual es útil en los estudios de confiabilidad, como el llevado a cabo en para los sistemas BEC, la cual muestra, en la primera sección de la curva: las fallas prematuras; la parte constante o media de la curva, presenta el tiempo de vida útil; y la tercer sección, muestra las fallas debidas al desgaste por el uso.

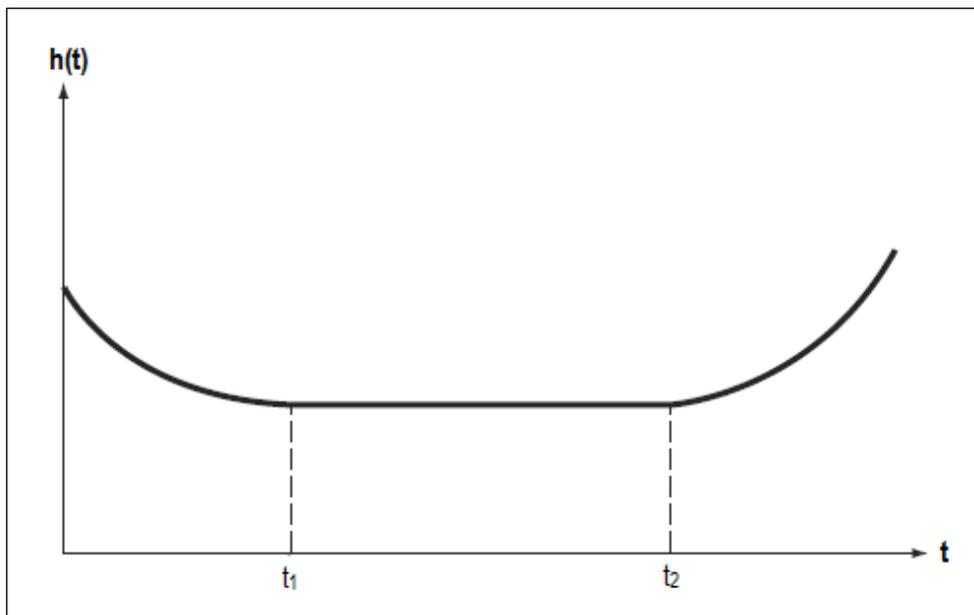


Figura 5.1 – Forma Típica de la Distribución Exponencial en los Estudios de Confiabilidad (Soong, 2004)

5.1.3. Proceso Homogéneo de Poisson

Este proceso es ampliamente aplicado en situaciones físicas. Supongamos que deseamos observar el número de ocurrencias de un cierto evento dentro de un intervalo de tiempo dado. Para modelar este tipo de situaciones podemos definir la variable aleatoria, X , como el número de ocurrencia de

este evento en el intervalo de tiempo dado. Es claro entonces que X puede tomar los valores 0, 1, 2, etc., y en principio no ponemos una cota superior para el número de observaciones del evento. Decimos que la variable aleatoria X tiene una distribución de Poisson con parámetro $\lambda > 0$, y escribimos $X \sim \text{Poisson}(\lambda)$ cuando:

$$f(x) = \begin{cases} e^{-\lambda} \frac{\lambda^x}{x!} & \text{sí } x = 0, 1, \dots, n \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Además de las distribuciones exponencial y gamma, que son las más comunes asociadas a este proceso, existen otras distribuciones de probabilidad que surgen al estudiar ciertas características del proceso de Poisson.

A continuación en la Figura 5.2, se muestra la distribución de la función de probabilidad de Poisson.

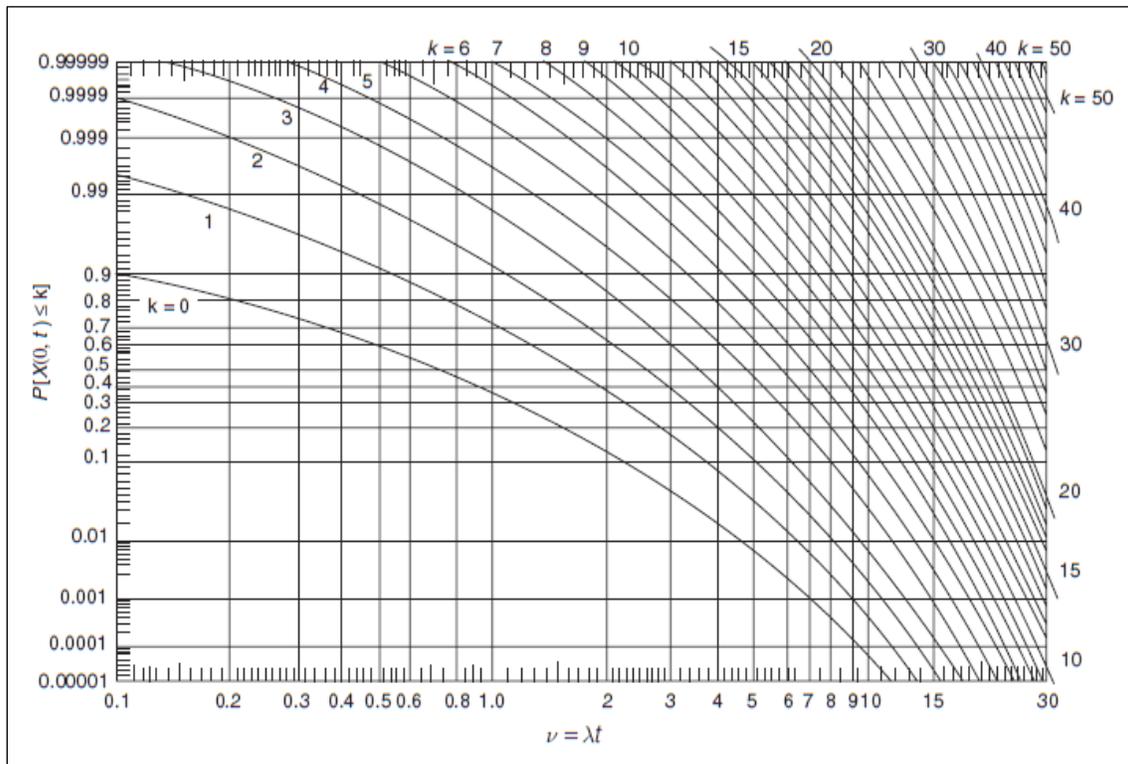


Figura 5.2 – Distribución de Probabilidad de la Función de Distribución de Poisson (Haight, 1967)

5.1.4. Proceso No Homogéneo de Poisson

Se considera ahora que el parámetro λ del proceso de Poisson, no es necesariamente una constante sino una función del tiempo. A veces a este proceso se le llama también proceso de Poisson con parámetro dependiente del tiempo. Este modelo puede ser naturalmente más adecuado para algunas situaciones reales aunque deja de cumplir la propiedad de Markov. El proceso no homogéneo de Poisson, cumple con las siguientes propiedades:

- a. $X_0 = 0$
- b. Los incrementos son independientes.
- c. Para cualquier $t \geq 0$, y h tiende a 0,
 - i. $P(X_{t+h} - X_t \geq 1) = \lambda(t)h + o(h)$
 - ii. $P(X_{t+h} - X_t \geq 2) = o(h)$

5.1.5. Distribución de Weibull

La variable aleatoria continua X tiene una distribución Weibull con parámetros $\alpha > 0$ y $\lambda > 0$, si su función de densidad está dada por la siguiente expresión:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda \alpha (\lambda x)^{\alpha-1} e^{-(\lambda x)^\alpha} & \text{si } x > 0, \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

En la siguiente Figura 5.3 mostramos la gráfica de la función densidad para varios valores de los parámetros α y λ de Weibull.

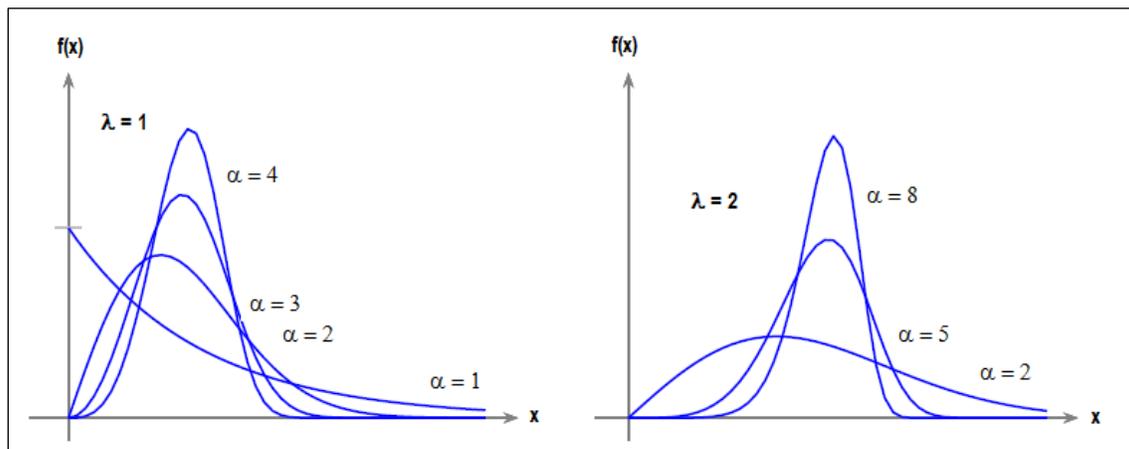


Figura 5.3 – Gráficas de la Función de Densidad de la Distribución de Weibull para Diferentes Valores de los Parámetros α y λ (Rincón, 2013)

5.1.6. Distribución Ji-Cuadrada

La distribución ji-cuadrada, es un caso importante de la distribución gamma, χ^2 . Decimos que la variable aleatoria continua X tiene una distribución ji-cuadrada, con n grados de libertad, siendo n mayor a 0, si su función de densidad está dada por la siguiente expresión:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(n/2)} \left(\frac{1}{2}\right)^{n/2} x^{n/2-1} e^{-x/2} & \text{sí } x > 0 \\ 0 & \text{sí } x \leq 0 \end{cases}$$

Se trata de una variable aleatoria continua con posibles valores en el intervalo $(0, \infty)$. Esta distribución tiene un solo parámetro denotado por la letra n , y al cual se le llama, grados de libertad.³

En la siguiente Figura 5.4 Podemos ver las diferentes formas que puede tomar la función ji-cuadrada, dependiendo del valor de los grados de libertad n .

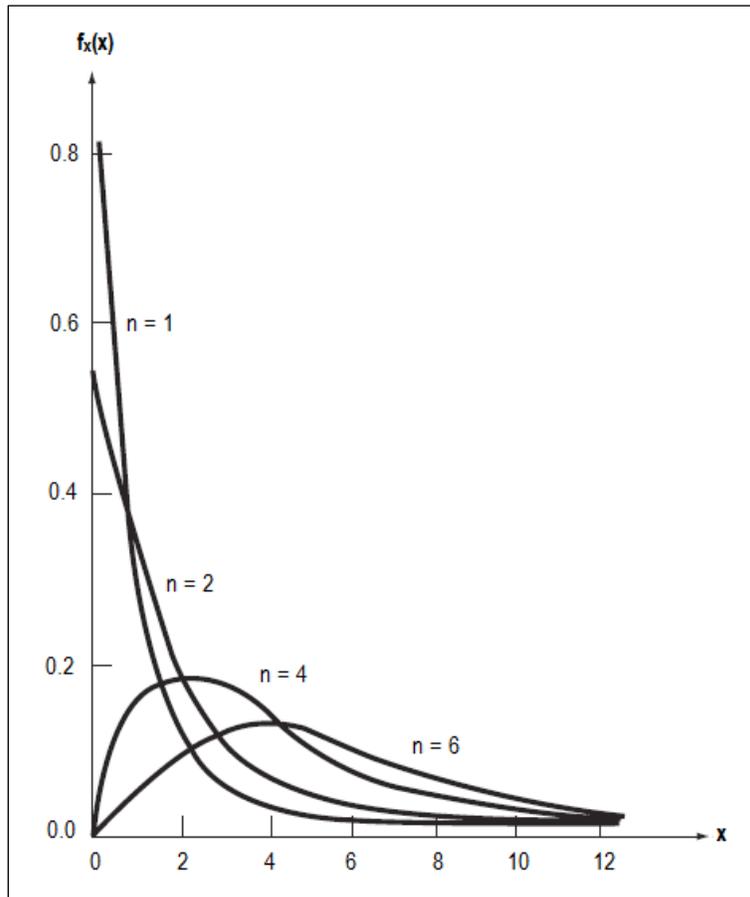


Figura 5.4 – Distribución Ji-Cuadrada para Valores de $n = 1, n = 2, n = 4$ y $n = 6$ (Soong, 2004)

5.2. Proceso de Modelado

El objetivo clave en el proceso de modelado, es poder describir la fracción de los sistemas BEC que se espera tengan un Tiempo de Vida Útil hasta determinado momento. Esta fracción, expresada en función del tiempo, se llama “función de supervivencia”. Los modelos paramétricos de la función sobreviviente pueden ser obtenidos con pocos datos y mediante herramientas predictivas que resulten útiles para esta aplicación. También existen métodos semiparamétricos y no paramétricos disponibles. Si se cuenta con datos suficientes, comúnmente son utilizados para el análisis de confiabilidad de acuerdo con los efectos que tendrán las múltiples variables. Para cualquier método que sea elegido, por lo regular se utiliza una mezcla de técnicas gráficas y numéricas para determinar el método ideal.

Antes de la aprobación del cualquier proyecto que tendrá aplicaciones de sistemas electrocentrífugos sumergidos, se calcula el Tiempo de Vida esperado para el sistema BEC, por lo regular basado en una combinación de información que es proporcionada tanto por el operador como por el fabricante. Aun si el proyecto es lo suficientemente parecido a un proyecto análogo cercano, en el tiempo presente, el cálculo del Tiempo de Vida esperado sigue siendo considerablemente subjetivo. Una vez que el proyecto ha sido puesto en marcha, la estimación del tiempo de vida es revisada y corregida de acuerdo a las unidades que han fallado y la experiencia operativa ganada. A los pocos días de que el proyecto ha sido iniciado, la estimación se hará basada solamente en unas cuantas fallas, por lo tanto el intervalo de confianza calculado, será mayor. Sawaryn⁵ resalta la importancia de la relación entre la distribución paramétrica estimada y el rango de falla predicho, Patterson⁶ sugiere que la información de falla de 20 sistemas BEC, por lo regular es suficiente para propósitos prácticos, para estimar la constante exponencial del rango, λ . Dependiendo del número de sistemas BEC involucrados en el desarrollo y el Tiempo Medio de Falla (MTTF), esta afirmación implica que probablemente no se tendrá información útil hasta después de muchos años.

5.2.1. Definición del Sistema

Es importante considerar el pozo como un sistema que debe ser sometido a reparación periódicamente para reemplazar los sistemas BEC que fallen. Sin embargo, si el Tiempo Medio de Falla es del orden de un año, de acuerdo a la guía de Patterson, 20 años será un lapso de tiempo en el que se pueda conseguir suficiente información para poder llevar a cabo análisis representativos y significativos. Además de que hay que considerar, que en algunos casos, este tiempo incluso excederá el tiempo de vida del campo; por lo tanto, se deben agrupar pozos similares. Cuando se

agrupan pozos de esta manera, se debe tener cuidado de no combinar sistemas que sea muy diferentes dentro de los grupos.

5.2.2. Condiciones Operativas

Una complicación más para la predicción del Tiempo de Vida, son las condiciones operativas, tales como el yacimiento, control de arena, especificaciones y funcionamiento del sistema, y gasto de producción, las cuales también varían y afectan el Tiempo de Vida Útil. Muchos de estos efectos, solo pueden ser observados en una etapa ya avanzada de la vida del campo. Cuando se cuenta con la información suficiente, la clasificación puede llevarse a cabo, y por lo tanto se pueden determinar modelos y parámetros separados para cada clase. La complejidad del modelo será determinada por la calidad y cantidad de la información disponible.

5.3. Elección del Modelo

Las medidas más comunes en la Industria Petrolera son Tiempo Medio entre Fallas y el Tiempo promedio de Vida Útil, estas, como ya vimos a detalle en el Capítulo II, son utilizadas para caracterizar los pozos y los diferentes sistemas artificiales de producción, con el fin de poder tener una medida de comparación de las condiciones de producción, así como también como una medida del rendimiento de diferentes programas de monitoreo o seguimiento.

Antes de comenzar con esta sección del capítulo, es importante definir los siguientes términos que serán utilizados con frecuencia, esto para un mejor entendimiento:

Función de Supervivencia: La función de supervivencia es la probabilidad de que un evento ocurra a, o después del tiempo t . Esta es también una función de distribución acumulada, CDF por sus siglas en inglés Cumulative Distribution Function, para una distribución dada. Para la información de confiabilidad, es regularmente modelada a partir de una distribución exponencial o una distribución de Weibull.

Rango de Falla: El rango de falla se refiere a la frecuencia con la que un sistema o un componente falla. También es la función de distribución de probabilidad o función de supervivencia.

Tiempo Medio a la Falla (Probabilísticamente): Aunque contiene el término Medio, en realidad no se utiliza de esta manera. El Tiempo entre Fallas puede ser una curva calculada como 1 entre el rango de falla. Este también puede ser la media de la curva. En Ingeniería Petrolera, este mismo término es utilizado para indicar la media o el P50 del tiempo de supervivencia para un sistema o

componente y regularmente es calculado como la estimación del promedio del Tiempo de Vida Útil basándose en la muestra total de sistemas o componentes que fallaron.⁴

Los modelos de análisis de supervivencia predicen el tiempo que toma que un evento ocurra y se concentra en la distribución de los tiempos de supervivencia. Esta se utiliza en muchos campos de estudio, sobre todos en aquellos en los que el tiempo de supervivencia indica algo, como lo es en el caso de los sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido y sus medidas de confiabilidad. Existe una clasificación general de tres metodologías para la estimación de las distribuciones de supervivencia, las cuales son: la no paramétrica, semi paramétrica y paramétrica, en realidad las que nos resultan de más utilidad para el análisis de supervivencia de sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido son las paramétricas, modelos que serán definidos específica e individualmente a continuación. Cabe mencionar que partir de la distribución exponencial, todos los demás modelos descritos son paramétricos.

5.3.1. Kaplan Meier, No Paramétrico

Cabe mencionar que el análisis de supervivencia no paramétrico, caracteriza las funciones de supervivencia sin asumir una distribución. El análisis se encuentra limitado a la estimación de la confiabilidad de los tiempos de falla pero solamente dentro del rango de los datos de falla de los que se dispone, lo que quiere decir que no hace predicciones fuera de este rango; además de que podemos realizar comparaciones de curvas de supervivencia, pero solamente de un factor a la vez, no podemos comparar muchos factores de falla al mismo tiempo.

Un análisis no paramétrico comúnmente utilizado es Kaplan Meier, este se caracteriza por una función decreciente a través de “saltos” de eventos observados a tiempos dados. El tamaño del salto depende del número de eventos al tiempo t y el número de sobrevivientes, en este caso sistemas BEC, al mismo tiempo t . El modelo de Kaplan Meier nos da la capacidad de estimar funciones sobrevivientes para información restringida. Y queda definido por la siguiente Ecuación 5.1.

$$S(t) = \prod_{t_i < t} \left(\frac{n_i - d_i}{n_i} \right) \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.1}$$

Dónde:

$S(t)$ = Función de supervivencia

n_i = Número de sobrevivientes justo antes del tiempo t_i

n_i = Cuando trabajamos con información restringida, se refiere al número de sobrevivientes, menos el número de sistemas correspondientes a la información restringida

d_i = Número de sistemas que fallaron al tiempo t_i

La curva resultante, es una función decreciente como ya lo habíamos mencionado, con saltos a los tiempos en los que los sistemas fallaron, d_i . El Tiempo Medio entre fallas, es el área bajo la curva resultante; el P50, o mediana, del tiempo a la falla es $S(t) \leq 0.5$.

Los intervalos de confianza tanto superior como inferior, para la curva Kaplan Meier, pueden ser calculados utilizando un software estadístico, y el rango de esta estimación es de aproximadamente 2 desviaciones estándar. Cuando se comparan dos curvas de supervivencia, la inspección visual no puede darnos un buen resultado, ya que por lo general, se dirá que son "iguales". Por lo que se deben calcular sus intervalos de confianza, si estos intervalos no coinciden, entonces podemos ver que las curvas de supervivencia son diferentes.

5.3.2. Riesgo Proporcional de Cox, Semi paramétrico

El análisis de supervivencia semi paramétrico, nos da una mejor visión que el no paramétrico. Este puede estimar la curva de supervivencia de un conjunto de datos dado al igual que para información restringida, sin embargo necesita regresión basada en múltiples factores o covariables para poder ver la contribución de un factor en la curva. Este método no es tan eficiente como los modelos paramétricos, sin embargo las suposiciones resultan menos restrictivas que las de los análisis paramétricos.

En lugar de suponer la distribución, el modelo del riesgo proporcional de Cox asume que el rango de falla de un sistema es el producto de:

- Un rango de falla base, el cual no debe ser especificado y solamente es función del tiempo.

$$h_o(t)$$

- Y una función positiva la cual incorpora los efectos de los factores y covariables independientes del tiempo.

$$\exp(\beta_1 x_{i1} + \beta_1 x_{ik} + \dots + \beta_k x_{ik})$$

Dónde:

β = Parámetros del modelo de Cox

x = Parámetros de operación

Este modelo es llamado semi paramétrico debido a que el rango de falla base, puede tomar cualquier forma. Dadas dos observaciones con el mismo rango de falla base, i e i' , pero que difieren en los valores x , que se refieren a los parámetros de operación, el rango de falla para estas dos observaciones es independiente del tiempo y se define como se muestra en la Ecuación 5.2:

$$\frac{h_i(t)}{h_i'(t)} = \frac{h_o(t)^{(\beta_1 x_{i1} + \beta_1 x_{ik} + \dots + \beta_k x_{ik})}}{h_o(t)^{(\beta_1 x_{i1} + \beta_1 x_{ik} + \dots + \beta_k x_{ik})}} = \frac{(\beta_1 x_{i1} + \beta_1 x_{ik} + \dots + \beta_k x_{ik})}{(\beta_1 x_{i1} + \beta_1 x_{ik} + \dots + \beta_k x_{ik})} \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.2}$$

El cálculo anterior para el rango, es el porqué de que el modelo de Cox, sea un modelo de riesgo proporcional; aunque el rango de falla $h_o(t)$, no está especificado, los parámetros β en el modelo de Cox pueden seguir siendo estimados. Después de ajustar el modelo de Cox, es posible obtener un rango de falla base y una función de supervivencia.

