

**PLAN DE MANTENIMIENTO PARA LOS EQUIPOS DE BOMBEO DE LA  
UNIDAD 150 PLANTA DE DESTILACIÓN DE CRUDOS DE LA REFINERÍA  
BARRANCABERMEJA**

**ÁLVARO ÁLVAREZ FLOREZ  
WILLIAM VARGAS SILVA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO- MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA**

**2013**

**PLAN DE MANTENIMIENTO PARA LOS EQUIPOS DE BOMBEO DE LA  
UNIDAD 150 PLANTA DE DESTILACIÓN DE CRUDOS DE LA REFINERÍA  
BARRANCABERMEJA**

**ÁLVARO ÁLVAREZ FLOREZ  
WILLIAN VARGAS SILVA**

**Monografía de Grado presentada como requisito para optar el título de  
Especialista en Gerencia de Mantenimiento**

**Director:  
ALFONSO GARCÍA CASTRO  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO- MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA**

**2013**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios que me fortalece todos los días.

A mi hija el mejor regalo que ha dado la vida.

A mi esposa, que me apoya y me alienta.

A mis padres por su apoyo me han ayudado a cumplir mis metas.

A La universidad industrial de Santander y Docentes por el conocimiento brindado incondicional su apoyo en las dudas.

Al Ingeniero Alfonso García, por la transferencia de conocimiento para alcanzar los objetivos trazados en este trabajo de grado.

Al Ingeniero Jesús David Cubillos por sus aportes en el desarrollo del estudio de causas de fallas de sellos mecánicos y la construcción de un manual de mantenimiento.

A Pesquera del Mar por el apoyo brindado durante la Especialización para alcanzar mi desarrollo profesional y personal.

**ÁLVARO ÁLVAREZ FLOREZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios todo poderoso quien guía mi vida y desea lo mejor para mí, quien hace posible un sueño, a Jesús por morir por mí en la cruz, al espíritusanto que me acompaña me llena de sabiduría inteligencia para cumplir un sueño.

A mi esposa, mis hijos y padres, que me ayudan para cumplir un sueño los amo Gracias por tantas alegrías que le dan a mi vida son fuente de inspiración.

A La universidad industrial de Santander, Docentes y secretarias por el conocimiento brindado incondicional su apoyo en las dudas.

Al Ingeniero Alfonso García, por la trasferencia de conocimiento para alcanzar los objetivos trazados en este trabajo de grado.

Al Ingeniero Jesús David Cubillos por sus aportes en el desarrollo del estudio de causas de fallas de sellos mecánicos y la construcción de un manual de mantenimiento.

Al Ingeniero Ernesto Alfonso Gómez por el apoyo brindado durante la Especialización para alcanzar mi desarrollo profesional y personal.

**WILLIAN VARGAS SILVA**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	23
1. GENERALIDADES	24
1.1 RESEÑA HISTÓRICA DE LA EMPRESA	24
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
1.3 OBJETIVOS	26
1.3.1 Objetivo general	26
1.3.2 Objetivos específicos	26
1.4 JUSTIFICACIÓN	27
2. MARCO REFERENCIAL	29
2.1 MARCO TEÓRICO	29
2.2 CAUSAS DE FALLAS EN LOS EQUIPOS ROTATIVOS	33
2.3 PROCESO DE DESTILACIÓN DE CRUDOS	33
2.3.1 Sección de destilación atmosférica	34
2.3.2 Pre calentamiento del crudo	35
2.3.3 Torre Pre-Flash	37
2.3.4 Fraccionamiento T-150	38
2.3.5 Sistema de Cima T-150	38
2.3.6 Circuito de Jet-A.	39
2.3.7 Circuito de ACPM	39
2.3.8 Circuito de Gasóleo	40
2.3.9 Circuito de Reflujo Medio	40
2.3.11 Zona de despojamiento T-150	41
2.4 SECCIÓN DE DESTILACIÓN AL VACIO	42

2.4.1 Zona de Fraccionamiento T-131	43
2.4.2 Circuito de Cima T-131	43
2.4.3 Circuito de Reflujo de Cima, Reflujo Caliente y Gasóleo Liviano de Vacío	44
2.4.4 Circuito de Destilado Liviano (Parafínico) o Destilado Medio (Nafténico).	45
2.4.5 Circuito de Destilado Medio (Parafínico) o Destilado Pesado (Nafténico).	45
2.4.6 Circuito de Reflujo Inferior y Destilado Pesado (parafínico) o Destilado Cilindro (Nafténico).	46
2.4.7 Circuito de Reflujo Medio T-131.	46
3. RODAMIENTOS	48
3.1 VIDA DEL RODAMIENTO	48
3.1.1 Índice básico de vida y vida frente a la fatiga de los elementos rodantes.	50
3.1.1.1 Desgaste abrasivo	52
3.1.1.2 Corrosión.	52
3.1.1.3 Factura	53
3.1.1.4 Ludimientos	54
3.1.1.5 Rodadura irregular	55
3.1.1.7 Desgaste adhesivo	57
3.1.1.8 Descarga eléctrica	58
3.2 CALCULO DE VIDA TEORICA DE OPERACIÓN DE LAS BOMBAS	58
3.2.1 Índice básico de carga	58
3.2.2 Índice básico de vida	59
3.2.2.1 Ajuste del Factor de velocidad y factor de vida de fatiga	60
3.2.2.2 Ajuste de temperatura para el índice básico de carga	61
3.2.2.3 Corrección del índice básico de vida	62
Tabla 5. Factor de ajuste de la vida para la fiabilidad.	63
3.2.2.4 Cálculo de las cargas del rodamiento	64
3.2.2.5 Factor de carga	64
3.3 EL DIAGNOSTICO DE FALLA BASADO EN VIBRACIONES MECÁNICAS	66
3.3.1 La Frecuencia de los rodamientos	67

3.3.2 Formulas	68
3.4 SELLO MECÁNICO	69
3.4.1 Elementos que Constituyen un Sello Mecánico	69
3.4.2 Causas de fallas en los Sellos	100
3.4.3 Tipos de falla.	103
3.4.4 Análisis de fallas	104
4. DESARROLLO DEL TRABAJO	108
4.1 DEFINICIÓN DE EQUIPOS CRÍTICOS	109
4.2 REVISIÓN DE VENTANAS OPERATIVAS	114
4.3 CÁLCULOS DE VIDA TEÓRICA DEL RODAMIENTO RADIAL	115
4.4 DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS DE FALLAS DE LOS RODAMIENTOS DE LOS EQUIPOS DE LA U150.	128
4.5 DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS DE FALLAS DE LOS SELLOS MECÁNICOS DE LOS EQUIPOS DE LA U150.	144
4.6 ESTUDIO DE FALLA DEL SELLO MECÁNICO DEL EQUIPO SP139.	146
4.7 MANUAL DE MANTENIMIENTO PARA RODAMIENTOS Y SELLOS MECÁNICOS	148
4.8 CONDICIONES OPERACIONALES DE LOS SELLOS MECÁNICOS ACTUALES EN PLANTA U150.	150
4.8.1 Tareas de mantenimiento actuales realizadas por el operador.	159
4.8.2 Mejores prácticas de operación de los sellos de las bombas	160
4.8.2.1 Plan API 11.	160
4.8.2.2 Plan API 21.	161
4.8.2.3 Plan API 23.	161
4.8.2.4 Plan API 32	161
4.8.2.5 Plan API 52.	162
4.8.2.6 Plan API 62	162
4.9 PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA LOS EQUIPOS DISPONIBLES STAND BY DE LA U150.	164

4.10 TAREAS DE MANTENIMIENTO PARA EQUIPOS EN OPERACIÓN	165
5. CONCLUSIONES	168
6. RECOMENDACIONES	170
BIBLIOGRAFIA	171

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Equipos de Bombeos de la U150	25
Figura 2. Ejemplo de agrietamiento en la superficie con pérdida de material poco profundo micropicado (descamación)	51
Figura 3. Ejemplo de desgaste abrasivo.	52
Figura 4. Ejemplo de corrosión en la superficie localizado y generalizada.	53
Figura 5. Ejemplo de fractura en el rodamiento.	54
Figura 6. Ejemplo de Ludimientos en el rodamiento.	55
Figura 7. Ejemplo de rodadura irregular en la pista de un rodamiento	55
Figura 8. Ejemplo de indentación en la pista del rodamiento.	56
Figura 9. Ejemplo de desgaste adhesivo en rodamiento.	57
Figura 10. Ejemplo de estrías por corriente eléctrica.	58
Figura 11. Velocidad del rodamiento y factor de velocidad.	60
Figura 12: Partes del Rodamiento de Bolas	68
Figura 13. Elementos que constituyen un sello mecánico.	70
Figura 14: Ejemplo primer punto de sellado.	71
Figura 15: Ejemplo segundo punto de sellado.	71
Figura 16: Ejemplo del tercer punto de sellado.	72
Figura 17. Ejemplo de película de lubricación interfacial.	73
Figura 18. Ejemplo mecanismo de arrastre y compensación.	74
Figura 19. Ejemplo sello rotativo.	75
Figura 20. Sello no balanceado	76
Figura 21. Sello balanceado	77
Figura 22. Ejemplo Sello mono resorte.	78
Figura 23. Ejemplo Sello resorte múltiple.	78
Figura 24. Sello de fuelle metálico.	79

Figura 25. Sello de cartucho.	80
Tabla 7. Planes API para sellos.	82
Figura 26. Plan 11 Recirculación Desde la Descarga Al Sello.	83
Figura 27. Ejemplo Plan 11.	83
Figura 28. Plan 12 Recirculación con Filtro Desde la Descarga Al Sello	84
Figura 29. Plan 13 Recirculación Inversa Desde la Cámara del Sello a la succión.	84
Figura 30. Ejemplo del Plan 13	85
Figura 31. Recirculación Con Retorno Desde la Descarga al Sello y Desde el Sello a la Succión	85
Figura 32. Plan 21 Recirculación con Enfriador	86
Figura 33. Ejemplo Plan API 21.	86
Figura 34. Plan 22 Recirculación con Enfriador y Filtro	87
Figura 35. Plan 23 Circuito cerrado con enfriador.	87
Figura 36. Plan 31 Recirculación con Separador Ciclónico	88
Figura 37. Plan 32 Inyección de Fuente Externa Sin Retorno	88
Figura 38. Plan 41 Recirculación con Separador Ciclónico Y Enfriador	89
Figura 39. Plan 52 Circulación de un líquido de barrera desde el Sello Auxiliar a un reservorio no presurizado.	90
Figura 40. Ejemplo plan 52.	90
Figura 41. Plan 53A Circulación de un líquido de barrera desde los Sellos a un reservorio presurizado.	91
Figura 42. Plan API 53B Circulación Presurizada de un líquido de barrera desde los Sellos a un hacia un intercambiador de calor.	92
Figura 43. Plan API 53C Circulación de un líquido de barrera Presurizado desde los Sellos hacia un intercambiador de calor.	92
Figura 44. PLAN API 54 Inyección de Fuente Externa de un líquido Limpio, Frío y Presurizado. Sello Dual Presurizado (Doble)	93
Figura 45. Plan API 61 Cámara Auxiliar Con Conexiones Para Venteo y Drenaje	93

Figura 46. Plan API 62 Cámara Auxiliar para Inyección de fuente externa para Lavado.	94
Figura 47. Plan API 72 Inyección de fuente externa de Barrera de Gas No presurizada al sello Auxiliar.	94
Figura 48. Plan API 74 Inyección de fuente externa de Barrera de Gas Presurizada.	95
Figura 49. Plan API 75 Sistema de Recolección de Fuga Condensada.	95
Figura 50. Plan API 76 Sistema de Venteo de Fuga no Condensada.	96
Figura 51. Representación del esquema de un Diagrama causa- efecto (Ishikawa).	107
Figura 52. Diagrama de bloques de la metodología empleada para desarrollo del trabajo.	109
Figura 53. Diagrama causa Efecto.	147
Figura 54. sistema de vapor al sello de la SP313E.	150
Figura 55. Ejemplo de línea de vapor de los planes de sello 62 con escape de condensado.	151
Figura 56. Sistema de vapor al sello del equipo SP156D.	151
Figura 57. Equipo SP165A con Plan API 11/62.	152
Figura 58. Equipo SP151C con Plan API 11/62.	153
Figura 59. Equipo SP158C con Plan API 11/62.	153
Figura 60. Equipo SP153C con Plan API 62.	154
Figura 61. Equipo SP150 con Plan API 62.	155
Figura 62: Plan API 11/62 del equipo SP139C	155
Figura 63: Plan API 32/62 del equipo SP137C.	156
Figura 64: Equipo SP138B con plan API 32/62.	157
Figura 65: Equipo SP152C con plan API 11/62.	157
Figura 66. Plan API 32 del equipo SP137C.	158
Figura 67. Plan API 32 del equipo SP131E.	158
Figura 68. Plan API 21/52 del equipo SP171A.	159
Figura 69. Diagrama plan de sello 62 con fluido externo agua.	162

Figura 70. Diagrama plan de sello 62 con fluido externo vapor.	163
Figura 71. Ejemplo de rangos de operación en indicadores de presión.	165

## LISTA DE GRÁFICAS

	<b>Pág.</b>
Gráfica 1: Modo de falla de los equipos rotativos U150	28
Gráfica 2. Causas de fallas equipo rotativo	33
Gráfica 3. Causa de fallas en rodamientos en bombas centrifugas.	49
Gráfica 4. Región de operación preferida. Vibración Versus flujo	49
Gráfica 5. Causas de fallas en rodamientos U150.	50
Gráfica 6. Factor de correccion por viscosidad.	66
Gráfica 7. Causas de fallas en sellos	101
Gráfica 8. Pareto frecuencia de falla.	112
Gráfica 9. Pareto costos totales.	113
Gráfica 10: Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP131.	120
Gráfica 11. Vida Teórica del rodamiento radial SP131.	120
Gráfica 12: Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP133.	121
Gráfica 13. Vida Teórica del rodamiento radial SP133.	121
Gráfica 14: Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP137.	122
Gráfica 15. Vida Teórica del rodamiento radial SP137.	122
Gráfica 16. Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP138.	123
Gráfica 17. Vida Teórica del rodamiento radial SP138.	123
Gráfica 18. Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP150.	124
Gráfica 19. Vida Teórica del rodamiento radial SP138.	124
Gráfica 20. Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP158.	125
Gráfica 21. Vida Teórica del rodamiento radial SP158.	125
Gráfica 22. Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP163.	126
Gráfica 23. Vida Teórica del rodamiento radial SP163.	126
Gráfica 24. Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP164	127
Gráfica 25. Vida Teórica del rodamiento radial SP164.	127

Gráfica 26. Causa de falla de los rodamientos U150.	128
Gráfica 27. Espectros SP164C	132
Gráfica 28. Espectros SP131E	134
Gráfica 29. Espectros SP138C	136
Gráfica 30. Espectros SP153C	138
Gráfica 31. Espectros SP136A	140
Gráfica 32. Espectros SP133A	142
Gráfica 33. Espectros SP137C	144
Gráfica 34. Causa de falla de los sellos mecánicos U150.	145

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Síntomas y causas de fallas hidráulicas y mecánicas en las bombas.	30
Tabla 2. Carta de identificación de averías.	31
Tabla 3. Carta de identificación de averías.	32
Tabla 4. Factor de temperatura $f_t$	61
Tabla 5. Factor de ajuste de la vida para la fiabilidad.	63
Tabla 6. Valores del factor de carga.	65
Tabla 7. Planes API para sellos.	82
Tabla 8. Causas de fallas en sellos mecánicos.	104
Tabla 9. Históricos de fallas equipos U150 entre los años 2007 y 2012.	110
Tabla 10. Nomenclatura de Modo de falla.	110
Tabla 11. Pareto por Frecuencia de falla.	111
Tabla 12. Pareto costos de mantenimiento.	112
Tabla 13. Causas de falla equipos de bombeo U150.	113
Tabla 14. Ventanas operativas y guías de control.	114
Tabla 15. Equipos con ventanas operativas por debajo de su flujo mínimo.	115
Tabla 16. Información recopilada de los data sheet.	116
Tabla 17. Información recopilada de los data sheet.	117
Tabla 19. Hoja de cálculo SP131.	119
Tabla 20. Nomenclatura frecuencia de falla.	130
Tabla 21. Análisis Rodamiento 7310	130
Tabla 22. Análisis Rodamiento 6410.	132
Tabla 23. Análisis Rodamiento 5310	134
Tabla 24. Análisis Rodamiento 7313	136
Tabla 25. Análisis Rodamiento 5308.	138
Tabla 26. Análisis Rodamiento 5310.	140

Tabla 27. Análisis Rodamiento 5310	142
Tabla 28. Soluciones a lcausa raiz sello mecanico SP139.	148
Tabla 29.Tareas de mantenimiento para sistema de sello.	149
Tabla 30. Tareas de cuidado básico de equipo Stand by.	164
Tabla 31. Tareas preventivas para equipos en operación U150.	165

## RESUMEN

**TITULO:** PLAN DE MANTENIMIENTO PARA LOS EQUIPOS DE BOMBEO DE LA UNIDAD 150 PLANTA DE DESTILACIÓN DE CRUDOS DE LA REFINERÍA BARRANCABERMEJA\*

**AUTOR:** WILLIAM VARGAS SILVA  
ÁLVARO ÁLVAREZ FLOREZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Modos de Fallas, causas, mantenimiento preventivo, procedimientos, Bombas Centrifugas, Planes de sellos API.

### DESCRIPCIÓN:

El objetivo principal de este estudio es reducir la alta frecuencia de fallas en rodamientos, sellos mecánicos de las bombas centrifugas de la planta destilación de crudos U150 del departamento Refinación de crudos de la refinería de Barrancabermeja de Ecopetrol.

Para desarrollar este estudio se recopiló la información de las carpetas, hoja de vida de cada equipo del historial de mantenimiento, se utilizó el software Elipse de Ecopetrol para realizar un historial desde el 2008 al 2012 de los costos de mantenimiento y órdenes de trabajo de cada uno de los equipos que presentaba una falla mecánica.

Se clasificó la información de los diferentes modos y causas de fallas, la mayor frecuencia de fallas estaba en los sellos mecánicos y rodamientos, se realizó un estudio al equipo que más frecuencia de falla en sellos mecánicos presentaba SP139 a través de la metodología causa efecto se determinó la causa raíz.

Se revisaron las condiciones operacionales en planta de los sellos mecánicos y rodamiento, encontrándose con grandes falencias que son causa de falla para los sellos por tanto se elaboró una serie de actividades preventivas que debe realizar el operador de planta, con esto se dan solución a varias causantes de fallas.

Se realizó el cálculo de vida teórica de los rodamientos para los equipos con alta frecuencia de falla por rodamiento, se graficaron 13 puntos desde el flujo mínimo hasta el máximo de la bomba evidenciándose en que más se aleje de su BEP aumentan las fuerzas radiales por efectos hidráulicos sobre el impulsor a su vez disminuye la vida de servicio del rodamiento.

---

\* Monografía.

\*\* Facultad de ingenierías físico- mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: Alfonso García Castro ingeniero mecánico.

## SUMMARY

**TITLE:** MANENIMIENTO PLAN FOR PUMPING EQUIPMENT UNIT 150 DISTILLATION PLANT REFINERY CRUDE BARRANCABERMEJA\*

**AUTHOR** WILLIAN VARGAS SILVA  
ALVARO ALVAREZ FLOREZ\*\*

**KEY WORDS:** Failure Modes, Causes, preventive maintenance, procedures, Centrifugal Pumps, API seals Plans

### DESCRIPTIONS

The main objective of this study is to reduce the high frequency of bearing failure, mechanical seals for centrifugal pumps crude distillation plant U150 crude refining department of Ecopetrol's Barrancabermeja refinery

To develop this study was compiled information folders, resume of each team's maintenance history, was used Ecopetrol Ellipse software for a history from 2008 to 2012 the cost of maintenance and work orders each one of the teams that had a mechanical failure.

He qualified information from the different modes and causes of failure, the failure rate was higher in mechanical seals and bearings, a study was made to the team that fails more often presented mechanical seals SP139 through causal methodology is determine the root cause.

We reviewed plant operational conditions of mechanical seals and bearing , encountering big flaw that cause failure for seals is therefore elaborated a number of preventive activities to be performed by the plant operator , with this solution are given several causing failures .

We performed the calculation of theoretical bearing life for equipment with high failure by bearing 13 points were plotted from the minimum to the maximum flow of the pump demonstrating that more away from its BEP radial forces increase by effects hydraulic drive on his look decreases the service life of the bearing.

---

\* Monograph.

\*\* Faculty of physical and mechanical engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Alfonso Garcia Castro Engineer

## INTRODUCCIÓN

Hoy día es necesario implementar en la mayor parte de los equipos industriales un mantenimiento predictivo, el cual permita ahorrar tiempo y dinero en mantenimiento de las máquinas dando así un mayor rendimiento a la industria y materias primas.

Es por esto que en esta monografía se realizó el análisis de los equipos que presentaban una mayor reincidencia en fallas, esto se realizó con la ayuda del análisis de Pareto, habiendo seleccionado los equipos a estudiar se revisaron todas las posibles fallas y nos apoyamos en el análisis de vibraciones; los cuales nos permiten predecir daños generados en las pistas de los rodamientos de las máquinas a través del estudio de las vibraciones presentes en ellas y así darles un margen de vida útil de los rodamientos en las máquinas para que hagan su plan de mantenimiento y realicen las correcciones necesarias.

El objetivo de este estudio es el de contribuir en el proceso de mejora del plan de mantenimiento de la U150 de la Refinería de Ecopetrol Barrancabermeja.

## **1. GENERALIDADES**

Dentro de la gran cantidad y diversidad de actividades que se llevan a cabo en la industria petrolera, está la Destilación de crudos, la cual se ejecuta para obtener los derivados, tales como combustibles; gasolinas, nafta, Jet A1 y diesel o los lubricantes y otros productos.

Durante el proceso de destilación operan 23 bombas centrifugas, algunos de estos equipos presentan últimamente fallas, específicamente en los sellos mecánicos, rodamientos, es por ello que se propone realizar un análisis para buscar la resolución del problema. Una vez realizado el análisis se realizarán propuesta de acciones de mantenimiento para garantizar un funcionamiento continuo de las bombas, mediante la aplicación de metodologías de investigación y análisis para mejorar la confiabilidad y disponibilidad operacional del equipo, acción que a la larga se debe traducir en ahorros en costos de mantenimiento, seguridad, producción.

Se hará una breve reseña histórica de la planta U150/130; se abordara el planteamiento del problema y finalidad del estudio; y los objetivos trazados para alcanzar la solución del mismo.

### **1.1 RESEÑA HISTÓRICA DE LA EMPRESA**

El diseño básico de la unidad 150 fue desarrollado por el Complejo Industrial de Barrancabermeja y su construcción ejecutada por Interventoría y Construcción Barrancabermeja y entró en operación en el primer trimestre de 1.986. La unidad 130 fue diseñada y construida por W.M.Kellogs en el año de 1.964.

Posteriormente en el año de 1991 la unidad fue sometida a una ampliación para aumentar su capacidad de procesamiento. Finalmente en el año 2003 la U-150/130 tuvieron otro Revamping contratado principalmente con la firma Conequipos Ltda. En donde se iniciaron los trabajos el mes de Noviembre del 2002 y se concluyeron el mes de Agosto del 2003, para aumentar su capacidad de procesamiento y manejar crudos livianos como Cupiagua y Cusiana.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El departamento de refinación de crudos de la GRB tiene a cargo la planta U150 la cual tiene dos corridas de operación en su proceso de destilación de crudo. En corrida naftenica carga 28000 BPD y corrida cupiagua con carga de 38000 BPD. Los equipos de bombeo operan las 24 horas los 365 días del año teniendo una parada general programada cada 4 años. Constantemente operan 23 bombas centrifugas cada equipo tiene su equipo disponible relevo para en caso de falla opere relevando al equipo que fallo.

**Figura 1. Equipos de Bombeos de la U150**



Fuente: Fotografía del autor planta U150.

La tasa de falla de los equipos de bombeo del a U150, según el histórico de mantenimiento de los últimos 5 años, registra 3 equipos con tasa de falla TMEF inferior a un año, con un modo de falla daños en los sellos; 4 equipos con TMEF inferior a 2 años, con modo de falla daño de rodamientos y sellos; 4 equipos con TMEF inferior a 3 años, con modo de falla daño en rodamiento y sellos; 5 equipos con TMEF inferior a 4 años, con modo de falla anillos de desgaste, rodamientos y sello; 7 equipos no presentaron falla durante estos 5 años. Por lo anterior se tiene 7 equipos que están ocasionando altos costos de mantenimiento y menor disponibilidad del equipo de bombeo.

### **1.3 OBJETIVOS**

**1.3.1 Objetivo general:** Realizar un plan de mantenimiento, con sus respectivas tareas y frecuencia a los equipos disponibles Sb U150 de la refinería Barrancabermeja

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Clasificar los equipos rotativos dependiendo de su criticidad, según los históricos de mantenimiento, en los últimos 5 años de operación.
- Realizar e implementar mejores prácticas de operación de los sellos de las bombas.
- Establecer estándares en la rutina de mantenimiento que deben aplicarse a los sistemas de lubricación, sistemas de sellado y sistema de enfriamiento, según la norma API, para los equipos rotativos.
- Definir mediante una ecuación, la vida teórica en días de operación de los rodamientos de las bombas, que operan durante las 2 corridas.
- Definir tareas de mantenimiento y frecuencia a los equipos en operación.

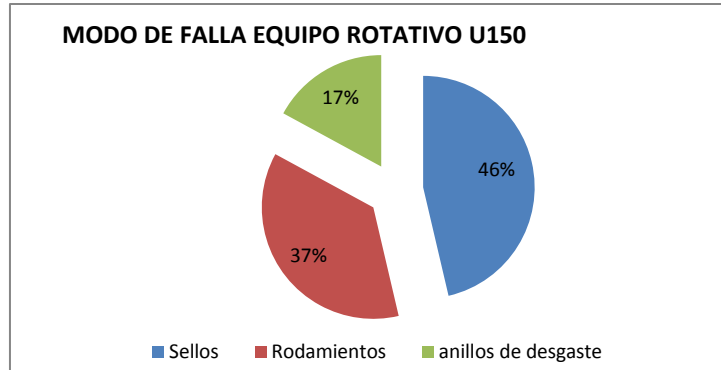
- Realizar un Plan de Mantenimiento, con sus respectivas tareas y frecuencias, para los equipos disponibles SB U150.

#### **1.4 JUSTIFICACIÓN**

Aumentar la confiabilidad de los equipos de bombeo de la U150 de la refinería Barrancabermeja es el principal objetivo para establecer estrategias de mantenimiento, que garanticen una mayor disponibilidad de los equipos de bombeo en la planta. Además de obtener menores costos de mantenimiento y mayor vida útil de los equipos.

Por lo anterior se realizará un estudio de los diferentes modos y causas de fallas de los equipos, en los últimos 5 años. Se establecerá un modelo de mantenimiento, con tareas y frecuencias definidas a realizar; además de mejores prácticas de operación de los diferentes planes de sellos; el éxito que este programa se desarrolle consistirá en transmitir el conocimiento, capacitar al operador, quien conoce el funcionamiento óptimo de la unidad y es quien detecta cualquier anomalía en la operación de los equipos. Dar la importancia a cada una de las tareas a ejecutar, por muy pequeña sea, juega un papel muy importante la actitud del operador pues es quien conoce los equipos y puede con pequeños cambios en su funcionamiento alertar de que algo está pasando. Muchas de las fallas pueden ser solucionadas aplicando conocimientos y acciones de mantenimiento primario, el cual puede realizar el operador de forma efectiva; por tanto se concientizará al personal de operaciones en ellos para ir reduciendo los fallos de los equipos que se observan en la gráfica 1.

**Gráfica 1: Modo de falla de los equipos rotativos U150**



Fuente: Autores.

Se realizarán los cálculos de la vida teórica, en días de operación, de los rodamientos de las bombas. Con esto se logrará saber el tiempo en el que empezarán a fallar por fatiga cualquiera de los componentes del rodamiento, respaldando los cálculos con monitoreo de vibraciones para averiguar qué se debe hacer operativamente para prolongar el TMEF.

Para la falla de los sellos mecánicos, la más frecuente, se desarrollará el diagrama de causa- efecto para determinar cuáles son las causas que provocan las fallas. Este diagrama comprende seis estudios: métodos, equipos, materiales, procedimientos, medio de operación y mano de obra.

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1 MARCO TEÓRICO

Una falla se define como un suceso que ocasiona que el sistema de bombeo deje de funcionar de la forma correcta para el cual fue diseñado. Las fallas pueden ser de dos clases: mecánicas o hidráulicas. Las fallas hidráulicas se relacionan directamente con el comportamiento del fluido, el cual está determinado por el caudal y la presión que desarrolla la bomba. Las fallas mecánicas están relacionadas directamente con el comportamiento de los elementos mecánicos que componen el sistema, tales como rodamientos, sellos mecánicos, anillos, empaquetaduras, etc.

Lo que se busca es una señal o comportamiento del sistema, que permita visualizar una falla o asumir una; para ver las posibles causa raíz que genera la falla visualizada.

Los síntomas y las causas de las fallas hidráulicas y mecánicas que aparecen comúnmente en las bombas centrifugas se muestran en la tabla 1. Esta tabla es una guía que permite identificar el síntoma y determinar la razón más probable por la cual se está presentando la falla.

Otras causas de fallas podrían ser.

- Mal diseño de la bomba.
- Materiales defectuosos.
- Deficiencia de proceso y fabricación.
- Operación fuera del punto de diseño o condiciones de servicio distintas a las recomendadas.

- Mantenimiento inadecuado.
- Operación inadecuada.

**Tabla 1. Síntomas y causas de fallas hidráulicas y mecánicas en las bombas.**

Síntoma	Fallas hidráulicas				Fallas mecánicas					
	Bomba no entrega líquido	Bomba no entrega suficiente caudal	Bomba no entrega suficiente presión	Bomba entrega flujo intermitentemente	Rodamientos se recalientan o fallan regularmente	Sellos mecánicos fallan con frecuencia	Empaquetaduras tienen corta vida	Vibraciones de la bomba exceden los niveles normales	Bomba consume mucha potencia	Desgaste acelerado de partes internas
Causa										
Bomba no preparada o mal preparada	x	x	x	x						
Válvulas de succión y/o descarga cerradas u obstruidas.	x	x	x					x		
Insuficiente NPSH disponible	x	x	x			x		x		x
Excesivo aire atrapado en el fluido	x	x	x	x						
Velocidad (rpm) muy baja	x	x	x							
Rotación incorrecta del Impeler		x							x	
Impeler roto o paletas averiadas		x	x		x			x		
Impeler o diámetro del impeler incorrecto		x	x							
Cabeza del sistema muy alta		x								
Instrumentos dan lecturas erróneas		x	x							
Entrada de aire en la línea de succión				x						
Excesivo desalineamiento del eje					x	x		x		
Lubricación inadecuada					x					
Contaminación del lubricante					x					
Fuerza axial o cargas radiales mayores que el grado del rodamiento					x					
Mezcla de lubricación inadecuada					x			x		
Presión de succión muy alta					x	x				
Rodamientos instalados incorrectamente					x	x		x		
Impeler desbalanceado					x	x		x		
Sobrecalentamiento de las caras de los sellos						x				
Deflexión excesiva del eje					x	x		x		
Instalación incorrecta de los sellos						x				
La bomba está funcionando en seco						x				
La bomba funciona fuera del punto de diseño					x	x	x	x	x	
Empaquetaduras instaladas incorrectamente							x			
Impeler bloqueado	x							x		
Bomba operando a velocidad cercana a la frecuencia natural del sistema								x		

Fuente: Flowserver, fundamentos sellos mecánicos

El primer paso que se debe seguir es categorizar la falla o el problema que se está presentando. El segundo establecer cuál es el síntoma que se está presentando. El tercer paso consiste en determinar cuál es el mecanismo de falla, dicho mecanismo es un proceso físico que conduce a la falla. Este puede ser, fuerza, temperatura, tiempo, reacciones al medio ambiente, etc.

El análisis de la falla determina la identificación de la causa raíz de la falla o del problema que se está presentando en el sistema.

**Tabla 2. Carta de identificación de averías.**

Problema	Causa	Solución
La bomba no puede funcionar	Fusible dañado	Reemplazar fusible dañado
	Dispositivo térmico de sobrecarga abierto en el arrancador	Resetear
	Cable roto	Localizar y reparar
	Voltaje bajo	Determinar la razón (sistema eléctrico puede ser inadecuado)
	Línea de descarga bloqueada	Remover masa bloqueante
	Líquido congelado en la bomba	Descongelar
La bomba no puede entregar la capacidad seleccionada	Hambruna en la succión	Reemplace la tubería de succión por una más grande o incremente la cabeza de succión
	Tubería con agujeros en la succión	Reparar o reemplazar tubería defectuosa
	Altura de succión excesiva	Reorganice la localización de los equipos para reducir la altura de succión
	Líquido cercano al punto de evaporación	Disminuya la temperatura o incremente la presión de succión
	Capacidad ajustada incorrectamente	Ajustar correctamente
	Empaquetaduras averiadas	Ajustar o reemplazar empaquetaduras
	Bomba operando a una velocidad incorrecta	Revisar la línea de voltaje y la frecuencia y comparar con la indicada en la placa de identificación del motor
	Asientos de válvula gastados o sucios, o ambos	Limpiar o reemplazar
	Viscosidad del líquido muy alta	
		Incrementar el tamaño de la tubería de succión
		Incrementar la presión de succión

Fuente: Flowserver, fundamentos sellos mecánicos

En la tabla 2 y 3 se presenta para cada problema o falla una posible causa y posibles soluciones. Se puede observar que un problema puede ser ocasionado por una o varias causas, por lo tanto es necesario revisar todas las causas raíces posibles con el fin de dar solución completa al problema.

**Tabla 3. Carta de identificación de averías.**

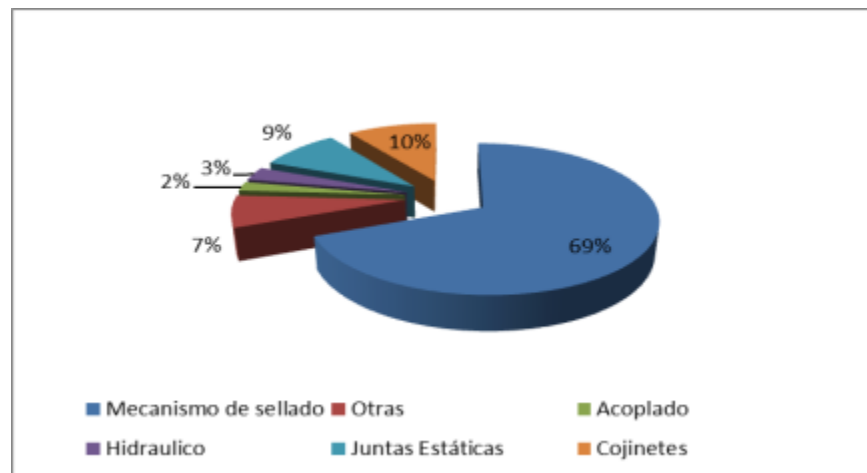
Problema	Causa	Solución
La bomba entrega fluido irregularmente	Tubería de succión está averiada	Reparar o reemplazar tubería
	Empaquetaduras averiadas	Reparar o reemplazar empaquetaduras
	Asientos de válvula gastados o sucios	Limpiar o reemplazar
	Estrangulación excesiva de las válvulas de bola	Limitar estrangulación a la tolerancia del fabricante
	Presión de succión insuficiente	Incrementar la presión de succión: 1) Incremente el nivel del tanque 2) Presurice el tanque de succión
	Líquido cercano al punto de evaporación	Reduzca la temperatura o incremente la presión de succión
El motor se sobrecalienta	Suministro de potencia no es la indicada para el motor	Compare el suministro de potencia con la indicada en la placa de identificación del motor
	Sobrecarga causada por operación de la bomba por encima de la capacidad indicada	Revise las condiciones de operación y compárelas con las especificaciones del fabricante de la bomba
	Empaquetaduras pegadas o lubricadas incorrectamente	Reajustar empaquetaduras y lubricar si es necesario
	Mecanismos de operación de la bomba no están lubricados correctamente	Revisar todos los puntos de lubricación
	Desalineación mecánica	Revisar la alineación de todas las partes
Ruido o golpeteo repetido con cada movimiento	Cavitación (Hambruna de la bomba)	1) Examine la tubería de succión por obstrucción en la tubería o válvulas en la succión 2) Revisar el valor de NPSH disponible en el sistema

Fuente: Flowserver, fundamentos sellos mecánicos

## 2.2 CAUSAS DE FALLAS EN LOS EQUIPOS ROTATIVOS

Como se puede observar en la gráfica 2, se presentan varias causas de fallas en equipos rotativos; siendo los mecanismos de sellado y cojinetes las principales causas de daño en estos equipos<sup>1</sup>.

**Gráfica 2. Causas de fallas equipo rotativo**



Fuente: Flowserver, fundamentos equipos rotativos.

## 2.3 PROCESO DE DESTILACIÓN DE CRUDOS

La U-150 procesa crudos con características especiales con destino a la producción de bases lubricantes y ceras. Crudos de base parafínica y Nafténica.

El crudo está compuesto por hidrocarburos de diferentes rangos de ebullición, desde metano hasta asfalto. Los hidrocarburos livianos (metano a butano), la gasolina y los destilados medios (Jet, Acpm y Gasóleo Liviano), son fraccionados en la sección atmosférica. En la sección al vacío, se obtienen las fracciones que tienen un punto de ebullición superior a la temperatura a la cual se empieza a

---

<sup>1</sup> Flowserver, fundamentos equipos rotativos.

presentar craqueo térmico (650-700 grados F). Este craqueo se minimiza reduciendo la presión parcial del hidrocarburo, con lo cual, a su vez, se disminuyen los puntos de ebullición de las fracciones. Para ello es necesario mantener ésta sección al vacío y diluir los vapores de hidrocarburo con vapor de agua, el cual actúa como un gas inerte.

**2.3.1 Sección de destilación atmosférica.** El crudo es precalentado en el tren de intercambiadores y calentado en el horno hasta una temperatura que permita la vaporización de los productos de cima y laterales de la torre. El efluente del horno se carga a la zona de vaporización instantánea (zona "flash"), de la torre atmosférica, donde el vapor y el líquido se separan.

La separación de los componentes de los productos es incompleta, ya que componentes de los productos laterales permanecen en la fase líquida y a su vez, componentes de los fondos se encuentran en la fase vapor. La fase líquida que sale de la zona flash, es despojada con vapor de agua para recuperar los componentes de los productos laterales y posteriormente se retira por el fondo de la torre como fondos atmosféricos o crudo reducido. Los vapores que salen de la zona flash, son fraccionados en la zona de lavado, que es la sección de la torre comprendida entre la zona flash y el plato colector del producto lateral inferior (gasóleo), para remover los componentes de los fondos atmosféricos, presentes en la fase vapor.

Los componentes más pesados de la fase vapor, son fraccionados y condensados en etapas, mediante los reflujos externos e internos, inducidos en la sección de reflujo circulante (PUMPAROUND). Los hidrocarburos condensados son retirados de la torre como corrientes laterales, los cuales normalmente son sometidos a despojo con vapor de agua, para removerles los componentes livianos de bajo punto de ebullición, que tienden a condensar con éstas corrientes. Sin embargo, en el caso de corrientes laterales de nafta de carga a unidades de reformado

catalítico, se despoja en un rehervidor para obtener una carga seca (menos de 100 ppm de agua).

Los componentes más livianos salen por la cima de la torre hacia un condensador, donde la nafta, el agua y parte del propano y butano, se condensan y pasan al tambor acumulador, que sirve para separar el gas de la fase líquida y la nafta del agua; y de almacenamiento para reflujo de cima.

**2.3.2 Pre calentamiento del crudo.** El crudo proveniente de los tanques de almacenamiento es bombeado mediante las P 150E/F. En la línea de succión de estas bombas existe facilidad para inyectar agua de dilución de sales. El crudo pasa por una serie de intercambiadores de calor crudo-productos/reflujos para obtener la temperatura que garantice la correcta operación del desalador.

En la descarga de las P-150E/F se halla la PICV-15004, la cual regula la presión en el desalador D-152, controlada por el PICT-15004 localizado en la línea de salida del D 152. El rango de control de presión para la corrida principal es de 220-250 psig.

Después de pasar por la PICV-15004, el crudo a cargar intercambia calor con el reflujo de cima de la T-131 en el intercambiador E-138, en donde el reflujo de cima fluye por lado casco y el crudo por el lado tubos. Posteriormente el crudo intercambia calor con los vapores de cima de la T-150 en los intercambiadores E-150C/D, dispuestos en paralelo, en donde los gases fluyen por el lado casco y el crudo por el lado tubos. El crudo fluye hacia el desalador D-152; antes de entrar se le inyecta agua de lavado, en una cantidad que fluctúa entre un 4-6% en volumen de la carga de crudo. El flujo de agua fresca se controla mediante el FIC-15008 y es bombeado del tambor acumulador de agua D-151 mediante la bomba P-158A/B. Al D-151 le llega condensado del sistema de cima de las T 150 y T 152 y una restitución permanente de agua clarificada que es controlada mediante la

LCV-15007. El agua antes de ser inyectada al crudo es precalentada en los intercambiadores de calor E-162 (con destilado liviano de T-132A) y E-161A/B (con el agua efluente del desalador). Un contactor estático garantiza una buena mezcla crudo-agua, con una caída de presión entre 3-6 Psig. La temperatura de operación del desalador es detectada por el TI-15001-2 localizado en la línea de entrada de crudo al D-152 con señal al DCS. El desalador dispone de una inyección de vapor de 150 psig para la remoción de lodos depositados en el fondo del mismo y de esta manera prolongar sus periodos de operación entre cada programa de limpieza interna. De otra parte, el agua salada que fluye del desalador es controlada mediante el AIC-15006A, que detecta el nivel de la interface crudo-agua. Un control adecuado para esta interface es de 50%.

Este AIC actúa sobre la válvula de control instalada a la salida del E-161A/B, la LCV-15006. El desalador tiene también el AIT-15006B que detecta alto nivel de la interface agua/crudo (con alarma al DCS); ésta debe ser máxima de 25%. Es muy importante mantener en buen control del AIC-15006A para evitar variaciones bruscas de operación en la T-152.

Para su protección por alta presión, el desalador posee una válvula de alivio de presión PSV 15001 (PSV-1333 alterna) con un set de presión de 275 psig, cuya descarga va a la zona flash de la T 150 mediante una línea de 6".

El crudo desalado fluye desde la cima del desalador, mediante control del PIC-15004 hacia los intercambiadores E-152A/B y E-167. El E-167 sirve como enfriador de Jet A que fluye por el lado casco, con crudo en el lado tubos; este intercambiador maneja parte del crudo en paralelo con los E-152A/B (Gasóleo/Crudo). Como el Delta de Presión por el lado crudo del E-167 es menor, en la entrada de este intercambiador se tiene un medidor de platina de orificio y una válvula globo, para distribuir adecuadamente el flujo de crudo.

El crudo proveniente de los intercambiadores E-152A/B y E-167 se une para intercambiar calor con el ACPM por el lado casco en los E-151A/B, posteriormente, el crudo pasa al E-137 donde intercambia calor con el destilado medio (pesado), para finalmente pasar por los E-136C y E-132, que están dispuestos en serie, donde intercambian calor con los fondos de vacío antes de llegar a la torre pre-flash T-152. En esta torre, se separan a temperaturas entre 210 y 297°F, los gases y un 50% de la nafta virgen contenida en el crudo (en el caso mezclado y nafténico es menor del 50%); y se obtiene un crudo separado o estabilizado que permite un descongestionamiento en el tren de precalentamiento y en el horno H-150.

El crudo separado o estabilizado una vez sale de la torre pre-flash, es bombeado mediante las bombas P-164C/D hacia el tren de precalentamiento conformado por los intercambiadores E-168, E-153 A/B, E-139 A/B, E-146, E-149, E-145 y E-144.

**2.3.3 Torre Pre-Flash.** El crudo en su recorrido entre las bombas de carga y la torre pre-flash sufre un calentamiento progresivo pasando por el intercambiador E-138 donde se calienta hasta unos 153 °F, luego en los intercambiadores E-150 C/D se calienta hasta unos 272 °F, en los E-167 y E-152 A/B alcanza una temperatura de 293°F, en el E-151 A/B se calienta hasta 331 °F y sigue su ascenso de temperatura después de pasar por el E-137 donde alcanza 343 °F y por último en los E-132 y E-136C eleva su temperatura hasta el valor de alimentación a la torre 347°F. Los vapores de cima salen de la torre preflash T-152, a una temperatura que es controlada y regulada por el TIC-15006 que actúa en cascada con el retorno de reflujo de cima FIC 15056. Adicionalmente, en esta línea, se posee indicación de temperatura en el TI 15075 Con el fin de controlar la corrosión en el sistema de cima (por la acción de los cloruros como ácido clorhídrico), se inyecta un químico neutralizante que se almacena en un “portafeed” y se bombea con una bomba neumática.

Los gases de cima fluyen hacia el enfriador con aire E-169A/B/C, la corriente efluente (nafta, agua y gases no condensables) van hacia el tambor acumulador separador de cima, D 162, el cual dispone de una bota separadora de condensado, que mediante control del LC 15022 fluye al tambor acumulador de condensado D-151. La nafta acumulada es succionada por las P-151C/D de donde parte va como reflujo de cima a la T-152 y parte, controlando el nivel del tambor mediante el LIC-15021, se bombea a la planta de tratamiento con soda como nafta producto.

**2.3.4 Fraccionamiento T-150.** El crudo calentado y parcialmente vaporizado entra a la torre de destilación atmosférica, T 150, a la altura de la zona de vaporización instantánea. La fracción líquida de la carga de crudo fluye hacia el fondo de la torre donde existen 4 platos (zona de despojo) y la fracción vaporizada asciende hacia la zona de fraccionamiento, donde se dispone de 25 platos y dos lechos empacados.

**2.3.5 Sistema de Cima T-150.** Los vapores de cima salen de la torre atmosférica, a una temperatura que es controlada y regulada por el TRC-15002 que actúa en cascada con el retorno de reflujo de cima FRC 15002. Adicionalmente, en esta línea, se posee indicación de temperatura en el TI 15001-11 Con el fin de controlar la corrosión en el sistema de cima (por la acción de los cloruros como ácido clorhídrico), se inyecta un químico neutralizante que se almacena en un “portafeed” y se bombea con una bomba neumática. Los gases de cima fluyen a intercambiar calor con crudo en los E-150C/D dispuestos en paralelo. Antes de los E-150C/D se encuentran instaladas 3 válvulas de seguridad las cuales disparan hacia la tea cuando se sobre presiona la T-150. Estas válvulas están calibradas para disparar a 50, 52 y 53 psig. El flujo que sale del E-150C/D cae por gravedad hacia el enfriador con aire E-170A/B. La corriente efluente del E-170A/B (nafta, agua y gases no condensables) va hacia el tambor acumulador separador de cima D-150, el cual dispone de una bota separadora de condensado, que mediante

control del LIC-15008 fluye al tambor acumulador de condensado D-151. La nafta acumulada fluye a la succión de las P-165A/B de donde parte va como reflujo de cima a la T-150 y parte, controlando el nivel del tambor mediante el LIC 15001, se bombea a la planta de tratamiento con soda como nafta producto. Dicha producción se registra en el FR-15010.

Los gases no condensables que salen del D-150 fluyen hacia el cabezal de gas de las unidades de cracking catalítico o a la tea. El control de presión de la T-150 se efectúa mediante el PRC-15001 que actúa con rango dividido sobre las válvulas PRCV-15001A (salida de gas a las unidades de cracking catalítico), PRCV-15001B por la cual se admite gas de la red de gas combustible en aquellos casos de depresionamiento del sistema y PRCV 15001C (salida de gases hacia la tea).

**2.3.6 Circuito de Jet-A.** El Jet-A producto extraído del plato 20 de la T-150 entra al despojador de Jet A T-151A. El régimen de extracción es regulado por el LIC-15003 que controla el nivel de líquido en el fondo del despojador T-151A. Los vapores de cima del despojador retornan a la T-150 por encima del mismo plato 20. El despojo se hace con vapor recalentado de 50 psig, a través de 4 platos tipo válvula. El flujo de vapor de despojo se regula con el FIC-15017. El Jet-A sale del fondo del despojador a la succión de las bombas de producto P-152A/B de donde es enviado al E-167 y posteriormente al enfriador con aire E-156, de donde fluye hacia el E-163 (enfriador con agua). De allí fluye a la planta de tratamiento con soda. Su producción se regula con la FRCV-15003 localizada antes del enfriador E-163 y antes de salir a tratamiento.

**2.3.7 Circuito de ACPM.** El ACPM se extrae del plato 13 de la T-150 y entra al despojador de ACPM T-151B. El flujo de extracción es regulado por el LIC-15004 que controla el nivel de líquido en el fondo del despojador. Los vapores de cima del despojador retornan a la T-150 por encima del plato 13. El despojo se hace con vapor de 50 psig recalentado, a través de 4 platos tipo válvula. El flujo de

vapor de despojo se regula FIC-15018. El ACPM sale del fondo del despojador a la succión de las P-153C/D de donde es enviado a ceder calor al crudo en los E-151A/B, posteriormente se enfría con aire en el E-157 y finalmente se enfría con agua en el E-164. La producción de ACPM se regula con el FIC-15004 localizado después del enfriador E-164 y antes de ser enviado a almacenamiento.

**2.3.8 Circuito de Gasóleo.** El gasóleo se extrae del plato 8 de la T-150 y entra al despojador de gasóleo T-151C. El flujo de extracción de gasóleo es regulado por el LIC-15005 que controla el nivel en el fondo del despojador. Los vapores de cima del despojador retornan a la T-150 por encima del mismo plato 8. El despojo se hace con vapor recalentado de 50 psig, a través de 4 platos tipo válvula. El flujo de vapor despojador se regula con el FIC-15019. El gasóleo sale del fondo del despojador a la succión de las P-156C/D de donde es enviado al “manifold” de mezcla con gasóleo y reciclo provenientes de la U-200 y con destilado pesado de la T-132C, para luego ceder calor al crudo en el E-152A/B y finalmente ser enfriado con aire en el E-158. La producción de gasóleo atmosférico se regula con el FIC-15005 localizado antes del E 152A/B.

**2.3.9 Circuito de Reflujo Medio.** La T-150 dispone de dos zonas empacadas para mejorar la transferencia de masa y calor líquido/gases. Las zonas empacadas están constituidas por varios tramos de láminas llamadas Gempack. Una de estas zonas empacadas corresponde a la sección de reflujo medio, localizada entre los platos 19 y 20. El reflujo medio se extrae del plato 20 y retorna por encima de la zona empacada de la respectiva sección de reflujo medio. El reflujo fluye a la succión de las bombas de reflujo medio P-157A/B. La P-157B sirve, también, de auxiliar a la bomba de reflujo inferior P-155. De la descarga de las P-157A/B el reflujo medio fluye a donde cede calor al crudo en los E 153A/B, para posteriormente entrar al intercambiador con crudo E-168 y finalmente enfriarse con agua en el E-166, donde se controla la temperatura de retorno de reflujo mediante la válvula de 3 vías TICV-15003. El régimen de reflujo

medio se controla mediante el FIC-15006. Entre la TICV-15003 y la FICV-15006 se encuentra una pareja de filtros para garantizar un reflujo limpio.

**2.3.10 Circuito de Reflujo Inferior.** La segunda zona empacada corresponde al reflujo inferior y se encuentra localizada entre los platos 12 y 13. El reflujo inferior se extrae del plato 13 y retorna por encima de la zona empacada de la respectiva sección de reflujo inferior. El reflujo fluye a la succión de las bombas de reflujo inferior P-155 y su auxiliar P-157B, de donde va a ceder calor al crudo en los E-149, E-146 para entrar posteriormente a los enfriadores con agua E-160 y E-159, donde se controla la temperatura de retorno del reflujo mediante la válvula de 3 vías TICV-15004. El régimen de reflujo inferior se regula mediante el FRC-15007. Una pareja de filtros se encuentra entre la TICV-15004 y la FICV-15007 para garantizar un reflujo limpio.

**2.3.11 Zona de despojamiento T-150.** La fracción líquida de la carga fluye al fondo de la torre a través de 4 platos tipo válvula donde se despojan los hidrocarburos livianos mediante vapor recalentado de 50 psig, que se inyecta en el fondo de la columna, y bajo control de flujo por medio del FIC-15020.

El nivel del crudo reducido acumulado en el fondo, se monitorea por medio del nivel de vidrio (LG) y un indicador de nivel LI-15002, los cuales cuentan con purga de gas en la toma superior y purga desde el cabezal de aceite liviano de ciclo por la toma inferior.

El crudo reducido sale del fondo de la T-150 hacia el tambor acumulador de crudo reducido D-131. El FI-15011 indica la cantidad de crudo reducido. El nivel de fondo de la T-150 se controla por vasos comunicantes con el nivel del D-131. El nivel del D-131 se controla desviando crudo reducido a otras unidades a través del LICV 1301. El D-131 tiene también facilidades para recibir crudo reducido de otras unidades.

## 2.4 SECCIÓN DE DESTILACIÓN AL VACIO

Esta sección es operada a la mínima presión de vacío prácticamente posible (normalmente 29" de mercurio), a fin de obtener la máxima vaporización del hidrocarburo para una temperatura dada en la zona flash, que generalmente está limitada a 750 grados F, por consideraciones de craqueo térmico y calidad de los productos.

Los fondos atmosféricos se cargan al horno de vacío, del cual salen parcialmente vaporizados, hacia la zona flash de la torre. La fase líquida se despoja con vapor de agua y se retira por el fondo de la torre como fondos de vacío, los cuales normalmente se envían hacia una nueva etapa de procesamiento (extracción con solvente o viscorreducción), a fin de recuperar productos valiosos y disminuir la viscosidad de ésta corriente.

Los vapores de la zona flash son fraccionados en la zona de lavado para retirar los componentes de los fondos, presentes en ésta fase, y los contaminantes de los productos laterales.

Generalmente, cuando la operación está dirigida hacia la producción de combustibles, en la sección al vacío de las unidades de destilación primaria, se obtiene un solo producto lateral (gasoleo), que se carga a las unidades de ruptura catalítica para la producción de gasolina como producto principal. Con crudos de bases lubricantes, la torre de la sección al vacío se opera para obtener dos o más productos laterales de alto punto de ebullición, que se utilizan como materia prima para la producción de diferentes tipos de bases lubricantes.

La corriente de cima de la torre al vacío está compuesta por vapor de agua e hidrocarburos condensables y no condensables que provienen, los segundos, del craqueo térmico que se presenta por las altas temperaturas utilizadas en la

sección al vacío, mientras que los condensables resultan del despojo incompleto en el fondo de la torre atmosférica y del arrastre de líquido del plato de cima de la torre al vacío. Los hidrocarburos condensables son recuperados y se envían como gasóleo producto.

**2.4.1 Zona de Fraccionamiento T-131.** El crudo reducido calentado y parcialmente vaporizado entra a la zona de vaporización instantánea de la T-131. La fracción líquida de la carga fluye al fondo de la torre a través de 4 platos tipo válvula y la parte vaporizada asciende hacia la zona de fraccionamiento donde se dispone de 3 platos y 5 lechos empacados.

**2.4.2 Circuito de Cima T-131.** Los vapores de cima de la torre al vacío T-131 se componen de vapor de agua, hidrocarburos livianos y gases no condensables, los cuales antes de salir de la torre pasan a través de una malla Demister con el fin de eliminar los arrastres de líquido en la corriente. Esta corriente es succionada por el eyector primario J-130 el cual la descarga al condensador con agua E-140, donde la mayor parte de los vapores se condensan. Los vapores que no logran condensarse son extraídos del E-140 por 3 eyectores secundarios (J-131A/B/C), que lo descargan al condensador con agua E-142. Los no condensables son succionados por 3 eyectores terciarios (J-132 A/B/C), que los descargan hacia el condensador con agua E-143 de donde finalmente los últimos gases no condensables circulan el tambor acumulador de sello D-134.

El condensado y aceite de los condensadores E-140, E-142 y E-143 caen a través de tuberías individuales hacia el D-134. El extremo de descarga de los condensadores penetra cierta longitud dentro del D-134 y éste mediante control de nivel del agua garantiza un sello para impedir la entrada de aire o gases al sistema. Los gases no condensables existentes en el D-134 son succionados por un eyector cuaternario (J-133) hacia la conexión a la tea o hacia la facilidad de

venteo a la atmósfera, con el objetivo de mantener una diferencial de presión entre el líquido de los condensadores y el acumulador.

El D-134 tiene internamente una platina separadora (baffle) la cual mediante un adecuado control de nivel de agua, rebosa el aceite que se acumula en su superficie y hace que caiga en la sección acumuladora de aceite de relojera.

El aceite acumulado fluye a la succión de la bomba P-141A/B de donde es enviado hacia tanques de gasóleo mediante control de nivel del LSLH-1309, el cual arranca la P-141A/B automáticamente, cuando el nivel de gasóleo de relojera esté alto o la para cuando esté bajo.

En la otra sección del D-134, debido a la condición de vacío existente se tiene la bomba P 142, con el fin de descargar el agua obtenida bajo control de nivel a través del LCV 1302B hacia el drenaje de aguas aceitosas. Igualmente se cuenta con la facilidad de drenar por gravedad hacia un tambor separador mediante control de nivel del LIC-1302. De este separador el agua fluye hacia el colector de aguas aceitosas. El separador en la parte superior cuenta con un venteo para desfogar vapores hacia la tea.

**2.4.3 Circuito de Reflujo de Cima, Reflujo Caliente y Gasóleo Liviano de Vacío.** La corriente de gasóleo liviano de vacío (GLV) se extrae de la batea acumuladora localizada entre los platos 3 y 4, la cual posee un control de temperatura que fija el perfil de temperaturas en la sección de fraccionamiento de la torre al vacío T-131, y por consiguiente, en un alto porcentaje, el control de especificaciones de los productos. El GLV fluye a la succión de las P-133A/B, de donde una parte es enviada como reflujo caliente directamente sobre el plato 4 (por debajo de la batea) para controlar la temperatura de la batea. La otra fracción de GLV es enviada a ceder calor al crudo en el E-138 y posterior enfriamiento con agua en el E-131A/B. Parte de esta corriente es enviada como reflujo de cima a la

T-131 mediante control de flujo del FIC-1304 y la otra que fluye por control de nivel de la batea LRC-1305 es el corte de gasóleo liviano de vacío producto, que se registra en el FR-1312 y es enviado a tanques de almacenamiento junto con el gasóleo de relojera del sistema de cima de T-131.

#### **2.4.4 Circuito de Destilado Liviano (Parafínico) o Destilado Medio (Nafténico).**

El destilado liviano producto (o medio nafténico), se extrae del colector bajo el lecho #1 de la T-131 y entra al despojador T-132A. El flujo es regulado por el LIC-1306 que controla el nivel de líquido en el fondo del despojador. Los vapores de cima del despojador retornan a la T-131 abajo del lecho #1.

El despojo se hace con vapor recalentado de 25 psig a través de 4 platos tipo válvula. El flujo de vapor de despojo se regula con el FIC-1327. El destilado liviano sale del fondo del despojador a la succión de las P-134A/B de donde es enviado al intercambiador con agua al desalador E-162, de donde posteriormente pasa al enfriador con agua E-133. Su producción se regula mediante el FRC-1305 localizado antes del E-162. Finalmente es enviado a almacenamiento como destilado liviano.

#### **2.4.5 Circuito de Destilado Medio (Parafínico) o Destilado Pesado (Nafténico).**

El destilado medio/pesado se extrae del colector bajo el lecho #3 y entra al despojador T-132B. El flujo es regulado por el LIC-1307 que controla el nivel de líquido del fondo del despojador. Los vapores de cima del despojador retornan a la T-131 abajo del lecho #3. El flujo de vapor recalentado de 25 psig, que se usa como medio de despojo a través de 4 platos tipo válvula, se regula con el FIC-1328. El destilado medio/pesado sale del fondo del despojador a la succión de las P-135A/B de donde fluye mediante control de producción en el FRC-1306 a intercambiar calor con el crudo en el E-145 y el E-137, posteriormente es enfriado con agua en el E-134 y finalmente enviado a tanques de almacenamiento ya sea como destilado o como gasóleo.

**2.4.6 Circuito de Reflujo Inferior y Destilado Pesado (parafínico) o Destilado Cilindro (Nafténico).** El destilado pesado/cilindro se extrae del colector bajo el lecho #4 de la T-131 y entra al despojador T-132C. El flujo es regulado por el LIC-1308 que controla el nivel del líquido del fondo del despojador. Los vapores de cima del despojador retornan a la T-131 por debajo del lecho #4. El flujo de vapor recalentado que se usa como medio de despojo fluye a través de 3 platos tipo válvula y se regula con el FIC-1329. El destilado pesado/cilindro sale del fondo del despojador a la succión de las P-136A/B y se divide en tres corrientes: una fracción va como reflujo caliente inferior mediante control del FRC-1313 sobre el lecho #5 de la T-131, actuando como corriente de lavado, otra fracción se mezcla con el gasóleo atmosférico y el proveniente de la U-200 y se lleva a enfriamiento con crudo en los E-152A/B y la tercera se enfría con agua en el E-135 de donde la FRCV-1307 regula el flujo de “cilindro” a almacenamiento.

**2.4.7 Circuito de Reflujo Medio T-131.** El reflujo medio se extrae del colector bajo el lecho #2 y retorna sobre el mismo lecho. El reflujo medio fluye a la succión de las P-139A/B de donde pasa a ceder calor al crudo en los intercambiadores E-139A/B y posteriormente va a enfriamiento con agua en el E-141A donde se controla mediante válvula de tres vías la temperatura de retorno de reflujo medio (TRCV-1304).

2.4.8 Circuito de Reciclo. El reciclo se extrae del plato colector bajo el lecho 5 y fluye al tambor acumulador D-135, de donde es succionado por las P-138 A/B. El reciclo es bombeado, parte sobre el plato 22 de la T-131 mediante control de flujo del FRC-1309 y parte mediante control de nivel del D-135 (LIC-1303) hacia el tambor de carga de crudo reducido D-131, registrado por el FR-1309.

2.4.9 Zona de Despojamiento T-131. La fracción líquida de la carga fluye al fondo de la torre al vacío a través de 4 platos tipo válvula donde se despojan los hidrocarburos livianos mediante vapor recalentado inyectado al fondo de la torre. Su flujo se regula por medio del FIC-1330 y el FIC-1331.

Los fondos de vacío pasan al D-133 y de allí son succionados con las P-137C/D. Los fondos de vacío normalmente se dividen en dos corrientes; la primera es enviada a ceder calor al crudo en el E-144 y la otra fracción de los fondos se carga al horno de vacío. La que se ha enfriado en el E-144 se reparte en dos corrientes; una retorna como circulación al fondo de la T-131 (medido por el FI-1301) y la segunda (controlando el nivel del D-133 con el LIC-1304) es enviada a ceder calor al crudo en los E-132, E-136C, para posteriormente ser enfriados con agua en el E-141B (si se requiere). Finalmente los fondos de vacío de la T-131 son enviados como asfalto o fondos parafínicos a almacenamiento o en su defecto a la unidad de balance como carga a Demex.

### 3. RODAMIENTOS

#### 3.1 VIDA DEL RODAMIENTO

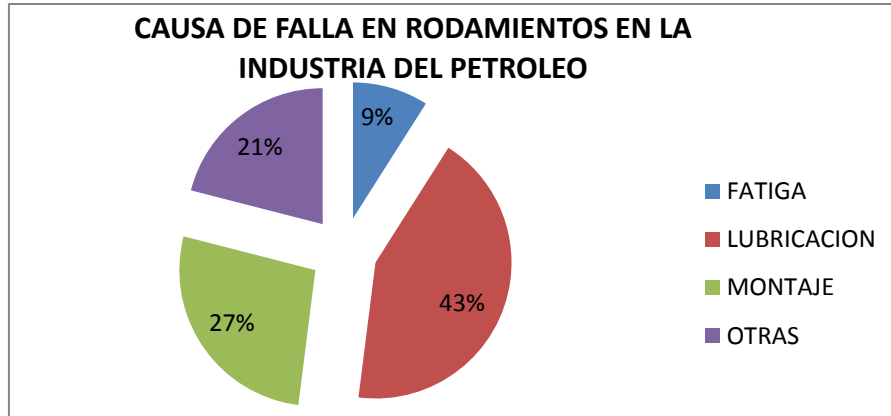
Las distintas funciones requeridas a los rodamientos varían según la aplicación del rodamiento. Estas funciones se deben ejecutar durante un período de tiempo prolongado. Aunque los rodamientos estén montados adecuadamente y funcionen correctamente, finalmente dejarán de funcionar satisfactoriamente debido al aumento de ruido y vibración, a la pérdida de precisión en el funcionamiento, al deterioro de la grasa o a la descamación por fatiga de las superficies rodantes.<sup>2</sup>

La vida del rodamiento, en el sentido amplio de la palabra, es el período durante el cual los rodamientos siguen en funcionamiento y cumplen las funciones para las que están diseñados. Esta vida del rodamiento se puede definir como la vida frente al ruido, la vida frente a la abrasión, la vida de la grasa o la vida frente a la fatiga de los elementos rodantes, dependiendo de cuál de ellas provoca la pérdida de servicio del rodamiento. Además de los fallos debidos al deterioro natural, los rodamientos también pueden fallar en condiciones como deformación por calor, fractura, arañazos en los anillos, daños en los sellados o en la jaula, u otro tipo de daños. Este tipo de condiciones no deberían interpretarse como fallos normales de los rodamientos, ya que a menudo se producen como resultado de errores en la selección del rodamiento, un diseño o entorno de funcionamiento del rodamiento inadecuados, un montaje incorrecto o un mantenimiento insuficiente. En la industria del petróleo las principales fallas del rodamiento han sido por lubricación como se muestra en la gráfica 3.

---

<sup>2</sup> Catálogo de rodamiento NSK No.E1102c.

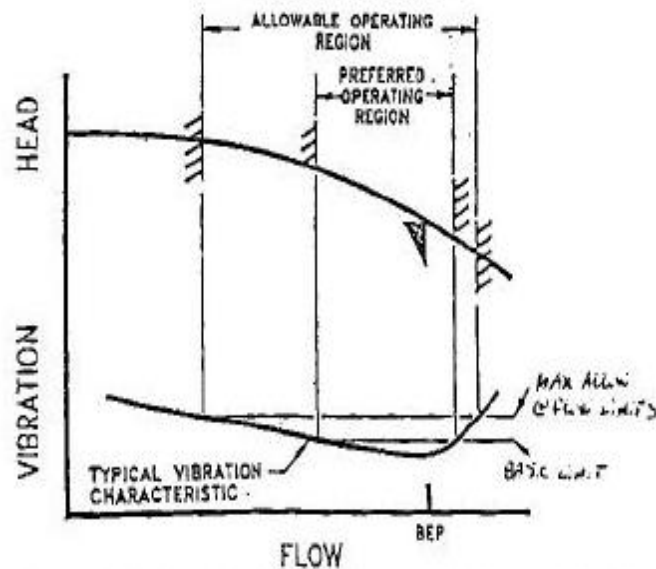
**Gráfica 3. Causa de fallas en rodamientos en bombas centrífugas.**



Fuente. Flowserver, fundamentos rodamientos

Según los históricos de fallas de los últimos 5 años la principal causa de falla es por operar los equipos por debajo del flujo mínimo los que causas que se genere mayores fuerzas radiales y axiales que ocasionan altas vibraciones como se muestra en la gráfica 4 acortando la vida útil del rodamiento.

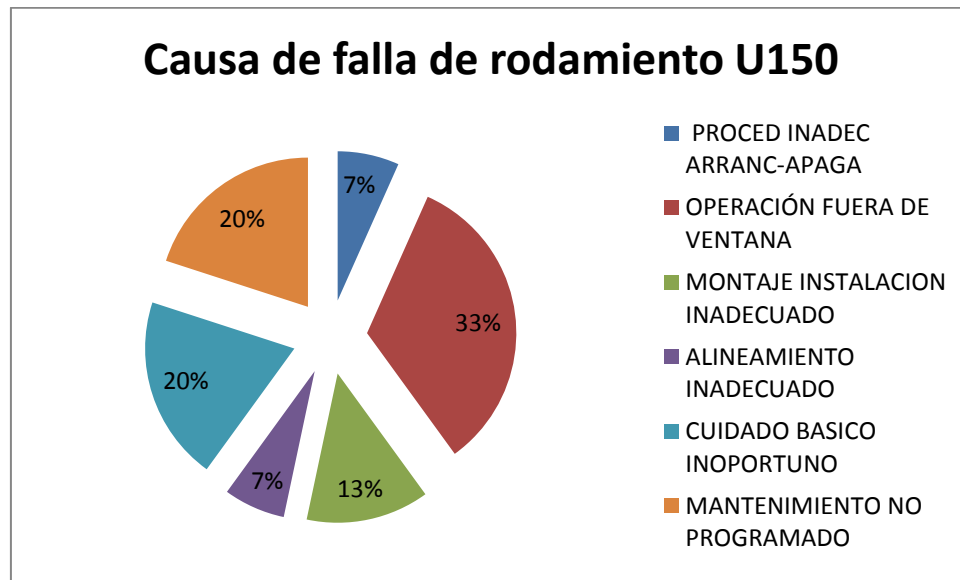
**Gráfica 4. Región de operación preferida. Vibración Versus flujo**



Fuente: Effect of mechanical unbalance on vibrations, forces and reliability of a single-stage centrifugal pump.

En la gráfica 5 se muestra todas las causas de fallas de los rodamientos que fallaron en los 15 equipos durante el periodo del 2008 al 2012 en la unidad de Destilación de crudos I50.

**Gráfica 5. Causas de fallas en rodamientos U150.**



Fuente: Autores.

### **3.1.1 Índice básico de vida y vida frente a la fatiga de los elementos rodantes.**

Cuando los rodamientos funcionan bajo carga, las pistas de rodadura de sus anillos interior y exterior y los elementos rodantes están sujetos a un stress cíclico repetido. Debido a la fatiga del metal de las superficies de contacto rodantes de las pistas de rodadura y los elementos rodantes, es posible que se desprendan pequeñas partículas del material del rodamiento (Fig. 2). Este fenómeno se conoce como “descamación”. La vida frente a la fatiga de los elementos rodantes viene representada por el número total de revoluciones a partir del cual la superficie del rodamiento empezará a descamarse debido al stress.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Catálogo de rodamiento NSK No.E1102c.

**Figura 2. Ejemplo de agrietamiento en la superficie con pérdida de material poco profundo micropicado (descamación)**



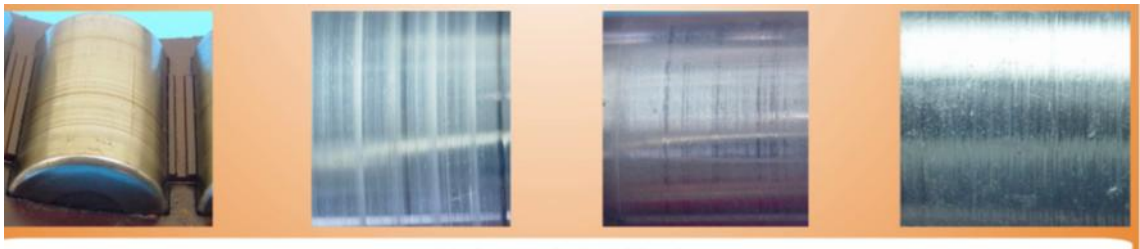
Fuente. Modos de fallas comunes de rodamientos, departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica AFIS.

Este fenómeno se conoce como vida frente a la fatiga. Incluso para los rodamientos aparentemente idénticos, del mismo tipo, tamaño y material y reciben el mismo tratamiento térmico u otros procesos, la vida frente a la fatiga de los elementos rodantes varía enormemente, incluso bajo condiciones de funcionamiento idénticas. Esto es debido a que la descamación de los materiales debida a la fatiga está sujeta a muchas otras variables. En consecuencia, “el índice básico de vida”, en que se trata la vida frente a la fatiga de los elementos rodantes como un fenómeno Estadístico, se utiliza antes que la vida real frente a la fatiga de los elementos rodantes. Supongamos que un número de rodamientos del mismo tipo funcionan individualmente bajo las mismas condiciones. Después de un cierto período de tiempo, el 10% de ellos fallan como resultado de la descamación producida por la fatiga de los elementos rodantes. En este caso, el número total de revoluciones se define como el índice básico de vida o, si la velocidad es constante, el índice básico de vida a menudo se expresa como el número total de horas de funcionamiento completadas cuando el 10% de los rodamientos pasan a no ser operativos debido a la descamación.

A continuación se mostraran otros modos de fallas más comunes en los rodamientos.

**3.1.1.1 Desgaste abrasivo.** Como se muestra en la figura 3 se generación de un rayado abrasivo sobre la superficie de rodadura y también sobre las jaulas, indicando que se está perdiendo material por abrasión.

**Figura 3. Ejemplo de desgaste abrasivo.**

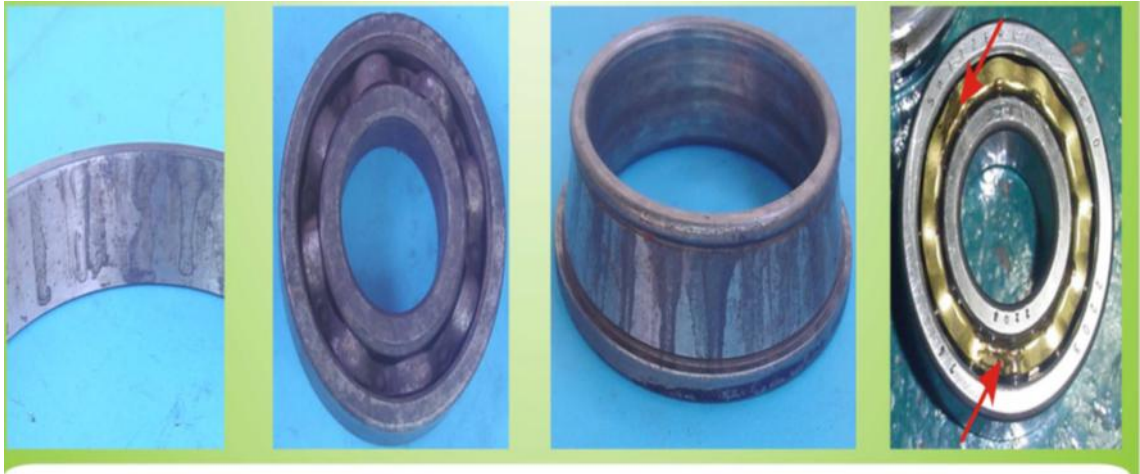


Fuente. Modos de fallas comunes de rodamientos, departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica AFIS.

Las principales causas son por contaminación del lubricante con partículas abrasivas provenientes del medio o partículas metálicas provenientes de zonas desgastadas, problemas en sellos y/o filtrado en el sistema de lubricación o mantenimiento inapropiado que permite el acceso de partículas al lubricante.

**3.1.1.2 Corrosión.** Se genera ataque corrosivo sobre las superficies de rodadura o las jaulas, por la acción del lubricante o de otro fluido que entra en contacto con el rodamiento, generándose daño superficial y depósitos. Se puede presentar corrosión generalizada, por gradiente de concentración o por rendija, con mecanismos uniforme o por picadura.

**Figura 4. Ejemplo de corrosión en la superficie localizado y generalizada.**



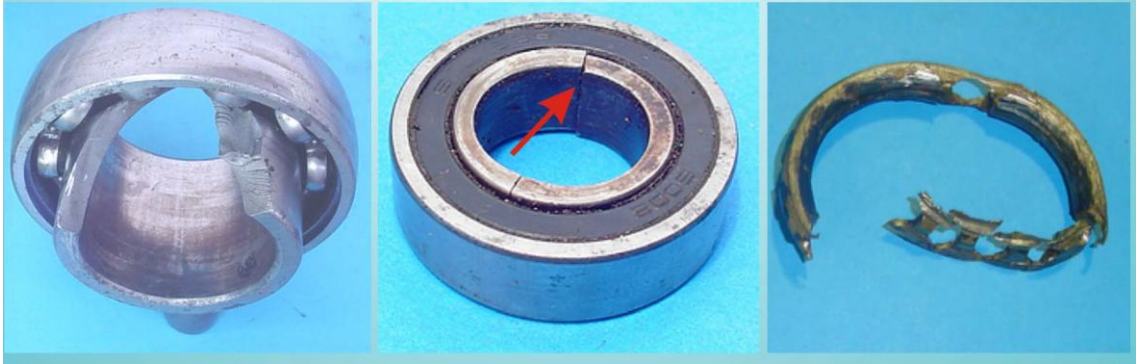
Fuente. Modos de fallas comunes de rodamientos, departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica AFIS.

Algunas causas de la corrosión en los rodamientos son:

- Contaminación del lubricante con agua, otros contaminantes o fluidos de la máquina.
- Degradación del lubricante por tiempo o por sobret temperatura.
- Mala selección del lubricante por ausencia o deficiencia de adictivos antioxidantes y antiherrumbre.
- Problemas en sellos del sistema de lubricación.

**3.1.1.3 Factura.** Las pistas o las jaulas presentan agrietamiento o fractura en montaje o servicio, llevando algunas veces a destrucción total del rodamiento. Estas fracturas generalmente súbitas.

**Figura 5. Ejemplo de fractura en el rodamiento.**



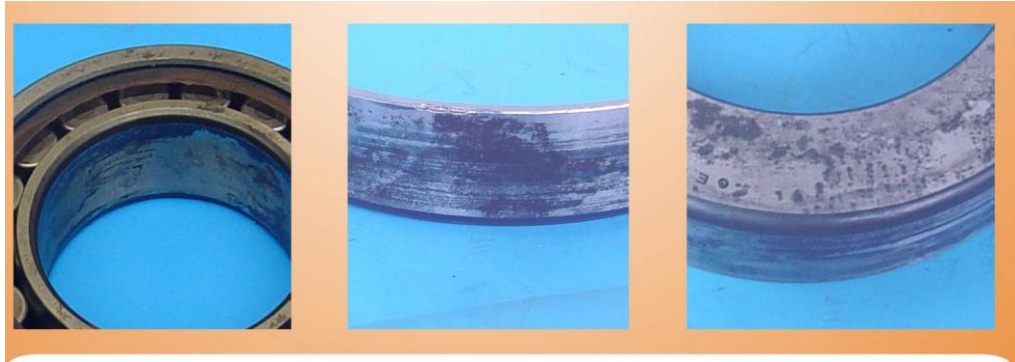
Fuente. Modos de fallas comunes de rodamientos, departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica AFIS.

Algunas causas de las fracturas son:

- Montaje incorrecto con impactos o excesiva fuerza de apriete.
- Mala lubricación, carga excesiva o desgaste adhesivo.
- Excesiva velocidad y/o alta vibración crítica para las jaulas.
- Desalineamiento, lubricante contaminado con partículas, consecuencia de picaduras e indentaciones, giro por ajuste muy holgado o mecanizado irregular de eje o alojamientos.