Como resultado de la regresión se estiman varios valores para el coeficiente β , y sus valores al cuadrado describen la cantidad de variación de la función de riesgo proporcional al ajustar el modelo. Las contribuciones de los factores o covariables en la curva, pueden ser interpretadas de la siguiente manera:

- $\beta > 0$, la covariable disminuye el tiempo de supervivencia conforme su valor incrementa.
- $\beta < 0$, la covariable aumenta el tiempo de supervivencia conforme su valor incrementa.
- Para factores, la contribución es relativa al nivel que el factor tenga.

Para poder entender de mejor manera los dos modelos explicados en esta parte, en el Apéndice 5.1, se encuentran ejemplos de dos situaciones específicas en las que se calculan las medianas de las curvas de supervivencia, comparando los métodos: Kaplan Meier, no paramétrico; riesgo proporcional de Cox, semi paramétrico; y la distribución de Weibull.

5.3.3. Distribución Exponencial

Patterson⁶ mostró cómo es que la distribución exponencial puede ser utilizada para modelar el Tiempo de Vida Útil de los sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido en el campo San Andrés, ubicado al oeste de Texas.

Por su parte Upchurch⁷, aplicó el mismo modelo a 1,149 fallas en sistemas BEC en el este del campo Wilmington, California. La información de falla, que incluía un amplio rango de sistemas y condiciones de operación, fue presentada en una serie de gráficas del Tiempo de Vida Útil contra el logaritmo del número de las instalaciones que continuaban en operación. Para Tiempos de Vida Útil cortos, las gráficas eran casi lineales, lo cual indicaba un rango de falla constante; por lo tanto, en este intervalo, la información ajusta de forma correcta a un modelo exponencial. Conforme el proyecto de sistemas BEC avanza en tiempo, el rango de falla aumenta, sugiriendo fallas por el desgaste natural causado por el uso. Por el punto de densidad, se puede notar que solo una pequeña proporción de sistemas BEC duran el tiempo suficiente para presentar el desgaste natural debido al uso, y solamente un volumen grande de información permite que este efecto sea

detectado. La evidencia numérica del desgaste por uso es dada por los rangos del Tiempo Medio de Vida Útil a la desviación estándar utilizada para el caso, estuvo en los rangos de 0.67 a 0.75 para todas las clasificaciones de sistemas BEC. Para una distribución exponencial, este rango debe ser exacto y solamente uno. Esta gran desviación de los valores teóricos implica que los Tiempos de Vida se encuentran agrupados muy cerca de la media de lo que es esperado para una distribución exponencial.

Lawless⁸ señala que aun pequeños cambios del modelo exponencial pueden alterar las propiedades considerablemente, además de que estos pequeños cambios pueden dificultar el poder detectar fallas en las muestras pequeñas o medianas, situación que se presenta muy comúnmente en fallas del sistema BEC.

5.3.4. Distribución de Weibull

Para esta distribución, en cuando a fallas en sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido, tenemos como antecedentes a Oliveira et al.⁹, quienes modelaron fallas de sistemas BEC de la Campos Oil Basin con la distribución de dos parámetros de Weibull. Y por otra parte, Sawaryn et al.¹⁰ añadieron un término adicional a la distribución de Weibull para poder representar los sistemas BEC que fallaron al iniciarse. Dependiendo de la magnitud del factor de forma, la distribución de Weibull puede ser utilizada para modelar tanto para incrementos crecientes monótonamente, constantes, o rangos de falla decrecientes de forma monótona.

En todos los casos anteriormente mencionados se utilizó la distribución de Weibull, excepto por uno, el cual tenía un conjunto de datos muy pequeño, los factores de forma de Weibull calculados fueron menores a la unidad, indicando por lo tanto un decremento del rango de falla. Esto es característico de fallas al poco tiempo de haber comenzado con la operación, las cuales son atribuidas al manejo, instalación, mantenimiento, control de calidad y problemas de producción. Cuando el factor de forma es igual a la unidad, la distribución de Weibull es reducida a una distribución exponencial. Esto es debido a que la distribución de Weibull sólo puede modelar rangos de fallas de un parámetro, no puede ser utilizado para modelar la forma bathtub la cual es necesaria para poder incorporar tanto fallas prematuras como el desgaste natural causado por el uso.

Frecuentemente, la distribución exponencial es utilizada como un caso especial de un modelo más general, tal como la distribución de Weibull, lo cual nos resulta de importancia dado el uso histórico que tienen ambas distribuciones para los sistemas BEC.

5.3.5. Métodos Gráficos

Ansell y Phillips¹¹ describieron el uso de muchos tipos de gráficas, Las gráficas probabilísticas, tales como la de Weibull, pueden ser utilizadas para el estudio de distribuciones específicas. Los gráficos de Duane por su parte, pueden ser utilizados para encontrar el rango de fallas con el tiempo. En este caso, se asume que la información se encuentra cronológicamente ordenada y parte de una secuencia. Las pruebas del tiempo total escalonado; TTT, por sus siglas en inglés Scaled Total Time on Test; pueden ser utilizados para ayudar a determinar si un distribución tiene un rango de falla creciente o decreciente. Estos autores sin embargo advierten que no se debe basar demasiado en las gráficas, además de señalar que los puntos extremos de cualquier línea predicha por lo regular no son significantes.

5.3.5.1. Gráficas de Duane

Duane al principio propuso la gráfica del logaritmo de la suma acumulada del rango de falla contra el logaritmo del Tiempo a la Falla. La gráfica, la cual aplica para un solo sistema que puede ser reparado, será casi lineal si el proceso que gobierna los Tiempos de Falla es la Ley de Potencia.

En este caso, el pozo es considerado como el sistema, en la Figura 5.5 podemos ver el ejemplo de una gráfica de Duane para siete sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido instalados en un periodo de 8 años en el pozo productor de agua CFP-01 de Alaska Kuparuk. La tendencia sugiere una mejora en la confiabilidad a lo largo de este periodo, además de que probablemente un modelo exponencial no sea el apropiado. Aun para Tiempo de Vida moderados, algunos pozos van a dar la información suficiente para que puedan ser tratados de esta forma. Este ejemplo ilustra la importancia del Tiempo de Calendario, la cual ya habíamos remarcado en el Capítulo II, además de la necesidad de aplicar varias técnicas cuando se está investigando la confiabilidad del sistema.

5.3.5.2. Gráficas de Tiempo Total Escalonado

Por su parte Hoyland y Rausand¹², presentaron detalles de cómo es que las gráficas de tiempo total escalonado, pueden ser utilizadas para representar la función sobreviviente, la información de falla se transforma para que pueda quedar dentro de una unidad cuadrada. La información se aproxima a una distribución exponencial y será graficada como una línea recta en la diagonal principal.

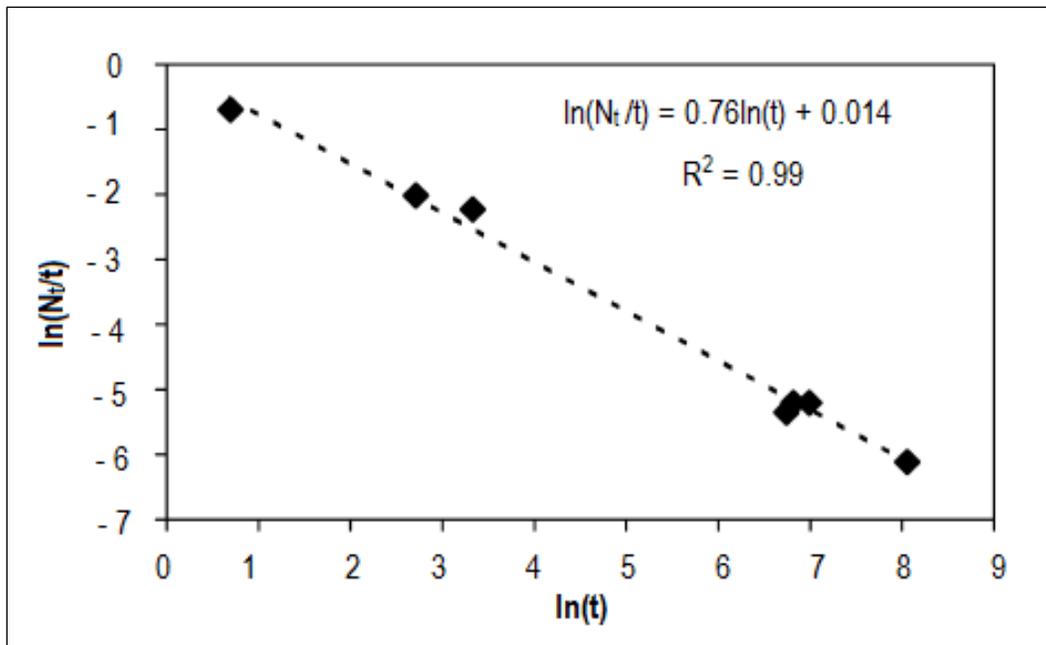


Figura 5.5 – Gráfica de Duane para las Fallas de los Sistemas BEC en el Pozo de Agua CFP-01 de Kuparuk, Alaska (Sawaryn, 2003)

Las distribuciones pueden mostrar un incremento del rango falla, o IFR, por sus siglas en inglés Increasing Failure Rate, o un decremento del rango de falla, o DFR, por sus siglas en inglés Decreasing Failure Rate, las cuales se posicionarán a la izquierda y la derecha de la diagonal respectivamente.

Si tenemos que la gráfica presenta forma de bathtub, entonces significa que tenemos fallas prematuras, por otra parte el desgaste por el uso comienza en la derecha y cruza la diagonal, como se muestra en la Figura 5.6. Hoyland y Rausand mostraron que las curvas teóricas de distribución de Weibull para los tiempos de falla, pueden ser calculadas en términos de la gamma integral incompleta. Las curvas pueden ser fácilmente calculadas en una hoja de cálculo con los algoritmos ya publicados.

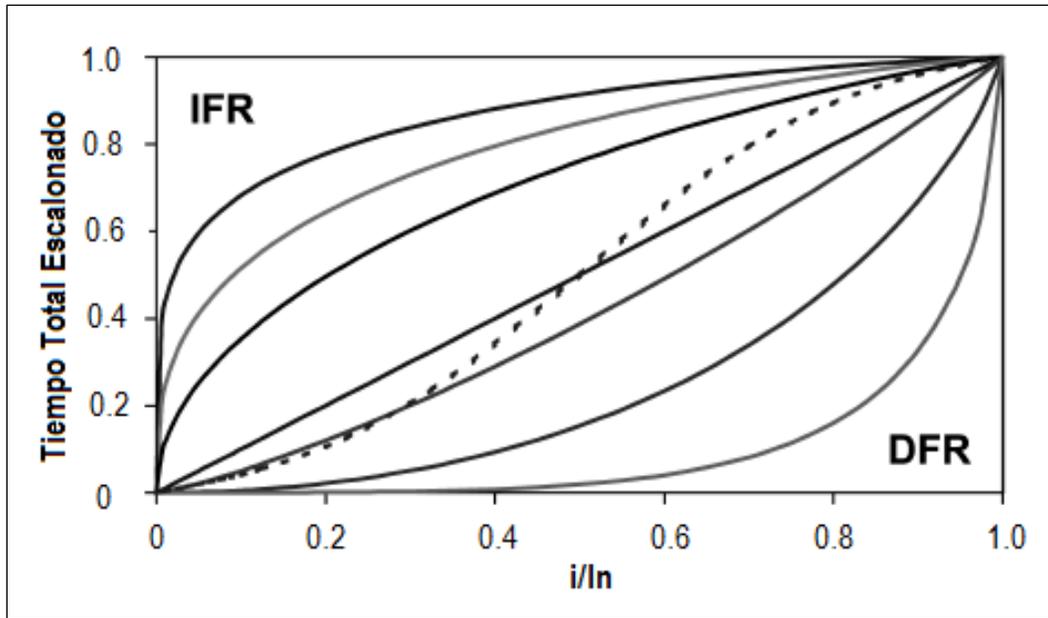


Figura 5.6 – Gráfica del Tiempo Escalonado que Muestra las Tendencias Exponencial y de Weibull (Sawaryn, 2003)

La información empírica también puede ser graficada en la misma escala, tenemos el ejemplo de su uso, el cual muestra la Figura 5.7.

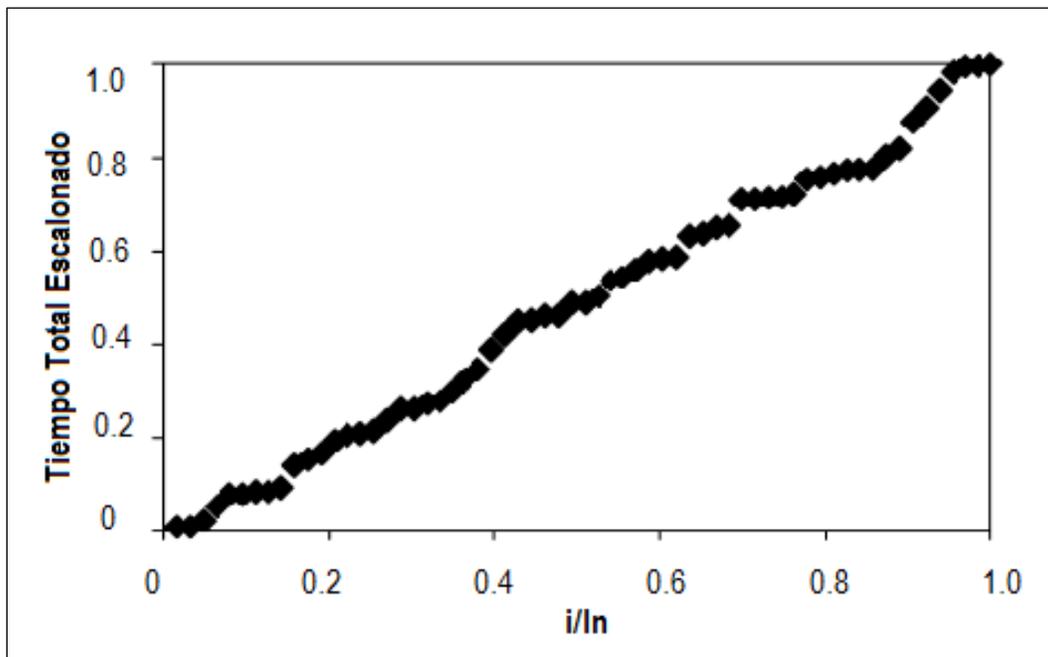


Figura 5.7 – Gráfica del Tiempo Escalonado para el Ejemplo con la Información de Patterson del Oeste de Texas (Patterson, 1993)

La tendencia se encuentra muy cerca de la diagonal, lo cual confirma que puede ajustarse a una distribución exponencial. Hay que tener en cuenta que la calidad de las gráficas del tiempo total escalonado, incrementa con el número de puntos.

5.3.6. Proceso Homogéneo de Poisson

HPP, por sus siglas en inglés Homogeneous Poisson Process. En general, el proceso ordinario de renovación creado por reemplazos sucesivos de unidades idénticas, exponencialmente distribuidas, se denomina proceso homogéneo de Poisson. Si las unidades o sistemas son reparadas, este modelo de renovación, solamente será adecuado si la reparación hace que el sistema sea tan bueno como uno nuevo. Para sistemas reparables, la situación es más complicada; esto es debido a que por el deterioro del sistema, la distribución del tiempo de falla del componente cambia; por lo tanto, en este caso, el proceso de renovación no es aplicable.

Para los sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido, es común que se rescaten algunos componentes y se vuelvan a utilizar. Después de la reinstalación, por ejemplo: para un cable de potencia, la falla puede depender de la fracción del cable que ha sido reutilizada, ya que a su Tiempo de Vida Esperado se le debe restar el tiempo que ya había estado en operación, por lo tanto se debe tener cuidado al aplicar el proceso homogéneo de Poisson. Operativamente, para el estudio y el mejoramiento de la confiabilidad, el sistema debe ser reducido a nivel de componente, como fue presentado por Upchurch. Como alternativa, los modelos de proceso no homogéneo de Poisson, NHPP por sus siglas en inglés Nonhomogeneous Poisson Process, incluyendo la el proceso de la ley de potencia, son métodos convenientes para el seguimiento del rango de falla con el tiempo, como una función del tiempo, y sus aplicaciones para los sistemas BEC deben ser estudiadas.

5.3.7. Métodos Numéricos

Ansell y Philips presentaron detalles de las pruebas de Laplace y tendencia de MIL-HDBK-189 que pueden ser utilizadas como pruebas para la distribución exponencial y para comparar un proceso homogéneo de Poisson con uno no homogéneo. Los resultados de las pruebas de tendencias pueden no ser muy útiles cuando se tiene muy poca información, de la misma forma que lo es con los métodos gráficos.

5.3.8. Distribución de Weibull Incorporando Simulación de Monte Carlo

Sawaryn et al., incorporaron sus modelos de la distribución de Weibull desarrollados para la información con la que contaban de Alaska para el simulador de Monte Carlo. Con el simulador,

podieron incluir otros parámetros, como los tiempos en espera por las operaciones de mantenimiento y los criterios económicos que involucra el reinicio de la operación del sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido. Demostraron que el tiempo que se ocupa en las operaciones de mantenimiento del pozo y reemplazo del sistema BEC fallado, si influye en el rango de falla. Después, usando la teoría de renovación estadística, Sawaryn, mostró que el tiempo de retraso en operaciones de mantenimiento dependía de la disponibilidad del equipo para poder llevar a cabo la operación, además de que aportó otras expresiones simples relacionadas con el rango de falla y el tamaño de la muestra al límite económico de producción del pozo, por debajo del cual el sistema BEC no debería ser instalado.

Se asume que el Tiempo de Vida Útil del sistema de bombeo electrocentrífugo está distribuido de una forma exponencial, y el límite económico fue representado por una función escalonada, implicando que el tiempo se conoce exactamente. En la práctica, las variaciones en las condiciones económicas, tales como el precio del barril de petróleo y costos de producción, además de la incertidumbre en los rangos de declinación predichos, significan que el tiempo al que el límite económico será alcanzado, es incierto.

Como podemos notar por todas las complicaciones que se presentan, el modelado está muy lejos de ser un proceso simple, esto es debido a situaciones en particular como la elección del modelo, influencia del desgaste por uso, y los criterios económicos para poder reinstalar un sistema BEC que falló.

5.4. Resumen de los Modelos Presentados

A continuación, la Tabla 5.1 muestra un resumen de los modelos presentados para analizar las fallas de los sistemas de bombeo electrocentrífugo.

Modelo	Aplicación
Kaplan Meier	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estimación de funciones de supervivencia para información restringida.
Riesgo Proporcional de Cox	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Podemos predecir fallas con menos restricciones que con los modelos paramétricos.
Distribución Exponencial	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modelar Tiempo de Vida Útil de Sistemas BEC ▪ En gráficas del Tiempo de Vida Útil vs. Logaritmo del número de las instalaciones que continúan en operación. Para Tiempos de Vida Útil cortos, la información ajusta de forma correcta a un modelo exponencial. ▪ Para detectar fallas, pequeños cambios del modelo exponencial pueden alterar las propiedades considerablemente, los cuales pueden dificultar el poder detectar fallas en las muestras pequeñas o medianas.

Distribución de Weibull	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modelado de fallas de sistemas con la distribución de dos parámetros de Weibull. ▪ Modelado de sistemas BEC que fallaron al iniciarse, distribución de tres parámetros. ▪ Para muestras muy pequeñas no es útil, ya que detecta un decremento del rango de falla. ▪ Solamente puede modelar rangos de falla de un parámetro, (no puede incorporar fallas prematuras ni desgaste natural).
Proceso Homogéneo de Poisson	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aplica solo cuando los reemplazos sucesivos del sistema BEC son idénticos, ya sea nuevo, o reparado que funcione como nuevo. ▪ Puede ser útil para estimar el tiempo de vida Útil de los sistemas BEC y predecir futuras fallas, cuando se cuenta con un conjunto de información pequeño, por ejemplo, cuando acaba de comenzar la operación del campo.
Proceso no Homogéneo de Poisson	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Seguimiento del rango de falla con el tiempo, como una función del tiempo (debe profundizarse su estudio en cuanto a la aplicación a sistemas BEC)
Graficas de Duane	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Encuentra el rango de falla en un tiempo dado. ▪ Un solo sistema que puede ser reparado (el pozo se considera como el sistema).
Gráficas de Tiempo Total Escalonado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Determina si el rango de falla es creciente o decreciente, mediante lo cual podemos identificar: fallas prematuras y desgaste por uso. ▪ Representar la función de supervivencia.
Métodos Numéricos (Laplace y MIL-HDBK-189)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilizados como pruebas para la distribución exponencial, sin embargo debe profundizarse su estudio en la aplicación a sistemas BEC.

Tabla 5.1 – Resumen de los Modelos Utilizados para el Análisis de Fallas en Sistemas BEC (Granados-Pérez, 2016)

5.5. Aspectos Adicionales a Tomar en Cuenta en el Modelado

5.5.1. Influencia del Desgaste por Uso

El desgaste causado por el uso en los sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido, por lo regular es ignorado al modelar y predecir el Tiempo de Vida Útil, y por lo tanto la posibilidad de vida infinita se encuentra implícita al utilizar ambas distribuciones tanto la exponencial como la de Weibull. Se asume que solamente pocas unidades podrán sobrevivir el tiempo suficiente para poder desgastarse por el uso. La investigación de la información de Upchurch muestra que el efecto es observable.

El desgaste por uso es un efecto a largo plazo y, por lo tanto, no puede ser observado en la vida temprana del desarrollo del campo. Durante este periodo por lo tanto, las aproximaciones, tales como las distribuciones exponencial y de Weibull, son apropiadas. Esta suposición puede no ser válida para tiempos más avanzados en la vida del desarrollo. Para ambas distribuciones, las “colas” en la distribución de Tiempos de Vida Útil largos van a influir de manera significativa en el Tiempo Medio de Vida, y por lo tanto, los sistemas BEC no alcanzarán la media calculada.

Gráficas como la del tiempo total escalonado y las presentadas por Upchurch, pueden ser utilizadas para detectar el desgaste por el uso. Para estimar el efecto de contribución a la media del Tiempo de Vida Útil que causan los tiempos de vida largos, se debe considerar la función de probabilidad acumulada para la distribución exponencial con un rango constante, λ , truncado en un tiempo, t_w , como se muestra en la Figura 5.8.

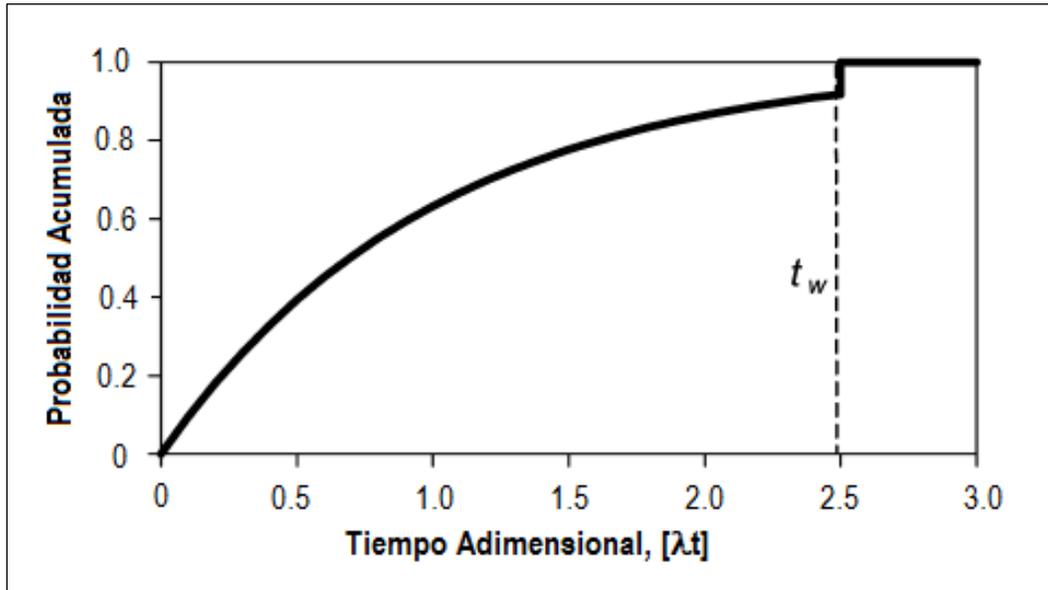


Figura 5.8 – Truncado Exponencial de la Distribución de Probabilidad Acumulada (Sawaryn, 2003)

Los efectos del retraso debido a las operaciones de mantenimiento y los equipos que no son iniciados en tiempo, son ignorados. Por lo tanto, esto asume que algunas unidades fallarán abruptamente al alcanzar el tiempo t_w . En el Apéndice 5.1 se muestra que con esta suposición, el rango de falla de la Ecuación 5.3 incrementa asintóticamente.

$$h(\infty) = \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda t_w}} \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.3}$$

Dónde:

$h(t)$ = Rango de renovación, t^{-1} , [días⁻¹]

λ = Rango constante de distribución exponencial, t^{-1} , [días⁻¹]

t_w = Tiempo en el que se asume la falla de todos los sistemas BEC, t , [días]

Con la Ecuación 5.3, también podemos notar que el rango de falla se encuentra dentro del 10% del calculado para la distribución completa si la aparición del desgaste por uso, t_w , es mayor a $2.5/\lambda$. Debe ponerse especial atención en que la distribución exponencial truncada ha sido involucrada

para poder ayudar a determinar cuándo las distribuciones normales pueden ser aplicadas, por lo que no es debe ser considerado como un modelo de desgaste por uso.

5.5.2. Tamaño de la Muestra

Rigdon y Basu¹³ mostraron que si solamente se tiene disponible un número limitado de puntos de fallas, aproximadamente entre uno y diez, el proceso de Poisson por lo regular, ajusta mejor que el proceso de la ley de potencia de dos parámetros. El principio general es que un modelo con pocos parámetros es preferible que un modelo con muchos parámetros que resultan inútiles, aunque este último ha sido útil para ajustar de mejor forma la información. La distribución de Weibull está relacionada con el proceso de la ley de potencia, pero no son lo mismo.

5.5.3. Errores en la Estimación del Rango Constante de Falla

La distribución exponencial ha mostrado ser un modelo útil para fallas en sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido. Además, si la fracción de sistemas que no han podido ser iniciados es pequeña y la unidad es reemplazada inmediatamente a la falla, el resultado será muy aproximado al obtenido con el proceso homogéneo de Poisson. Cox¹⁴ que la superposición de N_0 independiente de un proceso de Poisson, con la función generadora de probabilidad, $G(z,t)$, es también un proceso de Poisson con una función generadora de probabilidad, la cual quedaría definida por la siguiente Ecuación 5.4:

$$[G(z,t)]^{N_0} = e^{-1(1-z)N_0\lambda t} \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.4}$$

Dónde:

- G = Función generadora de probabilidad
- z = Variable de la función generadora de probabilidad
- t = tiempo, t, [días]
- N_0 = Tamaño inicial de la muestra del primer tipo (genérico) de sistemas BEC
- λ = Rango constante de distribución exponencial, t^{-1} , [días⁻¹]

De esta ecuación generadora, el número de fallas esperado, $\mu(N_t)$, al tiempo t, estará dado por $N_0\lambda t$, con $N_0\lambda t$ variable. Por lo tanto, aun si el rango exponencial constante, λ , es conocido exactamente, existe una incertidumbre inherente en el número de fallas resultado del proceso de renovación. En la práctica, el rango constante de falla no es conocido exactamente y debe ser estimado con la información de falla de otra instalación análoga o con las primeras fallas que se hayan presentado en la vida del campo. En consecuencia, la predicción del número de fallas va a depender de la

combinación de las incertidumbres atribuibles al proceso de renovación y a la estimación del rango constante de falla, λ_e . Un método común de estimación es el de la probabilidad máxima, y el comportamiento de la estimación con este método, dependerá en que tanto se encuentren las fallas restringidas.

5.5.4. Información Restringida

Para fines prácticos en este capítulo utilizaremos el término información restringida, para traducir el término censoring, el cual se refiere, en el caso de sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido, a que la información acerca de la Vida Útil del Sistema es conocida solamente de manera parcial, lo cual nos ocasionará dificultades.

La información restringida describe cómo se observa la Vida Útil del sistema BEC de los sistemas que aún no han fallado. Como sabemos en instalaciones de sistemas de bombeo electrocentrífugo, las unidades son puestas en producción a diferentes tiempos aleatorios. También existe una gran variación en las duraciones de las operaciones de mantenimiento que se llevan a cabo para reemplazar los sistemas BEC que han fallado o, en algunos casos, que son desinstaladas antes de fallar a causa de cambios en las condiciones del yacimiento o en intervalo productivo. Toda esta información acerca de la Vida Útil del sistema, involucra tanto los sistemas que han fallado, como los que siguen en funcionamiento, y esta información es la que puede o debe ser utilizada para determinar las distribuciones y estimar los parámetros. Debido a que esta información no es conseguida como parte de esquema de muestreo que se lleva a cabo de manera ordenada, es por eso que en algunos casos no contamos con la información suficiente.

5.5.5. Estimación de Parámetros

Establezcamos que T_i es el Tiempo de Vida Útil del sistema BEC número i , al final del periodo de interés sin importar si este falló. Si N_o es el número de sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido que se encuentran instalados y r son las unidades que fallan en el intervalo de tiempo, entonces λ_e , está dado por la Ecuación 5.5, en donde \mathfrak{T} , es el tiempo total de la prueba.

$$\lambda_e = \frac{r}{\sum_{i=1}^{N_o} T_i} = \frac{r}{\mathfrak{T}} \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.5}$$

Dónde:

λ_e = Rango general calculado constante de distribución exponencial, t^{-1} , [días⁻¹]

r = Número de fallas registradas

N_0 = Tamaño inicial de la muestra del primer tipo (genérico) de sistemas BEC

T_i = Tiempo de Vida Útil del sistema BEC i (incluyendo para información restringida), t , [días]

\mathfrak{T} = Tiempo total de la prueba, t , [días]

Para el proceso de Poisson, Pearson y Hartley¹⁵ mostraron que el límite inferior del intervalo de confianza, es el mismo que el obtenido al dividir $2r\lambda/\lambda_e$, que tendrá una distribución ji-cuadrada, con $2r$ grados de libertad. Para el límite superior, los grados de libertad deben ser tomados como $2r+2$. El intervalo de confianza $100(1-\alpha)\%$, de acuerdo con la Ecuación 5.6, para $1/\lambda$, puede ser obtenido de las tablas estándares para la distribución ji-cuadrada.

$$\frac{2\mathfrak{T}}{\chi^2(1-\frac{\alpha}{2})(2r)} \geq \frac{1}{\lambda} \geq \frac{2\mathfrak{T}}{\chi^2(1-\frac{\alpha}{2})(2r+2)} \dots\dots\dots\text{Ecuación 5.6}$$

Dónde:

\mathfrak{T} = Tiempo total de la prueba, t , [días]

χ^2 = Variable ji-cuadrada

α = Intervalo de confiabilidad

r = Número de fallas registradas

λ = Rango constante de distribución exponencial, t^{-1} , [días⁻¹]

Lawless presentó tres aproximaciones para la distribución para las observaciones de la información restringida. La última, atribuida a Cox, toma $2r\lambda/\lambda_e$, como distribución aproximada a el modelo ji-cuadrada con $2r+1$ grados de libertad. Con esta aproximación, la probabilidad de que $\eta=2r\lambda/\lambda_e$, se encuentra entre η y $\eta+d\eta$ y es presentada en la Ecuación 5.7:

$$p(\eta|2r+1)d\eta = \frac{1}{2^{r+\frac{1}{2}}\Gamma\left(r+\frac{1}{2}\right)} e^{-\frac{\eta}{2}\left(r+\frac{1}{2}\right)} \dots\dots\dots\text{Ecuación 5.7}$$

Dónde:

η = Variable adimensional sustituida

r = Número de fallas registradas

Γ = Función gamma

La Ecuación 5.4 y Ecuación 5.7 pueden ser combinadas para mostrar el número de fallas que se encuentra caracterizado por ser una distribución binomial negativa. Las nuevas ecuaciones para número de fallas esperado y su variación en el tiempo t , son mostradas en la Ecuación 5.8 y la Ecuación 5.9:

$$\mu(N_t) = N_0 \lambda_e t \left(1 + \frac{1}{2r} \right) \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.8}$$

Dónde:

- μ = Tiempo Medio a la Falla general, t , [días]
- N_t = Número de fallas al tiempo, t , [días]
- N_0 = Tamaño inicial de la muestra del primer tipo (genérico) de sistemas BEC
- λ_e = Rango general calculado constante de distribución exponencial, t^{-1} , [días⁻¹]
- r = Número de fallas registradas

$$\sigma^2(N_t) = N_0 \lambda_e t \left(1 + \frac{1}{2r} \right) \left(1 + \frac{N_0 \lambda_e t}{r} \right) \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.9}$$

Dónde:

- σ = Desviación estándar
- N_t = Número de fallas al tiempo, t , [días]
- N_0 = Tamaño inicial de la muestra del primer tipo (genérico) de sistemas BEC
- λ_e = Rango general calculado constante de distribución exponencial, t^{-1} , [días⁻¹]
- t = tiempo, t , [días]
- r = Número de fallas registradas

La relación entre el número de fallas que está dado por $N_0 \lambda_e t \left(1 + \frac{1}{2r} \right)$, la desviación estándar, y r , se presenta en la Figura 5.9, de la Ecuación 5.8 se puede notar que el número esperado de fallas casi no cambia. La variación, dada por la Ecuación 5.9, incrementa por el factor: $\left(1 + \frac{1}{2r} \right) \left(1 + \frac{N_0 \lambda_e t}{r} \right)$, el cual tiene a la unidad conforme r incrementa a infinito.

La región marcada como A en la Figura 5.9, refleja la incertidumbre inherente resultado del proceso de renovación. Para valores pequeños de r , la incertidumbre en el parámetro estimado, λ_e , es más grande; por lo tanto, la incertidumbre en el número de fallas predicho también será mayor. Para

valores grandes, este factor rápidamente domina la incertidumbre, poniendo un límite práctico de que tan lejos se puede hacer una predicción en el tiempo.

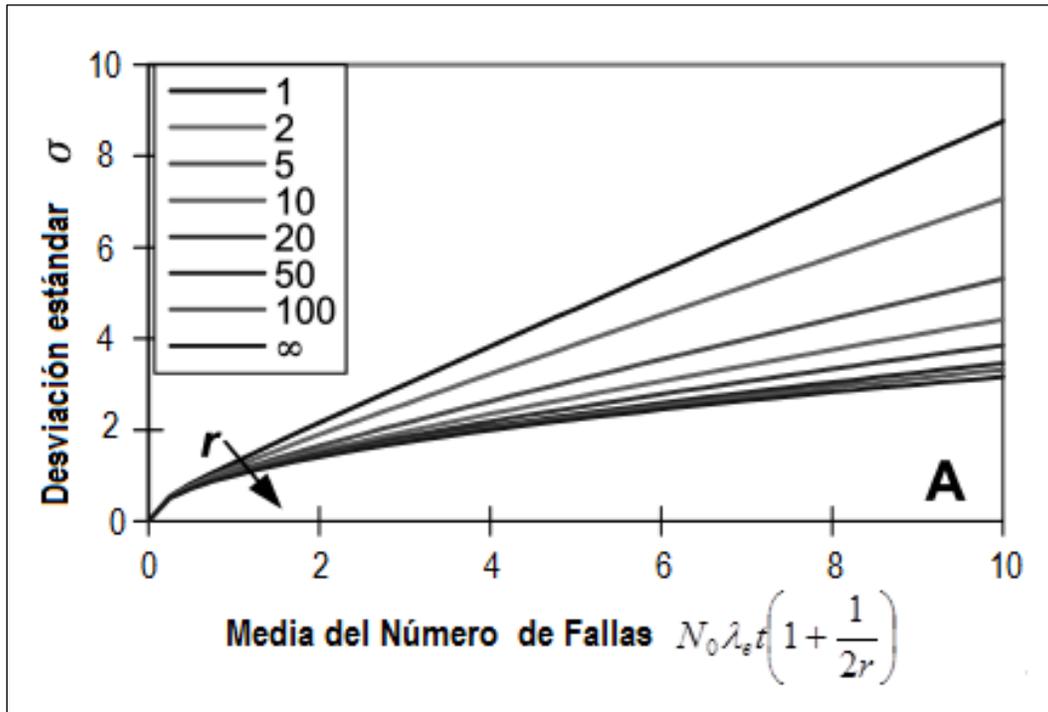


Figura 5.9 – Influencia del Error en la Estimación de Parámetros en el Proceso de Poisson (Sawaryn, 2003)

Por otro lado, cuando tenemos valores de $N_0 \lambda_e t$ y r , pequeños, el binomio negativo se sesga positivamente, y el número observado de fallas puede ser significativamente más alto que el verdadero.

Suposición de Cero Fallas

Cuando el valor de r (*número de fallas registradas*), es igual a cero en la Ecuación 5.6, se puede obtener un Tiempo de Vida Útil conservador, aun cuando no se han observado fallas del sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido. La estimación, corresponderá a un tiempo menor, aproximadamente: 100 (1-a)% del límite de confianza. El cual no será muy útil a menos que el tiempo escalonado sea grande.

Para poder ver un ejemplo aplicado de las ecuaciones, en el Apéndice 5.2, se muestra la predicción de fallas de un Bloque, para un desarrollo en Kuparuk, Alaska.

5.5.6. Variación en los Criterios Económicos

La incertidumbre en el límite económico del pozo también puede ser incorporada dentro del modelo de falla de los sistemas de bombeo electrocentrifugo sumergido. Para esto se asume que las fallas en el sistema BEC son independientes, con una distribución exponencial y con un Tiempo Medio a la falla de $1/\lambda$, y que el límite económico puede ser representado probabilísticamente con una función de densidad $q(t)$. La función de distribución acumulada correspondiente $Q(t)$, es la probabilidad que un pozo ya no sea rentable en el tiempo t . Bajo estas condiciones, el rango de falla, $h(t)$, y el número de unidades económicas, $N(t)$, como función del tiempo, están dadas por la Ecuación 5.10 y la Ecuación 5.11:

$$h(t) = N_0 \lambda [1 - Q(t)] e^{-\lambda \int Q(t) dt} \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.10}$$

Dónde:

$h(t)$ = Rango de renovación, t^{-1} , [días⁻¹]

N_0 = Tamaño inicial de la muestra del primer tipo (genérico) de sistemas BEC

λ = Rango constante de distribución exponencial, t^{-1} , [días⁻¹]

$Q(t)$ = Distribución de probabilidad acumulada económica

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda \int Q(t) dt} \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.11}$$

Dónde:

$N(t)$ = Tamaño de la muestra del primer tipo (genérico) de sistemas BEC

N_0 = Tamaño inicial de la muestra del primer tipo (genérico) de sistemas BEC

λ = Rango constante de distribución exponencial, t^{-1} , [días⁻¹]

$Q(t)$ = Distribución de probabilidad acumulada económica

Debido a que las fechas de instalación y los criterios económicos de los sistemas de bombeo electrocentrifugo sumergido varían de pozo a pozo, se requieren expresiones separadas para cada uno. El comportamiento de todos los pozos en el campo, es obtenido por superposición. Si $Q(t)$ es representado por la función de Heaviside, la Ecuación 5.10 y la Ecuación 5.11, pueden reducir de manera correcta las expresiones presentadas por Sawaryn, en la Figura 5.10, podemos ver los resultados para una función de densidad triangular, y en la Figura 5.11, la mitad de la anchura, la cual es equivalente a un Tiempo Medio a la Falla aplicado a tres pozos. Los pozos alcanzaron sus límites económicos a 1.5, 2.5 y 5 Tiempos Medios de Vida calculados, después de haber establecido fechas de puesta en operación de manera arbitraria.

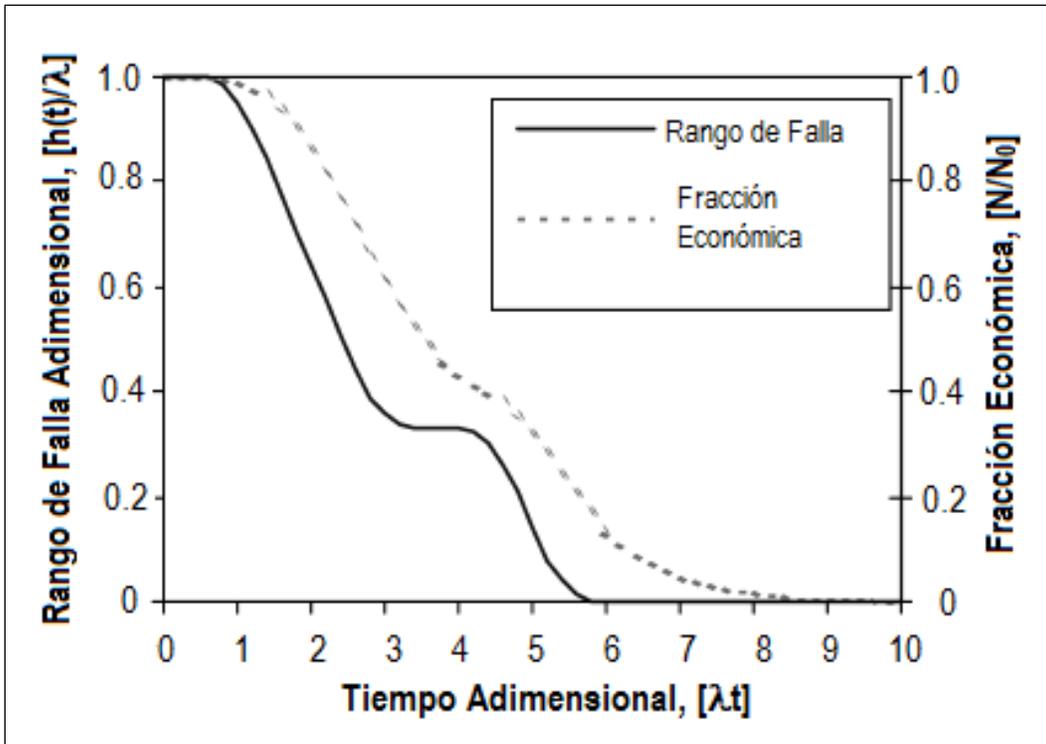


Figura 5.10 – Rango de Falla de la Declinación de la Muestra con una Función de Densidad Económica Triangular (Sawaryn, 2003)

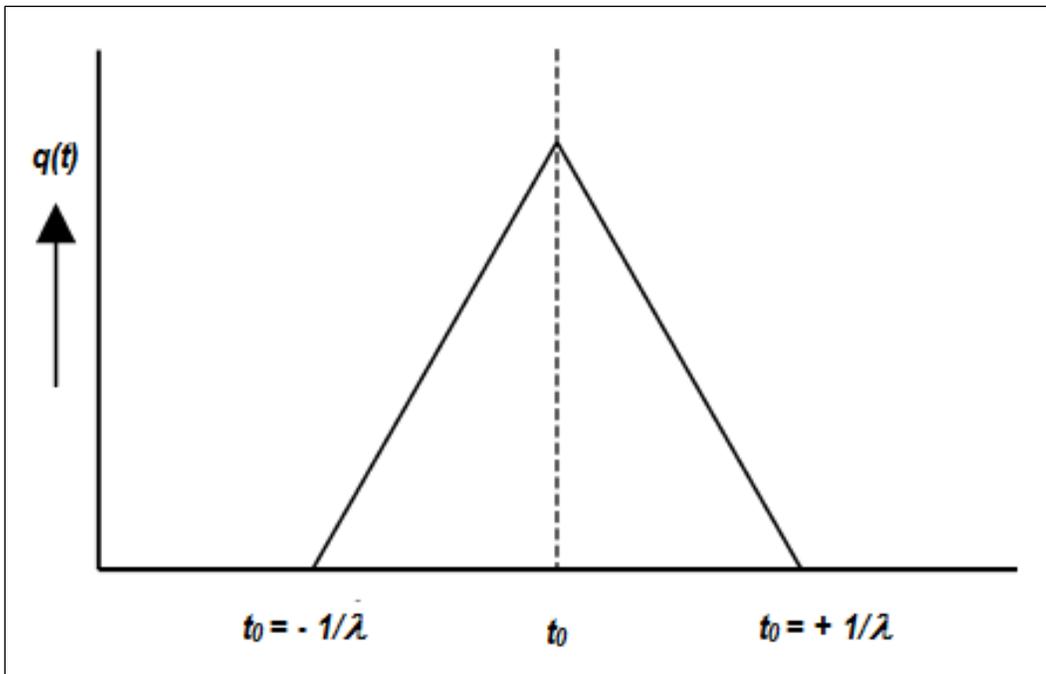


Figura 5.11 – Función de Densidad Triangular (Sawaryn, 2003)

La incertidumbre en los límites económicos tiene un impacto notable en el rango de falla, el cual está representado con la curva punteada. Por lo tanto, esta incertidumbre en el límite económico, debe ser considerada durante la declinación del campo.