**3.1.1.4 Ludimientos.** Se presenta depósitos oscuros en las superficies de apoyo con el eje o su alojamiento, indicando que en servicio se dieron pequeños movimientos oscilantes entre las partes (desgaste y/o oxidación).

**Figura 6. Ejemplo de Ludimientos en el rodamiento.**



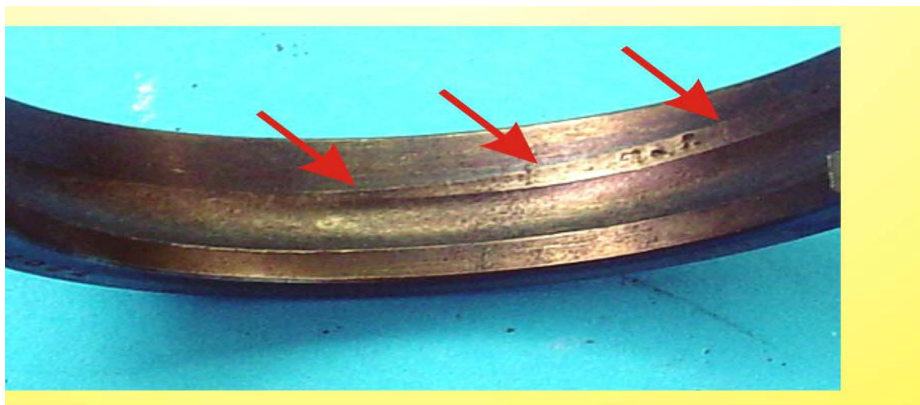
Fuente. Modos de fallas comunes de rodamientos, departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica AFIS.

Algunas causas son:

- Selección de ajuste muy holgado.
- Mecanizado irregular de eje o alojamiento, que no genera presión uniforme.
- Carga elevada o altos estado vibratorio de la máquina.
- Deflexiones excesivas de eje o alojamientos en servicio.

**3.1.1.5 Rodadura irregular.** El rodamiento presenta un camino oblicuo de rodadura de sus elementos rodantes sobre las pistas.

**Figura 7. Ejemplo de rodadura irregular en la pista de un rodamiento**



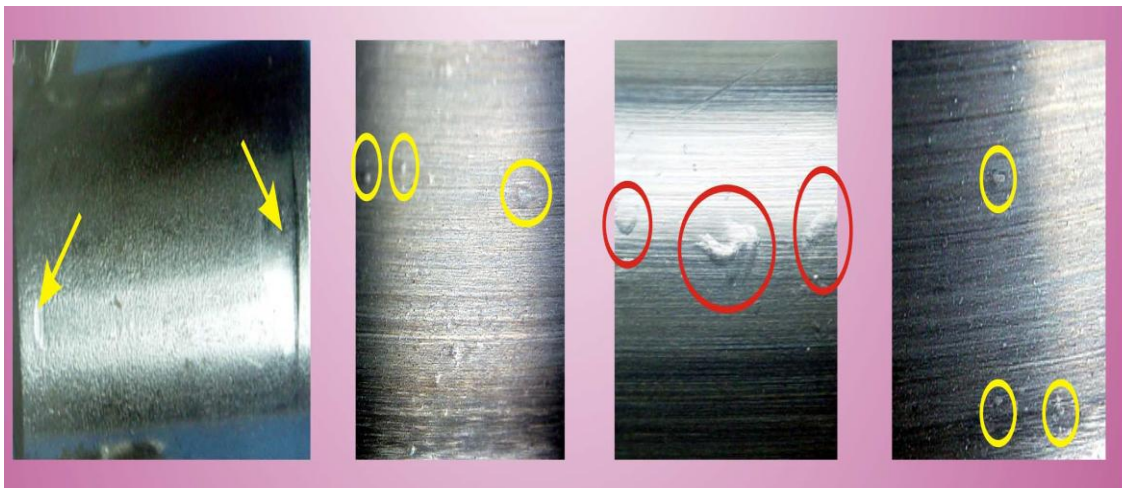
Fuente. Modos de fallas comunes de rodamientos, departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica AFIS.

Algunas causas son:

- Desalineamientos o mal montaje, diseños incorrectos que dejan rodamientos muy juntos o demasiado separados sobre el mismo eje, orientación anormal de las cargas en servicio.
- Deflexión excesiva de eje o alojamientos en servicio.

**3.1.1.6 Indentación.** Se trata de generación de cráteres o hendiduras sobre las superficies de rodadura, producto de la deformación plástica derivada de fuerzas de contacto excesivas entre los elementos del rodamiento (microindentaciones) y/o por presencia de partículas contaminantes entre ellos (microindentaciones).

**Figura 8. Ejemplo de indentación en la pista del rodamiento.**



Fuente. Modos de fallas comunes de rodamientos, departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica AFIS.

Algunas causas son.

- Contaminación del lubricante con partículas abrasivas provenientes del medio.
- Contaminación del lubricante con partículas metálicas provenientes de una zona desgastada.
- Problemas en sellos y/o filtrado del sistema del sistema de lubricación.

- Sobrecarga sobre el rodamiento especialmente por impactos durante operación o un mal montaje.
- Fuerza de apriete (montaje) elevada.

**3.1.1.7 Desgaste adhesivo.** Se presenta en servicio pérdida de material por contacto metal-metal entre las partes en rodamiento incluyendo las jaulas, producto de la pérdida parcial o total de la película lubricante. Si la pérdida de lubricación es parcial las zonas de contacto se pulen y si es total se eleva fuertemente la temperatura quemando el lubricante, oxidándose las partes o incluso fundiéndose.

**Figura 9. Ejemplo de desgaste adhesivo en rodamiento.**



Fuente. Modos de fallas comunes de rodamientos, departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica AFIS.

Algunas causas son.

- Lubricante inapropiado por baja viscosidad y/o bajo índice de viscosidad y/o falta de aditivos de extrema presión y/o temperatura de operación alta.
- Lubricación inapropiada por bajo caudal y/o baja presión.
- Degradación del lubricante por sobretemperatura y/o contaminación con otros fluidos.
- Sobrevelocidad y/o sobretemperatura de operación

**3.1.1.8 Descarga eléctrica.** Por paso de corriente eléctrica AC o DC a través del rodamiento se genera arcos eléctricos entre los elementos rodantes. Las pistas y las jaulas, que erosionan las superficies debido a fusión a pequeña escala. Producto de los arcos se pueden generar patrones de estrías o cráteres profundos si la corriente es alta.

**Figura 10. Ejemplo de estrías por corriente eléctrica.**



Fuente. Modos de fallas comunes de rodamientos, departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica AFIS.

Algunas causas son:

- Problemas en el aislamiento eléctrico, contaminación en el lubricante con líquidos o partículas conductoras o ausencia de polo a tierra en maquinaria que lo requiera.
- Proceso de reparación inadecuado por soldadura de una máquina. Que haga circular la corriente a través de los rodamientos (inapropiada ubicación de la pinza o masa).

## **3.2 CALCULO DE VIDA TEORICA DE OPERACIÓN DE LAS BOMBAS**

**3.2.1 Índice básico de carga.** El índice básico de carga se define como la carga constante aplicada a los rodamientos con anillos exteriores estáticos que pueden soportar los anillos interiores para un índice de vida de un millón de revoluciones (10<sup>6</sup> rev). El índice básico de carga de los rodamientos radiales se define como

una carga radial central de dirección y magnitud constantes, mientras que el índice básico de carga de los rodamientos de apoyo se define como una carga axial de magnitud constante en la misma dirección que el eje central.

**3.2.2 Índice básico de vida.** Se define la **vida** de un rodamiento como la duración de tiempo, o el número de revoluciones, que el rodamiento funciona hasta que aparece un desconche por fatiga de una determinada dimensión. Debido a que los fenómenos de fatiga en metales son tan solo controlables de modo estadístico, es imposible predeterminar de modo exacto la vida de un rodamiento en concreto.

Un número de rodamientos del mismo tipo son utilizados individualmente bajo las mismas condiciones. Tras un cierto mismo periodo de tiempo, un 10% de los rodamientos fallan como resultado de descamación causada por la fatiga de rodadura.

Se conoce como índice básico de vida el cálculo L10 el valor de L10 para expresar la vida que un rodamiento en concreto alcanzará en unas determinadas condiciones de funcionamiento.

Para rodamientos deBolas	$L_{10} = \left(\frac{C_r}{P}\right)^3$	$L_{10} = \left(\frac{C_r}{P}\right)^{\frac{10}{3}}$	Para rodamientos de Rodillos
	$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \cdot \left(\frac{C_r}{P}\right)^3$	$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \cdot \left(\frac{C_r}{P}\right)^{\frac{10}{3}}$	

(1)

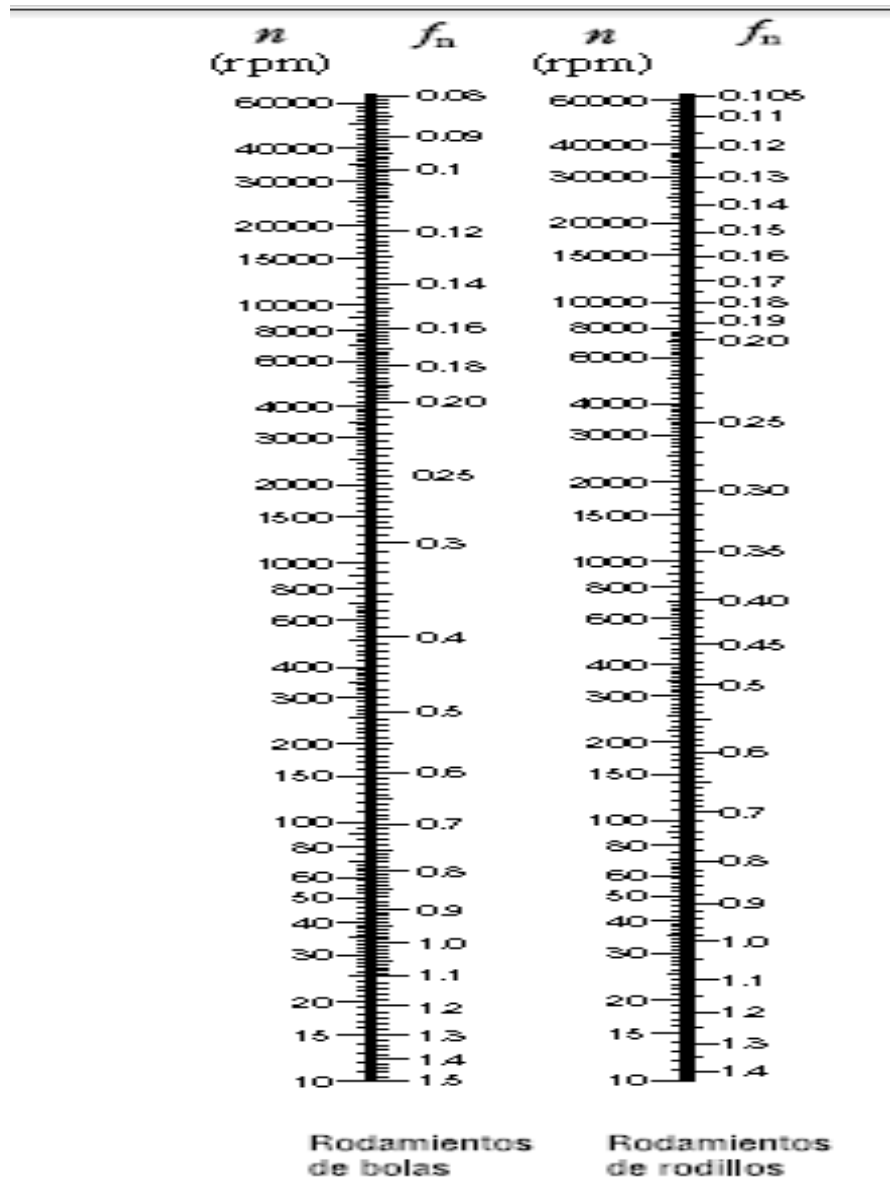
$C_r$ = clasificación de carga dinámica (del catálogo).

$n$ = velocidad (rpm)

$P$ : Carga del rodamiento (carga equivalente) (N),

3.2.2.1 Ajuste del Factor de velocidad y factor de vida de fatiga. Para los equipos de bombeo de la U150 que operan a 3580 RPM el factor de velocidad  $f_n$  es 0.21 dado en la figura 11.

Figura 11. Velocidad del rodamiento y factor de velocidad.



Fuente. Catálogo de rodamiento NSK No.E1102c

El factor de vida de fatiga es dado por la siguiente ecuación.

$$f_h = f_n \frac{C}{P} \quad \left| \quad f_h = f_n \frac{C}{P} \right. \quad (2)$$

$f_n$ : factor de velocidad.

$f_h$ : factor de vida de fatiga

P: carga del rodamiento.

**3.2.2.2 Ajuste de temperatura para el índice básico de carga.** Si utiliza rodamientos a altas temperaturas, disminuye la dureza del acero del rodamiento. En consecuencia también disminuye el índice básico de carga, ya que depende de las propiedades físicas del material. Por lo tanto, debería ajustar el Índice básico de carga para una temperatura superior utilizando la siguiente ecuación.

$$C_t = f_t C_t \quad (3)$$

$C_t$  : Índice básico de carga después de la corrección de temperatura(N)

$f_t$  : Factor de temperatura (Consulte la Tabla 4.)

C : Índice básico de carga antes del ajuste de temperatura (N)

**Tabla 4. Factor de temperatura  $f_t$**

Temperatura del rodamiento °C	125	150	175	200	250
Factor de temperatura $f_t$	1.00	1.00	0.95	0.90	0.75

Fuente. Catálogo de rodamiento NSK No.E1102c

Para los equipos de bombeo de la U150 las cajas de los rodamientos son lubricados con aceite ISO 46 y operan en una temperatura entre 120°C y 140°C el factor de temperatura seria 1 según Tabla3.

**3.2.2.3 Corrección del índice básico de vida.** La vida  $L_{10}$  se define como el índice básico de vida con una fiabilidad estadística del 90%. Dependiendo de las máquinas donde se utilicen los rodamientos, es posible que en ocasiones se requiera una fiabilidad superior al 90%. Sin embargo, las recientes mejoras en el material de los rodamientos han ampliado enormemente la vida de fatiga. Además, el desarrollo de la teoría Elastohidrodinámica de lubricación demuestra que el grosor de la película lubricante en la zona de contacto entre los anillos y los elementos rodantes influye enormemente en la vida del rodamiento. Para reflejar dichas mejoras en el cálculo de la vida de fatiga, el índice básico de vida se ajusta de acuerdo con los siguientes factores según ecuación 4

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 L_{10} \quad (4)$$

$L_{na}$ : Índice ajustado de vida, donde se tienen en cuenta la fiabilidad, las mejoras del material, las condiciones de lubricación, etc.

$L_{10}$ : Índice básico de vida con una fiabilidad del 90%

$a_1$ : Factor de ajuste de la vida para la fiabilidad

$a_2$ : Factor de ajuste de la vida para propiedades especiales de los rodamientos

$a_3$ : Factor de ajuste de la vida para condiciones de funcionamiento

El factor de ajuste de la vida para la fiabilidad,  $a_1$  se muestra en la Tabla 3 para las fiabilidades superiores al 90%. El factor de ajuste de la vida para propiedades especiales de los rodamientos,  $a_2$ , se utiliza para reflejar las mejoras en el acero de los rodamientos. Actualmente utilizan acero para rodamientos desgastado al vacío, y los resultados de las pruebas llevadas a cabo por NSK demuestran que la vida ha mejorado notablemente en comparación con los anteriores materiales. Los

índices básicos de carga  $C_r$  y  $C_a$  mostrados en las tablas de rodamientos se calcularon considerando la vida ampliada conseguida gracias a las mejoras en los materiales y a las técnicas de fabricación. En consecuencia, al estimar la vida Utilizando la Ecuación (4) es suficiente asumir que es superior a uno.

**Tabla 5. Factor de ajuste de la vida para la fiabilidad.**

Fiabilidad (%)	90	95	96	97	98	99
$a_1$	1.00	0.62	0.53	0.44	0.33	0.21

Fuente. Catálogo de rodamiento NSK No.E1102c

El factor de ajuste de la vida para condiciones de funcionamiento  $a_3$  se utiliza para ajustar varios factores, especialmente la lubricación. Si no existe desalineación entre los anillos interiores y exteriores, y el grosor de la película lubricante en las zonas de contacto del rodamiento es la suficiente, es posible que  $a_3$  sea mayor que uno; sin embargo,  $a_3$  es menor que uno en los siguientes casos:

- Cuando la viscosidad del lubricante en las zonas de contacto entre las pistas de rodadura y los elementos rodantes es baja.
- Cuando la velocidad circunferencial de los elementos rodantes es muy baja.
- Cuando la temperatura del rodamiento es alta.
- Cuando el lubricante está contaminado por agua o materias extrañas.
- Cuando la desalineación de los anillos internos y externos es excesiva.

Es difícil determinar el valor correcto de  $a_1$  para condiciones específicas de funcionamiento, porque existen muchos factores desconocidos. Dado que las condiciones de funcionamiento también influyen en el factor de propiedades especiales del rodamiento  $a_2$ , existe la proposición de combinar  $a_2$  y  $a_3$  en una sola cantidad ( $a_2 \times a_3$ ) en vez de considerarlos independientemente. En este caso,

en condiciones normales de lubricación y funcionamiento, debería asumirse que el producto ( $a_2 \times a_3$ ) es igual a uno. Sin embargo, si la viscosidad del lubricante es demasiado baja, el valor disminuye hasta 0,2. Si no existe desalineación y se utiliza un lubricante de alta viscosidad para garantizar un grosor suficiente de la película, el producto de ( $a_2 \times a_3$ ) puede estar cercano a dos.

**3.2.2.4 Cálculo de las cargas del rodamiento.** Las cargas aplicadas sobre los rodamientos generalmente incluyen el peso de la estructura que éstos deben soportar, el peso de los elementos giratorios en sí, la potencia de transmisión de los engranajes y las correas, la carga ocasionada por el funcionamiento de la máquina donde se utilizan los rodamientos, etc. Estas cargas pueden calcularse teóricamente, pero algunas de ellas resultan difíciles de estimar. Así pues, se hace necesario corregir las estimaciones utilizando datos obtenidos empíricamente.

**3.2.2.5 Factor de carga.** Cuando se ha calculado matemáticamente una carga radial o axial, la carga real sobre el rodamiento puede ser superior a la carga calculada debido a la vibración y a los impactos producidos durante el funcionamiento de la máquina. La carga real puede calcularse utilizando la siguiente ecuación:

$$F_R = f_w \cdot f_{rc} \quad (5)$$

$F_r$ : Cargas aplicadas sobre el rodamiento (N), {kgf}

$F_{rc}$ : Carga calculada teóricamente (N), {kgf}

$f_w$  : Factor de carga

Los valores mostrados en la tabla 6 se utilizan normalmente para el factor de carga  $f_w$ .

**Tabla 6. Valores del factor de carga.**

Condiciones de funcionamiento	Aplicaciones típicas	$f_w$
Funcionamiento suave libre de impactos	Motores eléctricos, máquinas herramienta, acondicionadores de aire	1.0~1.2
Funcionamiento normal	Ventiladores, compresores, ascensores, grúas, máquinas para fabricación de papel	1.2~1.5
Funcionamiento acompañado de impactos y vibraciones	Maquinaria para la construcción, trituradoras, cribas, Trenes de laminación	1.5~3

Fuente. Catálogo de rodamiento NSK No.E1102c

Para calcular la carga teóricamente  $F_R$  según Stepanpoff las fuerzas radial debido a efectos hidráulicos sobre el impulsor está dada por:<sup>4</sup>

$$F_R = 0.433 \cdot k_R \cdot S_G \cdot H \cdot D_2 \cdot b_2 \quad (6)$$

$F_R$ = Fuerza radial debido a efectos Hidraulicos sobre el impulsor.

$S_G$ = Gravedad Especifica del producto.

$D_2$ = Diametro Impulsor (in).

$H$ = Cabeza de la bomba (ft).

$b_2$ = Ancho del impulsor en la descarga (in).

$K_R$ = Coeficiente experimental, depende del porcentaje del flujo y del tipo de voluta.

$$K_R = 0.36 \cdot (1 - Q/Q_{EP}) \quad (7)$$

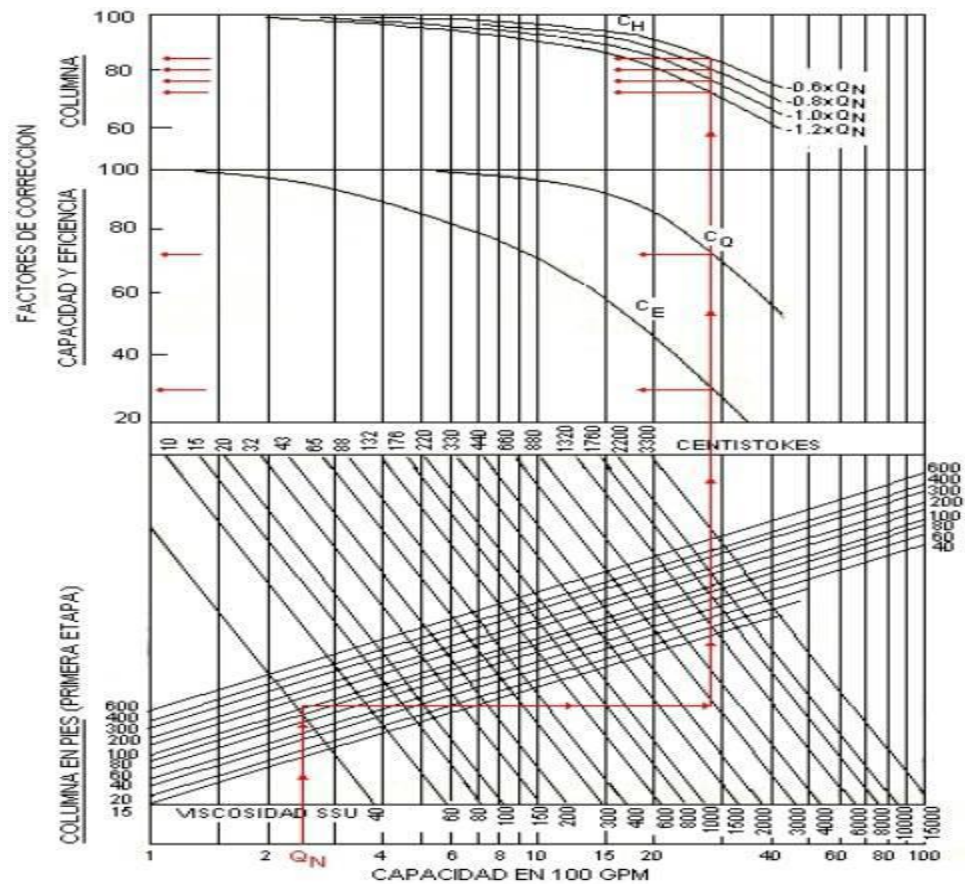
$Q_{EP}$ = Flujo de mejor eficiencia.

$Q$ = Flujo operacional.

<sup>4</sup> Stepanoff, A.J. centrifugal and axial flow pumps edition (1957)

Para transformar las características de operación con agua a la operación con fluidos viscosos. Se utiliza la gráfica 6 Para hallar el factor de corrección por viscosidad.

**Gráfica 6. Factor de corrección por viscosidad.**



Fuente: Centrifugal Pump Handbook. Sulzer Pumps Ltd. Third edition

### 3.3 EL DIAGNOSTICO DE FALLA BASADO EN VIBRACIONES MECÁNICAS

Las vibraciones que se pueden medir en los alojamientos de los cojinetes y ejes de las máquinas se utilizan para predecir su falla. En general la amplitud de la vibración que se toma, corresponde con la severidad de la falla que la genera. Las

fuentes que generan las vibraciones algunas veces excitan algunas frecuencias naturales del sistema y no cambian con la variación de velocidad del sistema.

Con la ayuda de las vibraciones se pueden identificar los diferentes tipos de fallas que se pueden presentar en el sistema; como lo son los desalineamientos, desbalances de masa y solturas. La velocidad de operación es la frecuencia de referencia para diagnosticar las fallas del sistema.

Cuando las bolas pasan por un defecto en la canastilla o pistas, se genera un pulso que excita todas las frecuencias del rodamiento. El diseño de la máquina determina la magnitud y periodicidad de la vibración obtenida en el rodamiento.

**3.3.1 La Frecuencia de los rodamientos.** Los elementos de los rodamientos generan frecuencias de acuerdo a su geometría y velocidad de operación.

Cuatro frecuencias básicas pueden ser generadas por rodamientos defectuosos, las cuales son<sup>5</sup>:

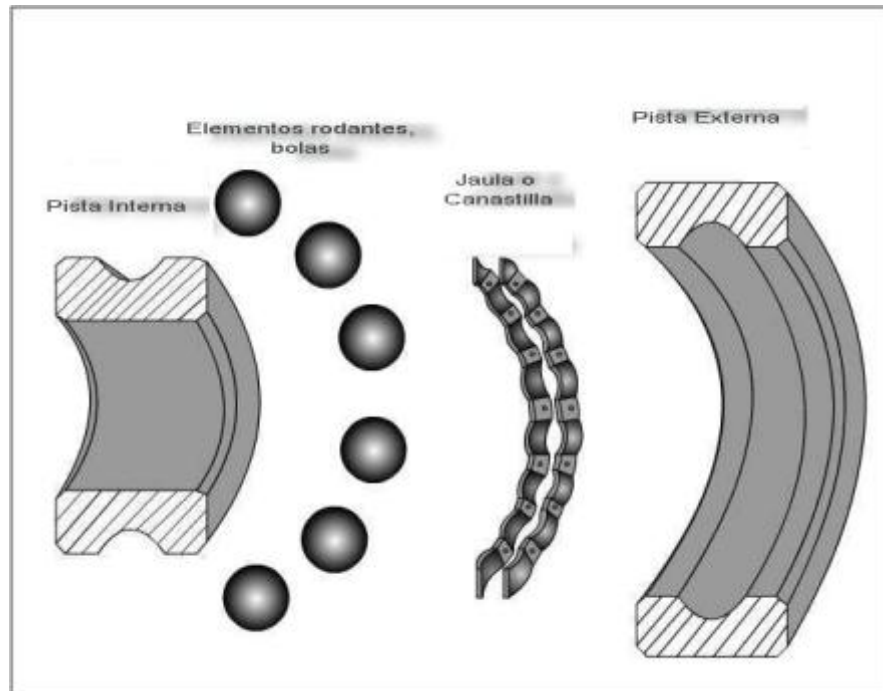
- Frecuencia de paso de las bolas por la pista exterior (BPFO); que es generado por el paso de las bolas sobre los defectos de la pista.
- Frecuencia de paso de las bolas por la pista interior (BPF1); que es generado por el paso de las bolas sobre los defectos de la pista.
- Frecuencia de giro de la bola o rodillo (BSF); generado por los defectos en las bolas.
- Frecuencia fundamental de la canastilla (FTF); generado por los defectos en la jaula o por movimientos inadecuados.

La figura 12 muestra las partes del rodamiento de bolas:

---

<sup>5</sup> Flowserver, fundamentos rodamientos.

**Figura 12: Partes del Rodamiento de Bolas**



Fuente. Abbasion S., Rafsanjani A., Farshidianfar A. y Irani N.; Rolling element bearings multi-fault classification based on the wavelet denoising and support vector machine

### 3.3.2 Formulas

$$\Omega = RPS = RPM/60. [4]$$

$$FTF = (\Omega/2) \{1 - (B/P) \cos \Phi\}. [4]$$

$$BPFI = (N/2) \Omega \{1 + (B/P) \cos \Phi\}. [4]$$

$$BPFO = (N/2) \Omega \{1 - (B/P) \cos \Phi\}. [4]$$

$$BSF = (P/2B) \Omega \{1 - (B/P)^2 \cos^2 \Phi\}. [4]$$

- $\Phi$  = Angulo de contacto; ángulo entre la línea perpendicular al eje y del centro de la bola al punto dónde la bola hace contacto con el arco de la pista,
- $N$  = Número de elementos rodantes (bolas).

- **P**= Diámetro primitivo; en pulgadas.
- **B**= Diámetro de la bola, en pulgadas.
- **RPS**= velocidad de rotación, unidades en revoluciones por segundo.

Para el cálculo de las anteriores frecuencias se debe consultar además, bases de datos del fabricante del rodamiento para conocer con exactitud los parámetros físicos necesarios.

### **3.4 SELLO MECÁNICO**

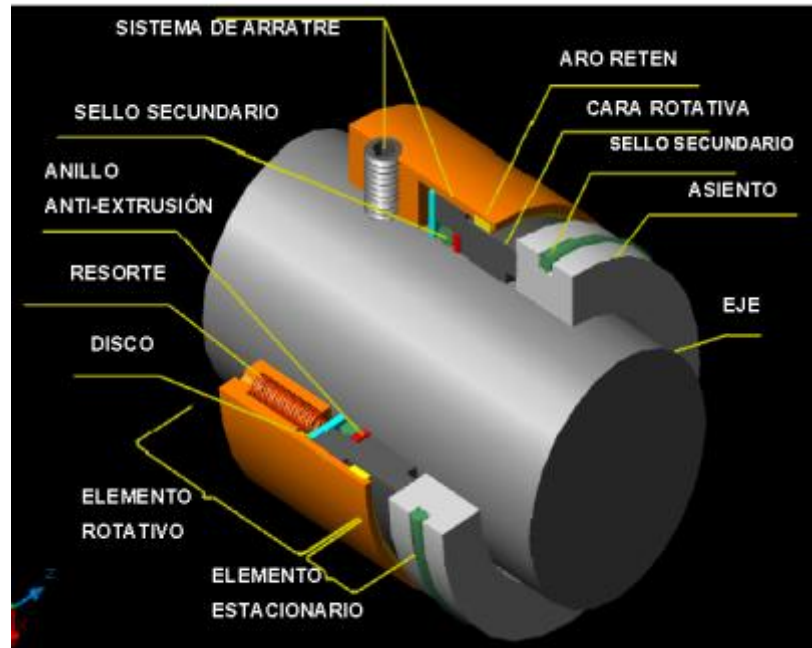
Es un dispositivo de sellado que previene el escape del fluido de un equipo, el cual atraviesa un eje rotativo realizando el sellado por contacto axial de sus caras que se encuentran perpendiculares al eje y en movimiento relativo una respecto a la otra.

Todos los sellos mecánicos comparten la misma tecnología básica. Hay dos superficies extremadamente planas (referidas como “caras”) las cuales están en contacto una con la otra. Una “cara” gira con el eje, mientras la otra permanece estacionaria con el cuerpo de la bomba. Estas “caras” están selladas a sus propios alojamientos a través del uso de sellos secundarios. Las “caras” están mecánicamente acopladas de forma flexible para que ellas puedan entrar en contacto y moverse para compensar desalineamientos estáticos, dinámicos y desgaste.

**3.4.1 Elementos que Constituyen un Sello Mecánico.** El sello mecánico es un dispositivo técnicamente avanzado que proporciona un gran rendimiento en el sellado durante largos periodos de tiempo, esto es posible gracias a la concepción

e interrelación de sus componentes que determinan una amplia variedad de diseño, como se muestra en la figura 13.

**Figura 13. Elementos que constituyen un sello mecánico.**

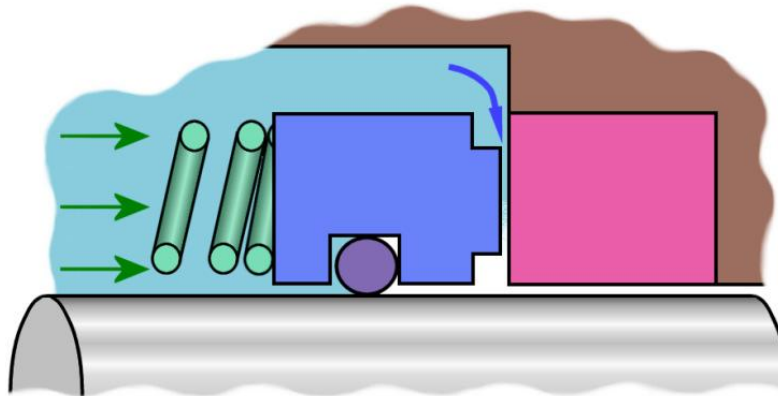


Fuente: *John Crane*. Manual de Sellos Mecánicos.

Un sello mecánico tiene tres puntos principales de sellado.

Primer punto de sellado es entre la cara rotativa (anillo primario) y la cara estacionaria (asiento). Este se conoce como sello primario.

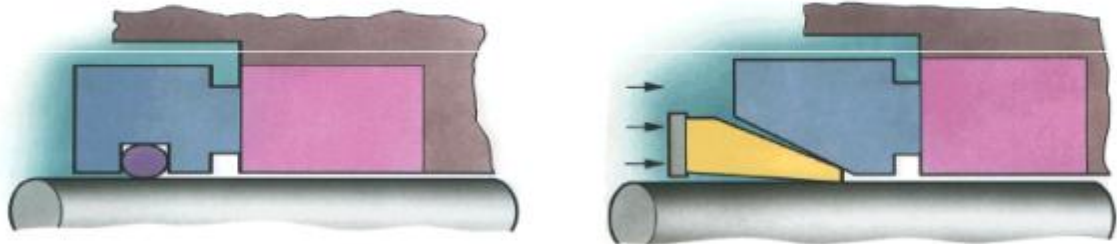
**Figura 14: Ejemplo primer punto de sellado.**



Fuente: *John Crane*. Manual de Sellos Mecánicos

Segundo punto de sellado entre el elemento rotativo y el eje o la camisa del eje. Este se conoce como sello secundario y podría ser un o-ring como se muestra, una 'cuña' o cualquier tipo similar de empaque.

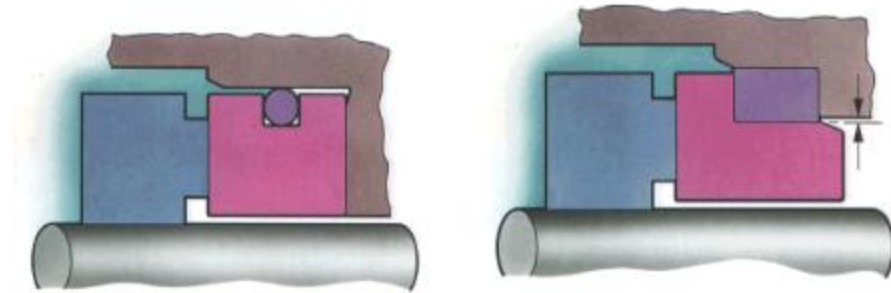
**Figura 15: Ejemplo segundo punto de sellado.**



Fuente: *John Crane*. Manual de Sellos Mecánicos.

3. El sellado entre el asiento y su alojamiento en la brida o carcasa, el cual también es llamado sello secundario. Éste es normalmente un empaque o un o-ring.

**Figura 16: Ejemplo del tercer punto de sellado.**



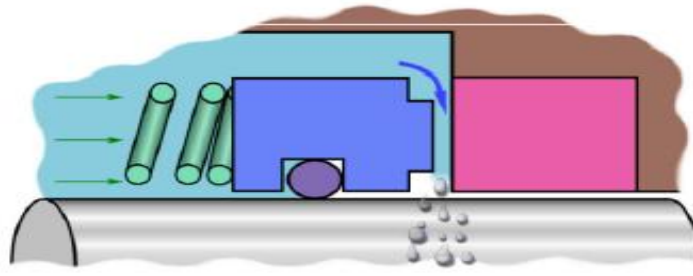
Fuente: *John Crane. Manual de Sellos Mecánicos.*

Como el nombre lo indica es el sellado primario en el sello mecánico, ya que constituye su función primordial. Como se mencionó anteriormente, es el sellado que se produce por el contacto axial de las dos caras del sello mecánico. Las superficies de las caras deben ser extremadamente planas con el propósito de que resulten perfectamente paralelas y logren un cierre preciso.

La planitud está dentro de dos bandas de luz (método óptico de medir la planitud). La planitud y el consecuente paralelismo son directamente proporcionales a la generación de fuga. Normalmente, las fugas entre estas dos caras son invisibles a simple vista, pues aparecen en forma vaporizada.

**Película de Lubricación Interfacial.** Si las dos caras que forman el sellado primario entran en contacto directo, se desgastarían muy pronto debido a la fricción y el calor generado. Es por esto que en realidad las dos caras no deben entrar en contacto, es decir que debe producirse una separación entre ellas. Para que se realice esa separación se debe producir una película de lubricación entre las dos caras llamada “Película de Lubricación Interfacial”.

**Figura 17. Ejemplo de película de lubricación interfacial.**

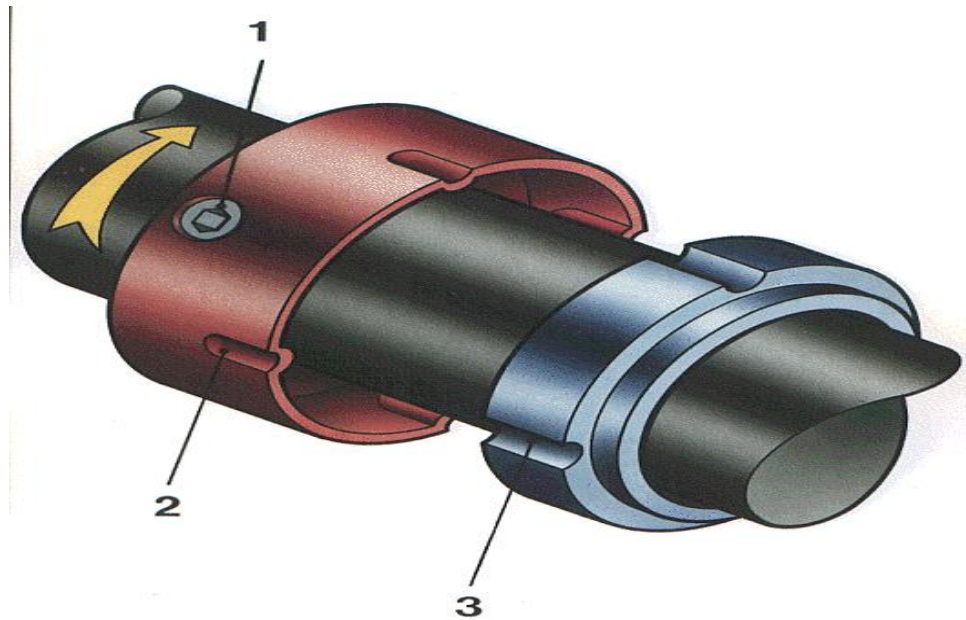


Fuente: *John Crane*. Manual de Sellos Mecánicos.

Esta película proporciona la lubricación y refrigeración necesarias para preservar la integridad de las caras del sello mecánico. Mantener la estabilidad de esta película es de primordial importancia, ya que de ella depende la vida útil del sello mecánico. Con el propósito de lograr y mantener la estabilidad de la película de lubricación interfacial, se han diseñado y estandarizado una serie de sistemas de lubricación y enfriamiento conocidos como Planes API, que se especifican de acuerdo a las características y condiciones del fluido bombeado.

**Sistemas de Arrastre y Compensación.** El componente rotativo gira con el eje y normalmente está accionado por un resorte. La compresión del resorte, normalmente 1 ó 2 bares, proporciona el contacto inicial de las caras y también lo mantiene cuando el sello está inactivo, evitando de esta forma cualquier fuga entre las caras. El componente estacionario se mantiene firmemente en la brida y normalmente está ranurado para acomodar un pin anti giro en la brida o carcasa. Para la fijación y transmisión de movimiento del eje al elemento rotativo o cabezal del sello mecánico, debe existir un mecanismo de arrastre.