5.6. Modelo de Evaluación Comparativa de Tiempo de Vida Útil de Sistemas BEC entre Diferentes Aplicaciones (ESP-RIFTS)

En esta parte presentaremos una introducción acerca de las dificultades encontradas en la elaboración del modelo desarrollado por Alhanati y Hanson de C-FER Technologies, a partir de la base de datos de ESP-RIFTS, con la cual ya hemos trabajado a lo largo de este trabajo de tesis, y en específico, en el Capítulo III para la Nomenclatura Estándar.

Al intentar hacer una evaluación comparativa de los Tiempos de Vida Útiles entre diferentes operaciones, se deben tomar en cuenta las diferencias de las aplicaciones, por mencionar algunas: la temperatura de fondo de pozo, la producción de agua, presencia de sólidos, entre muchas otras. El modelo desarrollado por C-FER Technologies del cual hablaremos a continuación, es un modelo estadístico que pueda lograr una evaluación comparativa adecuada. El modelo, está basado como ya mencionamos, en la base de datos de las instalaciones de sistemas de bombeo electrocentrífugo de ESP-RIFTS, por lo tanto como ya conocemos la estructura de la Nomenclatura Estándar, sabemos que toma en cuenta los mecanismos de falla, Causa de Falla; y los factores que influenciaron la falla, Componente Primario de Falla, los cuales afectan los rangos de falla a tomar en cuenta para el modelo.

Una de las técnicas de análisis utilizadas para poder facilitar la extracción de información útil, que nos pueda ayudar a predecir Tiempos de Vida en sistemas BEC, a partir de la base de datos, consiste en un modelo estadístico utilizado para determinar el promedio del Tiempo de Vida Útil de los sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido, o el rango de falla promedio para un determinado conjunto de condiciones operativas. El modelo está basado en la disponibilidad de la información de ESP-RIFTS alrededor del mundo; en la Figura 5.12 podemos observar los lugares de los cuales se obtiene la información de la base de datos.

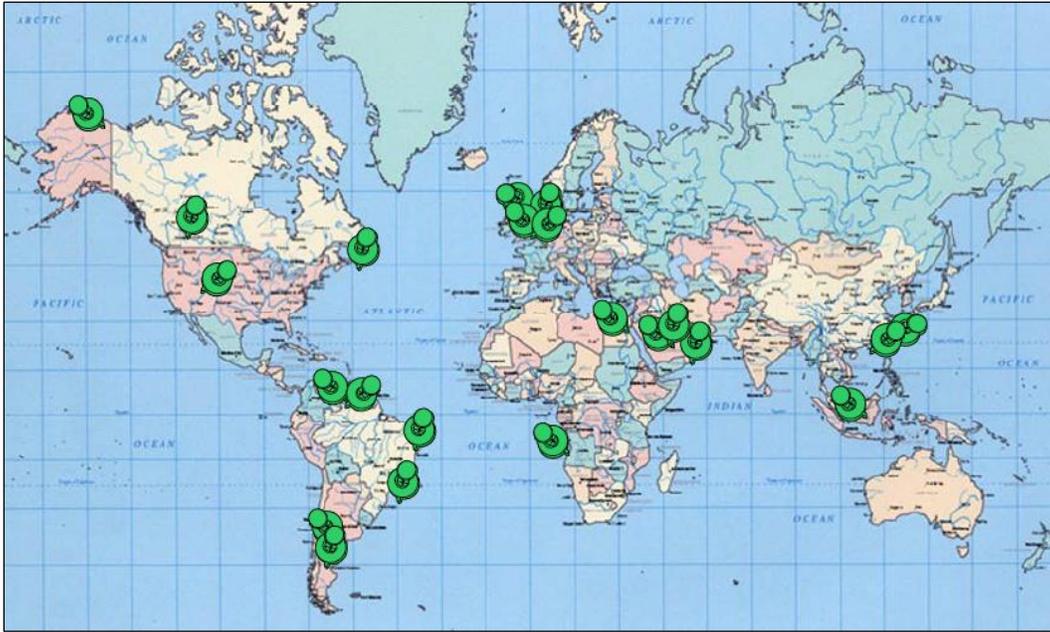


Figura 5.12 – Mapa de Localización de Operaciones de ESP-RIFTS (Alhanati, 2003)

Este modelo, tiene tres propósitos principales:

- a. Estimar el Tiempo de Vida Útil de sistemas BEC para nuevas aplicaciones, para entonces poder llevar a cabo la evaluación económica inicial del sistema artificial de producción, y los estudios de factibilidad del mismo para la aplicación en el campo a desarrollar.
- b. Estimar posibles cambios en la historia del Tiempo de Vida Útil de operaciones en curso, para así poder determinar los beneficios de un posible cambio en las prácticas operativas, como por ejemplo, la reutilización de algún equipo, el uso de separadores de gas, etc.; y puedan ser operadas de manera adecuada.
- c. Poder llevar a cabo una evaluación comparativa del promedio de Tiempo de Vida Útil de diferentes operaciones, tomando en cuenta las diferencias individuales de cada aplicación.

En las siguientes secciones describiremos un enfoque y las dificultades encontradas en el desarrollo del modelo. Al igual que un ejemplo ilustrativo llevado a cabo con la información de ESP-RIFTS. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la técnica presentada en esta sección no es única, además de que existen muchos factores y características que influyen en el desarrollo del modelo.

5.6.1. Descripción del Modelo

Como ya vimos en la primera sección de este capítulo, varios autores han construido diferentes modelos para la evaluación del Tiempo de Vida Útil de los sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido. Sin embargo, por lo regular estos modelos se encuentran restringidos a una sola

operación. Un punto en común en la construcción de estos modelos es que la información del Tiempo de Vida Útil sigue la tendencia de una distribución exponencial, por ejemplo: la confiabilidad de un sistema BEC puede ser descrita con la Ecuación 5.12, el cual es un modelo de un solo parámetro, λ .

$$S(t) = e^{-\lambda t} \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.12}$$

Dónde:

$S(t)$ = Porcentaje de sistemas BEC que podrán sobrevivir hasta el tiempo t

λ = Rango de falla promedio.

La suposición implícita en este modelo es que el riesgo instantáneo de falla no cambia durante todo el tiempo de la operación. Mientras que esta puede sonar como una suposición demasiado arriesgada, la información real apoya esta aproximación, como fue demostrado por Patterson. Otros modelos de distribución de Tiempo de Vida Útil también son posibles como el modelo de Weibull, como ya lo presentamos.

El objetivo de este modelo, no obstante, es construir un modelo que pueda tomar en cuenta las diferencias en las condiciones de operación de diferentes aplicaciones. Para poder lograrlo, usaron un enfoque similar al utilizado por Upchurch para analizar las fallas de los sistemas BEC en el campo East Wilmington en California. Upchurch analizó diferentes mecanismos de falla por separado y dividió la información en diferentes clases o categorías, de acuerdo a los parámetros clave que podrían afectar el total del rango de falla.

El modelo de distribución exponencial del Tiempo de Vida, dado por la Ecuación 5.12, también fue utilizado. Sin embargo, se pudo identificar que el rango de falla total se encuentra compuesto de la suma de los rangos de falla de cada uno de los diferentes mecanismos o Causas de Falla que ya fueron presentadas en el Capítulo III y Capítulo IV. Por lo tanto, esto nos lleva a la Ecuación 5.13:

$$\lambda_{Total} = \sum_j \lambda_j \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.13}$$

Dónde:

λ = Rango de falla, t , [días⁻¹]

Dónde λ_j , es el rango de falla de cada mecanismo. Y después, también se identificó que hay muchos factores los cuales pueden afectar el rango de falla de cada mecanismo, lo que nos lleva a definir la siguiente Ecuación 5.14:

$$\lambda_j = \lambda_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.14}$$

Dónde:

λ = Rango de falla, t , [días⁻¹]

x_1, x_2, \dots, x_n , = valores que contribuyen en el rango de falla de cada mecanismo, tales como: la temperatura de fondo de pozo, producción de agua, fabricante de la bomba, etc.

La función utilizada para representar la relación anteriormente descrita, también fue una función exponencial, la cual puede ser definida por la Ecuación 5.15 o por la Ecuación 5.16, ya sea en función del exponencial o como logaritmo:

$$\lambda_j = e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n} \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.15}$$

$$\log(\lambda_j) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.16}$$

Dónde:

S(t): Función sobreviviente.

t: Tiempo, [días]

β : Coeficientes de regresión

λ : Rango de falla, [días⁻¹]

Una ventaja de esta función es que garantiza que el valor estimado para cada rango de falla, λ_j , siempre es positivo, como debe de ser. Una segunda ventaja, es que dada la Ecuación 5.16, sus coeficientes β , pueden ser determinados aplicando técnicas simples de regresión.

5.6.2. Determinación de los Parámetros y Coeficientes del Modelo

Los parámetros y coeficientes del modelo, fueron determinados por medio de técnicas de regresión, utilizando la base de datos de ESP-RIFTS. Sin embargo, no resulta muy práctico considerar cada posible mecanismo de falla, ni todos los parámetros que pueden afectar el rango de falla de cada mecanismo. Para este esfuerzo preliminar de construir el modelo, solamente se encontraron cuatro mecanismos de falla predominantes en la misma base de datos, los cuales presentan la mayoría de

las fallas observadas, y por lo tanto, son los que fueron tomados en cuenta, los cuales son los siguientes:

- Incrustación y atascamiento de bombas.
- Sellos contaminados.
- Motores con corto circuito y quemados.
- Cables con corto circuito y quemados.

Adicionalmente, solo dos parámetros, los que más influenciaron en cada mecanismo, son los que fueron utilizados para construir el modelo preliminar.

5.6.3. Problemas Encontrados

El ejercicio de evaluación comparativa fue llevado a cabo con la información disponible de la base de datos de ESP-RIFTS, utilizando el modelo que fue construido como se explicó en la parte anterior. Para cada operación de sistema BEC en la base de datos, el promedio rango de falla y el promedio de los valores de los parámetros clave “reales”, fueron calculados. Después, los rangos de falla “predichos” fueron estimados con la aplicación del modelo y los valores promedio para los parámetros clave, calculados previamente.

5.6.3.1. Información Restringida

Como ya fue definida en la sección anterior de este capítulo, la información restringida se refiere a los sistemas BEC que aún no han fallado y por lo tanto el tiempo a la falla es desconocido. Uno de los problemas al tratar de adecuar la información del campo en el modelo es que la base de datos se encuentra restringida, por ejemplo: contiene información de los sistemas BEC que no fallaron o siguen en operación. Para estos sistemas, el Tiempo de Falla real es desconocido; todo lo que se sabe es que este sistema ha sobrevivido hasta cierto punto en el tiempo. Debemos notar que cuando la Causa de Falla en cambio es, por ejemplo: que el motor se quemó, entonces la bomba sobrevivió hasta este punto, porque sigue funcionando. Por lo tanto, cuando se considera un Causa de Falla, para los sistemas que fallaron por otras causas ajenas al sistema BEC, son considerados “sobrevivientes”, de acuerdo al mecanismo de falla que se esté considerando, esto aplica también en los componentes, cuando el sistema BEC falla por un componente, pero otros siguen estando en buen estado, son “sobrevivientes”. Por lo que se debe tener cuidado ya que cada falla es contada solamente una vez para el análisis.

Las restricciones de la base de datos añaden complicaciones, siendo la principal consecuencia que las técnicas de regresión lineal simple no pueden ser aplicadas. Este es un problema común, por lo que existen técnicas para poder tratar estas situaciones sin embargo, son más complejas.

5.6.3.2. Información Incompleta

Otro problema al adecuar la información del campo en el modelo es que las bases de datos por lo regular se encuentran incompletas, por ejemplo: los valores de ciertos parámetros pueden no ser conocidos para un número considerable de los registros. Existen dos formas para tratar con este problema:

- a. Simplemente omitir todos los registros que se encuentren incompletos, y ajustar el modelo solamente a los registros que se encuentren completos.
- b. Se puede definir un rango de falla promedio para los registros que se encuentren incompletos, y entonces poder “corregir” las predicciones del modelo de manera proporcional.

Esta segunda forma de solucionar el problema, tiende a acercar el rango de falla predicho al rango de falla promedio de toda la base de datos, lo cual reduce de alguna manera la capacidad predictiva del modelo.

Como es de esperar, no importa la aproximación que sea considerada, si los valores de los parámetros clave, son desconocidos, la mejor predicción que se puede hacer para el rango de falla esperado, será el rango de falla promedio de toda la muestra con la que se esté trabajando. Para el caso de este modelo, solo se tomaron en cuenta los parámetros con alto porcentaje de información en los registros.

5.6.3.3. Elección de Parámetros

Existe un relativo gran número de parámetros que pueden afectar los rangos de falla de los diferentes mecanismos o Causas de Falla. Como resultado de esto, existe un número aún más grande de combinaciones de los parámetros, el cual debe ser probando al construir el modelo, como podemos notar, entre más grande sea el número de parámetros que se utilice en la Ecuación 5.15 o en la Ecuación 5.16, más grande será el número de combinaciones posibles.

Adicionalmente, mientras que algunas combinaciones de parámetros pueden ciertamente, proporcionar un mejor ajuste que otras, sigue habiendo un número de posibles combinaciones de parámetros que pueden ajustar el modelo bastante bien. Como resultado, la elección final de los parámetros no es sencilla.

En este trabajo preliminar de la elaboración del modelo, la elección de dos parámetros más importantes para cada mecanismo fue hecha basada en las siguientes consideraciones:

- El grado de ajuste de la información al modelo.
- Que tan completa se encontraba la información disponible acerca de los parámetros para toda la base de datos.
- Consideraciones de ingeniería.

5.6.3.4. Incertidumbre en las Predicciones

La incertidumbre en la predicción de fallas de los sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido en un campo, está relacionada de manera directa con la distribución de falla. Estadísticamente, existen técnicas alternativas, tales como las distribuciones duales, las cuales pueden llegar a ser más fácil de manejar, sin embargo hay que considerar que la incertidumbre no puede ser eliminada por completo. Para poder hacer frente a la incertidumbre, debe tomarse en cuenta que las estimaciones de los métodos presentados, pueden utilizarse con el fin de poder calcular los costos de las operaciones de mantenimiento. Si el presupuesto es reducido, los planes deben desarrollarse priorizando el reemplazo del sistema BEC de acuerdo con la pérdida de producción; sin embargo estos planes siempre deben actualizarse de manera periódica. Debe ponerse especial atención y cuidado en la recopilación de la información de falla, ya que como hemos visto a lo largo de este trabajo de tesis, puede ayudar a reducir las fallas.¹²

Los rangos de falla predichos representan más que nada, lo más probable esperado para el Tiempo de Vida Útil del sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido de cada aplicación, basado en el modelo, y con los valores promedio calculados de los parámetros clave para cada aplicación en particular. Sin embargo, ya que el modelo es un modelo estadístico, se debe reconocer que existe cierta incertidumbre inherente en la predicción. Las mismas técnicas de regresión que pueden ser utilizadas para determinar los valores de los coeficientes del modelo, β , también pueden ser utilizadas para determinar la incertidumbre de las predicciones.

El rango de falla considerado como real, también tiene incertidumbre debido a que, como explicamos en la primera parte, la base de datos contiene información restringida, por ejemplo: para un número de instalaciones, el Tiempo a la Falla real, es desconocido. Y por lo tanto, una vez más, tiene que ser determinado, por lo que todo lo que puede ser determinado a partir de la base de datos, es lo más probable que podríamos esperar en los rangos de falla, para cada aplicación en específico. Sawaryn y Ziegel presentaron formas para evaluar esta incertidumbre en los rangos de falla “reales” calculados.

5.6.4. Resultados Obtenidos

En la Figura 5.13, podemos observar la gráfica de los Tiempos Medios a la Falla reales contra los predichos para cada operación que abarcaba la base de datos. Debemos recordar que el Tiempo Medio de Falla (MTTF), fue calculado simplemente como el inverso del rango de falla promedio, como ya fue explicado en el Capítulo II de esta tesis.

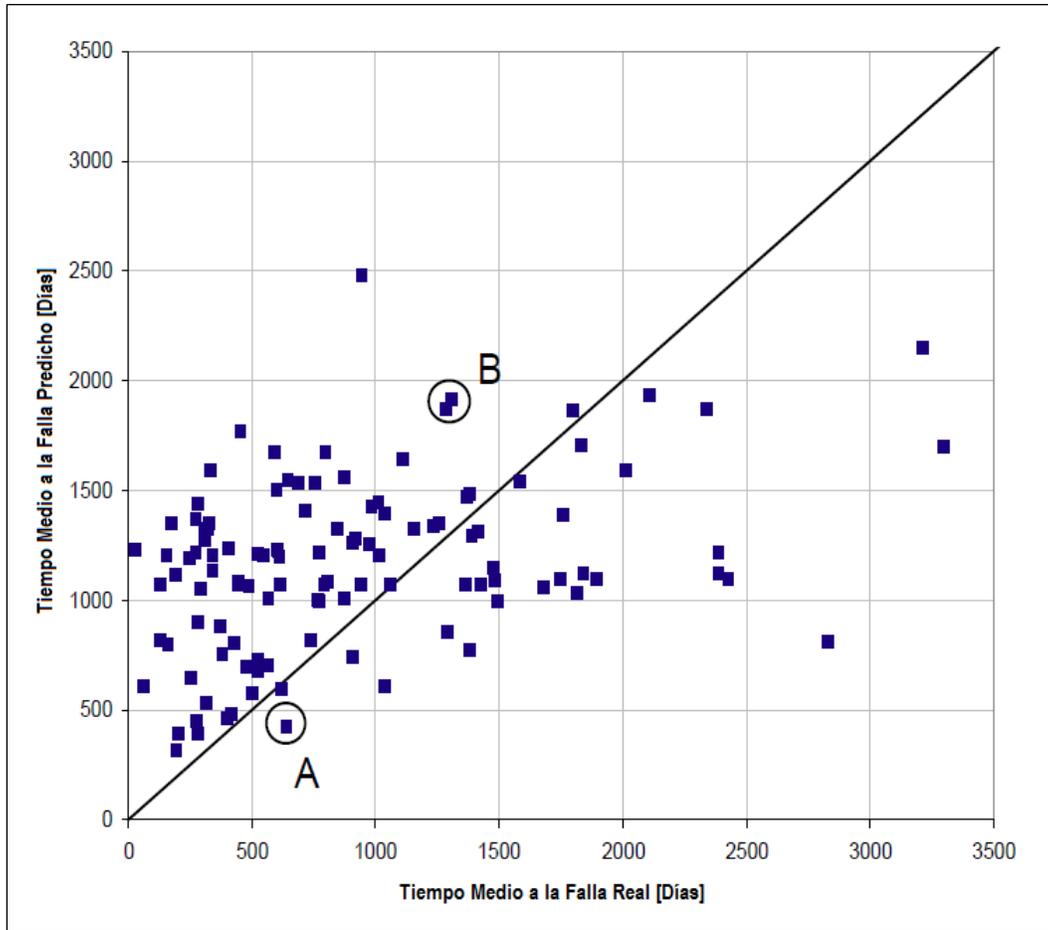


Figura 5.13 – Gráfica del Tiempo Medio a la Falla Real contra Tiempo Medio a la Falla Predicho para las Operaciones de los Sistemas de ESP-RIFTS (Alhanati, 2003)

Los resultados muestran que una aplicación con Tiempos de Vida Útiles relativamente bajos, los cuales son considerados como bajos, por ejemplo: como menores que el promedio que se tiene en la industria; pueden resultar mejores de lo esperado bajo ciertas circunstancias, como lo ponemos ver en el punto A de la Figura 5.13. Mientras que otra aplicación con Tiempo de Vida Útil relativamente largo, por lo regular comparado con el promedio de la industria, puede resultar peor que el esperado, bajo circunstancias en particular, como ejemplo el punto B de la Figura 5.13.

Sin embargo, se debe tener cuidado al interpretar estos resultados, ya que hay cierta incertidumbre en estos resultados, tanto en el Tiempo Medio a la Falla predicho, como el real, como ya se explicó.

5.6.5. Otros Beneficios del Desarrollo del Modelo

Este ejercicio de evaluación comparativa ilustra cómo es que el modelo puede ser utilizado para comparar Tiempos de Vida Útiles entre operaciones tomando en cuenta las diferencias en las características clave de cada aplicación.

Algunos otros de los beneficios en el desarrollo del modelo fueron: la identificación de los parámetros que más influyen el rango de falla, y la extensión de su influencia, a través de la determinación de los valores para los coeficientes β , lo cual es una parte de la construcción integral del modelo. Por lo tanto, el desarrollo del modelo apropiado es un paso clave para poder tener un mejor entendimiento de los factores que afectan el Tiempo de Vida Útil de los sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido. Algunas operaciones aisladas que tienen rangos de falla reales mucho más largos o mucho más cortos que los predichos por el modelo, son para estos autores objetivos de investigaciones futuras.¹⁶

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Las fallas específicas más comunes en los sistemas BEC son causadas por fallas eléctricas, las cuales a su vez, tienen origen en la falta de protección del motor eléctrico; por lo que es de suma importancia brindar la suficiente protección a este y poner especial atención en los materiales de los sellos a utilizar, esto evitará fallas prematuras, y por lo tanto, incrementará su Tiempo de Vida Útil.
- El realizar evaluaciones comparativas entre diferentes aplicaciones de sistemas BEC, permite que se puedan prevenir fallas que ya hayan sido observadas y analizadas. Es de suma importancia que al realizar estas evaluaciones se tomen en cuenta las condiciones operativas de ambas aplicaciones para que la evaluación sea apropiada.
- Con el fin de reducir la incertidumbre en los análisis de fallas y las predicciones de los Tiempos de Vida Útil que permitan aumentar la confiabilidad de los sistemas BEC, es vital que la información con la que se lleven a cabo dichos análisis y predicciones sea obtenida de bases de datos tan amplias y confiables como sea posible, por lo que uno de los principales desafíos para contar con bases de datos útiles, es el lograr la consistencia de la información que se recopila, además de la que ya se tiene y ha sido obtenida por diferentes operadores y fabricantes.
- La Nomenclatura Estándar utilizada por ESP-RIFTS, es muy completa y considera todos los aspectos que deben ser tomados en cuenta para poder contar con información de calidad, que como se mencionó anteriormente, es un punto clave para contar con bases de datos útiles para los análisis y predicciones de los sistemas BEC.
- El tema tocado en esta tesis, puede ser profundizado en varios aspectos, el de mayor relevancia sería el desarrollo de un nuevo modelo estadístico para predecir el Tiempo de Vida Útil que tome en cuenta las condiciones de operación específicas, y otros aspectos más generales de todas las aplicaciones, como la incertidumbre inherente en el reemplazo continuo de los sistemas BEC, esto permitiría aumentar la confiabilidad del sistema de gran manera.

Recomendaciones

- Sería recomendable que la información de las bases de datos de fallas de sistemas BEC sea compartida por toda la industria para poder identificar problemas en un mayor número de aplicaciones además de reducir la incertidumbre asociada a conjuntos de información pequeños.
- Es recomendable evaluar en cada desarrollo la posible implementación de un sistema BEC dual, esto dado que estadísticamente tiene una menor incertidumbre en el rango de falla y reducen significativamente los tiempos entre operaciones de mantenimiento. Cabe mencionar que al implementar este diseño, se deben llevar a cabo los procedimientos adecuados en todas las etapas del sistema BEC, ya que el no aplicar las lecciones aprendidas, en lugar de ser un beneficio podría resultar en pérdidas mayores.
- Es de suma importancia que al emplear un modelo para la predicción de los Tiempos de Vida Útil y se hayan estimado los parámetros iniciales, estos sean actualizados de manera frecuente, para que las predicciones puedan ser correctas en todas las etapas del desarrollo debido a que estas van cambiando conforme cambian las condiciones de la aplicación.
- Se necesario mejorar la capacitación del personal que estará a cargo de las diferentes etapas por los que pasará el sistema BEC de acuerdo a las normas establecidas y que puedan aplicar los procedimientos de manera adecuada y homogénea sin importar el operador de la aplicación. Las fallas en los sistemas BEC debidas a errores humanos, que llegar a representar una gran cantidad, y estas deben ser reducidas y eventualmente, evitadas.

Anexo 1: Apéndices

Es importante mencionar que el número de referencia, corresponde al número de capítulo al que pertenece el Apéndice, el cual lo indica el primer dígito de la numeración, por ejemplo: Apéndice 2.1, corresponde al Capítulo II.

Apéndice 2.1. Ejemplos de Cálculos de Medidas de Tiempos de Vida en Situaciones Especiales

A continuación se enlistan algunos ejemplos de situaciones que refuerzan la necesidad de considerar de manera apropiada las medidas de tiempo de vida.

1. *Definir las limitaciones del sistema es importante para asegurar la consistencia.*

Por ejemplo, si un ingeniero considera las fallas del equipo superficial y otro, solo considera las fallas del equipo subsuperficial, los resultados de ambos ingenieros no son comparables. O, si uno de ellos considera que un daño en la TR cuenta como falla del sistema artificial de producción y los otros no. Una vez más, los resultados no pueden compararse.

2. *De igual manera, es necesario definir ¿qué es una falla? Con el mismo fin de asegurar la consistencia.*

Por ejemplo, en una instalación de cavidades progresivas un flushby exitoso ¿Cuenta cómo falla? ¿Es una operación de mantenimiento? Las limpiezas u otros trabajos con tubería flexible que se realizan sin desinstalar el sistema ¿Son fallas? ¿Cómo se consideran?

3. *Si consideramos dos ingenieros que se encuentran analizando la confiabilidad durante el año pasado de los sistemas artificiales de producción instalados en sus campos:*

Hay 100 pozos en cada campo, y cada campo registró 120 fallas el año pasado. El primer ingeniero observa esto y dice que hubo 1.2 fallas por año (120 fallas entre 100 pozos). El segundo ingeniero observa más detalladamente y dice que, en promedio, cada pozo estuvo trabajando solamente alrededor del 80% del tiempo. (Los sistemas estuvieron detenidos en espera del equipo para desinstalar uno de los sistemas que falló, cuando estuvieron en mantenimiento cada uno, cuando hubo fallas con la fuente de energía eléctrica, etc.) Por lo tanto, el calcula 1.5 fallas por pozo por año (120 fallas entre 80 pozos que se encontraban en operación). Ambos valores son correctos, sin embargo tienen significados diferentes

4. *Inicio del funcionamiento de los sistemas.*

Algunos campos pueden tener sistemas que aún no han sido iniciados meses después de su instalación, o sistemas que no han sido desinstalados meses después de la última vez que funcionaron. Otros sistemas pueden encontrarse en funcionamiento sólo por un periodo de tiempo corto durante el día. Cualquiera de estos daría lugar a una gran diferencia entre Tiempo de Calendario y Tiempo Real en Funcionamiento. Una diferencia entre el Tiempo de Calendario y el Tiempo en el Pozo puede existir cuando hay un gran lapso de tiempo cuando un sistema es desinstalado y se instala el siguiente. Estas diferencias van a dar lugar a diferencias en el rango de falla cuando se calcula usando diferentes tiempos.

5. *Si consideramos un pozo en el que el sistema artificial de producción ha sido parado por otras razones diferentes a una falla.*

Meses después, el operador trata de reiniciar la producción del pozo, sin embargo no se puede. Claramente esto debe considerarse como una falla, pero ¿Qué tiempo debe utilizarse para calcular el MTTF o el MTTP? Lo más importante a tomar en cuenta al hacer este tipo de decisiones para cualquier pozo o campo es que estas mediciones van a ser comparadas con otras y van a servir de referencia.

6. *Sawaryn (2010) hace la siguiente declaración acerca del rango de falla calculado con el Tiempo de Calendario: "Puede notarse que incrementando la fracción de los sistemas que no han sido iniciados, el rango de falla aumenta, mientras que incrementando el tiempo entre operaciones de mantenimiento se puede observar el efecto contrario".*

Un sistema sin iniciar es una falla, e incrementar el número de fallas mientras no se añade más tiempo en el pozo indudablemente aumentará el rango de falla. Por otro lado, los pozos que se encuentran en espera de mantenimiento no pueden volver a fallar, y al añadir tiempo en el pozo cuando no se incrementa el número de fallas, indudablemente reducirá el rango de falla. Sin embargo, esto puede ser llevado a un extremo: una forma de disminuir el número de fallas ¡es reducir el número de equipo dando servicio de mantenimiento a los pozos! Por otro lado, si solamente se utiliza la Duración o el Tiempo Real en Operación al calcular el rango de falla, las operaciones de mantenimiento no van a tener efecto en el rango de falla. Por lo que una vez más, es importante ser consistente en este tipo de decisiones si es que se realizarán comparaciones con los datos obtenidos.

7. *Fallas de equipo independiente al SAP*

En este caso, tenemos un pozo con un empacador (no es parte del sistema artificial de producción) que tiende a fallar con mayor frecuencia que el sistema artificial de producción. El Tiempo en Operación Promedio de los SAP que fallaron solo va a tomar en cuenta los Tiempos de Vida de un pequeño número de los sistemas que fallaron antes de que el empacador fallara, e ignorar los muchos otros sistemas artificiales que pudieron haber operado por mucho más tiempo antes de fallar, pero tuvieron que ser desinstalados debido a la falla del empacador.

Apéndice 2.2. Cálculo de Tiempo de Falla y Censura con Simulación de Monte Carlo

Este apéndice contiene una ilustración de como los tiempos de falla y censura fueron calculados para las simulaciones de Monte Carlo. Los tiempos fueron generados de manera aleatoria seleccionados de una distribución exponencial con una media conocida. Existen algunos softwares que tienen una función especial para hacer esto, pero los generadores de números utilizados más comúnmente en la mayoría de los softwares solo pueden dar números aleatorios seleccionados de una distribución uniforme con valores entre 0 y 1.

Ahora, si usamos R para representar dicho número aleatorio (de tal manera que un gran número de R s se encontrarán distribuidos de manera uniforme entre 0 y 1), entonces el valor de t en la siguiente fórmula será a partir de una distribución exponencial con una media de M , mostrado en la Ecuación A2.1:

$$t = - M \ln(R) \dots\dots\dots \text{Ecuación A2.1}$$

Dónde:

- t : Tiempo
- M: Media de la distribución exponencial
- R: Número aleatorio seleccionado

En las simulaciones Monte Carlo, la Ecuación A2.1 fue utilizada para generar pares de tiempos de falla (t_f) y tiempos de censura (t_c), mostrados por la Ecuación A2.2 y Ecuación A2.3:

$$t_f = - M_f \ln(R) \dots\dots\dots \text{Ecuación A2.2}$$

$$t_c = - M_c \ln(R) \dots\dots\dots \text{Ecuación A2.3}$$

Dónde:

- t_f : Tiempo de Falla
- M_f : Media de la distribución exponencial para la Falla
- R: Número aleatorio seleccionado
- t_c : Tiempo de Censura
- M_c : Media de la distribución exponencial para la Censura

Nótese que al hacer esto, un nuevo valor aleatorio de R fue calculado cada vez que se aplicó esta fórmula; el mismo R no fue utilizado para calcular los tiempos de falla y censura. El tiempo medio de vida entonces es M_f y el tiempo medio de censura será M_c . Estos tiempos medios no serán alcanzados exactamente, pero se acercarán conforme el número de tiempos seleccionados aumente, por lo que resultan dos posibles casos:

- a. $t_c < t_f$
- b. $t_c > t_f$

Dónde:

t_f : Tiempo de Falla

t_c : Tiempo de Censura

En el primer caso, el tiempo de censura es menor que el tiempo de falla, por lo que el tiempo en operación para la simulación se estableció como t_c y el sistema no consideraba falla (Fue desinstalado sin falla).

En el segundo caso, el tiempo de falla es menor que el tiempo de censura, por lo que el tiempo en operación para la simulación se estableció como t_f y el sistema consideró la falla.¹

Apéndice 3.1. Ejemplos de Aplicación de la Nomenclatura Estándar

Este apéndice contiene ejemplos de cómo debe ser aplicada la Nomenclatura para el reporte de Fallas de Sistemas de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido, de ESP-RIFTS. Por lo que solamente se encuentran incluidas situaciones que podrían clasificarse como difíciles, en la mayoría de los casos, la aplicación de la Nomenclatura Estándar debe ser relativamente sencilla.

Ejemplo 1: Falla de un Componente que No Pertenece al Sistema BEC (Válvula Superficial)

Tipo de Falla	Falla de un componente que no pertenece al sistema BEC (válvula superficial)
Reporte de Producción:	Dentro del pozo se presentó un corto circuito. La válvula en la cabeza que lleva a la línea de flujo se encuentra bloqueada con parafinas. El sistema BEC debe ser desinstalado.
Reporte de Desinstalación:	Motor quemado. Parafinas en la tubería de producción cerca de la superficie. Los demás componentes parecen estar bien, pero se mandará la bomba a pruebas. La resistencia del cable en fase baja y la protección del mismo dañada en la parte superior.
Reporte de Inspección:	La cubierta del estator del motor se quemó. El estator del motor tuvo corto circuito. Las etapas de la bomba muestran desgaste en los difusores.
Investigación de Falla:	La válvula de la línea de flujo bloqueada por asfaltenos causó un corto circuito en el motor. Monitoreo y control de parafinas insuficiente o inadecuado. Se recomienda un mejor monitoreo de la acumulación de parafinas y la evaluación del programa de tratamiento químico.

Sistema	Estado del Periodo	Periodo Completo
	Razón para ser Desinstalado General:	Eléctrica
	Razón para ser Desinstalado Especifica:	Corto Circuito
	¿Falló el Sistema BEC?:	Sí
	Componente Primario de Falla:	Motor BEC
	Descriptor Primario de Falla:	Corto Circuito
	Descriptor Secundario de Falla:	Quemado
	Causa de Falla General:	Operación

	Causa de Falla Específica:	Monitoreo Inadecuado
Componentes	Condición del Motor al ser Desinstalado:	No Reutilizable
	Motor: Descriptor de Falla Primario:	Corto Circuito
	Motor: Descriptor de Falla Secundario:	Quemado
	Condición del Sello al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Sello: Descriptor de Falla Primario:	
	Sello: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición de la Entrada al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Entrada: Descriptor de Falla Primario:	
	Entrada: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición de la Bomba al ser Desinstalada:	No Reutilizable
	Bomba: Descriptor de Falla Primario:	Deteriorado por uso
	Bomba: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición del Cable al ser Desinstalado:	No Reutilizable
	Cable: Descriptor de Falla Primario:	Impedancia Baja / Resistencia
	Cable: Descriptor de Falla Secundario:	Abollado

Tabla A3.1 – Ejemplo 1: Falla de un Componente que No Pertenece al Sistema BEC (Válvula Superficial), de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)

Notas:

1. La válvula de la línea de flujo de la cabeza de pozo no debe ser identificada como el Componente Primario de Falla. Como ya fue definido en la Nomenclatura Estándar de Falla, cuando el Sistema BEC ha fallado, el componente asignado al campo: Componente Primario de Falla, debe ser un componente perteneciente al sistema BEC
2. El yacimiento, en este caso en específico las parafinas, no deben ser identificadas como la Causa de Falla General ni Causa de Falla Específica, esto es porque en la investigación se concluyó que un monitoreo inadecuado fue la causa de la falla.
3. Además, se debe identificar preferentemente como Causa de Falla algo que pueda ser corregido; y la existencia de parafinas en el yacimiento no puede ser cambiado solamente manejado de la mejor forma posible.

Ejemplo 2: Error Humano

Tipo de Falla	Error Humano
Reporte de Producción:	<p>Un operador nuevo en campo cierra la válvula de la línea de flujo durante la primera prueba de producción del pozo después de una operación de mantenimiento.</p> <p>El pozo cae.</p> <p>Corto circuito.</p> <p>Los niveles altos de producción no se reestablecen después de que el nuevo sistema BEC es instalado.</p>
Reporte de Desinstalación:	<p>Motor quemado y con corto circuito</p> <p>Parafinas en la tubería de producción cerca de la superficie</p> <p>Los demás componentes parecen estar bien, pero se mandará la bomba a inspección de fábrica.</p>
Reporte de Inspección de Fábrica:	<p>La cubierta del estator del motor se quemó.</p> <p>El estator del motor tuvo corto circuito</p> <p>Las etapas de la bomba muestran desgaste en los difusores.</p>
Investigación de Falla:	<p>Entrenamiento y mentoría inapropiadas para los operadores junior.</p> <p>Revisar el programa de entrenamiento para los operadores nuevos para incluir mejor supervisión y entrenamiento.</p> <p>Revisar los procedimientos de operación/instalación para verificar los límites actuales para cada uno antes de comenzar con el funcionamiento de un nuevo Sistema BEC.</p>

Sistema	Estado del Periodo:	Periodo Completo
	Razón para ser Desinstalado General:	Eléctrica
	Razón para ser Desinstalado Específica:	Corto Circuito
	¿Falló el Sistema BEC?:	Sí
	Componente Primario de Falla:	Motor BEC
	Descriptor Primario de Falla:	Corto Circuito
	Descriptor Secundario de Falla:	Quemado
	Causa de Falla General:	Operación
	Causa de Falla Específica:	Procedimiento de Operación
Componentes	Condición del Motor al ser Desinstalado:	No Reutilizable
	Motor: Descriptor de Falla Primario:	Corto Circuito
	Motor: Descriptor de Falla Secundario:	Quemado
	Condición del Sello al ser Desinstalado:	Reutilizable

	Sello: Descriptor de Falla Primario:	
	Sello: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición de la Entrada al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Entrada: Descriptor de Falla Primario:	
	Entrada: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición de la Bomba al ser Desinstalada:	No Reutilizable
	Bomba: Descriptor de Falla Primario:	Deteriorado por uso
	Bomba: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición del Cable al ser Desinstalado:	No Reutilizable
	Cable: Descriptor de Falla Primario:	
	Cable: Descriptor de Falla Secundario:	

Tabla A3.2 – Ejemplo 2: Error Humano, de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)

Ejemplo 3: Falla de un Componente Subsuperficial que No Pertenece al Sistema BEC (Liner Ranurado)

Tipo de Falla:	Falla de un componente subsuperficial que no pertenece al sistema BEC (liner ranurado).
Reporte de Producción:	Caída rápida de los gastos de producción y un incremento repentino en la producción de arena en el pozo aún con liner ranurado. Antes de que se pudiera agendar la desinstalación, el pozo cae en una sobrecarga. Al reiniciarse falla – la bomba parece estar trabada. Se intentó destrabar el sistema BEC al aumentar la velocidad para intentar destrabar la bomba y resultó en corto circuito dentro del pozo después de varios intentos.
Reporte de Desinstalación:	Motor quemado. Sello superior contaminado, pero el sello inferior se encontraba en buen estado. Bomba y tubería alrededor de la bomba se encontraban bloqueadas con arena.
Reporte de Inspección de Fábrica:	La cubierta del estator del motor se quemó. Bomba trabada por arena. Las etapas superiores mostrando daño severo.
Investigación de Falla:	Grandes volúmenes de arena fueron encontrados en el pozo. Se descubrió que el liner ranurado falló. Se recomienda evaluar las prácticas de diseño y terminación con liner.

Sistema	Estado del Periodo:	Periodo Completo
	Razón para ser Desinstalado General:	Eléctrica
	Razón para ser Desinstalado Específica:	Corto Circuito
	¿Falló el Sistema BEC?:	Sí
	Componente Primario de Falla:	Bomba BEC
	Descriptor Primario de Falla:	Bloqueo
	Descriptor Secundario de Falla:	Desgaste
	Causa de Falla General:	Terminación
	Causa de Falla Específica:	Falla del sistema de control de arena
Componentes	Condición del Motor al ser Desinstalado:	No Reutilizable
	Motor: Descriptor de Falla Primario:	Corto Circuito
	Motor: Descriptor de Falla Secundario:	Quemado
	Condición del Sello Superior al ser Desinstalado:	No Reutilizable
	Sello Superior: Descriptor de Falla Primario:	Contaminado
	Sello Superior: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición del Sello Inferior al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Sello Inferior: Descriptor de Falla Primario:	
	Sello Inferior: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición de la Entrada al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Entrada: Descriptor de Falla Primario:	
	Entrada: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición de la Bomba al ser Desinstalada:	No Reutilizable
	Bomba: Descriptor de Falla Primario:	Incrustación
	Bomba: Descriptor de Falla Secundario:	Deterioro
	Condición del Cable al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Cable: Descriptor de Falla Primario:	
	Cable: Descriptor de Falla Secundario:	

Tabla A3.3 – Ejemplo 3: Falla de un Componente Subsuperficial que No Pertenece al Sistema BEC (Liner Ranurado), de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)

Ejemplo 4: Diseño Inadecuado del Sistema BEC

Tipo de Falla:	Diseño Inadecuado del Sistema BEC
Reporte de Producción:	Una instalación nueva de sistema BEC no está alcanzando los gastos deseados. El diseño no tomó en cuenta de manera apropiada todas las pérdidas de presión al seleccionar la altura requerida de la bomba. Se debe desinstalar el sistema BEC e instalar una bomba con mayor levantamiento y un motor con capacidad de potencia adicional.
Reporte de Desinstalación:	Todos los componentes parecen estar bien. Se enviaron a inspección de fábrica.
Reporte de Inspección de Fábrica:	Se probaron todos los componentes, todos se encuentran bien. Se regresarán al cliente para que pueda reutilizarlos en otra aplicación.
Investigación de Falla:	Se recomienda al equipo de diseño de Sistemas BEC verificar de todas las formas posibles los parámetros de diseño y revisar el diseño del vendedor.

Sistema	Estado del Periodo:	Periodo Completo
	Razón para ser Desinstalado General:	Flujo
	Razón para ser Desinstalado Específica:	Poco flujo a superficie
	¿Falló el Sistema BEC?:	Sí
	Componente Primario de Falla:	Bomba BEC
	Descriptor Primario de Falla:	Otro
	Descriptor Secundario de Falla:	
	Causa de Falla General:	Relacionada al Diseño
	Causa de Falla Específica:	Selección del equipo – Capacidad de presión
Componentes	Condición del Motor al ser Desinstalado:	No Reutilizable
	Motor: Descriptor de Falla Primario:	Otra
	Motor: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición del Sello Superior al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Sello Superior: Descriptor de Falla Primario:	
	Sello Superior: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición de la Entrada al ser Desinstalado:	Reutilizable

	Entrada: Descriptor de Falla Primario:	
	Entrada: Descriptor de Falla Secundario	
	Condición de la Bomba al ser Desinstalada:	No Reutilizable
	Bomba: Descriptor de Falla Primario:	Otra
	Bomba: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición del Cable al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Cable: Descriptor de Falla Primario:	
	Cable: Descriptor de Falla Secundario:	

Tabla A3.4 – Ejemplo 4: Diseño Inadecuado del Sistema BEC, de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)

Ejemplo 5: Componentes del Sistema BEC Desechados Sin Inspección o Pruebas de Fábrica

Tipo de Falla:	Componentes BEC fueron descartados sin inspección o pruebas de fábrica
Reporte de Producción:	Productividad del pozo (nivel de fluido) declinando por lo que se encontraba por debajo del límite de sumergencia de la bomba. El sistema BEC se había encontrado funcionando por alrededor de dos años. El sistema BEC fue desinstalado para poder ajustar el tamaño del mismo. Nuevo sistema BEC se encuentra listo para ser instalado.
Reporte de Desinstalación:	Todos los componentes parecen estar en buen estado. Se enviaron a inspección de fábrica.
Reporte de Inspección de Fábrica:	Bomba, motor y la entrada se encuentran en buen estado y serán lavados y almacenados. Sellos y cables serán desechados a petición del cliente.
Investigación de Falla:	Programa de inyección de agua inadecuado o presión de pozos inyectores cercanos.