**Figura 18. Ejemplo mecanismo de arrastre y compensación.**



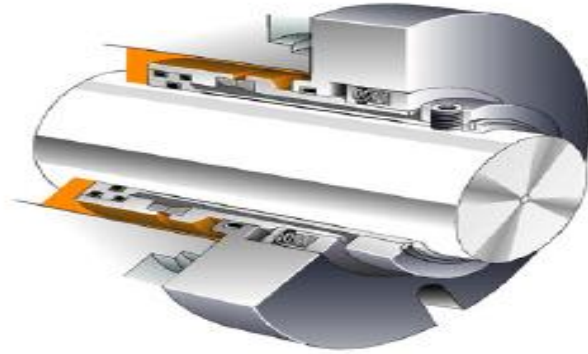
Fuente: *John Crane. Manual de Sellos Mecánicos.*

**Clasificación De Sellos Mecánicos.** Se clasifican en cinco formas básicas, pero un tipo de sello podría comprender dos, tres, cuatro o incluso cinco combinaciones diferentes de dichas formas básicas.

- Rotativo o estacionario
- Balanceado o No balanceado
- Montaje Interior o Exterior
- Por característica de diseño
- Por su disposición

**Rotativo O Estacionario.** En la figura 6 se ilustra, El cabezal de sello está fijado al eje, girando con él, por lo que se le denomina sello rotativo (el elemento rotativo contiene los resortes). Esta es la disposición más común de las dos disposiciones. Similarmente si las posiciones de los dos componentes se invierten y el cabezal de sello (que contiene los resortes) se mantiene estacionario sobre la brida, se denomina sello estacionario:

**Figura 19. Ejemplo sello rotativo.**



Fuente: *John Crane*. Manual de Sellos Mecánicos.

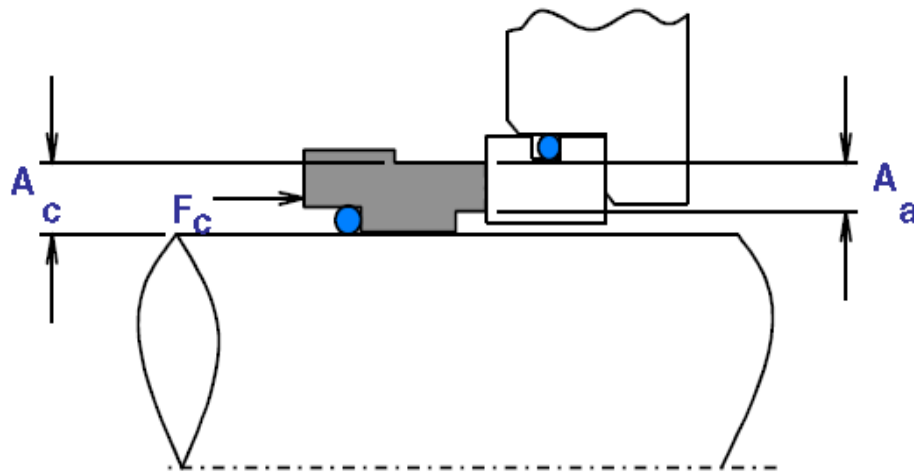
¿Cuándo pasamos de una situación de unidad rotativa a otra de unidad estacionaria?

Principalmente cuando las velocidades de rotación (Medidas en la periferia de la cara de sellado rotativa) se aproximan o están por encima de los 25m/seg. (5000 r.p.m.). A estas velocidades, las fuerzas dinámicas superan las limitaciones de la unidad de rotación llegando a deformarla. Un sello estacionario evita el movimiento excesivo del sello secundario, mantiene de forma satisfactoria el recorrido del componente primario de sellado y maneja los altos momentos torsionales involucrados. A estas velocidades, si la unidad estuviera girando, su peso, mayor que el del asiento acentuaría cualquier movimiento del eje o distorsión. El componente Rotativo es el asiento que gira con el eje o camisa en un sello estacionario. Como los resortes se encuentran detrás de la cara estacionaria, no giran.

**Balanceados o No Balanceados.** Los sellos mecánicos también se refieren como balanceados o no balanceados. Más correctamente, deberían ser hidráulicamente balanceados o sin balancear hidráulicamente. La diferencia es de carácter

geométrico y para efectos de funcionalidad el sello balanceado puede soportar más presión sin perder la película de lubricación interfacial. El sello no balanceado es la forma más sencilla de una unidad de sello mecánico rotativo con asiento estacionario: El área de acción de la fuerza de cierre ( $A_c$ ) es prácticamente igual al área de contacto de las caras o área de apertura ( $A_a$ ).

**Figura 20. Sello no balanceado**



$A_c$  = Área de Cierre;  $F_c$  = Fuerza de Cierre;  $A_a$  = Área de Apertura

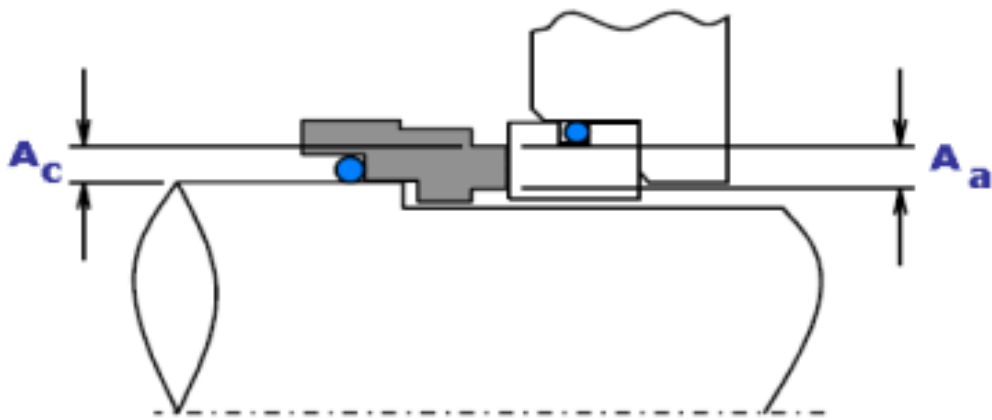
Fuente: *John Crane*. Manual de Sellos Mecánicos.

La presión de la caja de sellado más la presión del resorte tienden a cerrar las caras y al asiento de la unidad hacia sí. Sin embargo, hay una película de fluido entre las caras, sujeta a un gradiente de presión hidráulica entre la presión de la caja de sellado y la presión atmosférica. Se supone que el gradiente de presión es lineal. Esto, de hecho, origina una fuerza en forma de cuña que intenta separar las caras.

Según la presión de la caja de sellado aumenta, la presión que actúa sobre el área de sellado de las caras aumenta, la cuña se hace menos eficaz hasta que finalmente la película de fluido de la cuña se rompe y no hay lubricación. Las caras

se destruyen entre sí y se dice que el sello primario ha fallado debido a una inadecuada lubricación. La presión máxima que un Sello sin balancear puede soportar depende del diámetro del eje, la velocidad, los materiales de las caras y la naturaleza del fluido que se está sellando, pero siempre es inferior a la presión de un sello balanceado.

**Figura 21. Sello balanceado**



Fuente: *John Crane*. Manual de Sellos Mecánicos.

Las condiciones hidráulicas permanecen iguales que para la consideración del sello no balanceado. La diferencia es que la unidad rotativa está sujeta a una presión igual y hay un equilibrio hidráulico del área de contacto. La presión en la caja de sellado ahora actúa sobre el área 'Aa' del sello. El resultado es que la carga de la cara se reduce. La presión en las caras ( $P_{\text{caras}}$ ) resulta menor que la presión hidráulica del fluido bombeado ( $P_{\text{hidráulica}}$ ), producto de la reducción del área de acción de la fuerza hidráulica invariable ( $F_{\text{hidráulica}}$ ).

**Sellos resorte único o mono resortes.** Sellos flexibles y relativamente fáciles de instalar. En versiones de volumen (Tipo 21) son de bajo costo y sólo pueden utilizarse con presiones de bombeo bajas hasta un máximo de 80 psi y

velocidades bajas de superficie de eje cuando se trata de un diseño normal sin balancear. En las versiones de proceso (Tipo 1 o 2) pueden resistir hasta 425 psi sin balancear y hasta 1200 psi balanceados. El resorte sencillo genera un área de baja presión de apoyo en la cara, que da como resultado un desgaste DESIGUAL de la cara. Dependiendo de su diseño, a veces sólo puede girar en una dirección.

**Figura 22. Ejemplo Sello mono resorte.**



Fuente: *John Crane*. Manual de Sellos Mecánicos.

**Resorte múltiple.** Puede tolerar velocidades de eje y presiones mayores que la versión de resorte sencillo. Proporciona carga uniforme de la cara. Puede girar en ambas direcciones. Normalmente más fácil de balancear hidráulicamente. Es un sello de mayor precisión y por tanto es preferido en aplicaciones de procesos. Puede resultar más costoso.

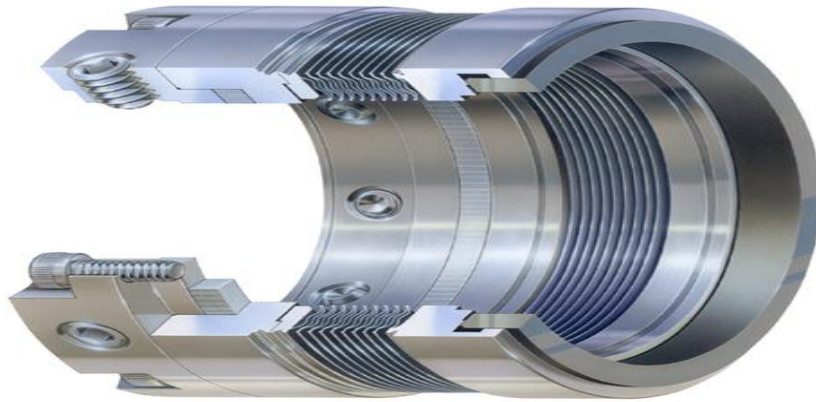
**Figura 23. Ejemplo Sello resorte múltiple.**



Fuente: *John Crane*. Manual de Sellos Mecánicos.

**Sello De Fuelle Metálico.** Desarrollado para aplicaciones de alta temperatura en la industria petrolera. Sin embargo puede usarse en bajas temperaturas usando o-ring elastomérico como sellante secundario. Puede obstruirse con facilidad y si el fuelle se fisura, puede dar como resultado una gran pérdida del producto.

**Figura 24. Sello de fuelle metálico.**



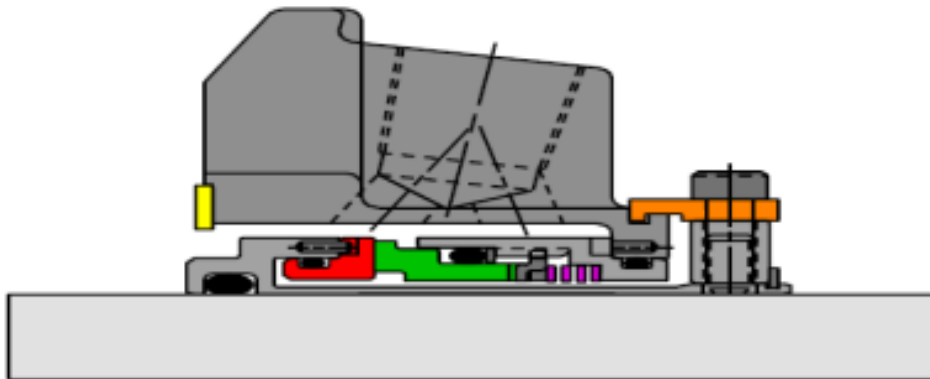
Fuente: *John Crane. Manual de Sellos Mecánicos.*

**Sello mecánico cartucho.** Este no es más que un ensamble completo de cabezal del sello, asiento, brida, camisa y collar de arrastre, en una sola unidad. El cabezal del sello viene pre ensamblado ya en su longitud de trabajo. Se diseñan desde el arreglo sencillo en tamaños pequeños, hasta muy grandes, en arreglos duales y complejos que incluyen todos los componentes, incluso los rodamientos. El objetivo, bien sean grandes o pequeños, sencillos o complejos, ha sido crear un módulo diseñado de tal forma que pudiera extraerse como una unidad completa, sustituirse por otra similar o llevarla al taller para su posterior reparación. Normalmente los sellos se diseñaban individualmente para satisfacer los requisitos especiales de un usuario. De forma que el sello de cartucho se ha convertido en una disposición cada vez más preferida para satisfacer adecuadamente los requisitos y la demanda del mercado.

### Qué Ofrece el Sello Cartucho

- Un módulo listo para su instalación que contiene todas las partes de un ensamblaje de sellado, camisa, brida, sello, asiento, etc.
- Facilidad de instalación - sólo requiere habilidad mínima.
- El diseño de fijación de la brida es tal que se ajusta a la mayoría de las cajas de sellado situadas en disposiciones ya existentes.
- Diseñado para ajustarse a la mayoría de las dimensiones de cajas.
- Facilidad de conversión de empaquetaduras.
- Fácil de desmontar para su reacondicionamiento fuera de la planta.
- Facilidad de instalación en localizaciones menos asequibles. y esto ha hecho que el sello cartucho tenga mayor acogida. Algunos de estos cambios son:
- Normas API.
- Legislación de Salud y Seguridad.
- Economía.
- Reducción del personal de mantenimiento.
- Incremento de servicios de mantenimiento fuera de la planta.

**Figura 25. Sello de cartucho.**



Fuente: *John Crane*. Manual de Sellos Mecánicos.

### Norma API 682 Sellos mecánicos.

1. Todos los sellos deben operar un mínimo de 25.000 hrs. ( 2 años, 10 meses)

2. Todos los sellos no deben permitir más de 10.000 ml/m<sup>3</sup> ( 1000 ppm vol.) de concentración de emisión de fuga de atmosfera
3. Sellos de contención deben de operar un mínimo de 25000 a 1.7 bar (25 psia) máximo y 8 horas bajo las condiciones de proceso.

**Categorías, tipos y arreglos de sellos.** Las configuraciones de sello que se incluyen en el estándar internacional pueden ser clasificadas en tres categorías (1,2 y 3), 3 tipos (a,b,c) y tres arreglos (1,2 y 3). Más lejos, los sellos de los arreglos 2,3 pueden estar en tres orientaciones; “cara-espalda”, “ espalda-espalda” y “cara-cara” .

**Categoría 1.** Son sello para usarse en la norma ISO 13709 en cámaras de sello , bajo las exigencias dimensionales por las normas ASME B73.1, ASME B73.2 y ISO 3069, Tipo C, y su uso está restringido a temperatura de la caja que va desde la bomba 40°C (-40°f), hasta 260°C (500°F) y presiones absolutas de hasta 2.2 MPa (22Bar.)

**Categoría 2.** Son sello para emplearse en cámaras de sellado que se encuentra bajo exigencias dimensionales por las normas ISO 13709. Su uso está restringido para sellar a temperaturas que van desde los -40°C (-40°F), hasta 400°C (750°F) y presiones absolutas de hasta 4.2MPa ( 42Bar)

**Categoría 3.** Este diseño de sello es más riguroso en cuanto a pruebas que se realizan. Se necesita que el sello sea de cartucho el cual debes ser probado con el fluido requerido. Estos presentas exigencias bajo la cámara de sellado sobre la norma ISO 13709 (o similar). Su uso está limitado para temperaturas en la bomba que van desde -40°C (-40 °F) hasta 400°C (750°F) y presiones absolutas de hasta 4.2MPa (42Bar).

**Tabla 7. Planes API para sellos.**

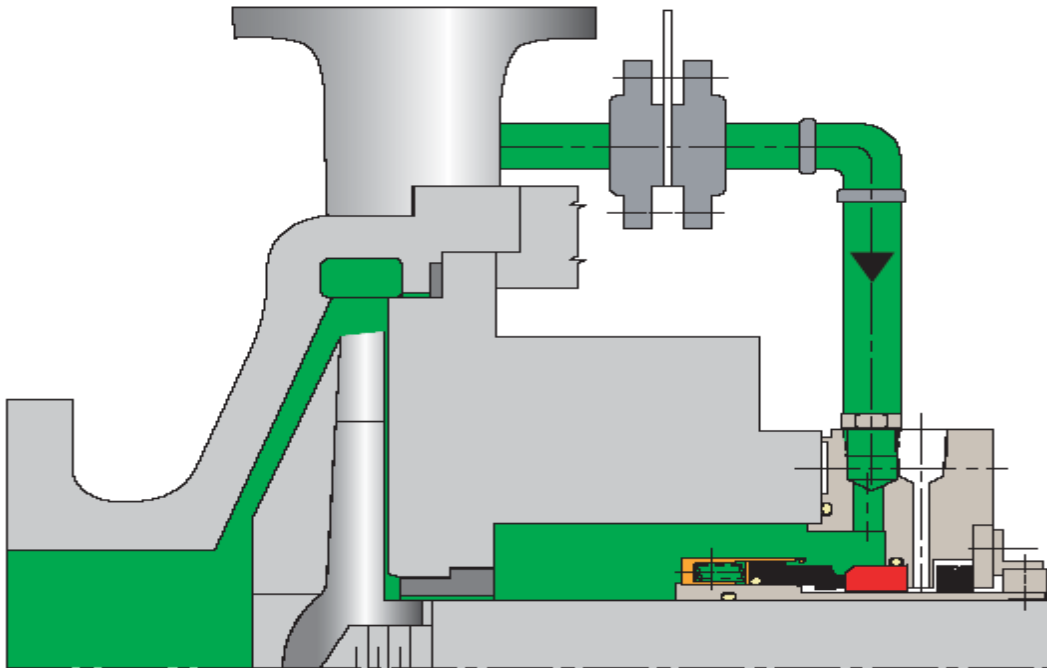
FLUIDO BOMBEADO	ACCIÓN REQUERIDA	PLANES API
1 Fluidos Limpios	1 Circulación	PLAN 1 Circulación Integral PLAN 11 Recirculación PLAN 12 Recirculación con Filtro PLAN 13 Recirculación Inversa PLAN 14 Recirculación con Retorno
2 Fluidos a altas Temperaturas	2 Enfriamiento	PLAN 2 Enfriamiento Integral PLAN 21 Recirculación con Enfriador PLAN 22 Recirculación con Enfriador y Filtro PLAN 23 Circuito Cerrado con Enfriador PLAN 24 Recirculación con Enfriador y Retorno
3 Fluidos Abrasivos	3 Lubricación	PLAN 31 Recirculación con Separador PLAN 32 Inyección Fuente Externa
4 Fluidos Abrasivos y altas Temperaturas	4 Enfriamiento y Lubricación	PLAN 41 Recirculación con Separador y Enfriador
5 Fluidos Peligrosos • Ácidos y Cáusticos • Tóxicos y Cancerígenos • Explosivos e Inflamables	5 Seguridad	PLAN 51 Sello Sencillo PLAN 52 Sello Dual No presurizado PLAN 53 Sello Dual Presurizado PLAN 54 Sello Dual Presurizado
6 Fluidos en General	6 Manejo de Emisiones	PLAN 61 Venteo y Drenaje PLAN 62 Enjuague
7 Gases	7 Barrera de Gas	PLAN 71 Barrera de Gas Opcional PLAN 72 Barrera de Gas No Presurizada PLAN 74 Barrera de Gas Presurizada PLAN 75 Drenaje de Fuga que condensa PLAN 76 Drenaje de Fuga que no condensa

Fuente. Presentación curso de John Crane.

**Plan 11.** Consiste en una conexión de la descarga de la bomba a las caras del sello mecánico. Requiere de una platina orificio para regular la presión y el caudal necesario y suficiente para lubricar y enfriar las caras del sello. Cuando el

diferencial de presión entre la descarga y la caja de estoperos es menor a 50 psi no es necesaria la platina orificio. Como estándar se utiliza tubing de ½" para realizar la instalación.

**Figura 26. Plan 11 Recirculación Desde la Descarga Al Sello.**



Fuente: presentación curso de John crane.

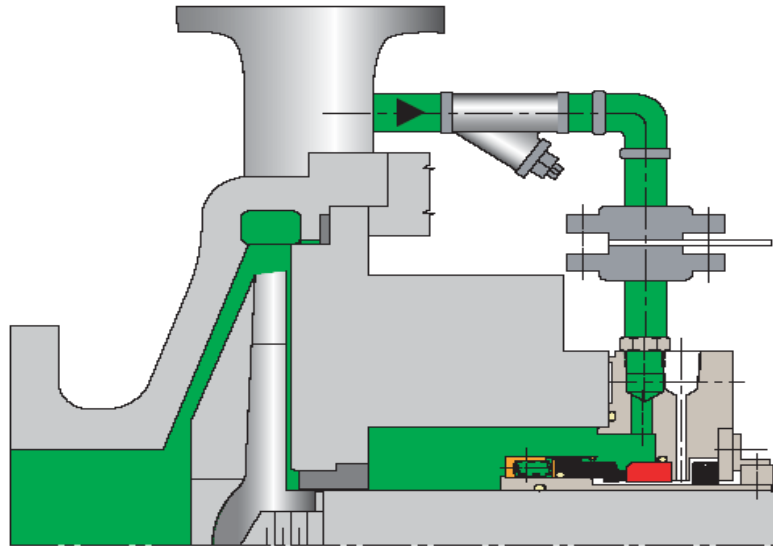
**Figura 27. Ejemplo Plan 11.**



Fuente: autor equipo de la planta U150.

## PLAN 12

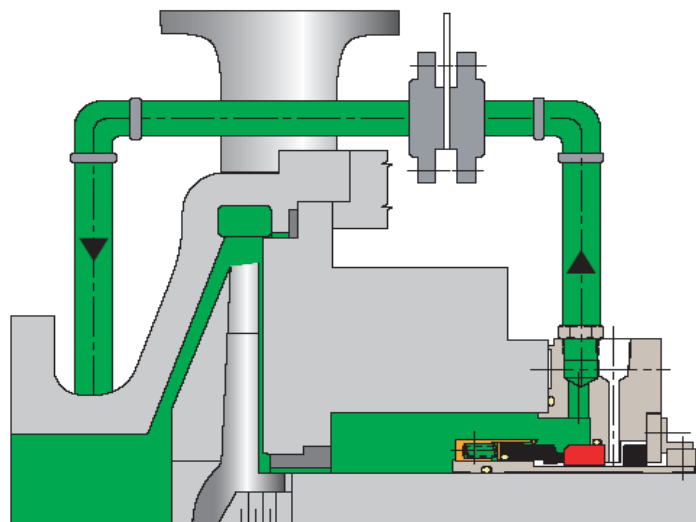
**Figura 28. Plan 12 Recirculación con Filtro Desde la Descarga Al Sello**



Fuente: presentación curso de John crane

## Plan API 13.

**Figura 29. Plan 13 Recirculación Inversa Desde la Cámara del Sello a la succión.**



Fuente: presentación curso de John crane.

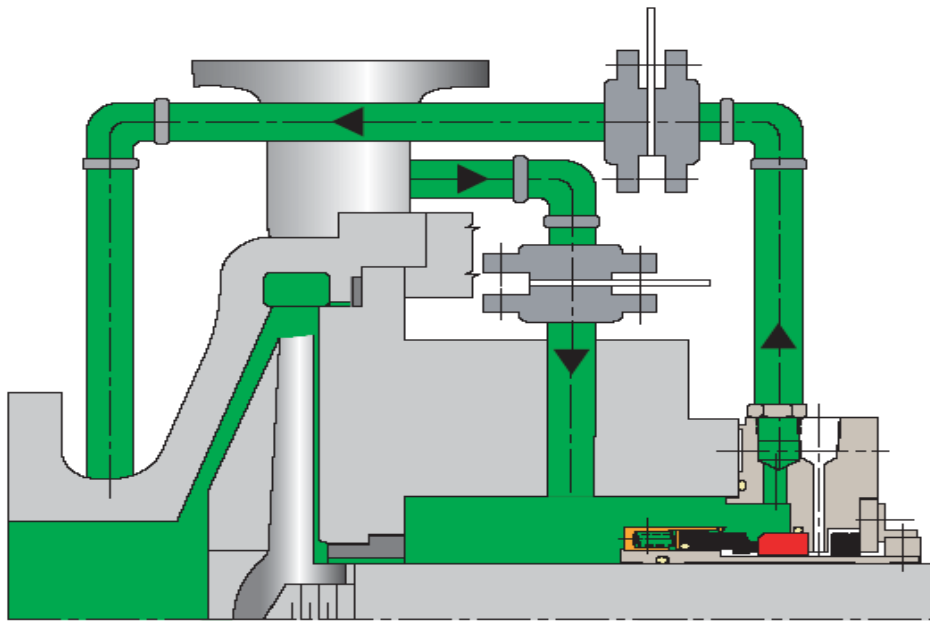
**Figura 30. Ejemplo del Plan 13**



Fuente: autor equipo de la planta U150.

**Plan API 14.**

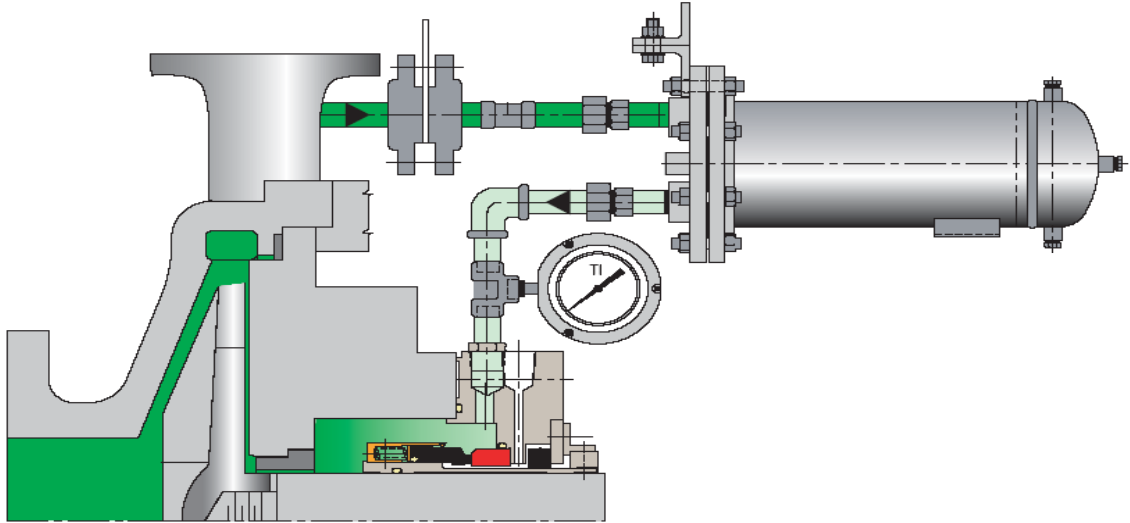
**Figura 31. Recirculación Con Retorno Desde la Descarga al Sello y Desde el Sello a la Succión**



Fuente: presentación curso de John crane.

Plan API 21.

Figura 32. Plan 21 Recirculación con Enfriador



Fuente: presentación curso de John crane.

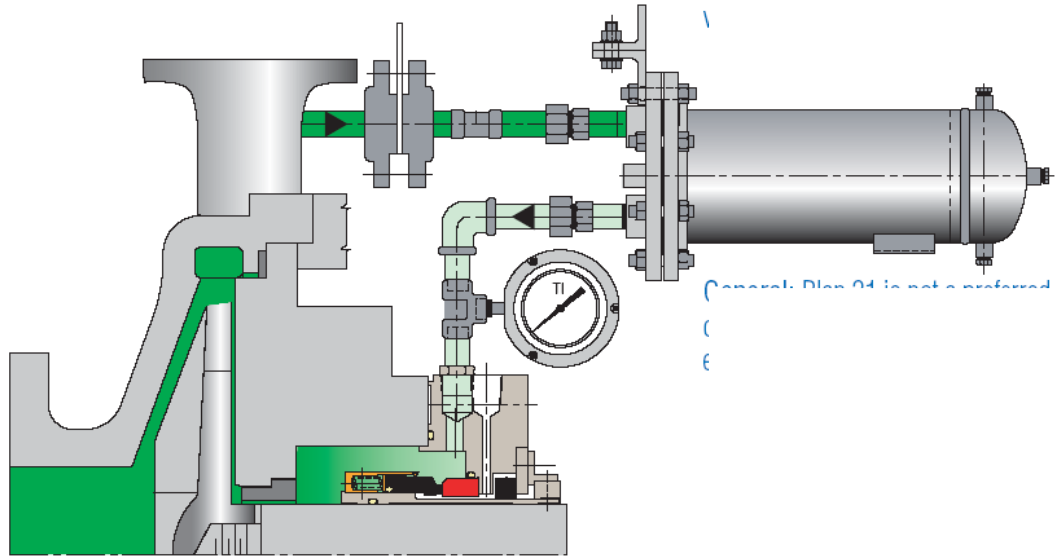
Figura 33. Ejemplo Plan API 21.



Fuente: autores equipo de la planta U150.

**Plan API 22.**

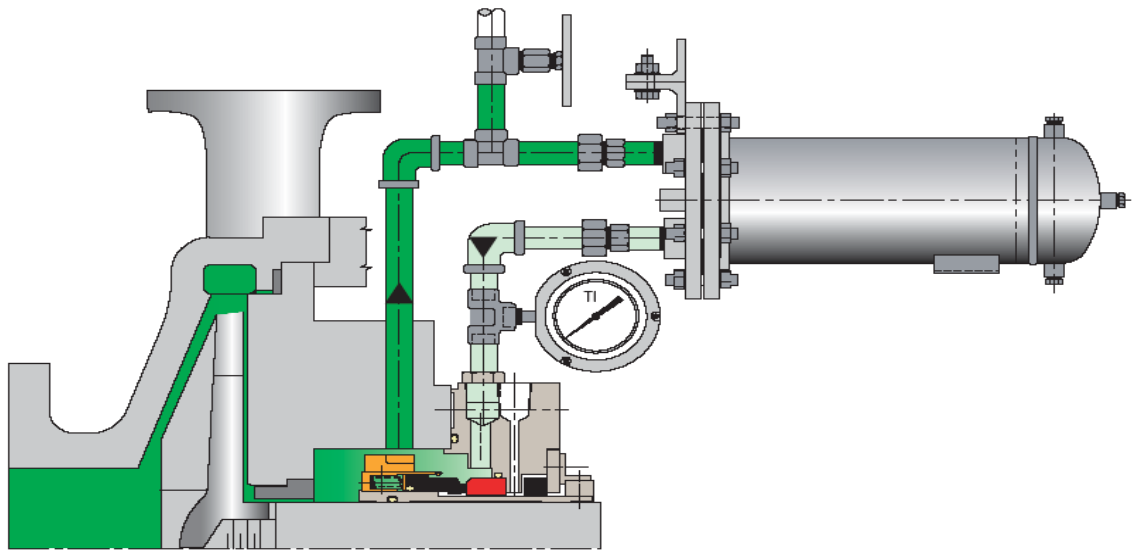
**Figura 34. Plan 22 Recirculación con Enfriador y Filtro**



Fuente: presentación curso de John crane.

**Plan API 23.**

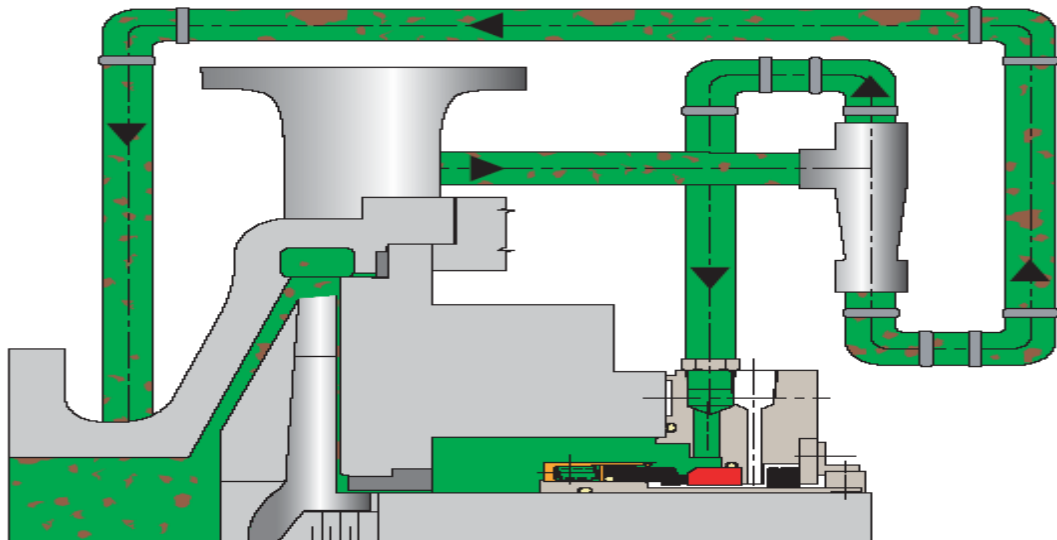
**Figura 35. Plan 23 Circuito cerrado con enfriador.**



Fuente: presentación curso de John crane.

## Plan API 31

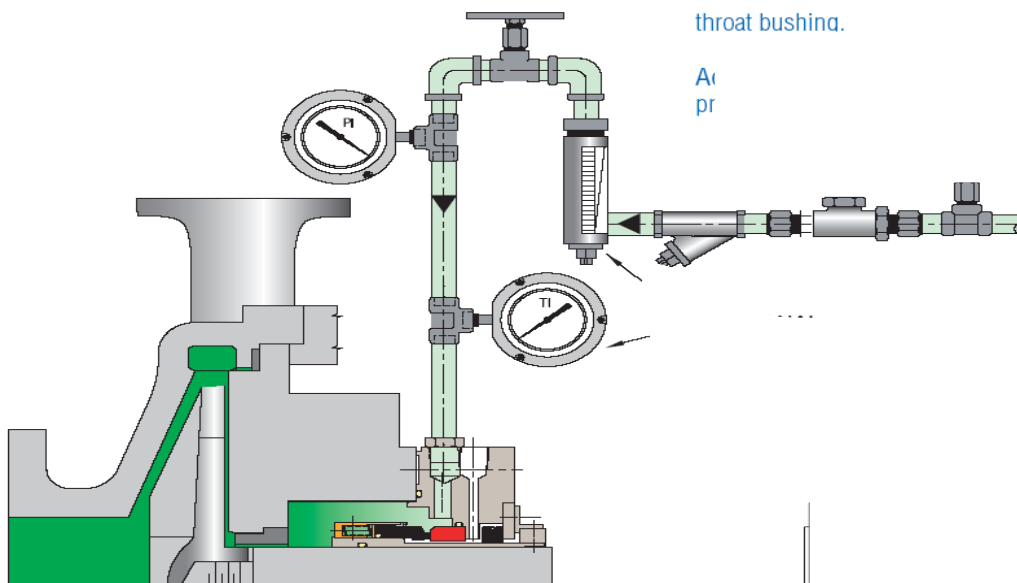
Figura 36. Plan 31 Recirculación con Separador Ciclónico



Fuente: presentación curso de John crane.

## Plan API 32.

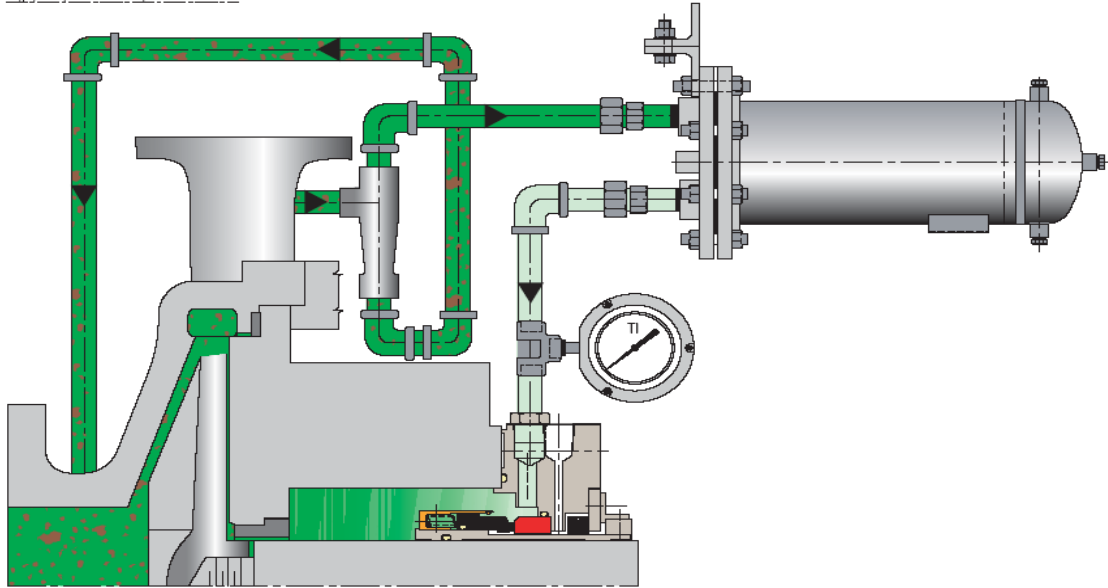
Figura 37. Plan 32 Inyección de Fuente Externa Sin Retorno



Fuente: presentación curso de John crane.

**Plan API 41.**

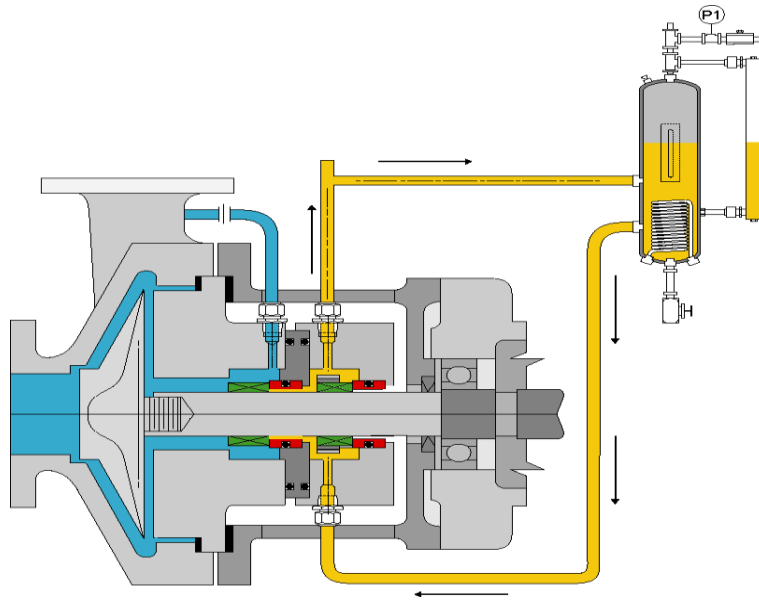
**Figura 38. Plan 41 Recirculación con Separador Ciclónico Y Enfriador**



Fuente: presentación curso de John crane.