Sistema	Estado del Periodo:	Periodo Completo
	Razón para ser Desinstalado General:	Flujo
	Razón para ser Desinstalado Especifica:	Poco flujo a superficie
	¿Falló el Sistema BEC?:	No
	Componente Primario de Falla:	
	Descriptor Primario de Falla:	

	Descriptor Secundario de Falla:	
	Causa de Falla General:	
	Causa de Falla Específica:	
Componentes	Condición del Motor al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Motor: Descriptor de Falla Primario:	
	Motor: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición del Sello Superior al ser Desinstalado:	No Reutilizable
	Sello Superior: Descriptor de Falla Primario:	Desechado por Mantenimiento
	Sello Superior: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición de la Entrada al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Entrada: Descriptor de Falla Primario:	
	Entrada: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición de la Bomba al ser Desinstalada:	Reutilizable
	Bomba: Descriptor de Falla Primario:	
	Bomba: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición del Cable al ser Desinstalado:	No Reutilizable
	Cable: Descriptor de Falla Primario:	Desechado por Mantenimiento
	Cable: Descriptor de Falla Secundario:	

Tabla A3.5 – Ejemplo 5: Componentes del Sistema BEC Desechados Sin Inspección o Pruebas de Fábrica, de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)

Notas:

1. Un cambio en la productividad del yacimiento es la razón principal de que la bomba se encuentre operando fuera de rango; sin embargo, como el Sistema BEC no falló, no debe haber Componente Primario de Falla o Causa de Falla.

Ejemplo 6: Mantenimiento Preventivo No Programado - El Sistema de Monitoreo de Fondo de Pozo Muestra el Comienzo de una Posible Falla Potencial

Tipo de Falla:	Mantenimiento preventivo no programado: El sistema de monitoreo de fondo de pozo muestra el comienzo de una posible falla potencial.
Reporte de Producción:	El sistema de monitoreo muestra alta vibración (muy por encima del límite especificado por la ingeniería). Programar el equipo de mantenimiento para evitar una falla catastrófica y evitar mayores pérdidas de producción.
Reporte de Desinstalación:	Sistema BEC fue desinstalado. Todos los componentes parecen estar en buen estado. Se observan algunas marcas de vibración en la cubierta del motor.
Reporte de Inspección de Fábrica:	Cubierta del motor doblada. Desgaste en los cojinetes. Fallas en criterios para el equilibrio y la vibración.
Investigación de Falla:	Se llevó el sistema BEC hasta la parte más pronunciada de la "pata de perro" en el pozo. Rediseñar el sistema BEC para prevenir el daño cuando el sistema BEC opere a través de la pata de perro en el pozo.

Sistema	Estado del Periodo:	Periodo Completo
	Razón para ser Desinstalado General:	Medida / Detección por los sistemas subsuperficiales
	Razón para ser Desinstalado Específica:	Alta vibración
	¿Falló el Sistema BEC?:	Sí
	Componente Primario de Falla:	Motor BEC
	Descriptor Primario de Falla:	Vibración/Desequilibrio
	Descriptor Secundario de Falla:	Doblado
	Causa de Falla General:	Relacionada al Diseño
	Causa de Falla Específica:	Configuración del sistema
Componentes	Condición del Motor al ser Desinstalado:	No Reutilizable
	Motor: Descriptor de Falla Primario:	Vibración/Desequilibrio
	Motor: Descriptor de Falla Secundario:	Doblado
	Condición del Sello Superior al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Sello Superior: Descriptor de Falla Primario:	

	Sello Superior: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición de la Entrada al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Entrada: Descriptor de Falla Primario:	
	Entrada: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición de la Bomba al ser Desinstalada:	Reutilizable
	Bomba: Descriptor de Falla Primario:	
	Bomba: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición del Cable al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Cable: Descriptor de Falla Primario:	
	Cable: Descriptor de Falla Secundario:	

Tabla A3.6 – Ejemplo 6: Mantenimiento Preventivo No Programado, de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)

Ejemplo 7: Aplicación Difícil - Aplicaciones que Tienen Muchos Problemas Relacionados

Tipo de Falla:	Aplicación difícil: aplicaciones que tienen muchos problemas relacionados.
Reporte de Producción:	<p>Pozo cae por corto circuito.</p> <p>El motor y el cable eran reutilizados a la hora de instalarlos.</p> <p>Campo con sistema de recuperación mejorada WAG, utilizando CO2.</p> <p>La tabla de Amperaje mostró un aumento antes de que el sistema se cayera.</p> <p>Alta RGA.</p> <p>El campo tenía un programa de tratamiento de asfaltenos.</p>
Reporte de Desinstalación:	<p>El sello y el motor se encontraban mojados por aceite y contaminados por fluidos del yacimiento.</p> <p>El separador de gas centrífugo y la bomba, parecen estar en buen estado.</p> <p>El cable tuvo un corto circuito en la extensión al motor.</p> <p>Se encontraron algunos asfaltenos en la tubería de producción, la bomba y entrada, además de corrosión externa en todo el sistema.</p>
Reporte de Inspección de Fábrica:	<p>Se encontró evidencia de la impregnación de gas y descompresión del cable.</p> <p>El sello y el motor se secaron, limpiaron y probaron y se encuentran en buen estado.</p> <p>Corrosión externa por CO2.</p> <p>Bomba y entrada pueden ser reutilizables.</p>

Investigación de Falla:	<p>Pegaduras de CO2 causaron un significativo nivel de fluido, daño al sello y tensión en el cable.</p> <p>Se recomienda una reevaluación del programa de recuperación mejorada y un mejor monitoreo y control de los pozos.</p>
--------------------------------	--

Sistema	Estado del Periodo:	Periodo Completo
	Razón para ser Desinstalado General:	Eléctrica
	Razón para ser Desinstalado Específica:	Corto circuito
	¿Falló el Sistema BEC?:	Sí
	Componente Primario de Falla:	Cable BEC (extensión)
	Descriptor Primario de Falla:	Corto circuito
	Descriptor Secundario de Falla:	Contaminado
	Causa de Falla General:	Operación
	Causa de Falla Específica:	Monitoreo inadecuado
Componentes	Condición del Motor al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Motor: Descriptor de Falla Primario:	Contaminación
	Motor: Descriptor de Falla Secundario:	Corrosión
	Condición del Sello Superior al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Sello Superior: Descriptor de Falla Primario:	Contaminación
	Sello Superior: Descriptor de Falla Secundario:	Corrosión
	Condición de la Entrada al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Entrada: Descriptor de Falla Primario:	Corrosión
	Entrada: Descriptor de Falla Secundario:	Cubierta interna
	Condición de la Bomba al ser Desinstalada:	Reutilizable
	Bomba: Descriptor de Falla Primario:	Corrosión
	Bomba: Descriptor de Falla Secundario:	Cubierta interna
	Condición del Cable al ser Desinstalado:	No Reutilizable
	Cable: Descriptor de Falla Primario:	Corto circuito
	Cable: Descriptor de Falla Secundario:	Contaminado

Tabla A3.7 – Ejemplo 7: Aplicación Difícil, de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)

Notas:

1. Una aplicación difícil (Relacionada al Diseño) no es identificada como la Causa de Falla, esto es debido a que la investigación de falla identificó que el monitoreo del programa de recuperación mejorada había fallado y que podría ser mejorado. La Causa de Falla debe identificarse de manera preferente, como algo que pueda ser corregido.
2. El término aplicación difícil, es destinado a los sistemas operativos que se encuentran en los límites de tecnología, tomando en cuenta también los límites económicos.
3. Debido a que la prueba mostró que el motor se encuentra en buen estado, la contaminación del sello y el motor pudo haber sucedido después de que el sistema fuera detenido. El motor y el sello son considerados como reutilizables porque no fallaron durante la operación por lo tanto son “reutilizables mientras que” en este caso, se limpien.

Ejemplo 8: Una Situación Diferente a la Falla de un Componente del Sistema BEC que Resultó en una Aparente Falla del Sistema BEC

Tipo de Falla:	Una situación diferente a la Falla de un Componente del Sistema BEC, resultó en una aparente falla del Sistema BEC.
Reporte de Producción:	No hay flujo a la superficie – no puede aumentarse la presión de la tubería de producción.
Reporte de Desinstalación:	El aparejo completo fue desinstalado. Se encontraron dos agujeros en la tubería de producción; uno encima del empacador y otro debajo del empacador, lo cual es evidencia de desgaste por presión. El sistema BEC fue enviado a la fábrica para ser inspeccionado.
Reporte de Inspección de Fábrica:	El tamaño de los coples fue diseñado para la entrada de la bomba y el eje fue desinstalado durante el desmantelamiento. La unidad completa fue desarmada. Se encontró holgura en el final de la cabeza de la bomba. Sin exceso de desgaste en el buje o en cualquier otro componente del equipo. El protector superior parecía contaminado, la sección baja del mismo se encontró gasificada. Aceite limpio en la cámara inferior. Motores fueron checados eléctricamente, y se encontraron en buen estado. Aceite limpio con un poco de limadura de bronce.
Investigación de Falla:	Erosión/Desgaste causado por presión que provocó dos agujeros en la tubería de producción. Gran cantidad de arena no consolidada del yacimiento. Sin sistema de control de arena

Sistema	Estado del Periodo:	Periodo Completo
	Razón para ser Desinstalado General:	Flujo
	Razón para ser Desinstalado Específica:	No había flujo a la superficie
	¿Falló el Sistema BEC?:	No
	Componente Primario de Falla:	Falla no relacionada al sistema BEC
	Descriptor Primario de Falla:	Fugas
	Descriptor Secundario de Falla:	Erosión/Desgaste por presión
	Causa de Falla General:	
	Causa de Falla Específica:	
Componentes	Condición del Motor al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Motor: Descriptor de Falla Primario:	Contaminación
	Motor: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición del Sello Superior al ser Desinstalado:	No Reutilizable
	Sello Superior: Descriptor de Falla Primario:	Contaminación
	Sello Superior: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición de la Entrada al ser Desinstalado:	Reutilizable
	Entrada: Descriptor de Falla Primario:	
	Entrada: Descriptor de Falla Secundario	
	Condición de la Bomba al ser Desinstalada:	Reutilizable
	Bomba: Descriptor de Falla Primario:	
	Bomba: Descriptor de Falla Secundario:	
	Condición del Cable al ser Desinstalado:	No Reutilizable
	Cable: Descriptor de Falla Primario:	
	Cable: Descriptor de Falla Secundario:	

Tabla A3.8 – Ejemplo 8: Una Situación Diferente a la Falla de un Componente del Sistema BEC que Resultó en una Aparente Falla del Sistema BEC, de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)

Notas:

1. El campo “Causa de Falla” aplica solamente cuando hay Fallas del Sistema BEC.

Apéndice 5.1. Comparación de Modelos No Paramétrico (Kaplan Meier), Semi Paramétrico (Cox) y Paramétrico (Weibull)

En esta parte presentaremos un ejemplo del uso de las técnicas de análisis de supervivencia en sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido.

La información utilizada para este ejemplo, pertenece a ESP-RIFTS. Sin embargo, para este análisis, se ha utilizado un subconjunto de datos el cual tiene las siguientes restricciones:

- Las observaciones son de los campos operados por Chevron
- Solamente se utilizó la información que no tenía información en conflicto, como está definido por las técnicas de validación de información de ESP-RIFTS, como ya fue especificado en el Capítulo III
- Factores que estaban relacionados con la descripción de la aplicación de sistemas BEC, se excluyeron 27
- Factores claros, que no estuvieran confundidos con otros factores, 30 fueron excluidos
- Información completa, que no tuviera puntos faltantes, con más del 90%, se excluyeron 78
- Factores que no tuvieran el campo de “comentarios” vacío, 27 tuvieron que ser excluidos

De las 182 variables originales, como ya especificamos anteriormente, tuvieron que ser excluidas 162, por lo que a continuación se presenta la Tabla A5.1, con el resumen de las 20 variables de descripción de falla restantes, las cuales fueron utilizadas para realizar este análisis.

Variable	Covariable / Factor y número de Niveles	Descripción
Tiempo de Vida Útil	Respuesta	Tiempo entre la fecha en que fue puesto en operación y la fecha en que se detuvo
Censor	Caída del Sensor (0, 1)	1. Si la falla es del sistema BEC 0. Si continúa en operación o fue detenido por razones diferentes
País	Factor, 7 niveles	El país y campo en el que el sistema BEC se encuentra en operación
Marino	Factor, 2 niveles	Indicador si el sistema BEC se encuentra en una instalación terrestre o marina
Aceite	Covariable	Estimación del rango de producción promedio de aceite en superficie [m ³ /d]
Agua	Covariable	Estimación del rango de producción promedio de agua en superficie [m ³ /d]
Gas	Covariable	Estimación del rango de producción promedio de gas en superficie [1000m ³ /d]

Incrustaciones	Factor, 5 niveles	Nivel cualitativo de incrustaciones presentes en el pozo
CO ₂	Covariable	Porcentaje de CO ₂ presente en el pozo
Emulsión	Factor, 3 niveles	Nivel cualitativo de emulsiones presentes en el pozo
Tipo de Panel de Control	Factor, 2 niveles	Tipo del panel de control utilizado en la superficie
Cubierta de Bomba	Covariable	Número de cubiertas de la bomba
Fabricante de la Bomba	Factor, 2 niveles	Fabricante de la bomba
Etapas de la Bomba	Covariable	Número de etapas de la bomba
Cubierta del Sello	Covariable	Número de cubiertas del sello
Cubierta del Motor	Covariable	Número de cubiertas del motor
Rango de Potencia del Motor	Covariable	Potencia nominal del motor a 60 [Hz]
Entradas	Covariable	Número de entradas
Cable	Covariable	Número de sistemas de cable
Tamaño del Cable	Covariable	Tamaño del cable
Sensor de Fondo de Pozo	Factor, 2 niveles	Instalación del sensor de fondo de pozo
Método de Introducción al Pozo	Factor, 2 niveles	Método en el que el sistema BEC fue introducido al pozo

Tabla A5.1 – Resumen de la Información Utilizada para el Análisis (Pflueger, 2011)

Ejemplo 1. Encontrando el Percentil 50 (P50) del Tiempo de Falla Para el Conjunto de Datos

Utilizando todo el conjunto de datos, ¿Cuál es el P50 estimado para el Tiempo de Vida Útil de un sistema BEC de Chevron? Las respuestas difieren considerablemente para los cuatro diferentes tipos de cálculos como se muestra en la Tabla A5.2.

Metodología	¿Incluye Información Restringida?	P50 Estimado [días]	Suposición	¿Las suposiciones cumplieron?
Media o Mediana	No	Media : 563 Mediana: 439	Ninguna	No Aplica
Mediana de Kaplan Meier	Sí	1044	Ninguna	No Aplica
Mediana Riesgo Proporcional de Cox	Sí	1043	Ninguna	No Aplica

Mediana Weibull	Sí	1067	Prueba de Ajuste Anderson Darling para la Distribución de Weibull	No
-----------------	----	------	---	----

Tabla A5.2 – Cálculos para determinar el P50 del Tiempo de Vida Útil para Sistemas BEC de Chevron (Pflueger, 2011)

En este ejemplo, el mayor impacto de la diferencia entre los métodos es la inclusión de la información restringida, como ya habíamos visto también en la primera parte de este capítulo. Un gran número de sistemas BEC de este conjunto de datos se encontraba en operación aún después de 3000 días, sin haber presentado alguna falla los cuales fueron excluidos del cálculo del promedio del Tiempo de Vida Útil para todos los sistemas BEC que habían fallado. Dado que la distribución de Weibull no pasó la prueba de ajuste, concluimos que el cálculo más apropiado estaría dado por Kaplan Meier o la mediana de riesgo proporcional de Cox, la cual se abrevia como CPH, por sus siglas en inglés Cox Proportional Hazard.

La interpretación de estos resultados es que el P50 del Tiempo de Vida Útil estimado para un sistema BEC de Chevron es de aproximadamente 1044 días. Adicionalmente que el análisis de Kaplan Meier estableció el intervalo de confianza entre 952 y 1113 días. A continuación, en la Figura A5.1, se muestra la comparación de los métodos de estimación para este Ejemplo 1.

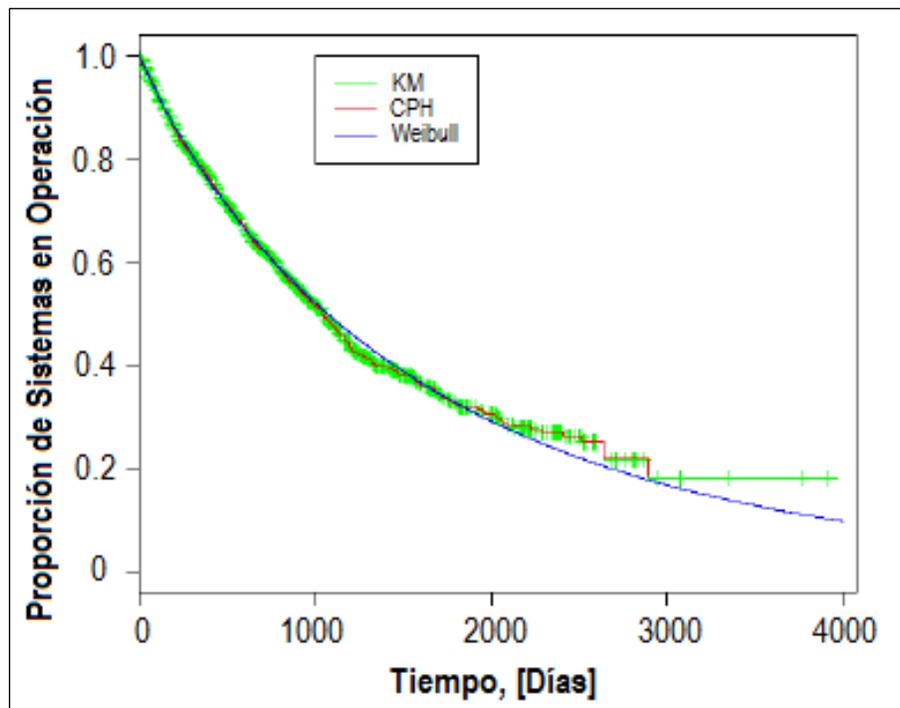


Figura A5.1 – Comparación de los Métodos de Estimación de la Curva de Supervivencia para el Conjunto de Datos Completo (Pflueger, 2011)

Ejemplo 2. Comparando Dos Curvas de Supervivencia que Difieren en un Factor

Utilizando el nivel 2 para el factor de emulsión. ¿La presencia de la emulsión en el pozo hace una diferencia significativa en el P50 del Tiempo de Vida Útil de un sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido? Los distintos tipos de cálculos se muestran en la Tabla A5.3.

Metodología	¿Incluye Información Restringida?	P50 con Emulsión [días]	P50 sin Emulsión [días]	¿Hay diferencia significativa?	Observaciones	¿Las suposiciones cumplieron?
Media o Mediana	No	Media : 600 Mediana: 458	Media : 536 Mediana: 424	No se sabe	El comportamiento del pozo es prácticamente el mismo	No Aplica
Mediana de Kaplan Meier	Sí	606	1508	Sí	El comportamiento de los pozos sin emulsión es mucho mejor	No Aplica
Mediana de Riesgo Proporcional de Cox	Sí	533	1408	Sí	Los pozos sin emulsión sobreviven por más tiempo (2.5 veces más)	No, no cumple con la probabilidad nula =0, con una probabilidad de 0.01.
Mediana Weibull	Sí	531	1463	Sí	Los pozos sin emulsión sobreviven por más tiempo (2.75 veces más)	No, no cumple con un buen ajuste, debido a que no ajusta en las colas de la curva.

Tabla A5.3 – Comparación de la Estimación de Medianas con los Diferentes Métodos con el Factor que difiere: Emulsión (Pflueger, 2011)

Entre más compleja sea la metodología utilizada, tendremos más información disponible para poder interpretar los resultados. Una vez más, al adicional la información restringida obtenemos una interpretación muy diferente de la información que al utilizar solamente la media o la mediana de todos los sistemas BEC que fallaron; no solo por la magnitud de los resultados, sino también para la determinación de bajo que condición el Tiempo de Vida Útil es mayor. Los resultados obtenidos, tanto la mediana de riesgo proporcional de Cox y Weibull, no son muy confiables debido a que no cumplieron con los supuestos. Al ver las gráficas presentadas en la Figura A5.2 y Figura A5.3, podemos observar de manera muy notoria que el ajuste es pobre en las colas.

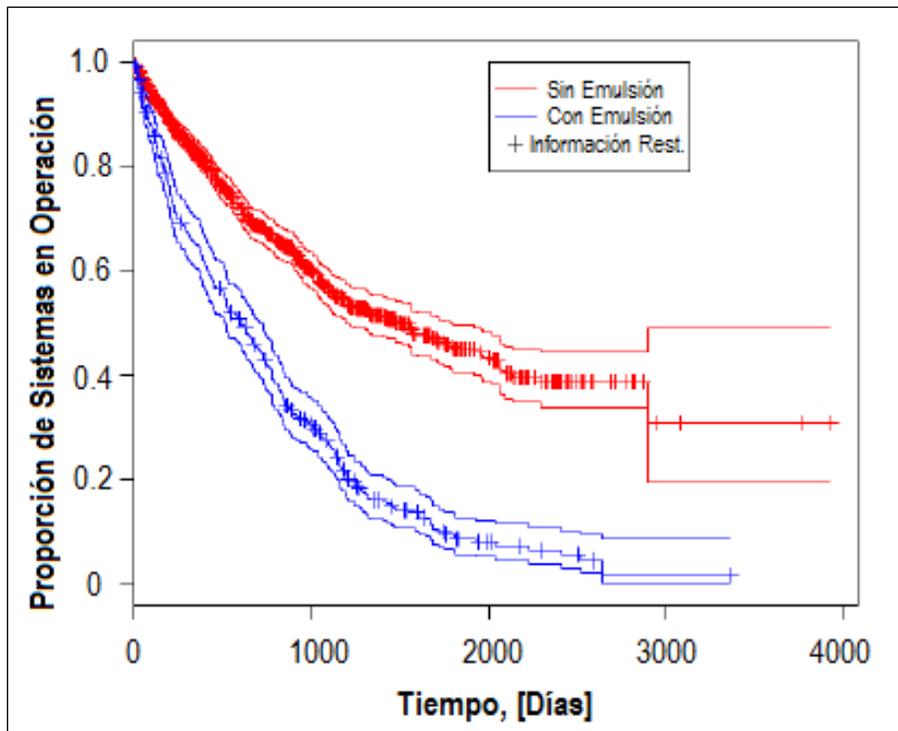


Figura A5.2 – Estimación de la Curva de Supervivencia para Sistemas BEC con y sin Emulsión por el Método de Kaplan Meier (Pflueger, 2011)

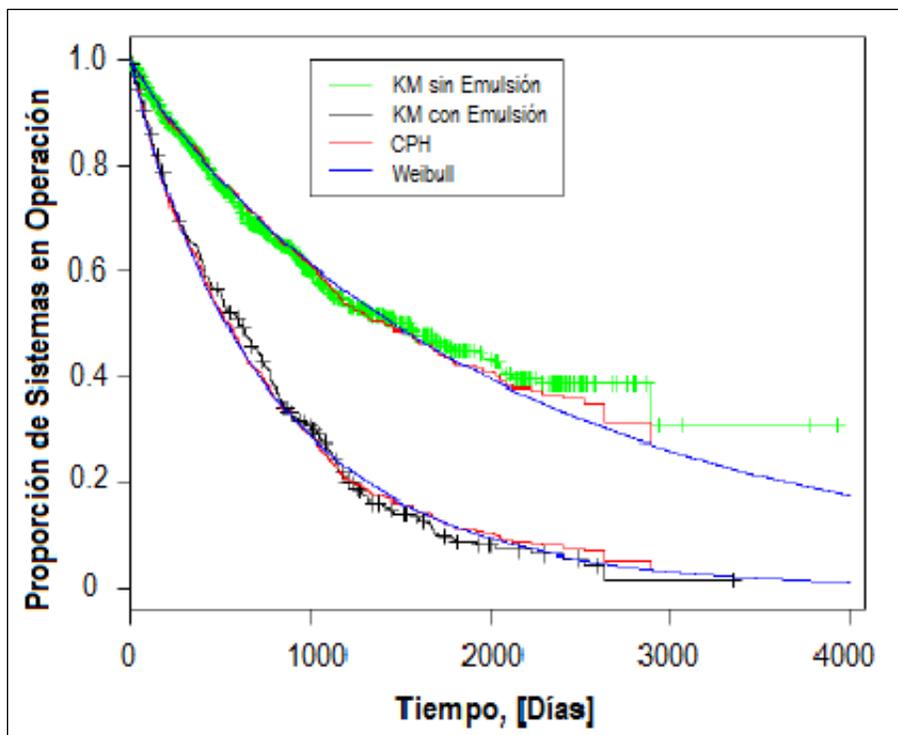


Figura A5.3 – Comparación de los Métodos de Estimación de la Curva de Supervivencia para Sistemas BEC con y sin Emulsión (Pflueger, 2011)

La interpretación de estos resultados es que los pozos sin emulsión pueden incrementar hasta dos veces su P50 de Tiempo de Vida Útil a diferencia de los pozos con emulsión. se debe notar que dados otros factores que difieren en la operación de los sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido, esta diferencia puede no ser del todo atribuida solo a la presencia de emulsión, sin embargo si se puede tomar en cuenta la interpretación e investigar más a fondo bajo las mismas condiciones de operación.⁴

Apéndice 5.2. Ejemplo de Predicción de Fallas en el Bloque F, Kuparuk, Alaska

Puesta en Operación de los Sistemas en el Campo

El siguiente ejemplo, está basado en la información del Bloque L, del desarrollo Kuparuk, Alaska. Los sistemas BEC que no fueron puestos en operación y los retrasos a causa de las operaciones de mantenimiento han sido omitidos. Entre diciembre de 1990 y diciembre de 1993, 10 pozos con sistema BEC, fueron perforados y puestos en producción.

En la Tabla A5.4, podemos ver las fechas de instalación y falla para dicho periodo.

Pozo	Fecha de Puesta en Producción	Fecha de Falla	Días en Operación
L-01	27-12-90	06-06-91	161
L-01	25-07-91	13-04-93	628
L-01	28-05-93	-	217 *
L-02	14-01-91	15-01-91	1
L-02	04-07-91	-	911 *
L-03	01-01-91	-	1,095 *
L-04	05-11-90	29-05-91	205
L-04	29-07-91	-	886 *
L-05	29-10-90	31-10-90	2
L-05	16-05-91	-	960 *
L-06	29-10-90	10-06-91	224
L-06	29-06-91	14-08-93	777
L-06	13-10-93	-	79 *
L-07	25-06-93	-	189 *
L-11	27-06-93	04-07-93	7
L-11	13-07-93	-	171 *
L-12	14-07-93	-	170 *

L-13	31-05-93	-	214 *
Total de días en operación			6,897
* Información Restringida, indica que los sistemas BEC no han fallado			

Tabla A5.4 – Fallas de Sistemas BEC del Bloque L en Kuparuk, Alaska, del 27 de diciembre de 1990 al 31 de diciembre de 1993 (Sawaryn, 2003)

El procedimiento operativo requiere que todos los componentes que hayan sido reemplazados sean tan buenos como si fueran nuevos. Por lo tanto, debido a este requerimiento del procedimiento operativo y el tamaño pequeño del conjunto de datos, se utilizó el modelo correspondiente al proceso homogéneo de Poisson, HPP. De la Ecuación 5.5 (ver Capítulo V), con el tiempo total de la prueba igual a 6,897 días, el cual comprende tanto los sistemas que fallaron, como las que no, el recíproco del rango exponencial constante, λ_e , fue calculado como 862 días. Si solamente se consideró el Tiempo de Vida Útil de ocho sistemas que fallaron, entonces el estimado es de 2005/8 que es igual a 251 días. Como podemos notar, la diferencia nos muestra la importancia de la contribución de los datos restringidos. Por lo tanto, sustituyendo en la Ecuación 5.6 (ver Capítulo V), el límite de confiabilidad aproximado del 95% es:

$$\frac{2(6,897)}{\chi^2_{0.975}(16)} \geq \frac{1}{\lambda} \geq \frac{2(6,897)}{\chi^2_{0.975}(18)}$$

Dónde:

χ^2 = Variable ji-cuadrada

λ = Rango constante de distribución exponencial, t^{-1} , [días⁻¹]

Como podemos ver, el Tiempo Medio de Vida, $\frac{1}{\lambda}$, se encuentra entre 1,997 y 438 días.

Predicción para el Bloque F (1995 – 1996)

Los datos de los pozos y días en operación de proyecto en desarrollo cercano, correspondiente al Bloque F, de 16 pozos, se muestran en la Tabla A5.5, estos datos se encuentran en el periodo de diciembre de 1995 a diciembre de 1996.

Año	1995	1996												Total
	Mes	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	
Pozos	4	0	1	1	0	6	1	1	0	1	0	1	0	16
Días	1,520	0	315	285	0	1,350	195	165	0	105	0	45	0	3,980

Tabla A5.5 – Planeación de la Instalación de Sistemas BEC en el Bloque F de Kuparuk, Alaska al 31 de diciembre de 1996 (Sawaryn, 2003)

Para este ejercicio, las fechas de la puesta en producción de los pozos se asumen a la mitad del mes en el que se encuentran las fechas reales de inicio. La incertidumbre de las fechas de puesta en producción es otro de los puntos que se deben tener en cuenta. La información del Bloque L puede ser utilizada para estimar el número de fallas esperado en el Bloque F, durante el periodo que comprende.

El número de sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido que fueron cambiados durante el periodo de interés, se utilizan la Ecuación A5.1 y la Ecuación A5.2. Con estas expresiones, el número esperado de fallas, es igual a 4.9, y su desviación estándar correspondiente es de 2.8.

$$\mu(N_t) = \lambda_e \left(1 + \frac{1}{2r} \right) \left[\sum_{i=1}^{N_0} (t - t_i) \right] \dots\dots\dots \text{Ecuación A5.1}$$

Dónde:

- μ = Tiempo Medio a la Falla general, t , [días]
- N_t = Número de fallas al tiempo, t , [días]
- λ_e = Rango general calculado constante de distribución exponencial, t^{-1} , [días⁻¹]
- r = Número de fallas registradas
- N_0 = Tamaño inicial de la muestra del primer tipo (genérico) de sistemas BEC
- t = tiempo, t , [días]
- t_i = Tiempo de puesta en operación del pozo i , t , [días]

$$\sigma^2(N_t) = \lambda_e \left(1 + \frac{1}{2r} \right) \left[\sum_{i=1}^{N_0} (t - t_i) \right] \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^{N_0} (t - t_i)}{r} \right] \dots\dots\dots \text{Ecuación A5.2}$$

Dónde:

σ = Desviación estándar

N_t = Número de fallas al tiempo, t , [días]

λ_e = Rango general calculado constante de distribución exponencial, t^{-1} , [días⁻¹]

r = Número de fallas registradas

N_0 = Tamaño inicial de la muestra del primer tipo (genérico) de sistemas BEC

t = tiempo, t , [días]

t_i = Tiempo de puesta en operación del pozo i , t , [días]

Los coeficientes de la distribución de falla, se presentan en la Figura A5.4, la cual muestra el límite de confiabilidad de aproximadamente el 95% entre 1 y 11 fallas. La incertidumbre, por lo tanto, es muy grande.

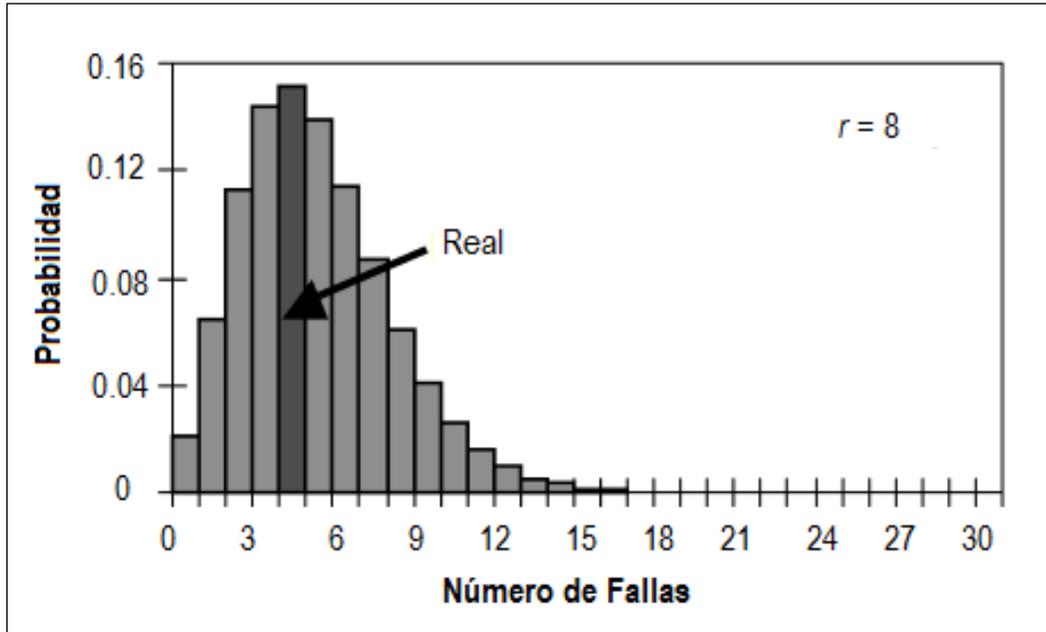


Figura A5.4 – Predicción de Fallas y Fallas Reales en el Bloque F de Kuparuk, Alaska periodo 1995 – 1996 (Sawaryn, 2003)

En la Tabla A5.6, podemos ver las fechas de instalación y falla de los 16 pozos del Bloque F entre diciembre de 1995 y diciembre de 1996.

Pozo	Fecha de Puesta en Producción	Fecha de Falla	Días en Operación
F-01	14-12-95	-	383*
F-06	21-06-96	-	193*

F-13	10-12-95	-	287*
F-14	17-05-96	-	228*
F-18	21-07-96	-	163*
F-22	11-05-96	-	234*
F-25	18-12-95	04-08-96	230
F-25	24-08-96	-	129*
F-29	29-09-96	-	93*
F-37	25-12-95	04-11-96	315
F-37	18-11-96	-	43*
F-38	13-05-96	-	232*
F-45	03-02-96	-	332*
F-53	05-03-96	-	301*
F-61	28-05-96	16-09-96	111
F-61	21-10-96	-	71*
F-66	24-11-96	-	37*
F-69	26-05-96	-	219*
F-78	19-05-96	16-06-96	28
F-78	12-07-96	-	172
Total de días en operación			3,901
* Información Restringida, indica que los sistemas BEC no han fallado			

Tabla A5.6 – Fallas de Sistemas BEC del Bloque F en Kuparuk, Alaska, del 14 de diciembre de 1995 al 31 de diciembre de 1996 (Sawaryn, 2003)

Predicción para el Bloque F (1996 – 1997)

Para la predicción de esta parte, utilizamos la información tanto del Bloque L como la del periodo 1995 – 1996 del Bloque F para la predicción de fallas del Bloque F, en el periodo del 1 de enero al 31 de diciembre de 1997. Basándonos en el tiempo de las pruebas de tiempo escalonado, TTT, de 3,901 días, el rango exponencial constante recíproco, λ_e , para los sistemas de bombeo electrocentrífugo sumergido del Bloque F, es calculado como 975 días. Una vez más, este tiempo de vida es mucho mayor que los 171 días obtenidos considerando solamente los cuatro sistemas que fallaron. De la Ecuación A5.3, el rango exponencial constante recíproco, λ_e , es de 900 días. El número de fallas esperado es 6.8, y si desviación estándar correspondiente es de 3.3. Los coeficientes de la distribución de falla, fueron calculados con la Ecuación A5.3, que se presenta a

continuación, y están representados gráficamente en la Figura A5.5, la cual muestra que el límite de confianza de aproximadamente el 95% se encuentra entre 2 y 13 fallas.

$$b_n = \frac{\Gamma\left(r+n+\frac{1}{2}\right)}{\Gamma\left(r+\frac{1}{2}\right)\Gamma(n+1)}\left(1+\frac{N_0\lambda_e t}{r}\right)^{-\left(r+n+\frac{1}{2}\right)}\left(\frac{N_0\lambda_e t}{r}\right)^n \dots\dots\dots\text{Ecuación A5.3}$$

Dónde:

b_n = Probabilidad de exactamente n fallas

Γ = Función gamma

r = Número de fallas registradas

n = Índice de los n términos en una serie

N_0 = Tamaño inicial de la muestra del primer tipo (genérico) de sistemas BEC

λ_e = Rango general calculado constante de distribución exponencial, t^{-1} , [días⁻¹]

t = tiempo, t , [días]

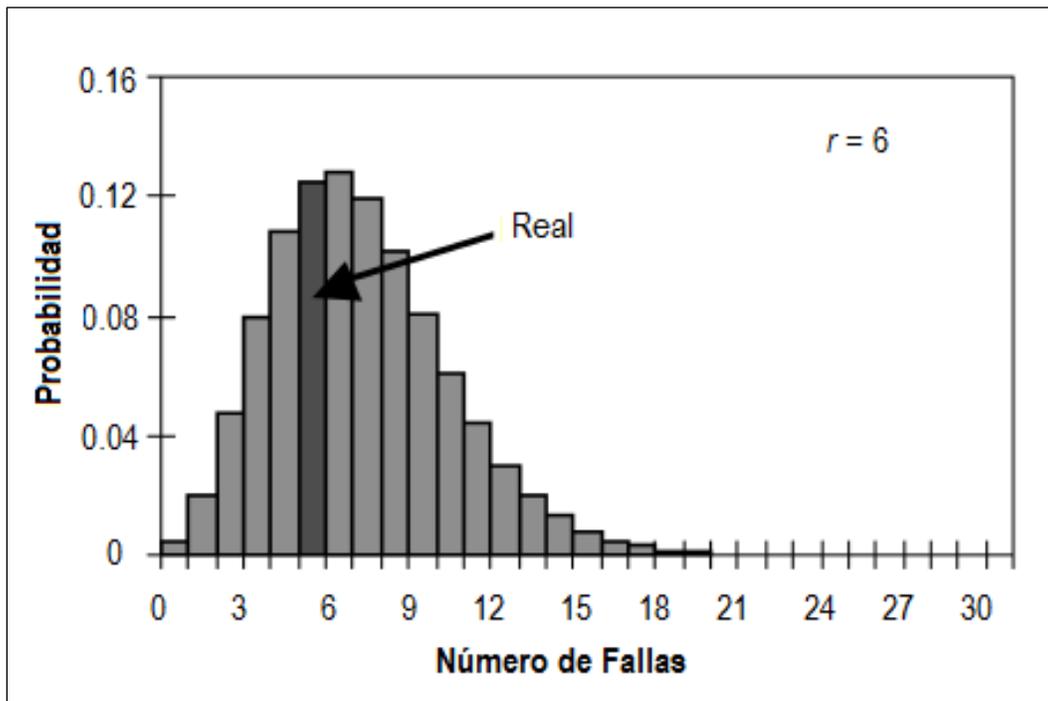


Figura A5.5 – Predicción de Fallas y Fallas Reales en el Bloque F de Kuparuk, Alaska periodo 1996 – 1997 (Sawaryn, 2003)

En realidad, se registraron 5 fallas. En ambos casos considerados, como podemos ver, los valores registrados se encontraron dentro de los valores predichos. Se puede realizar mejoras al proceso de predicción al considerar información extra acerca del proceso de renovación.

Comportamiento Esperado a Largo Plazo

Cuando el número de fallas, r , es grande (mayor a 100), la distribución binomial negativa puede ser aproximada a una distribución de Poisson. Para el Bloque F, que tiene 16 pozos, la distribución de fallas después de un año, sigue siendo sesgada, como se muestra en la Figura A5.6, por lo que debe chequearse antes de aplicar las aproximaciones comunes para la distribución de falla.

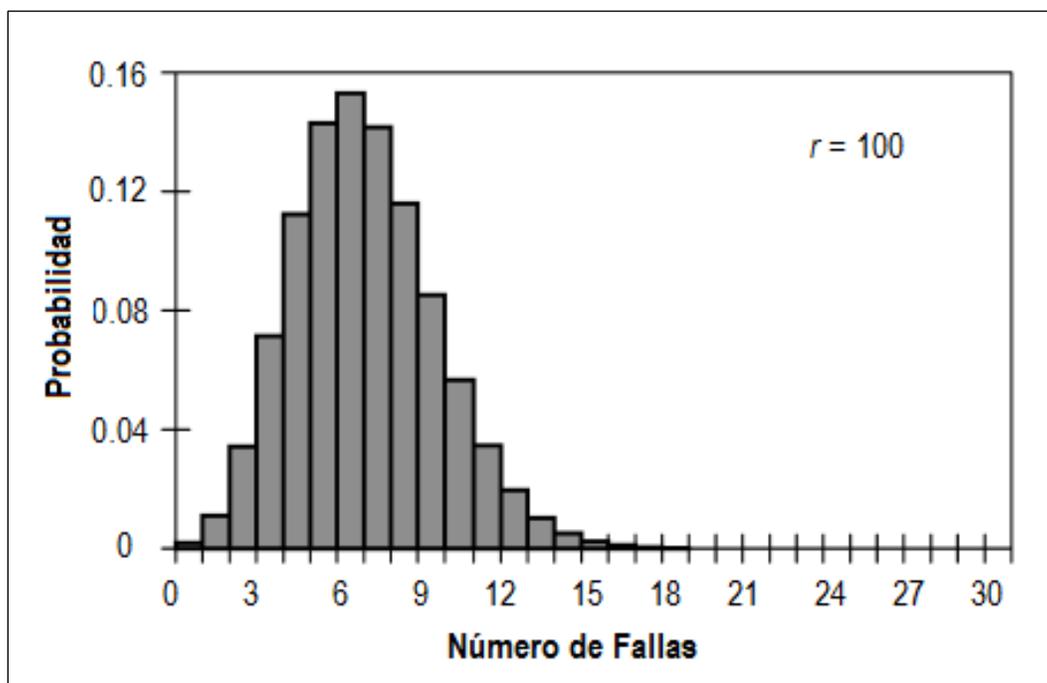


Figura A5.6 – Predicciones Hipotéticas de Fallas a Largo Plazo en el Bloque F de Kuparuk, Alaska (Sawaryn, 2003)

Anexo 2: Glosario

Corrientes de Foucault. Es un fenómeno eléctrico descubierto por el físico francés Léon Foucault en 1851. Se produce cuando un conductor atraviesa un campo magnético variable, o viceversa.

Transductores. Es un dispositivo capaz de transformar o convertir una determinada manifestación de energía de entrada, en otra diferente a la salida, pero de valor muy pequeños en términos relativos con respecto a un generador.

Prueba Hipot. Prueba de alto potencial, la abreviación por sus siglas en inglés, high potential test.

Escala Mohs. Escala de dureza desarrollada en el año de 1822 por Frederick Mohs, contiene la dureza relativa de varios minerales, va de una dureza de 1 que es el más relativamente suave a 10, que es el más duro.

Censoring. En estadística, ingeniería, economía e investigación científica, se define como censoring a la condición en la que el valor de una medida u observación se conoce solamente parcialmente.

Rango de Falla. Número total de fallas observadas dentro de un grupo de sistemas en un periodo de producción, dividida entre la suma de los tiempos de vida de todos los sistemas BEC del mismo grupo.

Rango de Flujo. Volumen de fluido bombeado por unidad de tiempo.

Prueba de Fábrica. Prueba llevada a cabo para confirmar el funcionamiento apropiado del equipo.

Periodo de Producción. Periodo en el que se encontró en operación un sistema BEC, instalado en un pozo.

Eje. Barra sólida o tubular que transmite el torque en el sistema BEC.