**Plan API 52.** Fluidos Peligrosos: Ácidos y Cáusticos, Tóxicos y cancerígenos, Inflamables y Explosivos

**Figura 39. Plan 52 Circulación de un líquido de barrera desde el Sello Auxiliar a un reservorio no presurizado.**



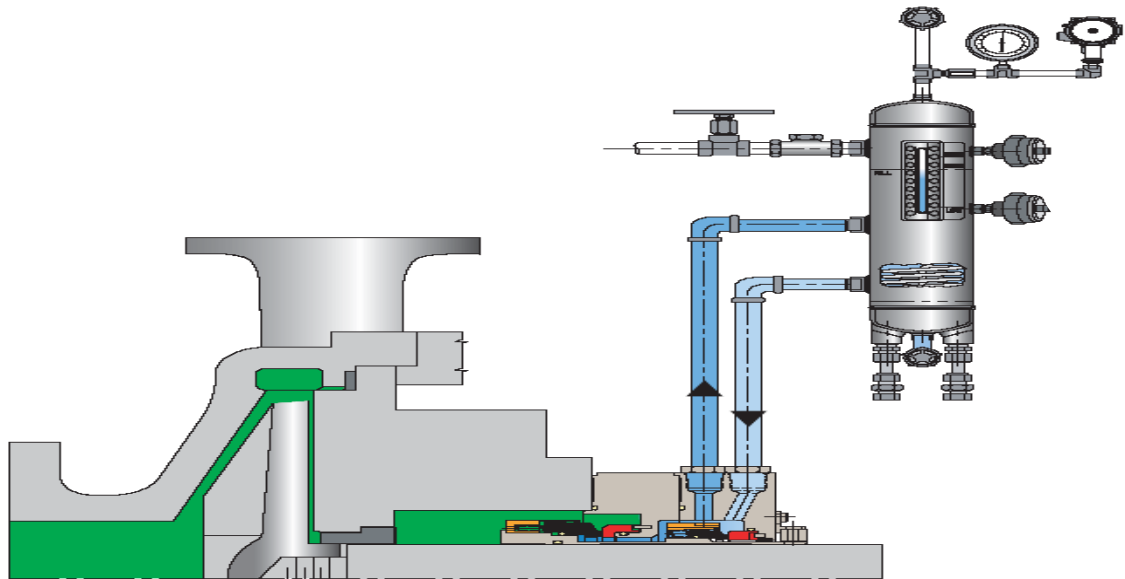
Fuente: presentación curso de John crane.

**Figura 40. Ejemplo plan 52.**



Fuente: autor equipo de la planta U150.

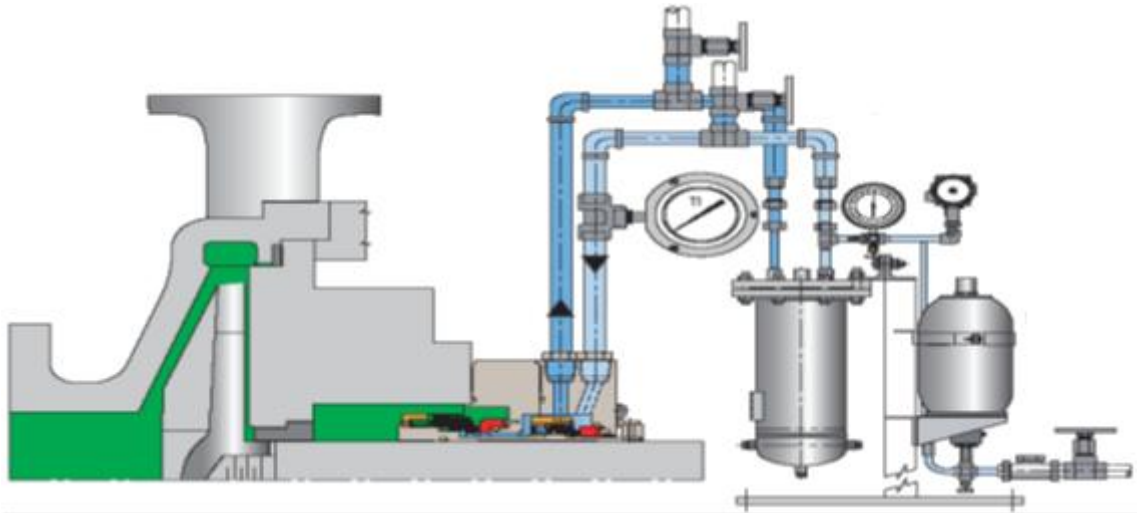
**Figura 41. Plan 53A Circulación de un líquido de barrera desde los Sellos a un reservorio presurizado.**



Fuente: presentación curso de John crane.

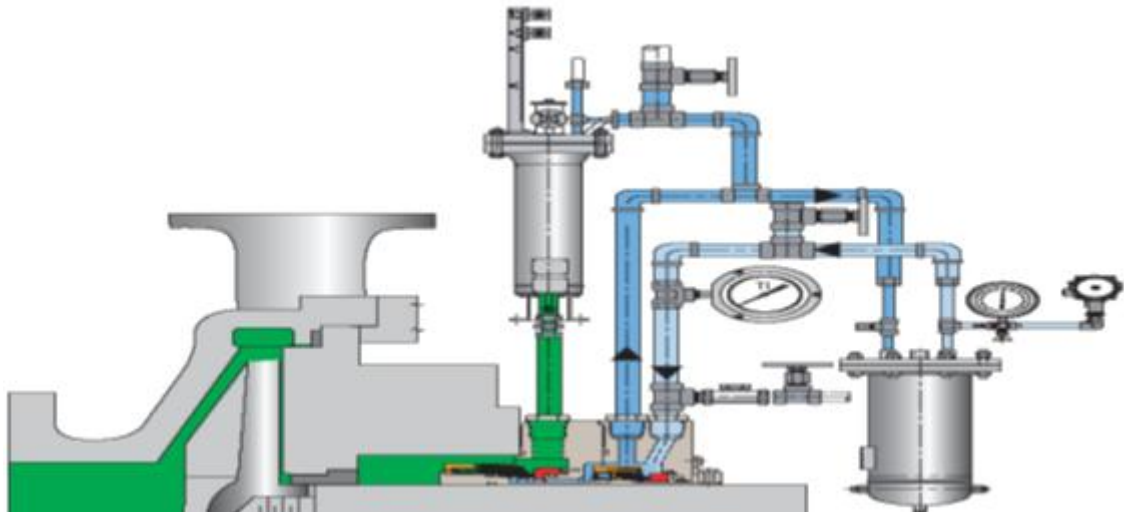
**El Plan API 53B.** Consiste en un circuito cerrado y presurizado de circulación de un fluido de barrera desde la cámara de sellado de un arreglo dual hacia un intercambiador de calor. La presurización se realiza mediante un acumulador de vejiga. En el acumulador de vejiga se inyecta gas a presión que transmite dicha presión sin tener contacto con el fluido barrera y además sirve de amortiguador ante las fluctuaciones de presión. La presurización del fluido de barrera debe estar entre 20 y 30 psi por encima de la presión en la caja de estoperos de la bomba.

**Figura 42. Plan API 53B Circulación Presurizada de un líquido de barrera desde los Sellos a un hacia un intercambiador de calor.**



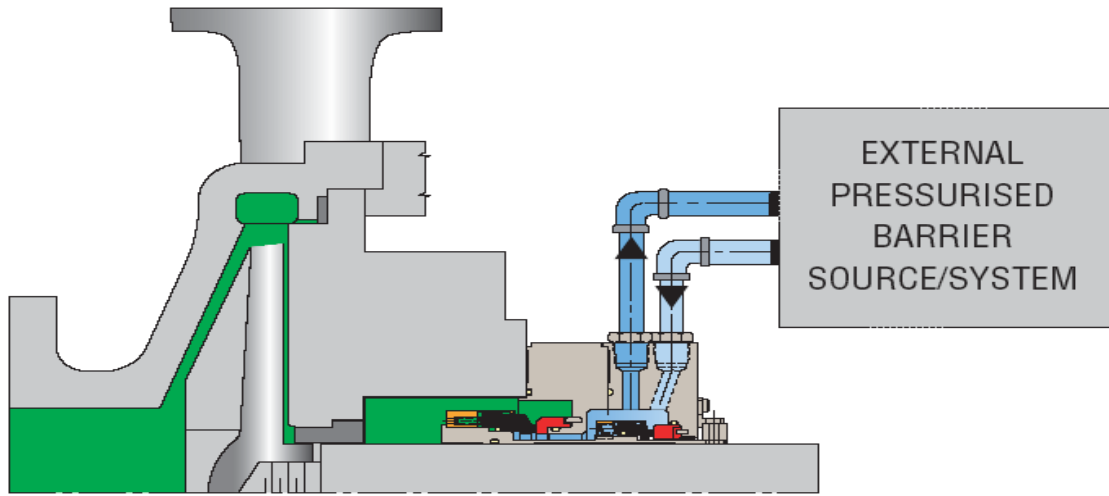
Fuente: presentación curso de John crane.

**Figura 43. Plan API 53C Circulación de un líquido de barrera Presurizado desde los Sellos hacia un intercambiador de calor.**



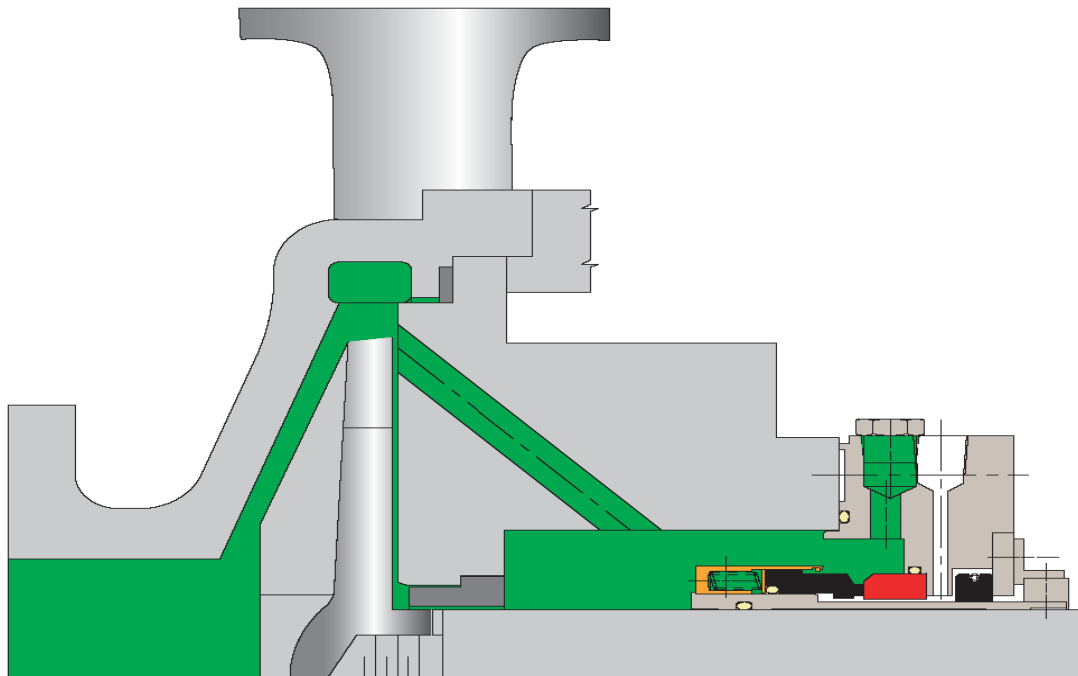
Fuente: presentación curso de John crane.

**Figura 44. PLAN API 54 Inyección de Fuente Externa de un líquido Limpio, Frío y Presurizado. Sello Dual Presurizado (Doble)**



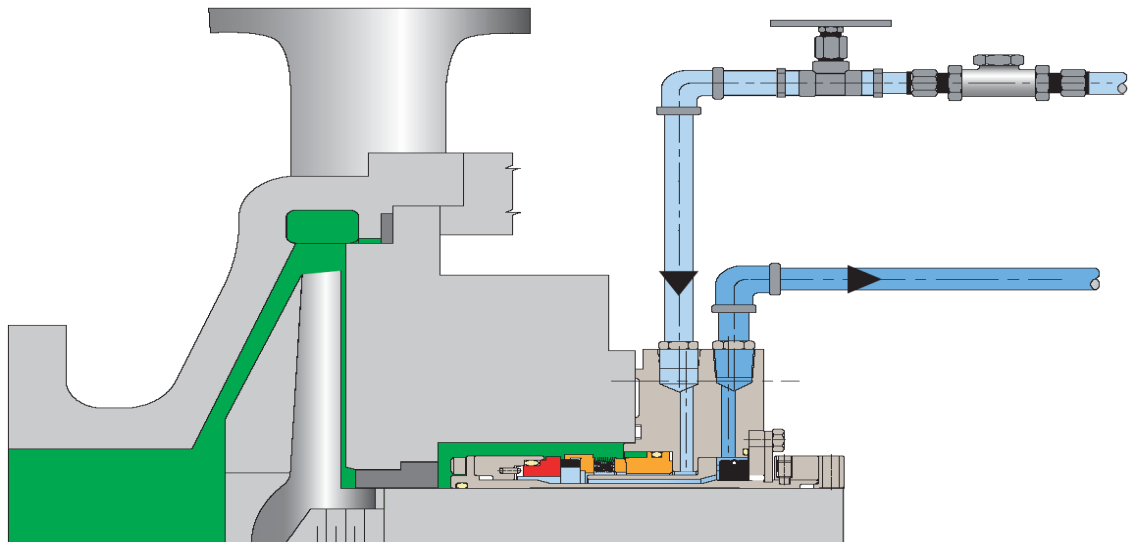
Fuente: presentación curso de John crane.

**Figura 45. Plan API 61 Cámara Auxiliar Con Conexiones Para Venteo y Drenaje**



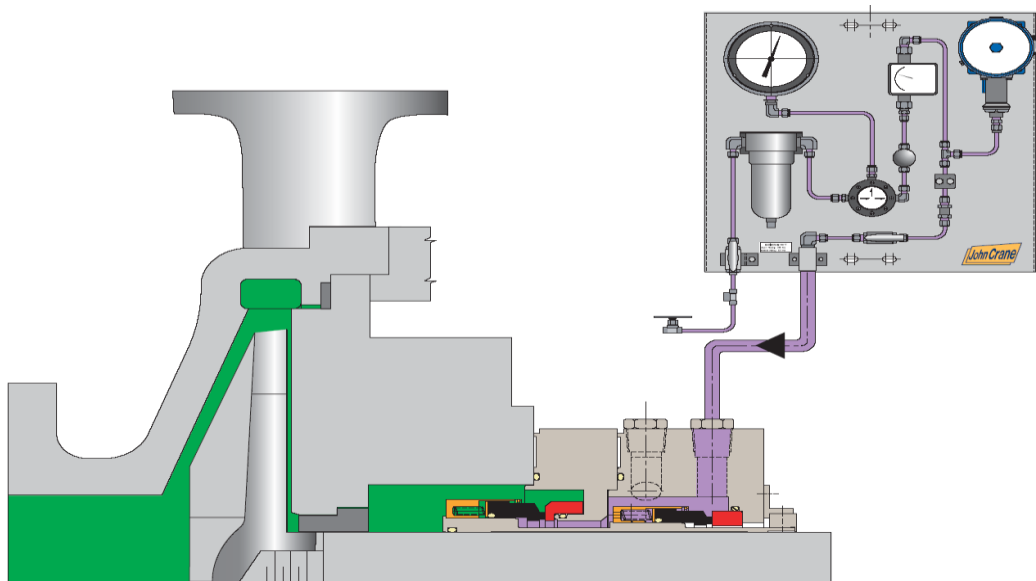
Fuente: presentación curso de John crane.

**Figura 46. Plan API 62 Cámara Auxiliar para Inyección de fuente externa para Lavado.**



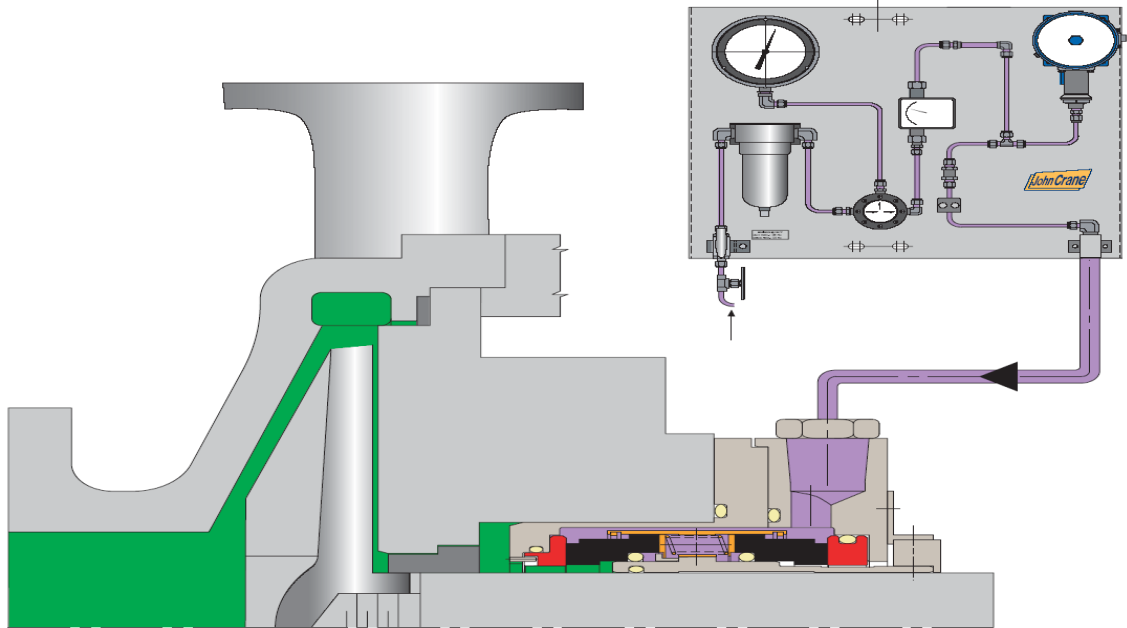
Fuente: presentación curso de John crane.

**Figura 47. Plan API 72 Inyección de fuente externa de Barrera de Gas No presurizada al sello Auxiliar.**



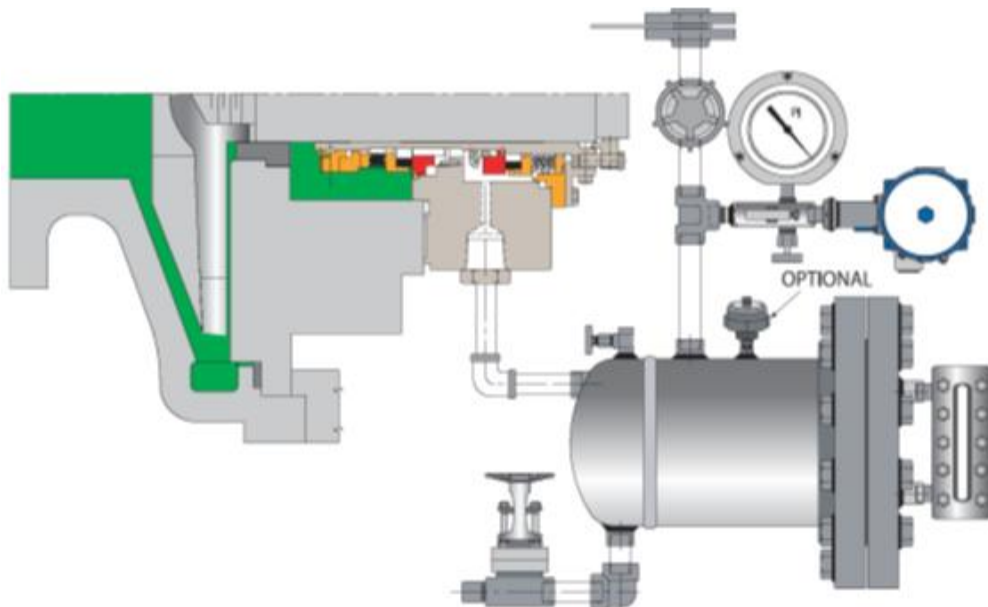
Fuente: presentación curso de John crane.

**Figura 48. Plan API 74 Inyección de fuente externa de Barrera de Gas Presurizada.**



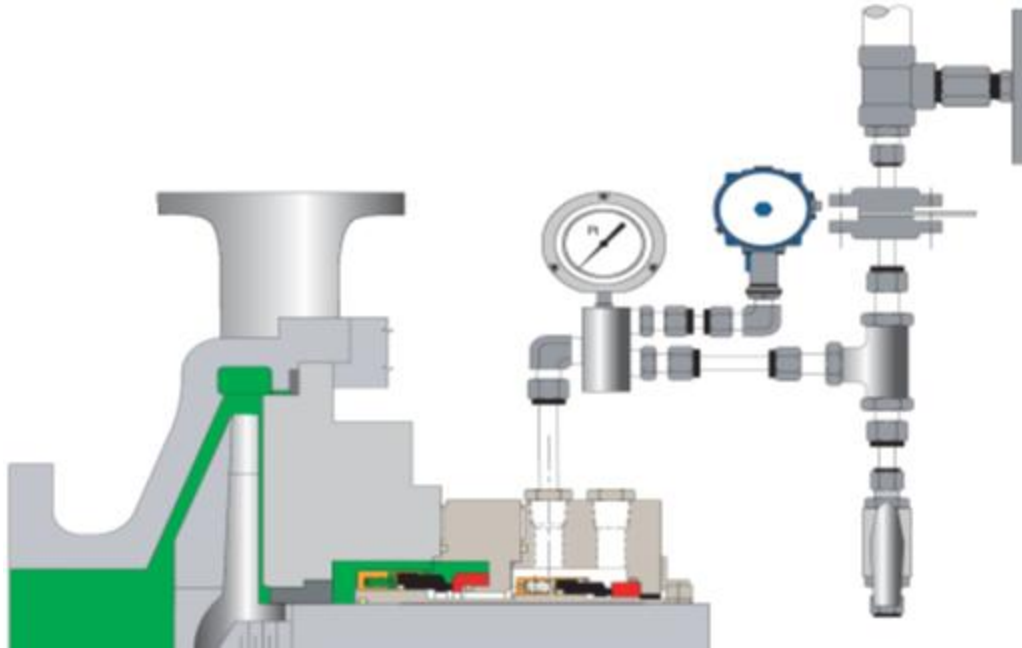
Fuente: presentación curso de John crane.

**Figura 49. Plan API 75 Sistema de Recolección de Fuga Condensada.**



Fuente: presentación curso de John crane.

**Figura 50. Plan API 76 Sistema de Venteo de Fuga no Condensada.**



Fuente: presentación curso de John crane.

**Metalurgia.** El acero inoxidable 316L es el material estándar utilizado para las partes metálicas de los sellos mecánicos. Como una guía para la adecuación del acero inoxidable 316 al medio que se está sellando, si las tuberías de la instalación son de acero, hierro, latón, bronce o acero inoxidable, entonces será compatible. Algunos medios que atacan al acero inoxidable 316L son: 98% de ácido sulfúrico, por encima de la temperatura ambiente. 50% a 85% a 60°C (140°F), destruirá el acero inoxidable 316L. Cuidado con el ácido acético puesto que bajo ciertas condiciones atacará al molibdeno. El ácido fluorhídrico es totalmente inaceptable, utilizar Monel o hastelloy 'C'. Ácido clorhídrico, consultar con Ingeniería John Crane. Ácido sulfúrico, utilizar aleación 20, pero verificar con Ingeniería John Crane. Dióxido de cloro, utilizar titanio, pero verificar con Ingeniería John Crane. El aumento de la temperatura aumenta drásticamente la proporción de corrosión de los ácidos. La aleación 20 es un grado de acero inoxidable que tiene mayor resistencia anticorrosiva que el acero inoxidable 316L. Hastelloy 'C' es una aleación de base de níquel con la adición de molibdeno,

cromo, manganeso, cobre y acero. En resistencia anticorrosiva se encuentra clasificado entre los metales mejor especificados para tal fin.

Hastelloy es la marca registrada de Cabot Corporation. Hastelloy 'C' es el material utilizado como estándar para resortes, puesto que además de sus propiedades anticorrosivas, su 'robustez' es 25% más que para uno de acero inoxidable como el 302. Tampoco sufre fatiga por la acción corrosiva del cloro como podría sufrir el acero inoxidable cuando está expuesto a un medio que contiene cloro, especialmente en secciones de forma fina como pueden ser los resortes utilizados en sellos mecánicos.

El titanio es uno de los materiales comercialmente asequibles que ofrece mejor resistencia anticorrosiva. Es resistente a medios tan agresivos como el ácido nítrico y el dióxido de cloro.

**Carbón.** El carbón estándar utilizado para los sellos mecánicos es un carbón artificial, elaborado con coque, grafito, carbono negro y antracita en combinación con agentes amalgamantes tales como brea de carbón, alquitrán o resina sintética.

El grado de carbón estándar John Crane impregnado de resina se agrupa en la familia 8122 (P101) que contiene los grados específicos 9050, 9051, 9055, 9003.

El carbón es compatible con una extensa gama de productos químicos. Además de sus cualidades de compatibilidad química, el carbón tiene excelentes propiedades de deslizamiento, y es el material preferido para el elemento rotativo del sello primario.

Otras cualidades del carbón se encuentran en su lubricidad, excelente disipación del calor y propiedades de durabilidad. El carbón es poroso (alrededor de 8%) por

lo tanto es necesario impregnarlo al vacío para sellar esta porosidad. La resina fenólica es normalmente el material utilizado para este propósito. El buen rendimiento del carbón se determina por el tipo, composición y textura de sus materiales base y el producto amalgamante utilizado. La impregnación ejerce una influencia secundaria.

**Materiales de Elastómeros.** Viton es el material estándar más usado. Es un caucho de fluoro carbono (FPM), Vitón es el nombre registrado por DuPont. Su resistencia a la temperatura es de -20°C (-4°F) a un máximo de 200°C (400°F). Shore Hardness es 75, lo que proporciona buenas características de desgaste. La temperatura máxima en aplicaciones de alta presión de agua caliente es 80°C (180°F). E.P.R. - Goma de etileno y propileno, la gama típica de temperatura se encuentra entre - 40°C (-40°F) a 150°C (300°F). E.P.R. tiene un Shore Hardness de 75 y mejores características de restablecimiento pero una compresión menos estable que el vitón. Normalmente sólo se utiliza en soluciones de agua caliente y cáusticas/alcalinas. E.P.R. Kalrez - Grado 4079 ofrece una resistencia química similar al teflón y es térmicamente estable hasta una temperatura de 316°C (600°F). Para aplicaciones de agua o vapor extremadamente calientes se deberá utilizar el grado 3018. Aflas - Térmicamente estable hasta 200°C (400°F). Particularmente pertinente en las industria de papel y pulpas, trabajos de licor, también con altas temperaturas de agua y aplicaciones cáusticas.

## **Materiales para las Caras**

### **Carbón/Cerámica**

- Una combinación ampliamente utilizada
- La cerámica es dura (Vickers Hardness 2500)
- Es químicamente resistente

- Cuanto mayor contenido de alúmina, mayor resistencia al calor. Cuanto mayor sea el porcentaje, mejor será la calidad. El grado estándar es 99,5% o grado superfino.
- La cerámica tiene cualidades de disipación del calor muy pobres, también es quebradiza y sufre de un fenómeno conocido como heat checking.

### **Carbón/Oxido de Cromo**

- El óxido de cromo tiene cualidades mucho mejores de disipación de calor que la cerámica.
- Tiene la resistencia química del acero inoxidable 316.
- No es adecuado para aplicaciones extremadamente ácidas o alcalinas.
- Un material de excelente propósito general para su utilización con medios de base acuosa.
- Buenas propiedades en entornos alcalinos.
- No se deberá utilizar en entornos alcalinos  $\text{pH} < 2,5$ .

### **Carburo de Tungsteno/Carburo de Tungsteno**

- No es tan duro como la cerámica (~75 Rockwell C)
- Un material fuerte, bueno mecánicamente.
- Buenas características de shock.
- 12/10/2011 John Crane Colombia S.A. 38
- Muy buena disipación de calor
- No puede utilizarse en situaciones operativas secas bajo ninguna circunstancia.

### **Carbón/Carburo de Tungsteno**

- Buena combinación de agua caliente y temperatura alta o cualquier aplicación similar 'próxima a la vaporización'
- No es tan bueno con aplicaciones abrasivas, pero tiene mejores propiedades de deslizamiento.

Carbón/Carburo de Silicio

- Muy buena compatibilidad química
- Extremadamente buenas cualidades de disipación de calor
- Muy duro
- Muy quebradizo

Carburo de Tungsteno/Carburo de Silicio: Preferido para trabajos abrasivos o ciertas aplicaciones de presión.

Carburo de Silicio/Carburo de Silicio: Para aplicaciones químicas extremadamente severas (Por ejemplo cuando el fluido podría atacar al carburo de tungsteno)

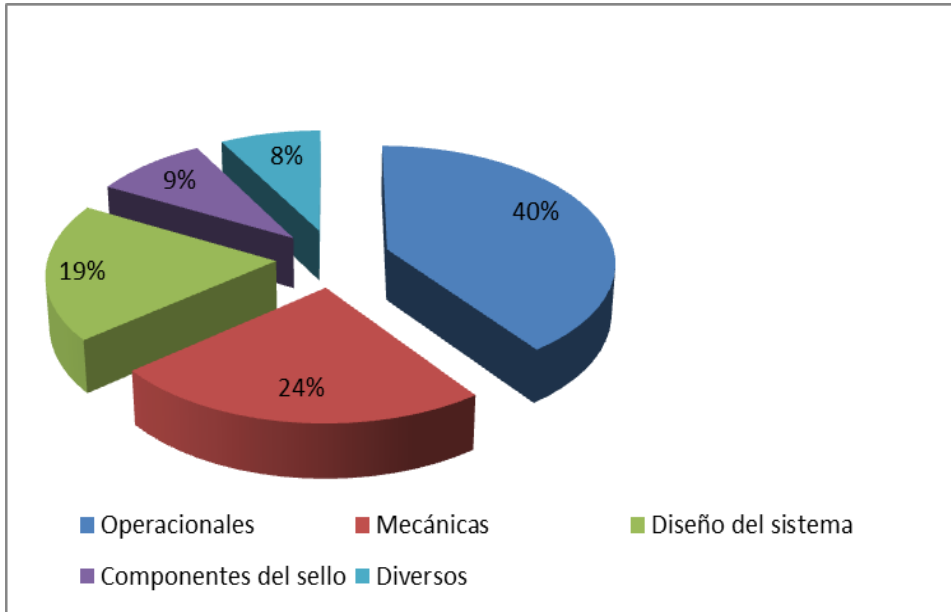
**3.4.2 Causas de fallas en los Sellos.** Se define como el paso o fuga de un fluido a través de los componentes de sellado resultando en una disolución del fluido de proceso, daños al ambiente, o presencia de condiciones inseguras o peligrosas para los usuarios.

Las principales causas comunes son:

- Error operacional.
- Equipo/condiciones del sistema.
- Error de mantenimiento.
- Falla de equipo.
- Contaminantes dentro del fluido.
- Diseño del plan API
- Diseño y/o materiales inadecuados.
- Sello desgastado

1 de cada 10 alcanzan vida normal.

**Gráfica 7. Causas de fallas en sellos**



Fuente: Flowserver, fundamentos sellos mecánicos

**Manipulación Impropia de los Componentes del Sello.** Esta es una de las causas principales de fallas prematuras. Las caras del sellado primario tienen un acabado de precisión y están manufacturadas con materiales de cerámica, carburo de tungsteno y carburo de silicio que son frágiles y fácilmente se astillan, se agrietan, se quiebran o se rayan y se convierten en causa inmediata de falla.

La limpieza también es algo importante, la suciedad o partículas extrañas en las caras, en los elementos del sellado secundario o en los alojamientos y ejes causan una falla prematura o causan un daño suficiente que acorta la vida del sello.

**Montaje Incorrecto del Sello.** La posición a la altura de trabajo del sello es básico, particularmente cuando la altura-carga-velocidad, como en los resortes ondulados y fuelles, son empleados para cargar mecánicamente las caras. La altura de trabajo mal dada, causa una fuerza de cierre muy baja provocando una falla de contacto entre ellas, o cuando la altura es menor a la especificada

provocará una carga mayor que ocasiona una fractura componentes del sello o un desgaste prematuro derivado del aumento de la fuerza de cierre en las caras.

Otras causas comunes son la omisión de la colocación de los elementos del sellado secundario, un alineamiento inapropiado de las caras del sello con el eje y la caja, o un apriete inapropiado de la brida. La falla del sello es provocado por una distorsión en las caras de contacto o una falla de paralelismo entre ellas.

**Impropia del Diseño.** Selección de materiales o diseños no apropiados, para las presiones, temperaturas, velocidad angular y productos químicos en una aplicación dada. El ataque químico al sellado primario o secundario y el excesivo desgaste de las caras son las causas de fallas más frecuentes. Las fallas por extrusión del sellado secundario ocurren cuando los límites de presión, temperatura o ambos son excedidos.

**Procedimientos Impropios de Arranque y de Operación.** Factores adversos que afectan al sello, es decir, presión, velocidad del fluido y temperatura ocasionan una falla inmediata o causan el daño suficiente para reducir la vida normal del sello. El medio en el cual trabajan los sellos mecánicos requiere considerar dos cuestiones básicas:

- a. Lubricación de las caras de contacto
- b. Disipación del calor generado por ellas

El arranque de la bomba con la succión de la bomba cerrada reduce enormemente el enfriamiento del sello y provocará que el sello gire en seco, requiriendo estos casos de un equipo adicional. Los fluidos que tienen un bajo punto de ebullición o un alto punto de fusión requieren un enfriamiento auxiliar o calentamiento, respectivamente antes y durante la operación del sello. Los fluidos que contienen sólidos disueltos o sin disolver, o que son rápidamente descompuestos u oxidados, pueden a su vez requerir controles de temperatura.

**Contaminantes dentro del fluido.** Son causas muy comunes de una falla inicial en los sellos, especialmente en los arranques de nuevas plantas o sistemas donde el fluido está contaminado con materiales de construcción, tales como arena, escorias de soldaduras o productos contaminantes corrosivos en general.

**Malas condiciones del equipo.** Cuando el eje o los rodamientos o chumaceras del eje permiten un movimiento axial o radial mayor al permitido de acuerdo al diseño del sello, provoca un funcionamiento anormal que permite la fuga inmediata o acorta la vida del sello.

### **3.4.3 Tipos de falla.**

- Caras del Sello: Características del contacto, grietas de calor, desgaste, ampollamiento.
- Anillo Primario: Fractura, erosión, fallas, ataque químico.
- Elemento Sellante Secundario: Manejo y almacenaje, extrusión, desgaste, ataque químico.
- Herraje del Sello: Abrasión, corrosión, arrastre del sello
- Fuelle metálico: Fatiga, grietas por esfuerzos corrosivos, distorsión del fuelle.

La Falla puede sobrevenir debido a tres factores básicos: químico mecánico térmico.

#### **Factores Químicos.**

- Ataque químico generalizado desgaste por corrosión y fricción (“fretting”)
- Desgaste por corrosión y fricción
- Ataque químico en O’rings

#### **Factores Mecánicos.**

- Distorsión de las Caras

- Deflexión de las Caras
- Daños en los elementos sellante secundario
- Erosión
- Abrasión

**Factores Térmicos.**

- Agrietamiento de la cara debido al calor
- Vaporización de producto entre caras
- Ampollas
- Coquización
- Daños al elemento sellante secundario

**3.4.4 Análisis de fallas** Es un procedimiento mediante el cual, utilizando una serie de técnicas, ensayos, medidas y observaciones, se determina el origen y las causas de la falla de una pieza, parte o componente de un equipo, máquina o estructura.

**Tabla 8. Causas de fallas en sellos mecánicos.**

Problema	Causa	Solución
El sello lanza pequeñas cantidades de producto a la atmósfera.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El producto se evapora y escapa a través de las caras del sello.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantener el fluido en condición líquida en la cámara del sello.</li> <li>• Verificar las condiciones de operación.</li> <li>• Verificar que el sistema de refrigeración sea el adecuado.</li> </ul>

Problema	Causa	Solución
El sello fuga	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los tornillos de sujeción de la bomba no están bien apretados.</li> <li>• El empaque de la brida puede ser defectuoso.</li> <li>• Las caras del sello pueden no estar planas.</li> <li>• El empaque del eje puede estar dañado.</li> <li>• Las caras pueden estar dañadas.</li> <li>• Excesiva vibración en el equipo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apretar correctamente la brida de sello.</li> <li>• Lapear correctamente las caras de contacto.</li> <li>• Revisar los sistemas de lubricación.</li> </ul>
El sello rechina durante la operación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cantidad insuficiente de líquido en las caras sellantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conectar una línea de mayor <math>\varnothing</math> en la derivación de la línea de lubricación del sello.</li> <li>• Instalar un buje de garganta en el fondo de la caja de empaques para aumentar la presión de la cavidad.</li> <li>• Ventilar la caja de sello.</li> <li>• Verificar la succión de la bomba.</li> </ul>
El polvo del carbón grafito de la cara se acumula en la parte de afuera de la brida.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cantidad de líquido insuficiente entre las caras.</li> <li>• La presión puede ser alta para el tipo de sello instalado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar condiciones de operación.</li> <li>• Verificar sistema de lubricación.</li> <li>• Verificar características técnicas del sello empleado.</li> </ul>

Fuente: Flowserver, fundamentos sellos mecánico.

**Técnicas para Determinar las Fallas y Sus Causas.** Debido a la cantidad de fallas que ocurren en los diferentes equipos se hace necesaria la aplicación de un criterio selectivo para atacar, en primer lugar las fallas que impactan negativamente en los resultados de mantenimiento y luego se aplican otras metodologías para analizar en detalle las causas y sus fallas.

**Principio de Pareto.** Es un método que permite solucionar por orden de importancia y magnitud, la causa de un problema que se debe investigar, hasta llegar a conclusiones que permitan eliminarlos de raíz. Este método proviene de los trabajos del economista italiano Wilfredo Pareto, quien comprobó que aproximadamente el 20% de las causas originan el 80% de las fallas.

### **Análisis Causa-Efecto (Espina de pescado / Diagrama de ishikawa)**

Es una técnica gráfica que permite apreciar con claridad las relaciones entre un problema y las posibles causas que pueden estar contribuyendo para que esto ocurra. El efecto se considera como la característica de calidad que necesita mejora, las causas son los factores de influencia.

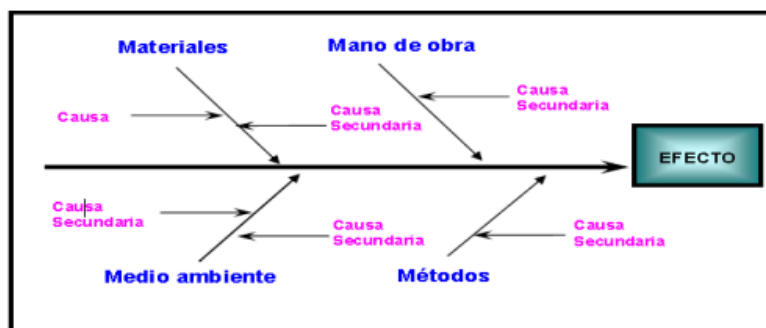
El diagrama Causa-Efecto puede utilizarse para: visualizar, en equipos, las causas principales y secundarias de un problema, la ampliación de la visión de las posibles causas de un problema, enriqueciendo su análisis y la identificación de soluciones, analizar procesos en búsqueda de mejoras, conducir a modificar procedimientos, métodos, costumbres con soluciones, muchas veces, más sencillas, mostrar el nivel de conocimientos técnicos que existen en la empresa sobre un determinado problema, etc.

Los pasos para construir el diagrama Causa-Efecto son los siguientes:

1. Definir con precisión el fenómeno o falla (efecto).
2. Elaborar un listado de todos los aspectos que tienen o podrían tener influencia sobre la aparición de los fenómenos (causas).

3. Ordenar las causas del punto anterior, teniendo presente que algunas son causas principales y otras secundarias; que son las que provocan las causas principales.
4. Dibujar una flecha amplia de izquierda a derecha y escribir el efecto al final de la flecha, como se muestra en la figura 51.

**Figura 51. Representación del esquema de un Diagrama causa- efecto (Ishikawa).**

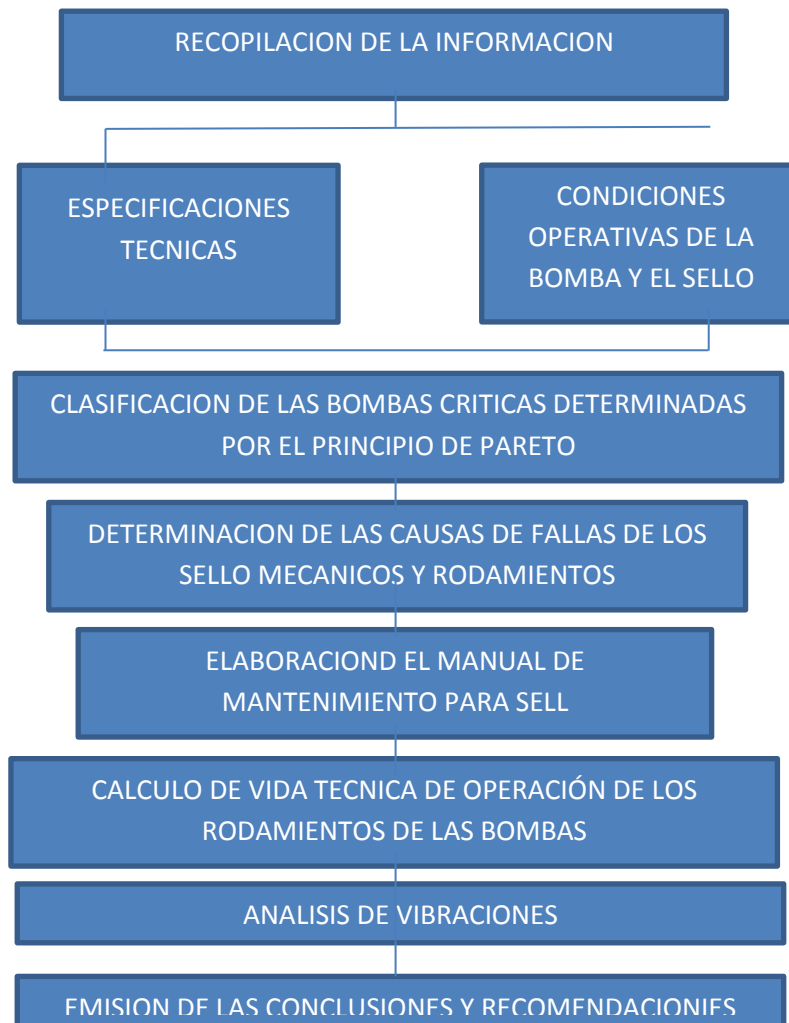


Fuente. Autores.

#### **4. DESARROLLO DEL TRABAJO**

Este capítulo contiene la metodología empleada para determinar las causas de las fallas de los sellos mecánicos y rodamientos de las bombas centrífugas de la U150. Mediante un árbol de falla se analizara al detalle las posibles causas de las fallas de los sellos mecánicos. Se hará un análisis a las vibraciones en los rodamientos. Se elaborara un manual con tareas de mantenimiento y su frecuencia para realizarlas por el operador y otras por personal de mantenimiento.

**Figura 52. Diagrama de bloques de la metodología empleada para desarrollo del trabajo.**



Fuente: Autores.

#### **4.1 DEFINICIÓN DE EQUIPOS CRÍTICOS**

Para definir los equipos se recopiló la información del CMMS Software Elipse de Ecopetrol del departamento de refinación de crudos y se complementa con las carpetas de hoja de vida de los equipos. En la tabla 7 se muestran los equipos que fallaron la causa y el año, los costos de mantenimiento se encuentran en la tabla 7

**Tabla 9. Históricos de fallas equipos U150 entre los años 2007 y 2012.**

EQUIPOS	Causa de falla	Año	EQUIPOS	Causa de falla	Año
SP172A	MEND	2007	SP134B	MADD	2010
SP135B	MROD	2007	SP131F	MSMF	2010
SP131E	MADD	2007	SP136B	MROD	2010
SP164D	MCOD	2007	SP138C	MSMF	2010
SP150F	MROD	2007	SP131F	MSMF	2011
SP158B	MROD	2007	SP153D	MSMF	2011
SP156D	MROD	2007	SP137D	MSMF	2011
SP163A	MSMF	2008	SP157B	MSMF	2011
SP164C	MSMF	2008	SP164C	MSMF	2011
SP157A	MROD	2008	SP155	MSMF	2011
SP172A	MBLD	2008	SP150E	MADD	2012
SP138C	MROD	2008	SP133A	MSMF	2012
SP131F	MROD	2008	SP150F	MROD	2012
SP134A	MADD	2008	SP133B	MROD	2012
SP137C	MSMF	2008	SP134A	MROD	2012
SP131E	MSMF	2009	SP136B	MSMF	2012
SP137D	MADD	2009	SP138C	MSMF	2012
SP137D	MADD	2009	SP131F	MADD	2012
SP137D	MROD	2010	SP153C	MSMF	2012
SP138B	MROD	2010	SP164C	MSMF	2012
SP136A	MSMF	2010			

Fuente. CMMS. Software Eclipse

**Tabla 10. Nomenclatura de Modo de falla.**

MADD: ANILLOS DE DESGASTE DANADOS
MROD: RODAMIENTO DANADO
MSMF: SELLO MECANICO FUGANDO
MCOD: COJINETE DANADO
MADD: ANILLOS DE DESGASTE DANADOS
MBLD: BOMBA DE LUBRICACION DEFECTUOSA
OFPME: FLUIDO DE PROCESO CON MATERIALES EXTRAÑOS
RODIN: REPUESTO PARTE INADECUADA
MCPNA: CAMBIO DE PLANTA NO AUTORIZADO. Condiciones del proceso.

OPRIN: PROCED INADEC ARRANC-APAGA OPE
OPRNA: OPERACION FUERA VENTANA OPERAT
MPRIM: PROCED INADEC ARMADO-ENSAM MTO
OSIIO: SELECCION INADECUADA DE INSUMOS DE OPERACIÓN Producto pesado/taponamiento filtro,

Fuente. CMMS. Software Elipse

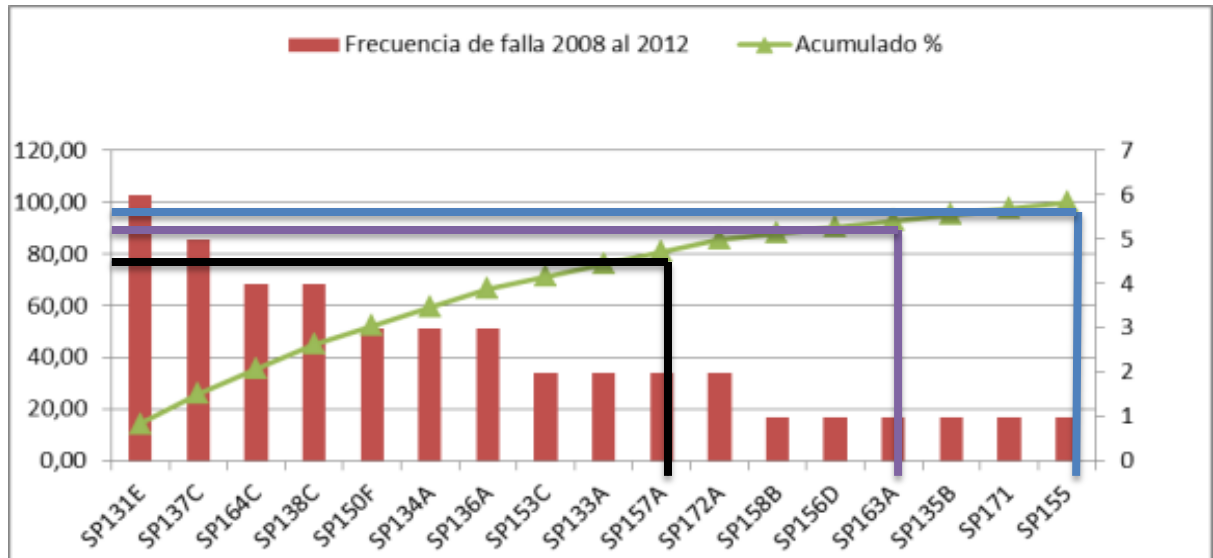
Se organizó la información y se aplicó la metodología del Pareto.

**Tabla 11. Pareto por Frecuencia de falla.**

Equipos U150	Frecuencia de falla 2008 al 2012	Frecuencia de falla %	Acumulado %
SP131E	6	14,29	14,29
SP137C	5	11,9047619	26,19
SP164C	4	9,52	35,71
SP138C	4	9,523809524	45,23
SP150F	3	7,142857143	52,38
SP134A	3	7,142857143	59,52
SP136A	3	7,142857143	66,66
SP153C	2	4,761904762	71,42
SP133A	2	4,761904762	76,19
SP157A	2	4,761904762	80,95
SP172A	2	4,761904762	85,71
SP158B	1	2,380952381	88,09
SP156D	1	2,3809	90,47
SP163A	1	2,3809	92,85
SP135B	1	2,3809	95,23
SP171	1	2,3809	97,62
SP155	1	2,3809	100,00

Fuente. CMMS. Software Elipse.

**Gráfica 8. Pareto frecuencia de falla.**



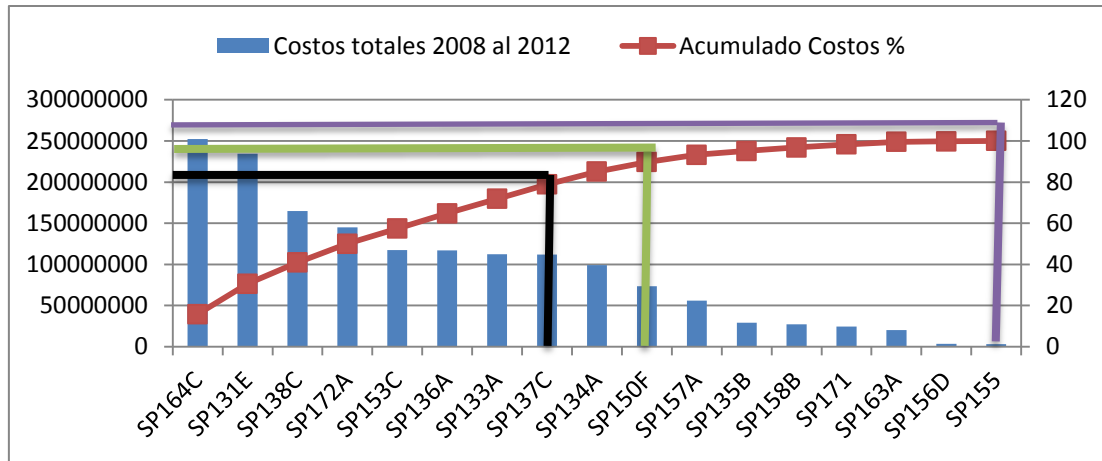
Fuente. Autores.

**Tabla 12. Pareto costos de mantenimiento.**

Equipos U150	Costos totales 2008 al 2012	Costos %	Acumulado %
SP164C	252345276	15,85602205	15,85602205
SP131E	234289668	14,7215046	30,57752664
SP138C	165003277	10,36791986	40,9454465
SP172A	144922055	9,106123703	50,0515702
SP153C	117581576	7,388194821	57,43976502
SP136A	116933217	7,347455423	64,78722045
SP133A	112405964	7,062987156	71,8502076
SP137C	111849807	7,028041237	78,87824884
SP134A	99271428	6,237683446	85,11593229
SP150F	73394949	4,611744463	89,72767675
SP157A	55991226	3,518187968	93,24586472
SP135B	29382932	1,84626566	95,09213038
SP158B	27090085	1,702195467	96,79432584
SP171	24392650	1,532703137	98,32702898
SP163A	20108746	1,263525614	99,5905546
SP156D	3526238	0,22156986	99,81212446
SP155	2990000	0,187875544	100

Fuente. CMMS. Software Elipse.

**Gráfica 9. Pareto costos totales.**



Fuente. Autores.

**Tabla 13. Causas de falla equipos de bombeo U150.**

EQUIPOS	Causa de falla	Año	EQUIPOS	Causa de falla	Año
SP172A	MEND	2007	SP134B	MADD	2010
SP135B	MROD	2007	SP131F	MSMF	2010
SP131E	MADD	2007	SP136B	MROD	2010
SP164D	MCOD	2007	SP138C	MSMF	2010
SP150F	MROD	2007	SP131F	MSMF	2011
SP158B	MROD	2007	SP153D	MSMF	2011
SP156D	MROD	2007	SP137D	MSMF	2011
SP163A	MSMF	2008	SP157B	MSMF	2011
SP164C	MSMF	2008	SP164C	MSMF	2011
SP157A	MROD	2008	SP155	MSMF	2011
SP172A	MBLD	2008	SP150E	MADD	2012
SP138C	MROD	2008	SP133A	MSMF	2012
SP131F	MROD	2008	SP150F	MROD	2012
SP134A	MADD	2008	SP133B	MROD	2012
SP137C	MSMF	2008	SP134A	MROD	2012
SP131E	MSMF	2009	SP136B	MSMF	2012
SP137D	MADD	2009	SP138C	MSMF	2012
SP137D	MADD	2009	SP131F	MADD	2012
SP137D	MROD	2010	SP153C	MSMF	2012
SP138B	MROD	2010	SP164C	MSMF	2012
SP136A	MSMF	2010			

Fuente: Autores

## 4.2 REVISIÓN DE VENTANAS OPERATIVAS

Se recopiló la información de la curva de cada una de las bombas y los data sheet se evidencia que las ventanas operativas por baja están por debajo del flujo mínimo de la bomba en 5 equipos se muestra en la tabla 15. Operar en ese punto de la curva afecta al equipo generando altos valores de vibración (ver grafica 4 del capítulo de rodamientos), acortando la vida útil del sello y los rodamientos.

**Tabla 14. Ventanas operativas y guías de control.**

Item	TAG	DESCRIPCIÓN TAG	UNIDAD	VOH	VOL	GCH	GCL
1	U130-FLUJO MP135A/B	FLUJO MP135A/B	Bls/d	5200	1850	4800	2000
2	U130-FLUJO MP133A	FLUJO MP133A	Bls/d	33000	16500	32500	17800
3	U130- FRCT1305	FLUJO MP134A/B	Bls/d	6600	850	6000	920
4	U130-FLUJO MP136A/B	FLUJO MP136A/B	Bls/d	10000	1700	9200	1850
5	U130-FLUJO MP138B/C	FLUJO MP138B/C	Bls/d	2500	400	2300	450
6	U130- FRCT1303	FLUJO MP139C/D	Bls/d	23500	6700	21600	7300
7	U130- FIO1372	FLUJO MP141A	Bls/d	--	--	--	--
8	U130-FLUJO MP142	FLUJO MP142	Bls/d	1500	500	1380	550
9	U150- FRT15001	FLUJO MP150E	Bls/d	54400	24400	50000	26300
10	U150-FLUJO MP151C	FLUJO MP151C	Bls/d	--	--	--	--
11	U150- FRCT15003	FLUJO MP152C/D	Bls/d	7800	1800	7200	1950
12	U150- FRCT15004	FLUJO MP153C/D	Bls/d	8800	3000	8700	3300
13	U150- FRCT15007	FLUJO MP155	Bls/d	13000	4000	12000	4400
14	U150- FRCT15005	FLUJO MP156C/D	Bls/d	4350	730	4000	800
15	U150- FRCT15006	FLUJO MP157A	Bls/d	32000	8400	29500	9000
16	U150- FICT15008	FLUJO MP158A	Bls/d	5700	950	5300	1050
17	U150- FI15032	FLUJO MP163A	Bls/d	37500	6400	34500	6900
18	U150- FI15057	FLUJO MP164C	Bls/d	60000	15100	55200	16300
19	U150-FLUJO MP165A/B	FLUJO MP165A/B	Bls/d	30500	8000	28000	8700
20	U170-FLUJO MP171A/B	FLUJO MP171 A/B	Bls/d	26700	8200	24600	8800
21	U170-FLUJO MP172A/B	FLUJO MP172 A/B	Bls/d	12300	2400	12000	2600
22	U150- PI15060	presión de succión P- 150 E	psia	35	9	28	9,5
23	U150- PI15061	presión de succión P- 150 F	psia	35	11	28	11,5
24	U150-FLUJO MP131E	FLUJO MP131E	Bls/d	36000	8000	33200	8500

Fuente. Página de Ecopetrol en RIS ventanas operativas U150.

**Tabla 15. Equipos con ventanas operativas por debajo de su flujo mínimo.**

<b>U150</b>	<b>Flujo min DATA SHEET</b>
<b>EQUIPO</b>	<b>BPD</b>
SP131E/F	10630
SP152C/D	2150
SP157A	10000
SP164C	17150
SP171A/B	9800

Fuente: Data sheet de cada uno de los equipos.

#### **4.3 CÁLCULOS DE VIDA TEÓRICA DEL RODAMIENTO RADIAL**

Para el cálculo de la vida teórica se utilizó una hoja en Excel para graficar 13 puntos, valores de flujo mínimo hasta flujo máximo el 120% de su BEP para cada bomba. Aplicando las formulas 1, 3, 4, 5, 6,7 y los valores las tablas 10, 11, 12. Los datos técnicos de los equipos y condiciones operacionales están recopilados en la tablas 16, 17, 18.

**Tabla 16. Información recopilada de los data sheet.**

DATOS TECNICOS DE LOS DATA SHEET DE LOS EQUIPOS											
EQUIPO	Producto	plan de sello	Curva BPD	Flujo min BPD	Flujo max BPD 120 %	Flujo BPD 70 %	CABEZA FT	Temperatura Max. (°F)	NPSHR (FT)	SP.GR	Presion de Vapor (PSIA)
SP131E/F	Crudo Reducido	32--62	37000	10630	44400	25900	550	700	11,8	0,76	35,1
SP133A/B	Reflujo de cima T131	11--62	32500	17800	39000	22750	360	350	20	0,87	15,5
SP134A/B	Destilado parfinico liviano	11--62	6170	920	7404	4319	390	493	20	0,82	2,63
SP135A/B	Destilado parfinico medio	11--62	5000	2000	6000	3500	470	556	20	0,74	2,3
SP136A/B	Destilado parfinico pesado	11--62	9600	1835	11520	6720	400	688	11	0,76	3,2
SP137C/D @2200RPM	Fondos de vacio	32/21--62	5775	1800	6930	4042,5		690	8	0,81	2,1
SP137C/D @2800RPM	Fondos de vacio	32/21--62	7350	6000	8820	5145	640	690	8	0,81	2,1
SP138B/C	Reciclo	32--62	2570	240	3084	1799	430	745	17	0,74	2
SP139C/D	Reflujo medio T131.	21--62	20600	7440	24720	14420	220	660	25	0,77	1,4
SP141A/B	gasoleo relojera.	11	3400	1375	4080	2380	240	150	15	0,99	
SP142	agua de proceso	11	1200	350	1440	840	105	160	8	0,98	4,7
SP150E/F	Crudo carga	11--62	44570	13400	53484	31199	880	150	27	0,88	3
SP151C	Nafta liviana.	11--62	13700	6875	16440	9590	265	110	12	0,72	31,2
SP151D @2900 rpm	Nafta liviana.	11--62	11076	3434	13291	7753,2		110	12	0,72	31,2
SP152C/D	JET	11--62	7200	2150	8640	5040	450	450	25	0,65	34
SP153C/D	ACPM	11--62	5500	900	6600	3850	278	500	20	0,71	25
SP155	Reflujo inferior	11--62	15400	1720	18480	10780	240	598	25	0,67	34
SP156C/D	Gasoleo atmosferico	21--62	3430	400	4116	2401	475	655	10	0,7	36
SP157A/B	Reflujo medio T150	11--62	34200	10000	41040	23940	305	450	20	0,67	27,9
SP158A/B	agua de lavado	11--62	4800	700	5760	3360	650	200	25	0,99	1,3
SP163A/B	Agua miramar.	11--62	28800	6620	34560	20160	272	90	25	0,99	0,68
SP164C/D	Reforzadora carga	11--62	48000	17150	57600	33600	800	350	20	0,81	30
SP165A/B	Nafta pesada	11--62	21900	8250	26280	15330	340	600	14	0,73	25
SP171A/B	Nafta virgen T171,	21--52	23400	9800	28080	16380	580	130	17	0,69	24
SP172A/B	Butanos	31--52	11450	2500	13740	8015	950	170	18,4	0,52	91,3

Fuente: carpeta de hoja de vida de los equipos U150

**Tabla 17. Información recopilada de los data sheet.**

DATOS TECNICOS DE LOS DATA SHEET DE LOS EQUIPOS									
Equipo	Diámetro Impulsor pulgadas RAT	Viscosidad SCT	Balinera axial	Carga dinámica C (N)axial	Carga dinámica C (LBf)axial	Balinera radial	Carga dinámica C (N)radial	Carga dinámica C (LBf)radial	Ancho del impulsor en la descarga (in)
SP131D	12,625	1	5310	95200	21401,8168	6212	55300	12431,9377	0,87
SP131E/NP	12,625	1	7310	74100	16658,3469	6212	55300	12431,9377	0,67
SP133A/NP	10,25	29	7311	85200	19153,7268	6310	65000	14612,585	0,76
SP134A/B	9,87	4	7309	60500	13600,9445	6308	42300	9509,4207	0,35
SP135A/B	10,875	9,29	7312	95600	21491,7404	6312	55300	12431,9377	0,67
SP136A/B	10,5	26	7311	85200	19153,7268	6310	65000	14612,585	0,67
SP137 C	12,625	3,2	7312	95600	21491,7404	6212	55300	12431,9377	0,68
SP137D/NP	12,625	3,2	7312	95600	21491,7404	6212	55300	12431,9377	0,68
SP138A	10,625	0,8	7312	95600	21491,7404	6212	55300	12431,9377	0,63
SP139B	8,159	0,8	7311	85200	19153,7268	6310	65000	14612,585	0,88
SP139C	8,159	0,8	7311	85200	19153,7268	6310	65000	14612,585	0,88
SP141	7,93		7308	49400	11105,5646	6307	35100	7890,7959	0,31
SP142A/B	10,75	0,5	7312	95600	21491,7404	6212	55300	12431,9377	0,67
SP150E/NP	15,7	45	7314	119000	26752,271	6215	68900	15489,3401	0,69
SP151C/NP	9,81	0,6	7309	60500	13600,9445	6210	37100	8340,4139	0,67
SP151D	9,81	0,6	7309	60500	13600,9445	6210	37100	8340,4139	0,67
SP152C/D	10,761	0,3	7313	116000	26077,844	6214	63700	14320,3333	0,67
SP153C/D	10,5	0,37	7309	60500	13600,9445	6210	37100	8340,4139	0,31
SP155	8,5	0,37	7309	60500	13600,9445	6210	37100	8340,4139	0,72
SP156C/D	10,12	0,4	7312	95600	21491,7404	6212	55300	12431,9377	0,75
SP157A/NP	8,43	0,34	7311	85200	19153,7268	6212	55300	12431,9377	1
SP158A	10		7311	85200	19153,7268	6212	55300	12431,9377	0,71
SP163A	8,5	0,18	5311	49200	11060,6028	6311	74100	16658,3469	1,1
SP164C/NP	14,5	4,51	5310	95200	21401,8168	6212	55300	12431,9377	1,2
SP165A/B	9,75	0,55	7311	85200	19153,7268	6211	46200	10386,1758	
SP171A/B	12,625	0,42							
SP172A/B	6,1	0,21							
SP164A	14,5	4,51	5310	95200	21401,8168	6212	55300	12431,9377	
SP138B	10,625	0,8	7313	116000	26077,844	6214	63700	14320,3333	

Fuente: carpeta de hoja de vida de los equipos U150.

Tabla 18. Condiciones operativas de los equipos de bombeo U150.

CONDICIONES OPERATIVAS DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO								
EQUIPO	Producto	Presión de succión PSI	Presión de descarga PSI	Vibración operación (in/s)	PCH	Temperatura de proceso (°F)	Flujo operación (BPD)	% operación
SP131E/F	Crudo Reducido	12	240	0,16		544	14500/9000	39-25
SP133A/B	Reflujo de cima T131	-29	150	0,17		366	30000	92
SP134A/B	Destilado parfinico liviano	3	130	0,19		454	3000	41
SP135A/B	Destilado parfinico medio	-13	160	0,11		563	2000	50
SP136A/B	Destilado parfinico pesado	-16	160	0,08		590	2100	36
SP137C/D @2200RPM	Fondos de vacío	-20 InHg	100	0,08		600		
SP137C/D @2800RPM	Fondos de vacío	-21 InHg	150	0,11		600		
SP138B/C	Reciclo	-27	130	0,17		612	1400	51
SP139C/D	Reflujo medio T131.	-28	85	0,07		510	8500/10000	41
SP141A/B	gasóleo relojera.	-12	120	0,06		95	660	47
SP142	agua de proceso	-12	60	0,13		120	1150	96
SP150E/F	Crudo carga	25	420	0,11		95	38000/28000	85-67
SP151C	Nafta liviana.	21	140	0,083		130	11000/3500	73-26
SP151D @2900 rpm	Nafta liviana.	21	70	0,083		130	11000/3500	73-26
SP152C/D	JET	29	140	0,077		351	5500/2500	69-39
SP153C/D	ACPM	23	150	0,18		480	8000/7000	113-55
SP155	Reflujo inferior	10	110	0,071		543	8000	71-41
SP156C/D	Gasóleo atmosférico	24	150	0,076		530	700	58
SP157A/B	Reflujo medio T150	13	130	0,12		380	18000	51-35
SP158A/B	agua de lavado	15	275	0,088		110	2000	40
SP163A/B	Agua Miramar.	13	208	0,07		95	24000	85
SP164C/D	Reforzadora carga	18	320	0,066		265	25000	57
SP165A/B	Nafta pesada	18	160	0,08		125	12000/9000	64-41
SP171A/B	Nafta virgen T171,	39	200	0,17		128	18000	80-47
SP172A/B	Butanos	70	330	0,06		96	11500	96

Fuente: Recopilación de datos por autor en DSC y campo equipos U150.

Con los datos recopilados de los equipos se introducen las formulas (6,7 y 1), en la hoja de Excel para graficar las fuerzas radiales por efector hidráulicos sobre el impulsor y la vida teórica en días del rodamientos radial. En la tabla 16 se muestran los valores de los 13 puntos graficados de la fuerzas radiales del equipo SP131.

$$F_R = 0.433 \cdot k_R \cdot S_G \cdot H \cdot D_2 \cdot b_2 \quad (6)$$

Para rodamientos  
deBolas

$$L_{10} = \left( \frac{C_r}{P} \right)^3$$

$$L_{10} = \left( \frac{C_r}{P} \right)^{\frac{10}{3}}$$

Para rodamientos  
de Rodillos

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \cdot \left( \frac{C_r}{P} \right)^3$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \cdot \left( \frac{C_r}{P} \right)^{\frac{10}{3}}$$

(1)

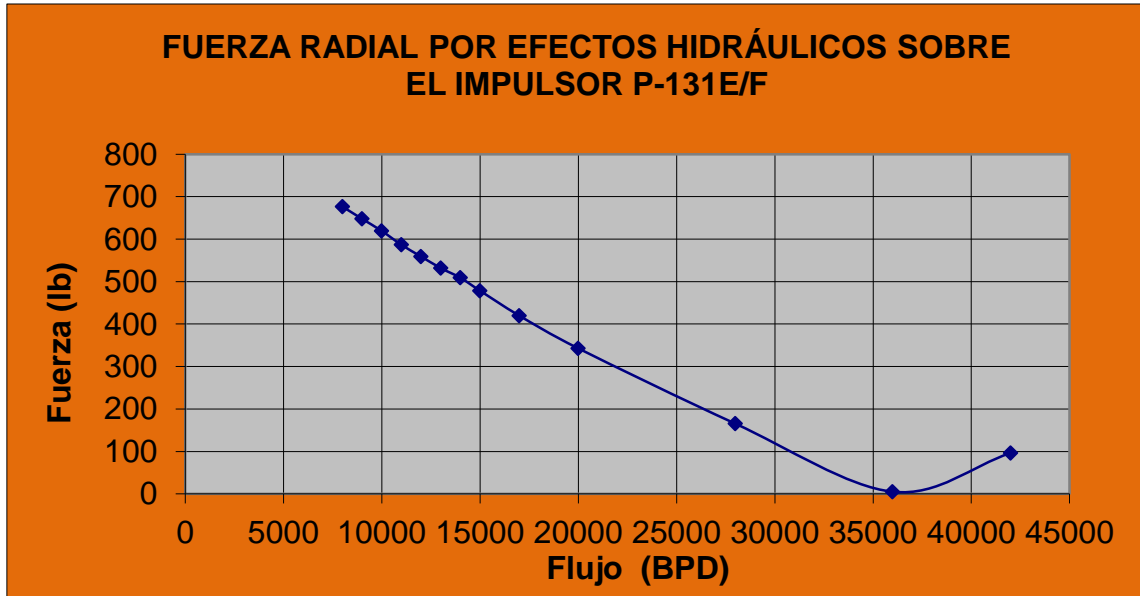
$$K_R = 0.36 \cdot (1 - Q/Q_{EP}) \quad (7)$$

Tabla 19. Hoja de cálculo SP131.

FLUJO BPD	FLUJO (GPM)	QBEP (BPD) *	(CQ)	% QBEP	H (ft)	FUERZA (lb)
8000	233	36260		22%	670	676,35
9000	263	36260		25%	665	647,55
10000	292	36260		28%	660	619,10
11000	321	36260		30%	650	586,51
12000	350	36260		33%	645	558,95
13000	379	36260		36%	640	531,76
14000	408	36260		39%	640	508,90
15000	438	36260		41%	630	478,44
17000	496	36260		47%	610	419,67
20000	583	36260		55%	590	342,69
28000	817	36260		77%	560	165,23
36000	1050	36260		99%	550	5,11
42000	1225	36260		116%	470	96,37

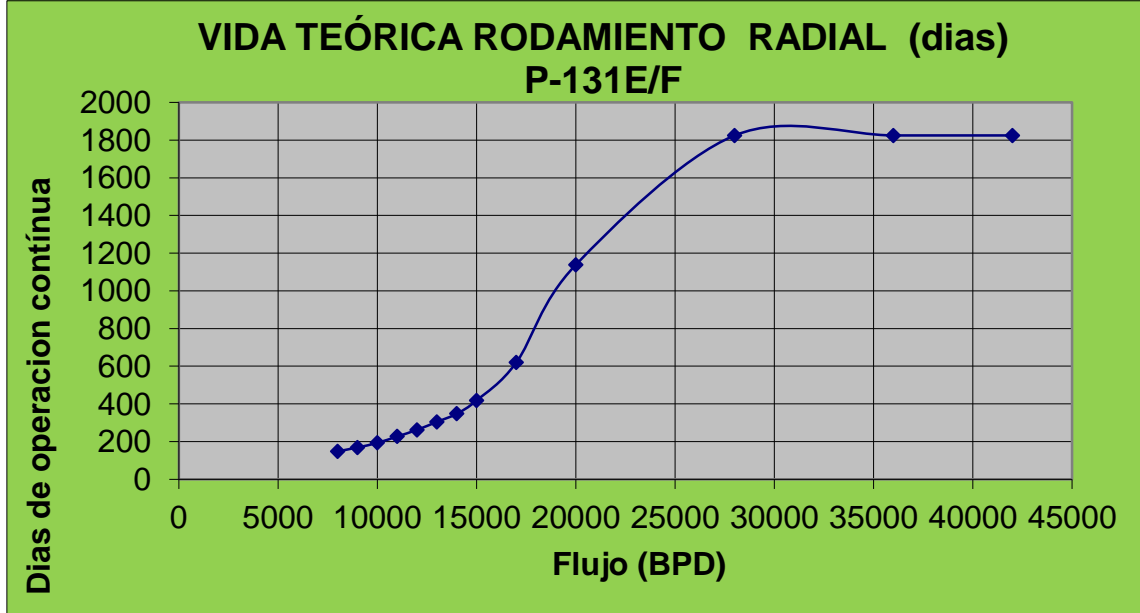
Fuente: Autores.

**Gráfica 10: Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP131.**



Fuente: Autores.

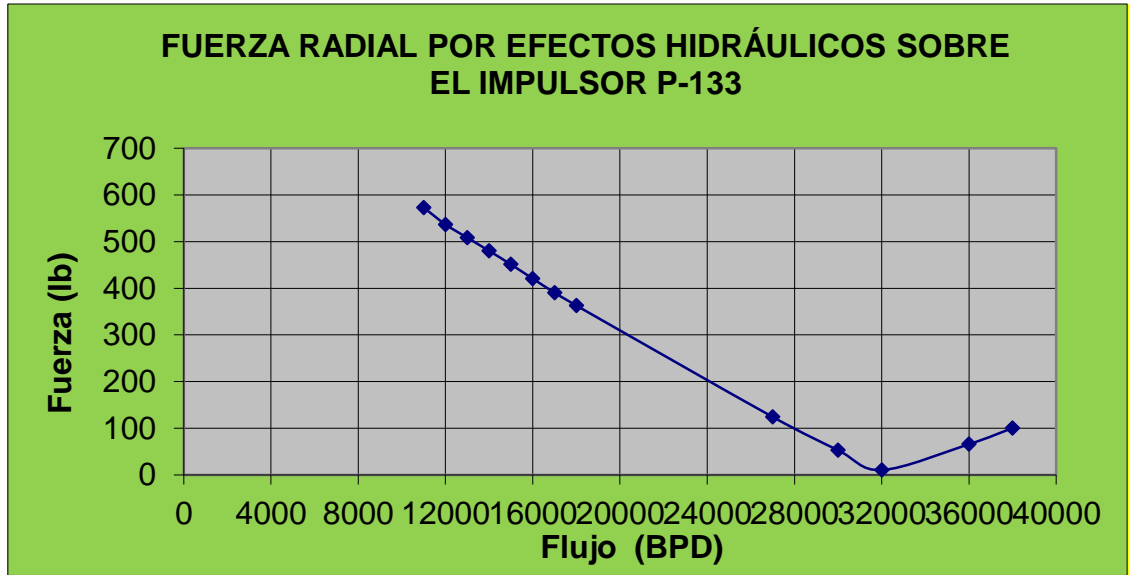
**Gráfica 11. Vida Teórica del rodamiento radial SP131.**



Fuente: Autores.

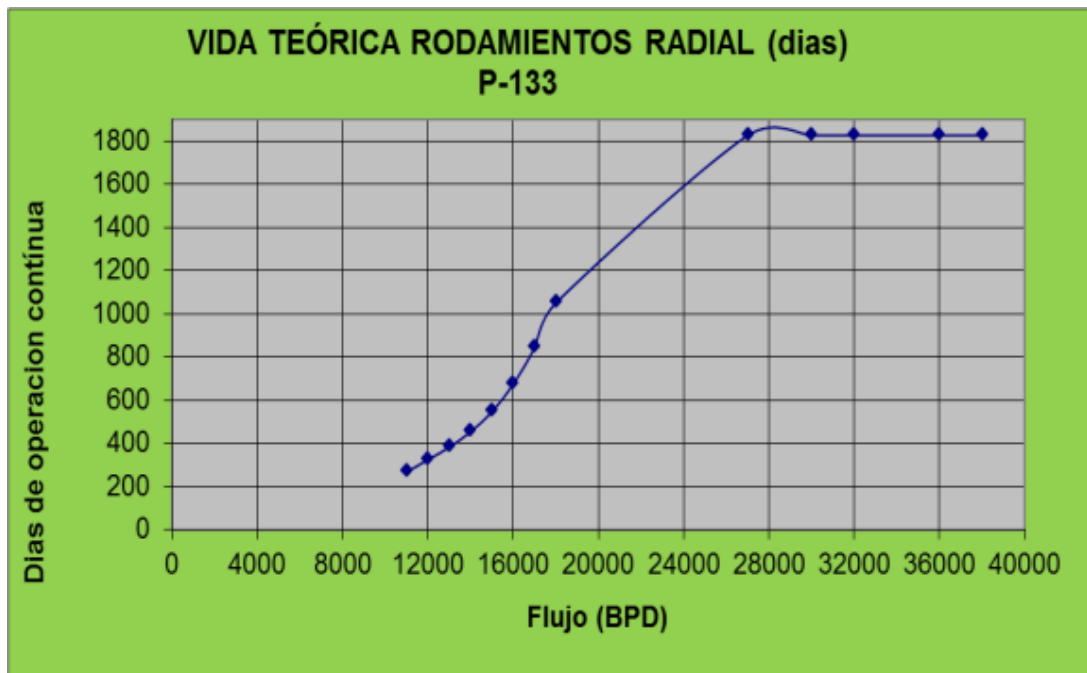
Teóricamente el rodamiento falla por fatiga a los 418 días.

**Gráfica 12: Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP133.**



Fuente: Autores.

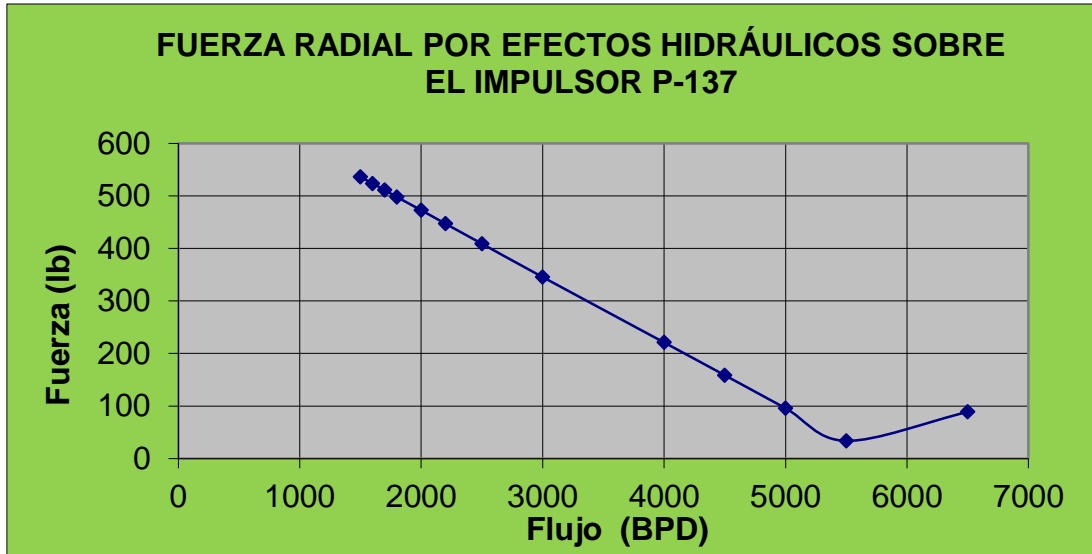
**Gráfica 13. Vida Teórica del rodamiento radial SP133.**



Fuente: Autores.