Etapa. Parte de la bomba BEC, donde el impulsor y el difusor crean presión.

Cabeza del Pozo. Componente que incluye válvulas que controlan el pozo.

Sección Sello. Componente del sistema BEC cuyo principal objetivo es proteger el motor de los fluidos del pozo.

Operador. Usuario del sistema BEC.

Flujo Mínimo Recomendado. El mínimo rango del flujo para una etapa de la bomba en particular, el cual es especificado por el fabricante.

Flujo Máximo Recomendado. El máximo rango del flujo para una etapa de la bomba en particular, el cual es especificado por el fabricante.

Entrada de la Bomba. Componente de la bomba el cual proporciona una trayectoria de flujo hacia el primer impulsor.

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Arutunoff y su Bomba Electrocentrífuga (Bearden, 2009).....	1
Figura 1.2 – Evolución del Sistema BEC (Stale, 2010).....	2
Figura 1.3 – Distribución de los Componentes del Aparejo del Sistema BEC (Díaz-Zertuche, 2003)	5
Figura 1.4 – Equipo Superficial del Sistema BEC (Baker Hughes Centrilift, 2008).....	7
Figura 1.5 – Bomba Electrocentrífuga Sumergida (Baker Hughes Centrilift, 2008)	10
Figura 1.6 – Bombas Trabajando con Líquidos con Diferentes Densidades Relativas (Díaz-Zertuche, 2003)	11
Figura 1.7 – Principales Componentes de la Bomba Electrocentrífuga Sumergida (Baker Hughes Centrilift, 2008)	12
Figura 1.8 – Corte Transversal del Motor (Baker Hughes Centrilift, 2008).....	14
Figura 1.9 – Combinaciones de Motores Tándem (Lucero-Aranda, 2015)	15
Figura 1.10 – Arreglo de Motor Tándem (Lucero-Aranda, 2015)	16
Figura 1.11 – Funcionamiento del Separador de Gas Convencional (Díaz-Zertuche, 2003).....	18
Figura 1.12 – Separador de Gas Centrifugo (Baker Hughes Centrilift, 2008).....	19
Figura 1.13 – Gráfica de Incremento de Producción con el Manejador Avanzado de Gas de REDA (Lucero-Aranda, 2015).....	20
Figura 1.14 – Separador de Gas Poseidón (Schlumberger, 2009)	21
Figura 1.15 – Protector Convencional REDA (Díaz-Zertuche, 2003).....	23
Figura 1.16 – Corte Transversal del Cable de Potencia (Baker Hughes Centrilift, 2008).....	25
Figura 1.17 – Altura Dinámica Total (Lucero-Aranda, 2015).....	29
Figura 1.18 – Curvas de Comportamiento de la Bomba REDA (Díaz-Zertuche, 2003)	30
Figura 1.19 – Configuración de Sistema BEC con Camisa (Baker Hughes Centrilift, 2008).....	34
Figura 1.20 – Producción por Medio de SAGD y Sistema BEC (Baker Hughes Centrilift, 2008)	35
Figura 1.21 – Configuración del Sistema BEC con Empacador (Baker Hughes Centrilift, 2008).....	36
Figura 1.22 – Configuración del Sistema BEC con Herramienta “Y” (Baker Hughes Centrilift, 2008)	37
Figura 1.23 – Configuración del Sistema BEC Dual con Herramienta “Y” (Carlsen, 2009).....	38
Figura 1.24 – Configuración del Sistema BEC con Bomba de Potencia (Baker Hughes Centrilift, 2008)	39
Figura 2.1 – Ejemplo de Tiempos de Vida Para Cinco Pozos en Doce Meses (Alhanati, 2008).....	44
Figura 2.2 – Medidas de Tiempo de Vida a través del Tiempo, Caso 1 (Alhanati, 2008).....	50

Figura 2.3 – Medidas de Tiempo de Vida a través del Tiempo con Ventana, Caso 1 (Alhanati, 2008)	51
Figura 2.4 – Medidas de Tiempo de Vida a través del Tiempo, Caso 2 (Alhanati, 2008).....	52
Figura 2.5 – Medidas de Tiempo de Vida a través del Tiempo con Ventana, Caso 2 (Alhanati, 2008)	53
Figura 2.6 – Número de Pozos Activos a través del Tiempo, Caso 3 (Alhanati, 2008)	54
Figura 2.7 – Medidas de Tiempo de Vida a través del Tiempo, Caso 3 (Alhanati, 2008).....	55
Figura 2.8 – Medidas de Tiempo de Vida a través del Tiempo con Ventana, Caso 3 (Alhanati, 2008)	55
Figura 2.9 – Intervalo de Confiabilidad en el MTTF a través del Tiempo (Alhanati, 2008).....	59
Figura 3.1 – Delimitación del Sistema de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido (C-FER Technologies, 2012).....	75
Figura 3.2 – Ejemplo de las Tendencias Estimadas del MTTF, Considerando y sin Considerar los Sistemas en Operación (Alhanati, 2007)	81
Figura 3.3 – Jerarquía del Equipo y Consideraciones de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)	83
Figura 3.4 – Diagrama de Bloques del Sistema de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido (C-FER Technologies, 2012).....	92
Figura 3.5 – Pasos para la Aplicación de la Nomenclatura Estándar de Falla de ESP-RIFTS: Diagrama de Flujo del Sistema (Granados-Pérez, 2015)	98
Figura 3.6 – Pasos para la Aplicación de la Nomenclatura Estándar de Falla de ESP-RIFTS: Diagrama de Flujo de los Componentes (Granados-Pérez, 2015).....	99
Figura 4.1 – Posibles Causas de Falla y su Rango de Falla Asociado Para Sistemas BEC (Granados-Pérez, 2015).....	106
Figura 4.2 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas en la Terminación (Granados-Pérez, 2015).....	107
Figura 4.3 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas en la Instalación (Granados-Pérez, 2015)	110
Figura 4.4 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas en la Fabricación (Granados-Pérez, 2015)	113
Figura 4.5 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas Causadas por el Desgaste por Uso (Granados-Pérez, 2015).....	115
Figura 4.6 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas Durante la Operación (Granados-Pérez, 2015)	118

Figura 4.7 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con los Fluidos del Yacimiento (Granados-Pérez, 2015)	121
Figura 4.8 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con el Diseño del Sistema o Selección de Componentes (Granados-Pérez, 2015).....	125
Figura 4.9 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC con Problemas Severos de Producción de Arena (Granados-Pérez, 2015)	129
Figura 4.10 – Porcentaje de Fallas en los Componentes del Sistema BEC sin Problemas de Producción de Arena (Granados-Pérez, 2015).....	129
Figura 4.11 – Comparación Gráfica del MTTF para Sistemas BEC Con Problemas Severos y Sin Problemas de Producción de Arena (Stale, 2010).....	130
Figura 4.12 – Escala de Mohs (Modificado de Takacs, 2009)	132
Figura 4.13 – Selección de la Bomba para Aplicaciones Abrasivas (Takacs, 2009).....	136
Figura 4.14 – Esquema de la Ubicación del Acelerómetro en el Sistema BEC (Baker Hughes Centrilift, 2008)	144
Figura 4.15 – Alineación de los Ejes de Vibración (White, 1997).....	144
Figura 5.1 – Forma Típica de la Distribución Exponencial en los Estudios de Confiabilidad (Soong, 2004).....	172
Figura 5.2 – Distribución de Probabilidad de la Función de Distribución de Poisson (Haight, 1967).....	173
Figura 5.3 – Gráficas de la Función de Densidad de la Distribución de Weibull para Diferentes Valores de los Parámetros α y λ (Rincón, 2013)	174
Figura 5.4 – Distribución Ji-Cuadrada para Valores de $n = 1$, $n = 2$, $n = 4$ y $n = 6$ (Soong, 2004).....	175
Figura 5.5 – Gráfica de Duane para las Fallas de los Sistemas BEC en el Pozo de Agua CFP-01 de Kuparuk, Alaska (Sawaryn, 2003).....	183
Figura 5.6 – Gráfica del Tiempo Escalonado que Muestra las Tendencias Exponencial y de Weibull (Sawaryn, 2003)	184
Figura 5.7 – Gráfica del Tiempo Escalonado para el Ejemplo con la Información de Patterson del Oeste de Texas (Patterson, 1993)	184
Figura 5.8 – Truncado Exponencial de la Distribución de Probabilidad Acumulada (Sawaryn, 2003).....	188
Figura 5.9 – Influencia del Error en la Estimación de Parámetros en el Proceso de Poisson (Sawaryn, 2003).....	193
Figura 5.10 – Rango de Falla de la Declinación de la Muestra con una Función de Densidad Económica Triangular (Sawaryn, 2003).....	195
Figura 5.11 – Función de Densidad Triangular (Sawaryn, 2003).....	195

Figura 5.12 – Mapa de Localización de Operaciones de ESP-RIFTS (Alhanati, 2003)	197
Figura 5.13 – Gráfica del Tiempo Medio a la Falla Real contra Tiempo Medio a la Falla Predicho para las Operaciones de los Sistemas de ESP-RIFTS (Alhanati, 2003)....	203
Figura A5.1 – Comparación de los Métodos de Estimación de la Curva de Supervivencia para el Conjunto de Datos Completo (Pflueger, 2011)	227
Figura A5.2 – Estimación de la Curva de Supervivencia para Sistemas BEC con y sin Emulsión por el Método de Kaplan Meier (Pflueger, 2011).....	229
Figura A5.3 – Comparación de los Métodos de Estimación de la Curva de Supervivencia para Sistemas BEC con y sin Emulsión (Pflueger, 2011)	229
Figura A5.4 – Predicción de Fallas y Fallas Reales en el Bloque F de Kuparuk, Alaska (Sawaryn, 2003).....	234
Figura A5.5 – Predicción de Fallas y Fallas Reales en el Bloque F de Kuparuk, Alaska (Sawaryn, 2003).....	236
Figura A5.6 – Predicciones Hipotéticas de Fallas a Largo Plazo en el Bloque F de Kuparuk, Alaska (Sawaryn, 2003)	237

Índice de Tablas

Tabla 2.1 – Intervalos de Confiabilidad del MTTF para un Número de Fallas Específico (Alhanati, 2008).....	58
Tabla 3.1 – Conjunto de Datos Generales Según Alhanati (Alhanati, 2007).....	68
Tabla 3.2 – Conjunto de Datos Generales y Conjunto Mínimo de Datos* de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012).....	74
Tabla 3.3 – Modo de Falla (Alhanati, 2007).....	77
Tabla 3.4 – Componentes que Fallaron (Alhanati, 2007).....	77
Tabla 3.5 – Descriptores de Falla (Alhanati, 2007).....	78
Tabla 3.6 – Causas de Falla (Alhanati, 2007).....	79
Tabla 3.7 – Posibles Razones de Desinstalación (C-FER Technologies, 2012).....	86
Tabla 3.8 – Posibles Componentes que Fallaron (C-FER Technologies, 2012).....	87
Tabla 3.9 – Posibles Descriptores de Falla (C-FER Technologies, 2012).....	89
Tabla 3.10 – Posibles Causas de Falla (C-FER Technologies, 2012).....	91
Tabla 4.1 – Clasificación de los Datos de Consulta (Stale, 2010).....	105
Tabla 4.2 – Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas en la Terminación (Stale, 2010).....	108
Tabla 4.3 – Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas en la Instalación (Stale, 2010).....	110
Tabla 4.4 – Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas en la Fabricación (Stale, 2010).....	113
Tabla 4.5 – Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas Causadas por el Desgaste por Uso (Stale, 2010).....	116
Tabla 4.6 – Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con Fallas Durante la Operación (Stale, 2010).....	119
Tabla 4.7 – Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionados con los Fluidos del Yacimiento (Stale, 2010).....	122
Tabla 4.8 – Fallas en los Componentes del Sistema BEC Relacionadas con el Diseño del Sistema o Selección de Componentes (Stale, 2010).....	126
Tabla 4.9 – Clasificación de los Datos de Consulta de Sistemas BEC con Problemas Severos de Producción de Arena (Stale, 2010).....	128
Tabla 4.10 – Clasificación de los Datos de Consulta de Sistemas BEC sin Problemas de Producción de Arena (Stale, 2010).....	128
Tabla 4.11 – Análisis de Vibración en el Sistema BEC (API 11S8, 2008).....	141

Tabla 5.1 – Resumen de los Modelos Utilizados para el Análisis de Fallas en Sistemas BEC (Granados-Pérez, 2016).....	187
Tabla A3.1 – Ejemplo 1: Falla de un Componente que No Pertenece al Sistema BEC (Válvula Superficial), de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)	213
Tabla A3.2 – Ejemplo 2: Error Humano, de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)	215
Tabla A3.3 – Ejemplo 3: Falla de un Componente Subsuperficial que No Pertenece al Sistema BEC (Liner Ranurado), de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)	216
Tabla A3.4 – Ejemplo 4: Diseño Inadecuado del Sistema BEC, de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)	218
Tabla A3.5 – Ejemplo 5: Componentes del Sistema BEC Desechados Sin Inspección o Pruebas de Fábrica, de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)	219
Tabla A3.6 – Ejemplo 6: Mantenimiento Preventivo No Programado, de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)	221
Tabla A3.7 – Ejemplo 7: Aplicación Difícil, de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012)	222
Tabla A3.8 – Ejemplo 8: Una Situación Diferente a la Falla de un Componente del Sistema BEC que Resultó en una Aparente Falla del Sistema BEC, de Aplicación de la Nomenclatura Estándar de ESP-RIFTS (C-FER Technologies, 2012).....	224
Tabla A5.1 – Resumen de la Información Utilizada para el Análisis (Pflueger, 2011).....	226
Tabla A5.2 – Cálculos para determinar el P50 del Tiempo de Vida Útil para Sistemas BEC de Chevron (Pflueger, 2011)	227
Tabla A5.3 – Comparación de la Estimación de Medianas con los Diferentes Métodos con el Factor que difiere: Emulsión (Pflueger, 2011)	228
Tabla A5.4 – Fallas de Sistemas BEC del Bloque L en Kuparuk, Alaska, del 27 de diciembre de 1990 al 31 de diciembre de 1993 (Sawaryn, 2003)	232
Tabla A5.5 – Planeación de la Instalación de Sistemas BEC en el Bloque F de Kuparuk, Alaska al 31 de diciembre de 1996 (Sawaryn, 2003)	233
Tabla A5.6 – Fallas de Sistemas BEC del Bloque F en Kuparuk, Alaska, del 14 de diciembre de 1995 al 31 de diciembre de 1996 (Sawaryn, 2003)	235

Referencias Bibliográficas

Capítulo I: Aspectos Fundamentales y Aplicaciones del Bombeo Electrocentrífugo Sumergido (BEC)

1. Takacs, G. 2009. *Electrical Submersible Pumps Manual. Design, Operations, and Maintenance*, primera edición. Burlington, Massachusetts, Estados Unidos: Gulf Professional Publishing / Elsevier.
2. Stale, B. 2010. *Artificial Lift – Electrical Submerged Pump, best practice and future demands within subsea applications*. MS Thesis, Faculty of Science and Technology. University of Stavanger, Stavanger, Noruega. (Junio 2010).
3. Díaz-Zertuche, H. 2003. *Bombeo Electrocentrífugo Sumergido*, primera edición. Distrito Federal, México: Ediciones Gráficas Zeta.
4. Lucero-Aranda, F.J. 2015. *Tema V Bombeo Electrocentrífugo Sumergido (BEC, BES o ESP)*. Apuntes de la materia Sistemas Artificiales de Producción. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México.
5. Baker Hughes. 2008. *Centrilift Submersible Pump Handbook*, novena edición, versión 1. Claremore, Oklahoma, Estados Unidos: Baker Hughes Centrilift.
6. Schlumberger. 2009. *ESP Technologies for Operating in High-Gas Environments*, http://www.slb.com/~media/Files/artificial_lift/other/gassolution.ashx (Descargado en agosto 2015).
7. James, M. y Wing, R. 2009. *High Temperature Electric Submersible Pumps Effective in Oil Sands Production*, <http://www.pumpsandsystems.com/topics/pumps/pumps/high-temperature-electric-submersible-pumps-effective-oil-sands-production> (Descargado en agosto 2015).
8. Sawaryn, S.J., 2003. *The Dynamics of Electrical-Submersible-Pump Populations and the Implication for Dual-ESP Systems*. SPE Production & Facilities 18 (4): 236-246. SPE-87232-PA.
9. Pérez, A. y Caicedo, S.A. 2009. *Feasibility Study of Dual “Backup” Electrical Submersible Pump Based on Risk Analsis*. SPE-120889-MS presentado en Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Cartagena de Indias, Colombia, 31 mayo – 3 junio.

Capítulo II: Medidas de Evaluación de la Confiabilidad de los Sistemas Artificiales de Producción

1. Skoczylas, P., Alhanati, F.J.S., Sheldon, J. y Trevisan, F. 2015. *Use of Run-Life Measures in Estimating Artificial Lift System Reliability*. SPE-173908-MS presentado en SPE Progressing Cavity Pumps Conference, Calgary, Alberta, Canadá, 31 marzo – 1 abril.
2. Alhanati, F.J.S. 2008. *Pitfalls to Avoid in Assessing Artificial Lift Run-Life Performance*. Presentado como SPE Distinguished Lecture durante la temporada 2009 – 2010; mayo 2010 en Irán.

Capítulo III: Metodología Para el Reporte de Fallas de los Sistemas de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido

1. Alhanati, F.J.S., Solaki, S.C. y Zahacy, T.A. 2007. *ESP Failures: Can We Talk the Same Language?*. SPE-148333-MS.
2. C-FER Technologies. 2012. *ESP-RIFTS: General Data Set*. Edmonton, Alberta, Canadá: C-FER Technologies.
3. C-FER Technologies. 2012. *Standard ESP Failure Nomenclatura*, Versión 4.3. Edmonton, Alberta, Canadá: C-FER Technologies.
4. ISO 14224:2006, *Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries -- Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment*. 2006. Ginebra, Suiza: ISO. http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=36979

Capítulo IV: Análisis de Fallas de Sistemas de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido

1. ISO 14224:2006, *Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries -- Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment*. 2006. Ginebra, Suiza: ISO. http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=36979
2. C-FER Technologies. 2012. *Standard ESP Failure Nomenclatura*, Versión 4.3. Edmonton, Alberta, Canadá: C-FER Technologies.

3. C-FER Technologies. 2015. *Electric Submersible Pump – Reliability Information and Failure Tracking System ESP-RIFTS*, <http://jip.esprifts.com/> (Consultada diciembre 2015).
4. Stale, B. 2010. *Artificial Lift – Electrical Submerged Pump, best practice and future demands within subsea applications*. MS Thesis, Faculty of Science and Technology. University of Stavanger, Stavanger, Noruega. (Junio 2010).
5. API 11S8, *Recommended Practice on Electric Submersible System Vibrations*, segunda edición. 2012. Washington, Distrito de Columbia, Estados Unidos: API.
6. Ramírez, M. *Bombeo Electrosumergible: Análisis, Diseño, Optimización y Trouble Shooting*, 2004, Monagas, Venezuela.

Capítulo V: Modelos para el Análisis de Fallas

1. Soong, T. 2004. *Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers*, primera edición. West Sussex, Inglaterra: Wiley.
2. Rincón, L. 2013. *Introducción a la probabilidad*, primera revisión. Distrito Federal, México: Facultad de Ciencias / Universidad Nacional Autónoma de México.
3. Rincón, L. 2011. *Introducción a los procesos estocásticos*, primera edición. Distrito Federal, México: Facultad de Ciencias / Universidad Nacional Autónoma de México.
4. Pflueger, M. 2011. *Electrical Sumersible Pump Survival Analysis*. MS Thesis, Department of Statistics. Texas A&M, Collage Station, Texas, Estados Unidos. (Marzo 2011).
5. Sawaryn, S.J. y Ziegel, E. 2003. *Statistical Assessment and Management of Uncertainty in the Number of Electrical Submersible Pump Failures in a Field*. SPE-71511-MS presentado en 2001 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Nueva Orleans, Louisiana, Estados Unidos, 30 septiembre – 3 octubre.
6. Patterson, M.M. 1993. *A Model for Estimating the Life of Electrical Submersible Pumps*. SPE Production & Facilities 8 (4): 247-250. SPE-22790-PA.

7. Upchurch, E.R. 1990. *Analyzing Electric Submersible Pump Failures in the East Wilmington Field of California*. SPE-20675-MS presentado en 1990 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Nueva Orleans, Louisiana, Estados Unidos, 23 – 26 septiembre.
8. Lawless, J.F. 2003. *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*, segunda edición, Hoboken, Nueva Jersey, Estados Unidos: Wiley – Interscience.
9. Oliveira, L.F., et al. 1997. *Analysis of ESP Failure from Northeast Pole of Campos Basin*. Presentando en 1997 Gulf Coast Section ESP Workshop, Houston, Texas, Estados Unidos, 30 abril – 2 mayo.
10. Sawaryn, S.J, Norrell, K.S. y Whelehan, O.P. 1999. *The Analysis and Prediction of Electric-Submersible-Pump Failures in the Milne Point Field, Alaska*. SPE-56663-MS presentado en 1999 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, Estados Unidos, 3 – 6 octubre.
11. Ansell, J.I. y Phillips, M.J. 1994. *Practical Methods for Reliability Data Analysis*, primera edición. Oxford, Inglaterra: Oxford Science Publications.
12. Rausand, M. y Hoyland, A. 2003. *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods and Applications*, segunda edición. Hoboken, Nueva Jersey, Estados Unidos: Wiley – Interscience.
13. Rigdon, S.E. y Basu, A.P. 2000. *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*, primera edición. Hoboken, Nueva Jersey, Estados Unidos: Wiley – Interscience.
14. Cox, D.R. 1962. *Renewal Theory*, primera edición. Londres, Inglaterra: Methuen Publishing.
15. Pearson, E.S. y Hartley, H.O. 1968. *Biometrika Tables for Statisticians, Vol. I*, tercera edición. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press.
16. Alhanati, F.J.S., Zahacy, T.A. y Hanson, R.S. 2003. *Benchmarking ESP Run Life Accounting for Application Differences*. Presentando en 2003 Gulf Coast Section ESP Workshop, Houston, Texas, Estados Unidos, 30 abril – 2 mayo.