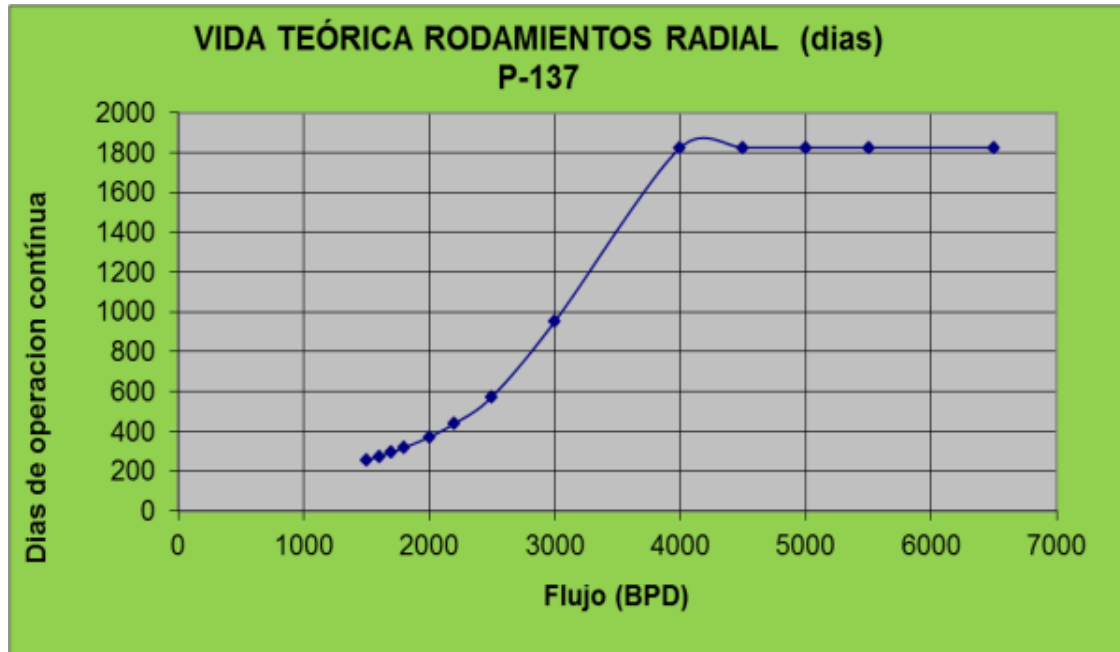
Teóricamente el rodamiento falla por fatiga a los 1825 días

**Gráfica 14: Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP137.**



Fuente: Autores.

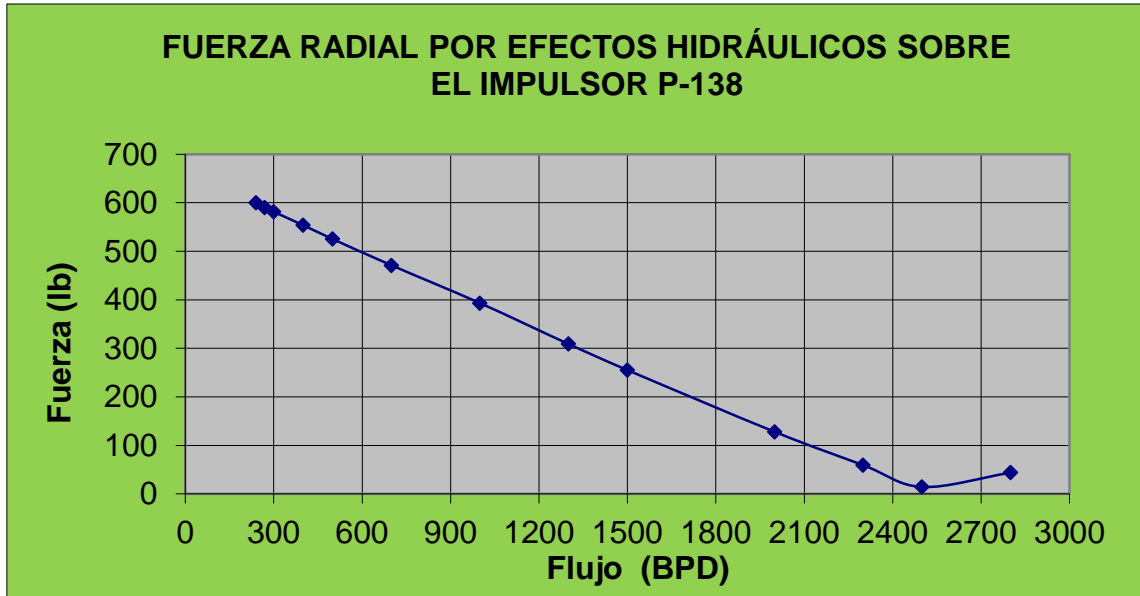
**Gráfica 15. Vida Teórica del rodamiento radial SP137.**



Fuente: Autores.

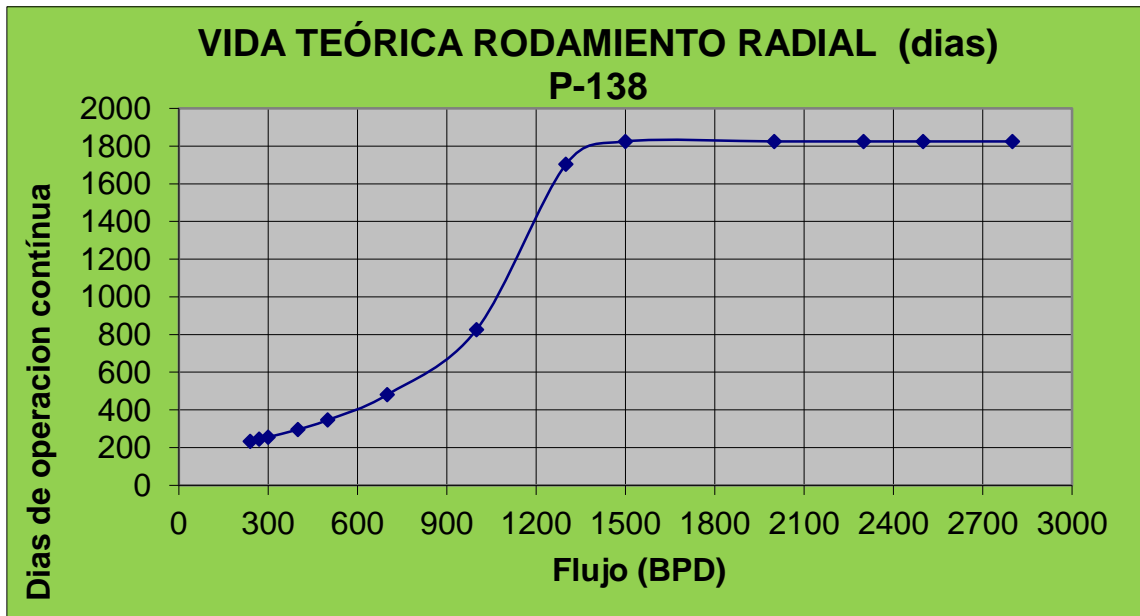
Teóricamente el rodamiento falla por fatiga a los 439 días

**Gráfica 16. Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP138.**



Fuente: Autores.

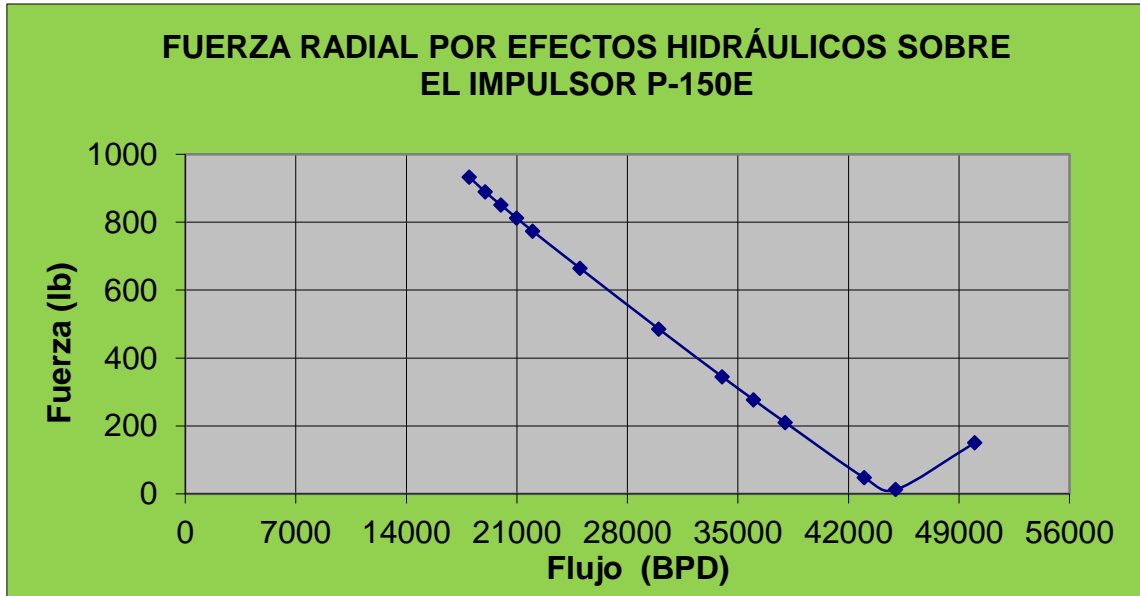
**Gráfica 17. Vida Teórica del rodamiento radial SP138.**



Fuente: Autores.

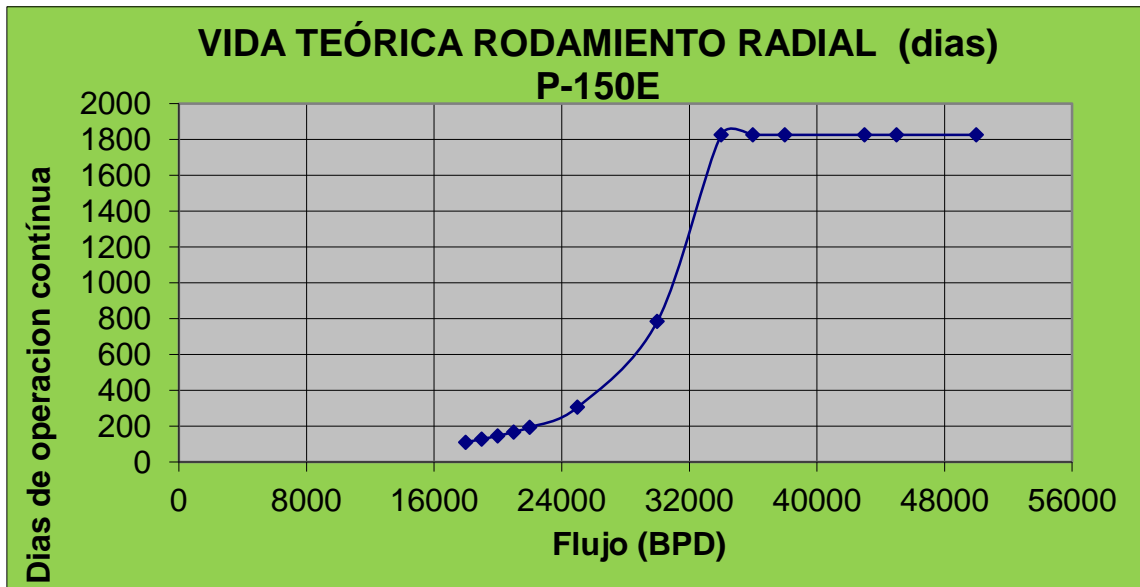
Teóricamente el rodamiento falla por fatiga a los 1825 días.

Gráfica 18. Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP150.



Fuente. Autores

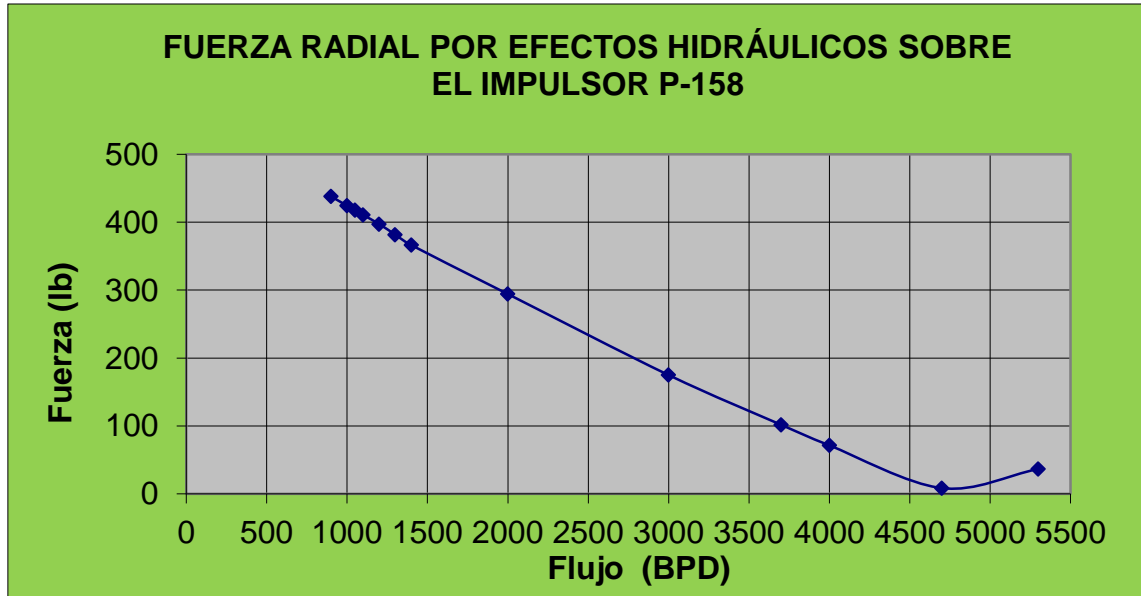
Gráfica 19. Vida Teórica del rodamiento radial SP138.



Fuente: Autores.

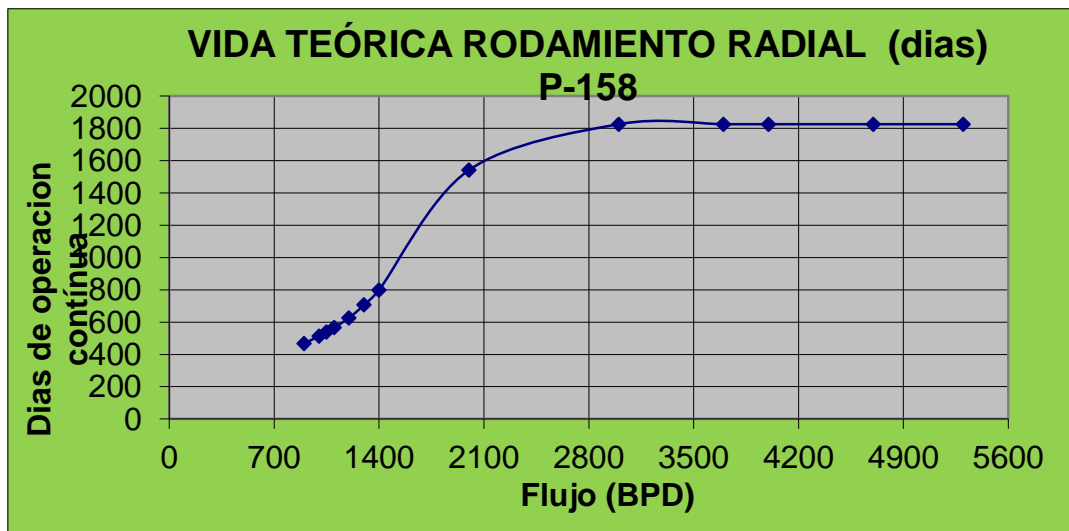
Teóricamente el rodamiento falla por fatiga a los 785 días.

Gráfica 20. Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP158.



Fuente. Autores

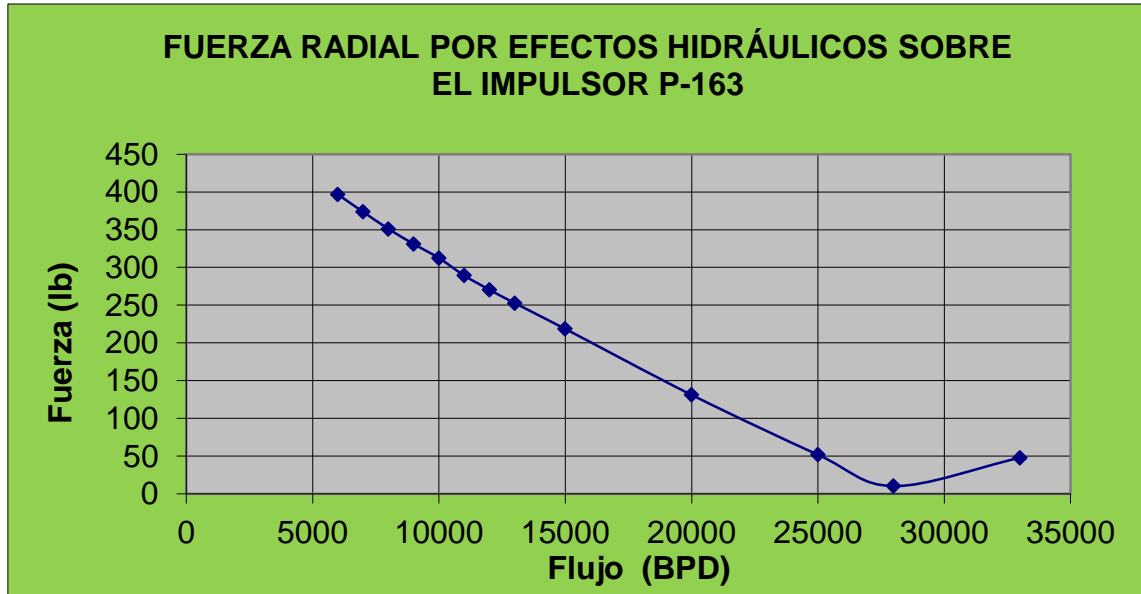
Gráfica 21. Vida Teórica del rodamiento radial SP158.



Fuente. Autores

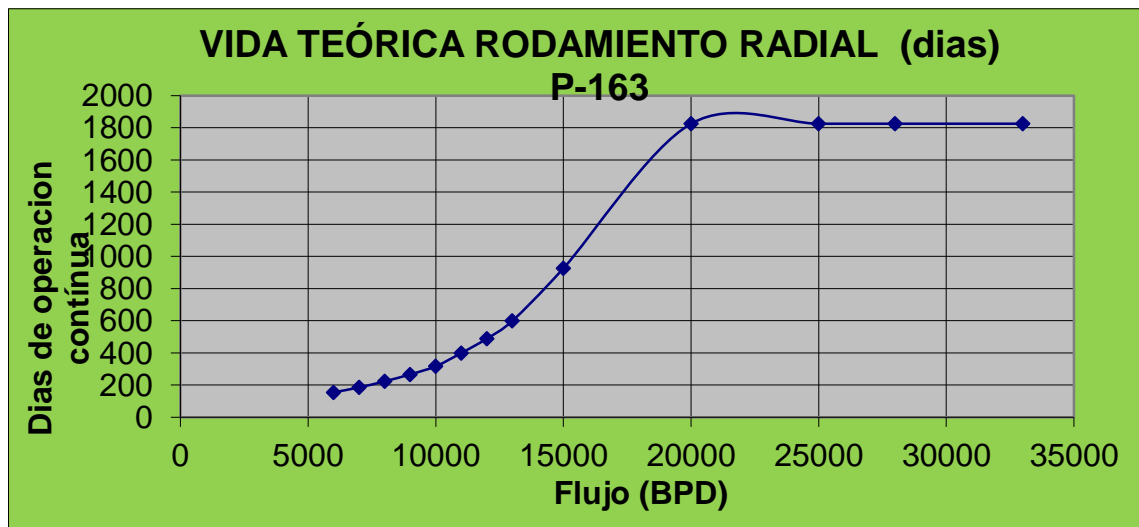
Teóricamente el rodamiento falla por fatiga a los 799 días según su flujo de operación.

**Gráfica 22. Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP163.**



Fuente. Autores

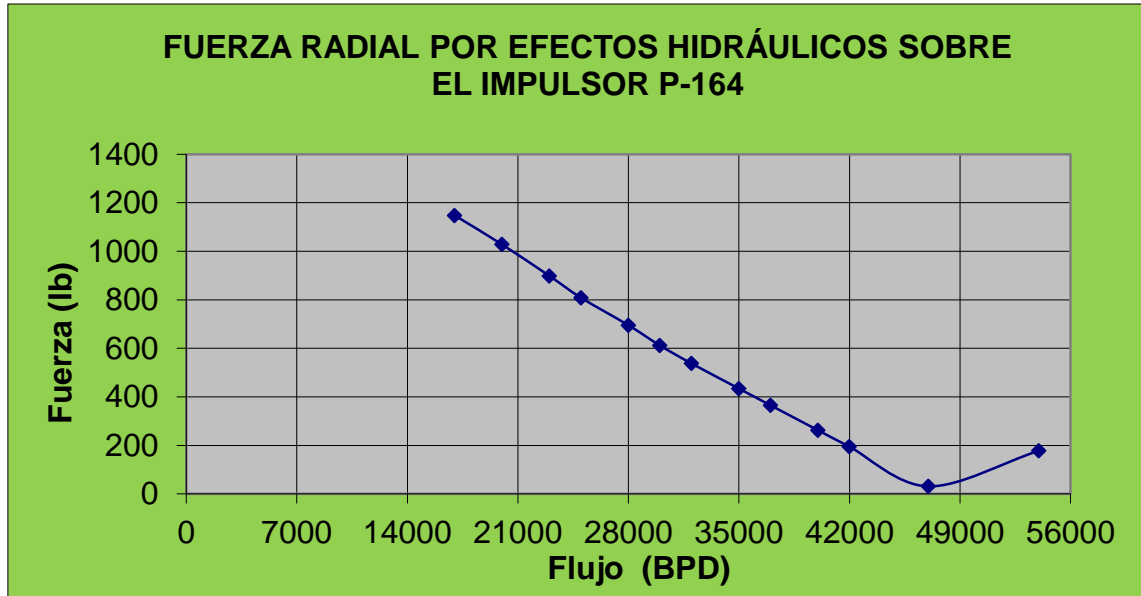
**Gráfica 23. Vida Teórica del rodamiento radial SP163.**



Fuente. Autores.

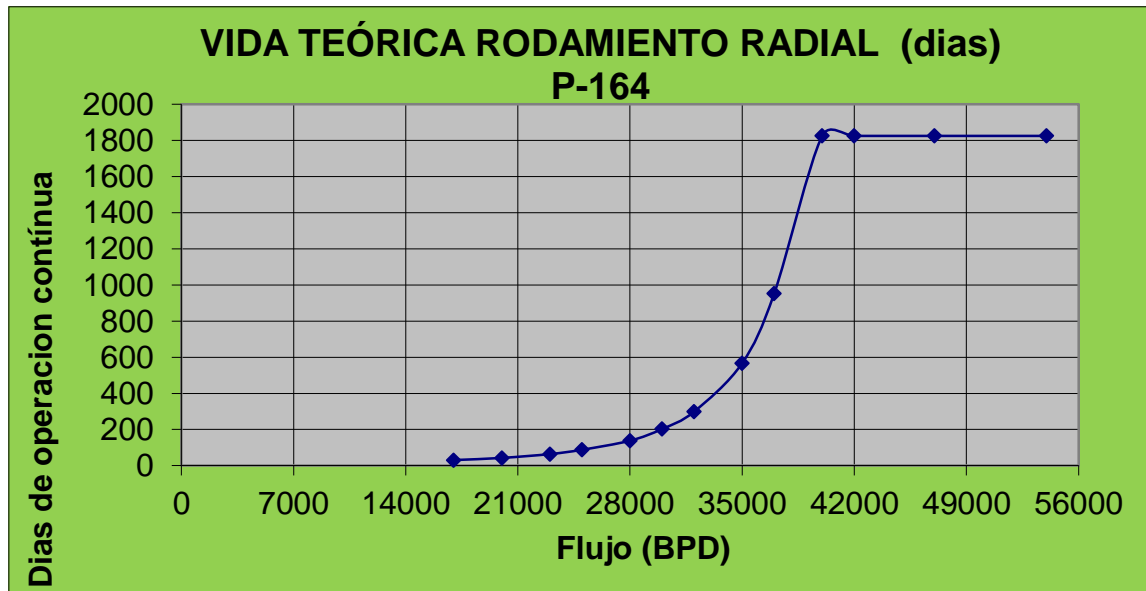
Teóricamente el rodamiento falla por fatiga a los 1825 días según su flujo de operación.

**Gráfica 24. Fuerzas radiales por efectos hidráulicos SP164**



Fuente. Autores.

**Gráfica 25. Vida Teórica del rodamiento radial SP164.**



Fuente. Autores.

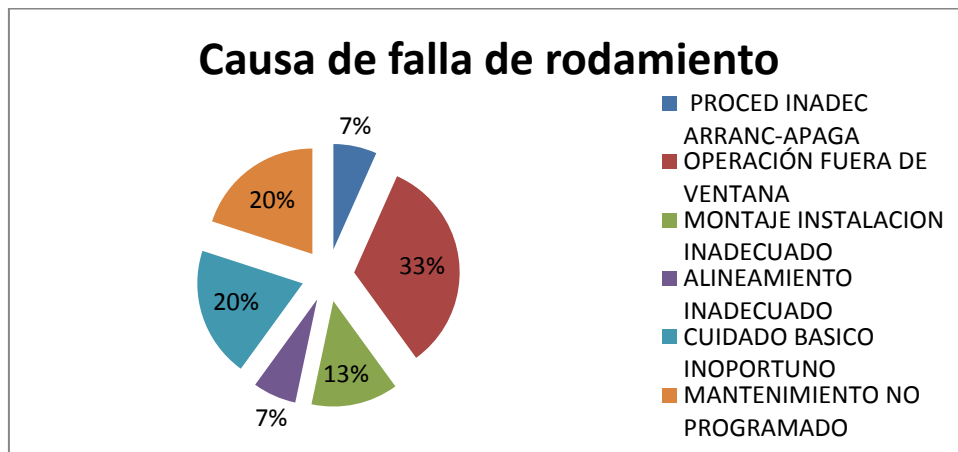
Teóricamente el rodamiento falla por fatiga a los 202 días según su flujo de operación.

#### 4.4 DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS DE FALLAS DE LOS RODAMIENTOS DE LOS EQUIPOS DE LA U150.

Se recopiló toda la información de las carpetas de las hojas de vida de los equipos y de CMMS Software Eclipse. En total fallaron 15 equipos por rodamientos las principales causas es porque el equipo opera muy cerca de su flujo mínimo y en unos casos por debajo de su flujo mínimo esto ocasiona altos valores de vibración como se muestra en la gráfica 25.

El cuidado básico inoportuno de los equipos ha sido otra falencia que ha causado las fallas en el rodamiento el no hacer seguimiento a la lubricación verificando nivel de aceite, viscosidad del aceite, temperatura y el drenar el agua que se acumula en las cajas del rodamiento porque los equipos están a la intemperie cuando llueve tiende a entrar agua a las cajas emulsionando el aceite estas actividades son indispensable para asegurar la lubricación del rodamiento. Estas actividades quedaran definidas con una frecuencia para ser realizadas por el operador, se recopilaran en el capítulo de tareas de mantenimiento.

**Gráfica 26. Causa de falla de los rodamientos U150.**



Fuente. Autores.

Por el mantenimiento no programado han fallado 3 equipos la principal causa es que el equipo no fue programado para limpieza de filtro opero con baja presión de succión generando alto valores de vibración y temperatura en la caja del rodamiento.

No se presenta ninguna falla por diseño inadecuado en la aplicación del tipo de rodamiento.

En el montaje instalación de rodamientos han tenido 3 reproceso por parte de mantenimiento. Para este caso es necesario revisar el procedimiento y entrenar al personal de mecánica para cubrir la falencia del proceso de montaje.

En el procedimiento de parada y arrancada del equipo fallo 1 bomba por condiciones operacionales del proceso por baja presión de succión por lo tanto es necesario ajustar el procedimiento que cumplan con unos parámetros para arrancar el equipo que no se deben incumplir.

**Análisis de vibraciones.** Se realizaron los cálculos para corroborar los armónicos de los espectros tomados de los equipos críticos según Pareto de la base de datos del software de monitoreo de vibraciones RBW ware 5.2. Para tener certeza que estamos valorando la falla que es, en la parte del rodamiento. FTF efecto canastilla, BSF giro de bola patinando entre la pista, BPFO pista externa, BPFI pista interna.

La nomenclatura que se encuentra en la tabla 20, son las de las frecuencias de fallas de los rodamientos, que se muestran en las graficas 27 a la 33, donde se referencian los Spectros de la Base de datos del software de monitoreo de vibraciones RBM ware 5.2



de fallas para cada uno de los componentes del rodamiento 7310 conociendo sus dimensiones y velocidad de rotación; dando como resultados los respectivos armónicos de las fallas que se pueden presentar en cada uno de los componentes del mismo de forma teórica, llamándolos frecuencias teóricas. También se observan los valores que se presentan en el software de monitoreo de vibraciones RBM ware 5.2, que se encuentra instalado en el U150 de la Refinería Ecopetrol de Barrancabermeja; los cuales llamamos frecuencias reales; se realiza el cálculo del porcentaje de error que existe entre los dos valores para verificar y poder evaluar que tan desviado puede estar el análisis del espectro que se presenta a continuación en la gráfica 27.

Como se puede observar en la tabla las frecuencias FTF, BPF1 Y BPFO presentan un porcentaje de error casi nulo, pero el BSF presenta un porcentaje de error del 5,25%, el cual es un valor aceptable para realizar la interpretación de la gráfica 27, en la cual se observan los espectros debidamente identificados con la nomenclatura anteriormente especificada.

En la gráfica 27 se observa que el BSF presenta un pico en el armónico 1x, 2x y 3x dando a entender que este rodamiento se encuentra defectuoso en su elemento rodante, también se evidencia que la canastilla externa presenta algún daño y que es hora de cambiarlo



Como se puede observar en el tabla anterior, se calculan las frecuencias teóricas de fallas para cada uno de los componentes del rodamiento 6410 conociendo sus dimensiones y velocidad de rotación; dando como resultados los respectivos armónicos de las fallas que se pueden presentar en cada uno de los componentes del mismo de forma teórica, llamándolos frecuencias teóricas. También se observan los valores que se presentan en el software de monitoreo de vibraciones RBM ware 5.2, que se encuentra instalado en le U150 de las Refinería Ecopetrol de Barrancabermeja; los cuales llamamos frecuencias reales; se realiza el cálculo del porcentaje de error que existe entre los dos valores para verificar y poder evaluar que tan desviado puede estar el análisis del espectro que se presenta a continuación en la gráfica 28.

Como se puede observar en la tabla, las frecuencias FTF, BPFI, BPFO y BSF presentan un porcentaje de error casi nulo, lo cual permite garantizar la interpretación de la gráfica 28, en la cual se observan los espectros debidamente identificados con la nomenclatura anteriormente especificada.

En la gráfica 28 se observa que el BSF presenta un pico en el armónico 1x y 2x dando a entender que este rodamiento se encuentra defectuoso en su elemento rodante y es hora de cambiarlo o planear la parada de mantenimiento, también se evidencia armónicos de rotación que indican que el equipo está trabajando con una leve desalineación y soldadura en alguno de sus componentes.

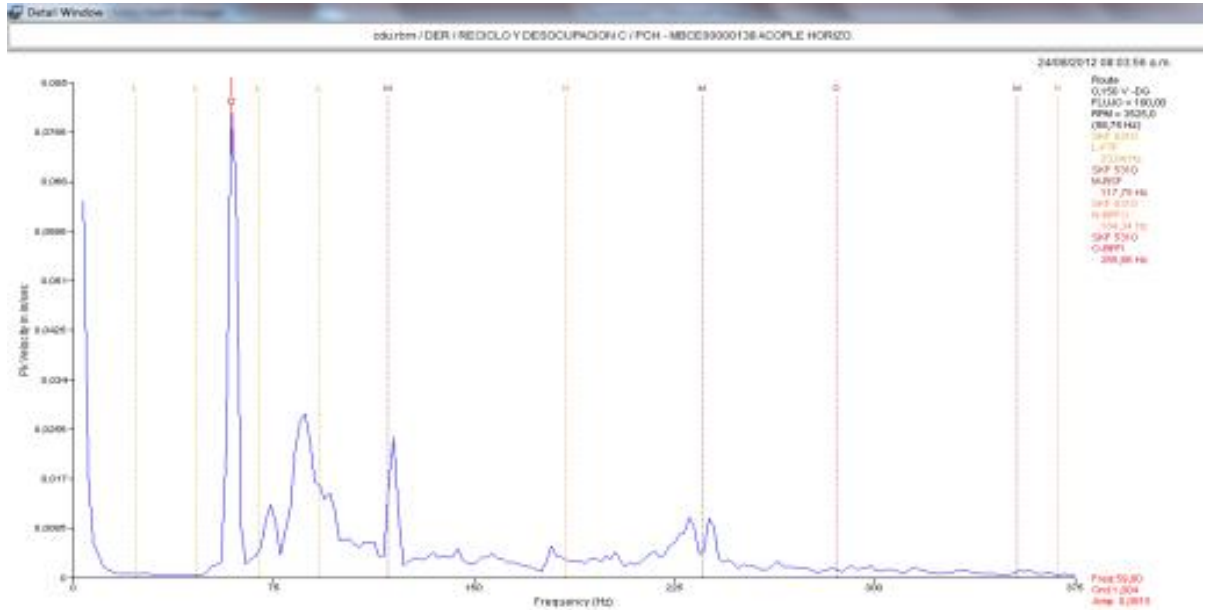


de fallas para cada uno de los componentes del rodamiento 6410 conociendo sus dimensiones y velocidad de rotación; dando como resultados los respectivos armónicos de las fallas que se pueden presentar en cada uno de los componentes del mismo de forma teórica, llamándolos frecuencias teóricas. También se observan los valores que se presentan en el software de monitoreo de vibraciones RBM ware 5.2, que se encuentra instalado en el U150 de la Refinería Ecopetrol de Barrancabermeja; los cuales llamamos frecuencias reales; se realiza el cálculo del porcentaje de error que existe entre los dos valores para verificar y poder evaluar que tan desviado puede estar el análisis del espectro que se presenta a continuación en la gráfica 29.

Como se puede observar en la tabla, las frecuencias FTF, BPFI, BPFO y BSF presentan un porcentaje de error casi nulo, lo cual permite garantizar la interpretación de la gráfica 29, en la cual se observan los espectros debidamente identificados con la nomenclatura anteriormente especificada.

En la gráfica 29 se observa que el BSF presenta un pico en el armónico 1x y 2x dando a entender que este rodamiento se encuentra defectuoso en su elemento rodante y es hora de cambiarlo o planear la parada de mantenimiento, también se evidencia armónicos que no están asociados a ninguno de los componentes del sistema, lo cual evidencia que se presenta migración de vibraciones de algún equipo adyacente y es necesario aislarlo para no causar daños en un futuro.

**Gráfica 29. Espectros SP138C**



Fuente. Base de datos del software de monitoreo de vibraciones RBM ware 5.2

**Equipo SP153C de la U150 de la Refinería Ecopetrol de Barrancabermeja**

**Tabla 24. Análisis Rodamiento 7313**

Rpm	3580,1	$P = (D_o + D_i) / 2$ $\Omega = RPS = RPM / 60$ $FTF = (\Omega / 2) \{1 - (B/P) \cos \Phi\}$ $BPFI = (N/2) \Omega \{1 + (B/P) \cos \Phi\}$ $BPFO = (N/2) \Omega \{1 - (B/P) \cos \Phi\}$ $BSF = (P/2B) \Omega \{1 - ((B/P)^2) \cos^2(\Phi)\}$ $\%ERROR = ((FT - FR) / FT) * 100\%$					
N	12						
$\Phi$	0						
	mm						
B	19,5						
D <sub>o</sub>	140						
D <sub>i</sub>	65						
P	102,5						
	<b>FRECUENCIAS TEORICAS</b>		<b>FRECUENCIAS REALES</b>				
	<b>1x</b>		<b>2x</b>	<b>3x</b>	<b>1x</b>	<b>2x</b>	<b>3x</b>
$\Omega$	59,67	119,34	179,01	59,67	119,34	179,01	0
FTF	24,16	48,32	72,48	24,16	48,32	72,48	0,00
BPFI	426,12	852,24	1278,36	426,11	852,22	1278,33	0,00
BPFO	289,9	579,8	869,7	289,91	579,82	869,73	0,00
BSF	127,14	254,28	381,42	123,83	247,66	371,49	2,60

Fuente. Autores.

Como se puede observar en el tabla anterior, se calculan las frecuencias teóricas de fallas para cada uno de los componentes del rodamiento 7313 conociendo sus dimensiones y velocidad de rotación; dando como resultados los respectivos armónicos de las fallas que se pueden presentar en cada uno de los componentes del mismo de forma teórica, llamándolos frecuencias teóricas. También se observan los valores que se presentan en el software de monitoreo de vibraciones RBM ware 5.2, que se encuentra instalado en le U150 de las Refinería Ecopetrol de Barrancabermeja; los cuales llamamos frecuencias reales; se realiza el cálculo del porcentaje de error que existe entre los dos valores para verificar y poder evaluar que tan desviado puede estar el análisis del espectro que se presenta a continuación en la gráfica 30.

Como se puede observar en la tabla, las frecuencias FTF, BPFI, BPFO y BSF presentan un porcentaje de error casi nulo, lo cual permite garantizar la interpretación de la gráfica 30, en la cual se observan los espectros debidamente identificados con la nomenclatura anteriormente especificada.

En la gráfica 30 se observa que el BSF presenta un pico en el armónico 1x dando a entender que este rodamiento a comenzado a deteriorarse en su elemento rodante y que si se presenta un buen monitoreo se puede llevar a un punto de trabajo mientras se planear la parada de mantenimiento, también se evidencia armónicos que están asociados a la rotación del sistema, y evidencia que se un desajuste en el equipo Sp153c.

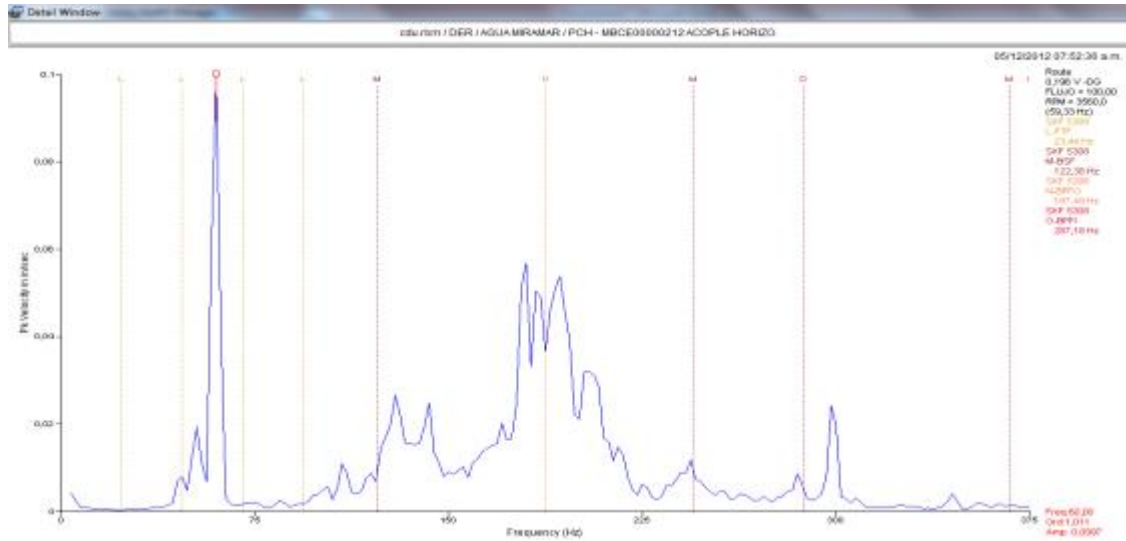


Como se puede observar en el tabla anterior, se calculan las frecuencias teóricas de fallas para cada uno de los componentes del rodamiento 5308 conociendo sus dimensiones y velocidad de rotación; dando como resultados los respectivos armónicos de las fallas que se pueden presentar en cada uno de los componentes del mismo de forma teórica, llamándolos frecuencias teóricas. También se observan los valores que se presentan en el software de monitoreo de vibraciones RBM ware 5.2, que se encuentra instalado en le U150 de las Refinería Ecopetrol de Barrancabermeja; los cuales llamamos frecuencias reales; se realiza el cálculo del porcentaje de error que existe entre los dos valores para verificar y poder evaluar que tan desviado puede estar el análisis del espectro que se presenta a continuación en la gráfica 31.

Como se puede observar en la tabla, las frecuencias FTF, BPFI, BPFO y BSF presentan un porcentaje de error casi nulo, lo cual permite garantizar la interpretación de la gráfica 31, en la cual se observan los espectros debidamente identificados con la nomenclatura anteriormente especificada.

En la gráfica 31 se observa que el BPFO, BPFI , FTF Y BSF presenta un pico en el armónico 1x dando a entender que este rodamiento tiene sus elementos defectuosos y se debe planear la parada de mantenimiento con urgencia ya que puede fallar en cualquier momento, también se evidencia armónicos que están asociados a la rotación del sistema que da como resultado un desajuste en el equipo Sp136A y otros que no son propios del sistema si no de equipos adyacentes que están generando resonancia y contaminando la señal o muy posiblemente alterando el funcionamiento del equipo.

### Gráfica 31. Espectros SP136A



de fallas para cada uno de los componentes del rodamiento 5310 conociendo sus dimensiones y velocidad de rotación; dando como resultados los respectivos armónicos de las fallas que se pueden presentar en cada uno de los componentes del mismo de forma teórica, llamándolos frecuencias teóricas. También se observan los valores que se presentan en el software de monitoreo de vibraciones RBM ware 5.2, que se encuentra instalado en el U150 de la Refinería Ecopetrol de Barrancabermeja; los cuales llamamos frecuencias reales; se realiza el cálculo del porcentaje de error que existe entre los dos valores para verificar y poder evaluar que tan desviado puede estar el análisis del espectro que se presenta a continuación en la gráfica 32.

Como se puede observar en la tabla, las frecuencias FTF, BPFI, BPFO y BSF presentan un porcentaje de error es muy bajo, lo cual permite garantizar la interpretación de la gráfica 32, en la cual se observan los espectros debidamente identificados con la nomenclatura anteriormente especificada.

En la gráfica 32 se observa que el BPFO, BPFI, FTF Y BSF no presentan un pico significativo en ninguno de los armónicos dando a entender que este rodamiento no tiene sus elementos defectuosos y se encuentra en perfecto estado, es un equipo que se encuentra en óptimas condiciones de trabajo.

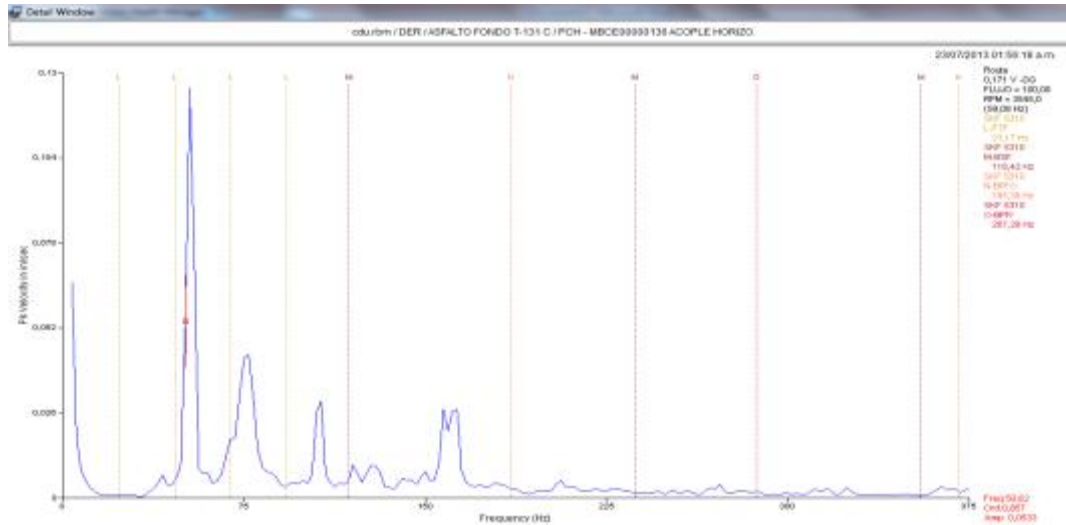


Como se puede observar en el tabla anterior, se calculan las frecuencias teóricas de fallas para cada uno de los componentes del rodamiento 5310 conociendo sus dimensiones y velocidad de rotación; dando como resultados los respectivos armónicos de las fallas que se pueden presentar en cada uno de los componentes del mismo de forma teórica, llamándolos frecuencias teóricas. También se observan los valores que se presentan en el software de monitoreo de vibraciones RBM ware 5.2, que se encuentra instalado en le U150 de las Refinería Ecopetrol de Barrancabermeja; los cuales llamamos frecuencias reales; se realiza el cálculo del porcentaje de error que existe entre los dos valores para verificar y poder evaluar que tan desviado puede estar el análisis del espectro que se presenta a continuación en la gráfica 33.

Como se puede observar en la tabla, las frecuencias FTF, BPFI, BPFO y BSF presentan un porcentaje de error muy bajo, lo cual permite garantizar la interpretación de la gráfica 33, en la cual se observan los espectros debidamente identificados con la nomenclatura anteriormente especificada.

En la gráfica 33 se observa que el BPFO, BPFI , FTF Y BSF no presentan un pico significativo en ninguno de los armónico dando a entender que este rodamiento no tiene sus elementos defectuosos y se encuentra en perfecto estado; lo que se evidencia en los armónicos son ruidos provenientes posiblemente de máquinas adyacentes a la SP133A.

**Gráfica 33. Espectros SP137C**



Fuente. Base de datos del software de monitoreo de vibraciones RBM ware 5.2

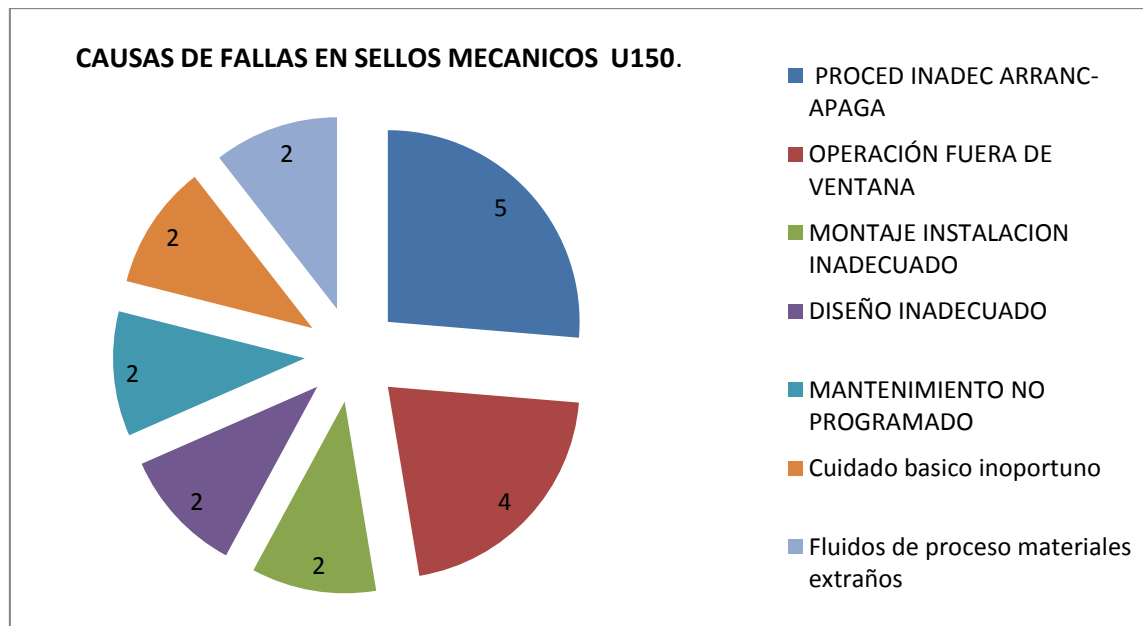
#### **4.5 DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS DE FALLAS DE LOS SELLOS MECÁNICOS DE LOS EQUIPOS DE LA U150.**

Para determinar las causas de fallas de los sellos se realizó un estudio utilizando la metodología de árbol de falla. Se recopiló toda la información de las carpetas de las hojas de vida de los equipos y de CMMS Software Elips. En total han fallado 19 sellos en algunos equipos la falla es más repetitiva para este caso se realizó el estudio diagrama causa efecto al equipo SP139D. Las principales causas es por no tener asegurado unos parámetros que no deben violar en los procedimientos de arrancada y parada de los equipos. Para superar esta falencia se deben revisar los procedimientos y realizar capacitación al personal de mantenimiento.

Durante los cambios de corrida cupiagua a naftenica los equipos cambian sus condiciones operacionales, aumenta la temperatura del fluido cambia su gravedad específica y en unos equipos disminuye el flujo de operación por debajo de su flujo mínimo violando las ventanas operativas generando altas vibraciones en

sobre esfuerzos en el sello y en algunos casos si no se realiza un buen procedimiento en el cambio de corrida hay fluidos que llegan muy calientes al equipo durante proceso que ocasionan que la bomba Cavite en periodos cortos generando más sobre esfuerzos que sumando todos estos esfuerzos sobre el sello disminuyen su vida útil.

**Gráfica 34. Causa de falla de los sellos mecánicos U150.**



Fuente: Autores.

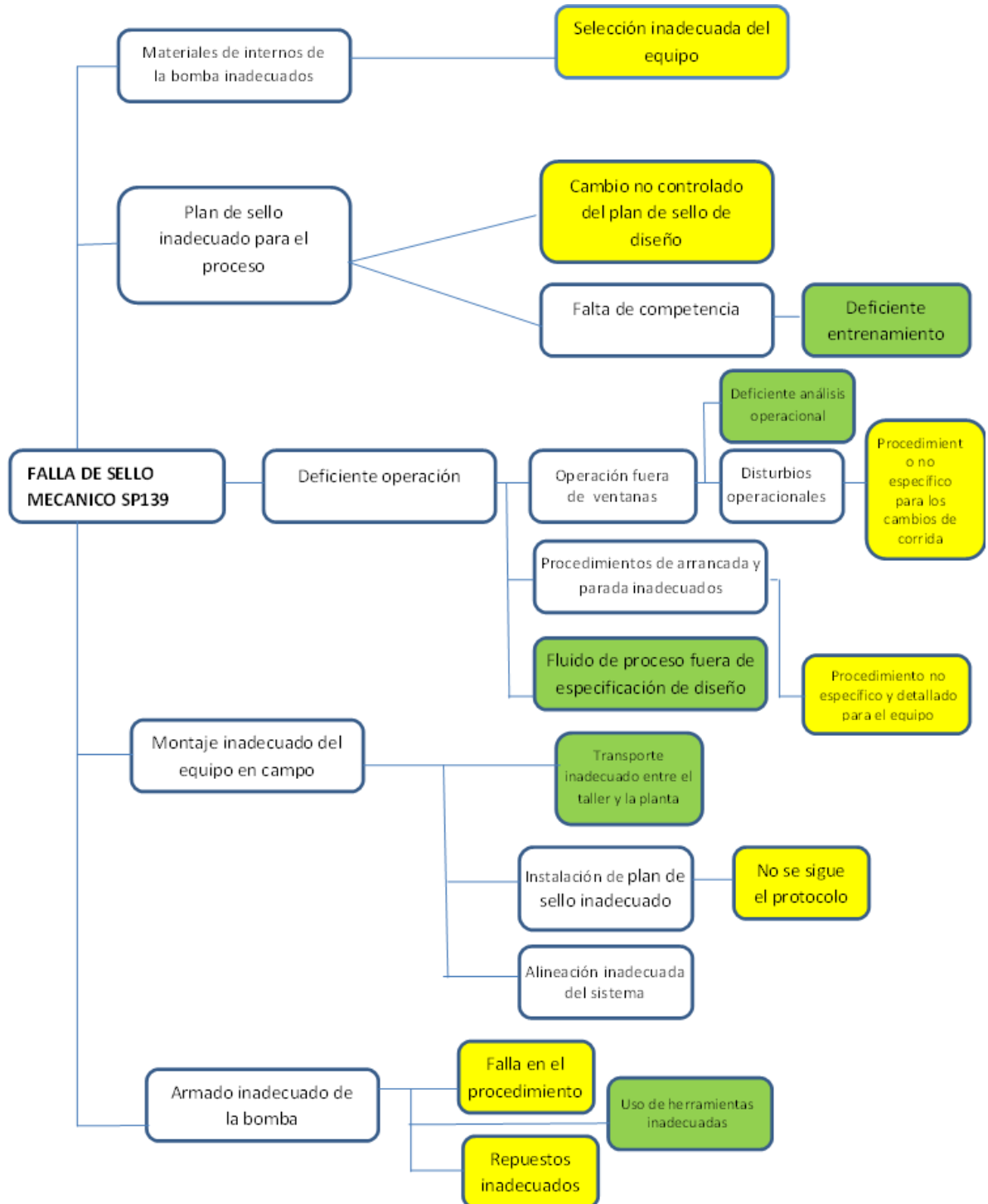
Además el cuidado básico inoportuno de los equipos ha sido otra falencia que ha causado las fallas en el sello el no hacer seguimiento a las condiciones de operación de los diferentes planes de sellos como son mantener la presión de agua de lavado entre 1 y 2 psi para los plan 62 y si es vapor entre 3 psi y 5 psi. Para los planes 32 mantener una presión entre 15 psi y 30 psi mayor a la presión de succión del equipo, en los planes 11 se deben asegurar que la platina de orificio no se tape impidiendo el paso del fluido que lubrica el sello disminuyendo su vida útil. Para asegurar que las condiciones operacionales del sello mecánico

sean las ideales se elaborara una manual de mantenimiento con actividades definidas con una frecuencia para ser realizadas por el operador.

#### **4.6 ESTUDIO DE FALLA DEL SELLO MECÁNICO DEL EQUIPO SP139.**

Se copilo la información con la colaboración de operaciones y hojas de vida del equipo.

Figura 53. Diagrama causa Efecto.



Fuente: Autor

Se seleccionaron como causa raíz o probable aquellas que pudieron ser verificadas (color amarillo en diagrama causa-efecto) y como causas posibles aquellas que el equipo de trabajo consideró que podrían ser altamente contribuyentes (color verde en diagrama causa-efecto) a los problemas identificados pero que no pudieron ser descartadas.

**Tabla 28. Soluciones a Icausa raiz sello mecanico SP139.**

Sistema	Efecto primario	Causa Raiz	Soluciones	
SP139	ESCAPE PORSELLO	Selección inadecuada del equipo	S1	recomendado de acuerdo al fluido de proceso y las condiciones operacionales
			S2	Operar la Unidad 150 solo en corrida cupiagua.
			S3	cumpla con los requerimientos de proceso y las condiciones operacionales.
		Cambio de diseño en el plan de sello no controlado adecuadamente	S4	Cambiar plan de sello de la bomba de plan 21 a plan 32.
			S5	Montar facilidad para limpieza de la cera obtruida del plan de sello 21 actualmente
		Procedimiento de mantenimiento no específico y detallado para el equipo (reparacion y montaje)	S6	Realizar procedimiento para reallizar reparacion estandar del equipo, garantizar el entendimiento y aplicación del mismo.
			S7	Realizar reparacion del equipo rotativo mediante un contarto de mantenimiento con el fabricante

Fuente. Autores.

#### **4.7 MANUAL DE MANTENIMIENTO PARA RODAMIENTOS Y SELLOS MECÁNICOS**

Se revisaron las causas de fallas de los rodamientos y sellos mecánicos. Para eliminar los defectos del proceso y de mantenimiento. Se programaron tareas de cuidado básico de equipo para ser realizadas por el operador eliminando varias causas de falla del rodamiento y sello mecánico.

**Tabla 29. Tareas de mantenimiento para sistema de sello.**

<b>Tareas de mantenimiento</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Frecuencia</b>
Realizar Retrolavado a intercambiadores planes de sello 21, 23, 52,53.	mantener la transferencia de calor del flushing	semanal
Ajustar regulador de presión plan 62. Lavado con agua 1 psi y 2 psi, con vapor 3psi y 5 psi.	Mantener condiciones de presión de operación del sello.	1 vez por turno
Ajustar regulador de presión plan 32. (20 psi mayor a la presión de succión)	Mantener condiciones de presión de operación del sello.	1 vez por turno
Reposición de nivel liquido barrera plan 52.	Mantener condiciones de operación del sello.	condición
Revisión de platina de orificio.(tomar temperatura antes y después)	Mantener condiciones de presión y temperatura de operación del sello.	diaria
Realizar prueba de funcionamiento PI del sellos (bloquear y drenar)	Mantener condiciones de presión de operación del sello.	semanal
Tomar temperatura del fluido (flushing) que lubrica y refrigera las caras del sello.	Mantener condiciones de operación del sello.	diaria
Revisar sistema de presión de sello plan 52.	Mantener condiciones de operación del sello.	diaria
Tomar muestra de aceite caja de rodamientos para verificar contaminantes (agua, metales, lodo,) según estado de aceite cambiarlo	Garantizar buen esta de aceite para lubricación del rodamiento.	diaria
Tomar valores de vibración y temperatura en cada uno de los puntos A, B, C, D con el CSI 2130.	Conocimiento estado operacional del equipo.	semanal
Revisar nivel de aceite, posición de la araña de nivel de la caja de rodamiento.	Garantizar nivel adecuado de aceite para lubricación del rodamiento.	diaria
Programar limpieza de filtro de succión con una pérdida de diferencial de 4 psi.	Garantizar condiciones del proceso al equipo.	Condición

Fuente. Autores.

#### 4.8 CONDICIONES OPERACIONALES DE LOS SELLOS MECÁNICOS ACTUALES EN PLANTA U150.

Para implementar las mejores prácticas de operación de los sellos mecánicos lo primero es revisar las condiciones operacionales que se encuentran los diferentes planes API de sellos mecánicos de las bombas de la U150 y que tareas de mantenimiento preventivo son realizadas por el operador en planta diariamente a los planes API. Se encontraron las siguientes condiciones operacionales de los sellos mecánicos en campo.

**Figura 54. sistema de vapor al sello de la SP313E.**



Fuente: Autores

En la figura 54 se muestra el sistema de vapor al quench del sello lado acople y lado empuje de la SP131E donde se evidencia una fuga considerada de condensado en línea de llegada del vapor al sistema de control de presión de vapor al sello. En la figura 55 se muestra mejor el escape de condensado que tiene la línea por la universal. Esto evidencia que el vapor que se utiliza para los sellos no es vapor seco.

**Figura 55. Ejemplo de línea de vapor de los planes de sello 62 con escape de condensado.**



Fuente. Autores

Además del condensado en la línea de vapor las trampas de vapor no están operando retirando el condensado el cual afecta directamente el sello.

**Figura 56. Sistema de vapor al sello del equipo SP156D.**



Fuente: Autores.

En la figura 56 se muestra que el Indicador de presión de vapor al sello está pegado en 12 psi. En este caso no hay control de presión de vapor al sello de la bomba es una condición no confiable para el equipo.

**Figura 57. Equipo SP165A con Plan API 11/62.**



Fuente: Autores.

En la figura 57 se muestra una bomba con plan de sello 11/62, utiliza agua industrial para el plan 62. El Indicador de presión está pegado no tiene un sistema para regular la presión del agua solamente una válvula de bloque de  $\frac{3}{4}$ " es una condición no confiable que acorta la vida útil del sello.

**Figura 58. Equipo SP151C con Plan API 11/62.**



Fuente Autores.

En la figura 58 se muestra que el plan de sello 62, no tiene un sistema control de presión del agua que va hacia el sello, no tiene ni Indicador de presión únicamente una válvula de bloque de  $\frac{3}{4}$ " es una condición no confiable que afecta directamente el sello.

**Figura 59. Equipo SP158C con Plan API 11/62.**



Fuente: Autores.

En la figura 59 se muestra el equipo SP158A con una plan de sello 62, con ningún sistema de control de presión del agua que va hacia el sello, no tiene ni Indicador de presión únicamente tiene una válvula de bloque de  $\frac{3}{4}$ " es una condición no confiable que afecta directamente el sello.

**Figura 60. Equipo SP153C con Plan API 62.**



Fuente: Autores.

En la figura 60 se muestra el equipo SP153C con una plan de sello 62, con ningún sistema de control de presión del agua que va hacia el sello, no tiene ni Indicador de presión únicamente tiene una válvula de bloque de  $\frac{3}{4}$ " es una condición no confiable que afecta directamente el sello.

**Figura 61. Equipo SP150 con Plan API 62.**



Fuente. Autores.

En la figura 61 se muestra el equipo SP150 con una plan API 11/62, con ningún sistema de control de presión del agua que va hacia el sello, el Indicador de presión está dañado únicamente tiene una válvula de bloque de  $\frac{3}{4}$ " y válvula cheque es una condición no confiable que afecta directamente el sello.

**Figura 62: Plan API 11/62 del equipo SP139C**



Fuente: Autores.

En la figura 62 se muestra el cuadro de control de presión de vapor al sello mecánico del equipo. La indicación del PI es que está por debajo de su rango de

operación entre 3 psig y 5 psig. Es una condición no confiable para el sello además las trampas de vapor no están trabajando retirando el condensado.

**Figura 63: Plan API 32/62 del equipo SP137C.**



Fuente: autores.

En la figura 63 se muestra que la presión de vapor al sello mecánico Plan API 62 del equipo está por debajo de su rango de operación de 3 psig y 5 psig. Es una condición no confiable para el sello además la trampas de vapor del sistema no están trabajando retirando el condensado.

Por lo anterior muestra que los equipos que tienen plan API 11/62 no cumplen con los estándares API para este plan por tanto la operación de los sellos mecánicos no es confiable lo que originarán serán fallas prematuras de los sellos que no tienen ningún control. En la figura 64 y 65 se muestran los equipos SP138B, SP152C con una fuga de condensado por el sello es evidente que el vapor que llega a la planta no es seco y en muchos casos no es controlada la presión llevando a una falla en el sello mecánico.

**Figura 64: Equipo SP138B con plan API 32/62.**



Fuente: Autores.

**Figura 65: Equipo SP152C con plan API 11/62.**



Fuente: autores.

Los equipos que tienen instalado el plan de sello API 32 por norma deberían llegar el fluido externo al sello para lubricar y enfriar las caras a una presión entre 20 psig y 30 psig por encima a la presión de la caja del sello, en la figura 66 y 67 nos muestra los indicadores de presión que no es confiable la operación los sellos mecánicos del plan 32. El indicador de presión debería tener una cinta adherida al vidrio de la caratula del IP indicando el rango de presión debería operar con esto se asegura para que operaciones este revisando y manteniendo

en control esta presión. Esto da mayor confiabilidad a la operación de los sellos mecánicos.

**Figura 66. Plan API 32 del equipo SP137C.**



Fuente: Autores

**Figura 67. Plan API 32 del equipo SP131E.**



Fuente: Autores.

En la figura 68 se muestra la bomba P171A con su plan de sello API21/52 ente equipo si cumple con las especificaciones norma API con su instrumentación requerida y calibrada. Lo único que tiene pendiente es un esparrago en una brida salida del reservorio de aceite.

**Figura 68. Plan API 21/52 del equipo SP171A.**



Fuente: Los autores.

Por las condiciones en que se encuentran la operación de los sellos mecánicos de los diferentes equipos de la U150 se propone implementar mejores prácticas de operación con el objetivo que los sellos tengan una correcta operación así evitamos fallas prematuras en estos sistemas.

**4.8.1 Tareas de mantenimiento actuales realizadas por el operador.** El plan de mantenimiento de equipo rotativo de la U150 es por condición según los parámetros de vibración, temperatura y condiciones del estado del aceite de la caja de rodamiento, los sellos se inspeccionan o se bajan cuando se presenta la fuga antes no. Las actividades preventivas de cuidado básico de equipo que realiza el operador en patio son.

- Cambiar indicador de presión
- Cambiar aceite lubricante bombas, turbinas (sin consola)
- Engrase de mecanismos y acoples.

- Corregir anomalías de lubricación de equipo rotativo
- Tomar una muestra de lubricación.
- Retirar y limpiar filtros de hasta de pulgadas
- Destapar líneas de sistema de enfriamiento
- Engrasar vástagos de válvulas globo, compuerta y correderas
- Conexión de líneas de servicios industriales (mangueras de vapor)
- Reemplazar e instalar tapones en drenajes y venteos
- Medir, analizar y realizar toma de temperatura a equipo rotativo (motores, turbinas, reductores y bombas)
- Realizar tribología a equipo rotativo (motores, turbinas, reductores y bombas)
- Cuidado básico equipo rotativo parada planta
- Aplicar política rotación de equipos

De las anteriores actividades realizadas por el operador de planta no tienen una frecuencia definida para cada equipo, no hay acciones preventivas para la operación de los Planes API de sellos mecánicos. La documentación de cada una de las actividades no hay información clara de la descripción o estado del equipo. Para recuperar la confiabilidad de todo el equipo rotativo de la U150 es necesario la construcción de un RCM.

#### **4.8.2 Mejores prácticas de operación de los sellos de las bombas**

**4.8.2.1 Plan API 11.** Circulación desde la descarga de la bomba hasta las caras de sello, pasando por una Placa Orificio (Agujero de Restricción).

- Verificar que tenga instalada la Placa Orificio de 1/8" mínimo si la presión de descarga sobrepasa las 50 psi.
- Verificar temperatura antes y después de la platina de orificio para descartar posible taponamiento del orificio. Frecuencia una vez por turno.

**4.8.2.2 Plan API 21.** Circulación desde la descarga hasta la cavidad de sellado pasando por de una placa orificio y un intercambiador de calor.

- Verificar que tenga instalada la Placa Orificio de 1/8" mínimo.
- Verificar que el intercambiador no se encuentre obstruido, frecuencia una vez por turno.
- Verificar que la temperatura del líquido que sale del intercambiador se encuentre 10°C o 50°F mínimo por debajo de la temperatura de vaporización del producto. Frecuencia una vez por turno.

**4.8.2.3 Plan API 23.** Circulación forzada por un anillo de bombeo desde la caja de sellado pasando por un intercambiador de calor y retornando a la caja del sello.

- Verificar que la altura del intercambiador se encuentre de 18" a 24" por encima del eje de la bomba.
- Verificar que el intercambiador no se encuentre obstruido. Frecuencia una vez por turno.
- Verificar que la temperatura del líquido que sale del intercambiador se encuentre 10°C o 50°F mínimo por debajo de la temperatura de vaporización del producto. Frecuencia una vez por turno.

**4.8.2.4 Plan API 32.** Inyección de fuente externa de líquido limpio compatible con el producto bombeado a una presión de 30 psi (2 bar) por encima de la presión en la cavidad de sellado.

- Verificar que la presión este regulada entre 20 psi y 30 psi por encima de la presión en la cavidad de sellado. Frecuencia una vez por turno.
- Verificar que la válvula check y la válvula de bloqueo se encuentren operando correctamente. Frecuencia una vez por turno.
- Verificar que el manómetro y el flujómetro tengan el rango y los materiales apropiados para el servicio.

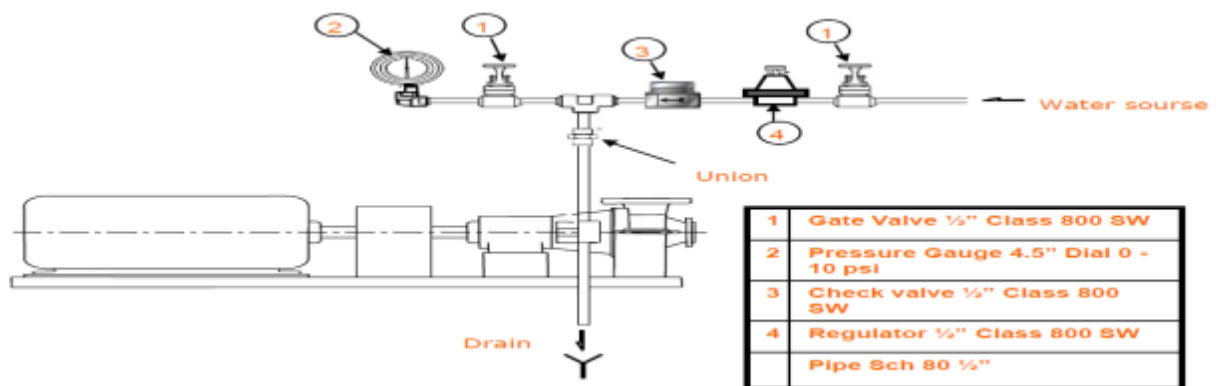
- se debe dejar inyectado el líquido a la presión recomendada al parar el equipo para evitar contaminación del sello. Frecuencia una vez por turno.

**4.8.2.5 Plan API 52.** Circulación forzada por un anillo de bombeo, de líquido de barrera contenido en un reservorio no presurizado.

- Verificar que el manómetro tenga el rango apropiado para el servicio.
- Verificar que el switch de presión se encuentre calibrado para punto de disparo entre 10 y 20 psi subiendo.
- El sistema no es presurizado y debe estar venteado.
- La válvula de venteo debe estar abierta. Frecuencia una vez por turno.
- El sistema debe tener una placa orificio en la línea de venteo.
- Verificar que líquido circule correctamente. Entrada al sello por la parte inferior y salida por la parte superior. La tubería de salida debe estar más caliente que la tubería de entrada. Frecuencia una vez por turno.

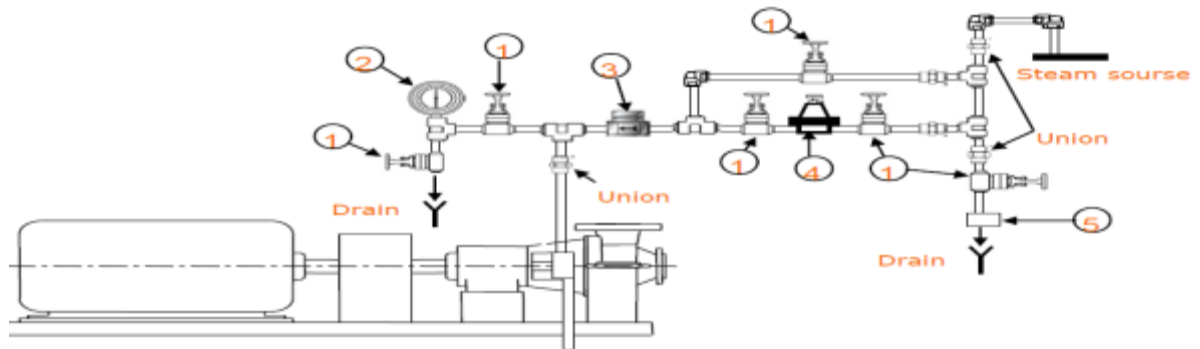
**4.8.2.6 Plan API 62.** Conexiones para Lavado y Drenaje para efectuar lavado con fluido externo (vapor, agua, etc.). En la figura 69 y 70 se muestra un esquema de materiales que deben tener el plan 62 utilizando agua o vapor.

**Figura 69. Diagrama plan de sello 62 con fluido externo agua.**



Fuente: Curso clasificación de sello John crane 2009.

**Figura 70. Diagrama plan de sello 62 con fluido externo vapor.**



Fuente: Curso clasificación de sello John crane 2009

1. válvula de ½”.
2. Indicador de presión rango de 0-15 psi.
3. Válvula Cheque de ½”.
4. Regulador de presión Max 5 psi.
5. Trampa de vapor.

#### **Actividades a ejecutar.**

- Verificar que la válvula Check opere correctamente. Frecuencia una vez por turno.
- Verificar que cuando el fluido a inyectar sea vapor este deber seco. Frecuencia una vez por turno.
- Verificar que se tenga instalado en el sistema una trampa de vapor.
- Verificar una vez por turno la presión del vapor seco inyectado debe estar entre 3 y 5 psi. Frecuencia una vez por turno.
- Verificar que el Manómetro tenga un rango de presión adecuado (0 a 15 psi).
- Verificar una vez por turno para el caso de lavado con agua la presión este entre 1 y 2 psi.
- Verificar una vez por turno que la trampa este trabajando.
- Verificar cada semana el funcionamiento de los indicadores de presión Bloquear y drenar.

## 4.9 PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA LOS EQUIPOS DISPONIBLES STAND BY DE LA U150.

Se generó una serie de tareas de cuidado básico para los equipos disponible en planta con esto se logra asegurar la confiabilidad de los equipos.

**Tabla 30. Tareas de cuidado básico de equipo Stand by.**

Tarea	Observacion	Frecuencia
Drenar caja de rodamientos para retirar agua.	Los equipos están expuestos a altas temperatura por la radiación del proceso, al sol y la lluvia esas condiciones son potenciales para que se acumule agua en la caja de rodamiento.	15 días
Verificar estado y nivel de aceite caja de rodamientos	Los equipos disponibles deben estar en una condición en que puedan entrar a operar en caso de una falla del equipo principal, por tanto la lubricación es elemental en la puesta en servicio del equipo.	15 días
Verificar estado de guarda acople y soportes de bombas y motor.	La seguridad de las personas es elemental en la puesta de servicio de los equipos por tanto es necesario realizar seguimiento a los soportes.	15 días
Aplicar el producto CHESTERTON con brocha al eje motor, bomba y acople para preservar y evitar la oxidación.	Es necesario retirar la capa de óxido que esté presente al momento de aplicar el inhibidor de corrosión	4 meses
Girar eje motor-bomba Desplazándolo 90° el eje en cada rotación del equipo STAND BY	Con esto ayudamos a lubricar la parte del eje que no esta sumergido en el aceite y protegerlo de la corrosión y Evitar Deflexión del eje.	2 meses
Realizar pruebas de funcionamiento para las bombas disponible en planta con potencia menor a 100 HP.	Se deja operar el equipo disponible durante 48 horas para evaluar las condiciones operacionales, temperatura, presión, vibración. Luego se realiza el cambio por el equipo principal.	4 meses
Realizar pruebas de funcionamiento para las bombas disponible en planta con potencia mayor a 100 HP. (bombas de carga)	Se deja operar el equipo disponible durante 72 horas para evaluar las condiciones operacionales, temperatura, presión, vibración. Luego se realiza el cambio por el equipo principal.	6 meses
Se operara con un equipo principal solamente se saca de servicio cuando se van hacer las pruebas funcionales al equipo disponible y nuevamente queda en operación. El equipo principal pasara a ser el equipo auxiliar cuando salga programado a un mantenimiento general y el equipo auxiliar pasara a principal.	pasara a principal. El sacar a mantenimiento general el equipo principal se hará por ciclo de vida de sus componentes de desgaste sellos, anillos, rodamientos según evaluación de ATP	Por condición.
Probar funcionamiento de indicadores de presión	bloquear y drenas instrumento calibrar el cero.	15 días
Verificar estado de orificio de platina 1/8" de los planes API 11 de los equipos de potencia igual o menor a 100 HP .	Ejecutar según procedimiento de trabajo mantenimiento de planes de sellado, revisión de la platina de orificio de las bombas principales. . Esta actividad se realizar cuando se hacen las pruebas funcionales a los equipos disponibles.	4 meses
Verificar estado de orificio de platina 1/8" de los planes API 11 de lo equipos de potencia mayor a 100 HP	Ejecutar según procedimiento de trabajo mantenimiento de planes de sellado, revisión de la platina de orificio. . Esta actividad se realizar cuando se hacen las pruebas funcionales a los equipos disponibles.	6 meses
Verifican en el plan API 132 la inyección de líquido a la presión recomendada en los equipos SB.	Se debe asegurar el fluido externo al sello para evitar contaminación del sello.	1 vez por turno

Fuente: autores.

#### 4.10 TAREAS DE MANTENIMIENTO PARA EQUIPOS EN OPERACIÓN

Asegurar la confiabilidad de los equipos en operación juega un papel muy importante en que el operador de planta realice un seguimiento al equipo mediante una serie de actividades de mantenimiento predictivo. Se generó unas tareas y frecuencias para ejecutarlas como BEC por el operador.

**Figura 71. Ejemplo de rangos de operación en indicadores de presión.**



Fuente: Los autores.

**Tabla 31. Tareas preventivas para equipos en operación U150.**

Tareas	Frecuencia
Tomar valores de vibración Y temperatura en cada uno de los puntos A,B,C,D	15 días
Probar funcionamiento de indicadores de presión (bloquear y drenas instrumento calibrar el cero.	15 días
Ajuste de válvula reguladora plan API de sellado 62.	1 vez por turno
Realizar retrolavado a intercambiador del plan API 21 de sello mecánico.	Semanal
Ajuste de válvula reguladora plan API de sellado 32.	1 vez por turno
Realizar limpieza general de equipo.	mensual

<b>Tareas</b>	<b>Frecuencia</b>
Engrasar vástago de válvulas de succión, descarga, drenajes	4 meses
Tomar valores de temperatura antes y después de la platina de orificio	Semanal
Verificar que las trampas de vapor del plan API 62 estén funcionando	1 vez por turno
Verificar que el vapor del plan API 62 sea seco.	1 vez por turno
Verificar nivel de aceite en caja de rodamientos.	1 vez por turno
Drenar caja de rodamientos para retirar agua. Los equipos están expuestos a altas temperatura por la radiación del proceso, al sol y la lluvia esas condiciones son potenciales para que se acumule agua en la caja de rodamiento.	semanal
Verificar presión de succión y descarga. Deben estar entre la franja verde marcada en el IP para estar en control. (ver figura 71)	1 vez por turno
Tomar valores de temperatura salida del intercambiador plan API 21 Verificar que la temperatura del líquido se encuentre 10°C o 50°F mínimo por debajo de la temperatura de vaporización del producto	1 vez por turno
Programar limpieza mecánica y prueba hidrostática a intercambiadores del plan API 21. Esta actividad se realizar cuando se hacen las pruebas funcionales a los equipos disponibles.	4 meses
Revisión de la platina de orificio plan API 11. . Esta actividad se realizar cuando se hacen las pruebas funcionales a los equipos disponibles.	4 meses
Programar limpieza de filtro de succión con una perdida diferencial de 3 psi.	por condición
Tomar una muestra de aceite para análisis de contaminantes.	6 meses

Fuente: Autores.

Si se cumple con cada una de estas tareas estarán dando confiabilidad al proceso; es muy importante que el operador sea capacitado en la operación de los diferentes planes API de sellos mecánicos. El que el operador entienda porque es

necesario realizar cada una de estas actividades es un punto a favor ya que él es quien se familiariza con el equipo y es quien le brinda el mantenimiento ante una falla o anomalía del equipo. Hay una falencia que los operadores tienen, no manejan un lenguaje técnico en la documentación de las tareas que realizan. Por tanto es necesario capacitarlos para cerrar esa brecha.

## 5. CONCLUSIONES

- De la información recopilada y clasificada desde el año 2008 al 2012 de las bombas centrífugas de la U150 de Destilación de crudos; en total 42 equipos presentaron fallas, de los cuales 19 fueron por sellos mecánicos, 15 por rodamientos y 7 por anillos de desgaste.
- Las principales causas de fallas fueron en 10 equipos por operar por fuera de ventana operativa, 7 por procedimientos de arrancada y parada, 5 por fluido de proceso, 9 por procedimiento inadecuado de mantenimiento, 4 por mantenimiento no programado, 3 por Diseño del equipo y 3 por Cuidado Básico de equipo.
- De los 19 equipos que presentaron fallas por sellos mecánicos, las causas fueron 5 por procedimiento inadecuado de arrancada y apagada, 4 por operar fuera de ventana operativa con flujos por debajo del mínimo de la bomba, 2 por montaje instalación inadecuado, 2 por Diseño inadecuado, 2 por mantenimiento no programado, 2 por cuidado básico inoportuno y 2 por fluido de proceso material extraño.
- De las fallas presentada en rodamiento las causas fueron 1 equipos por procedimientos inadecuado de arrancada y apagada, 3 por mantenimiento no programado, 3 por cuidado básico inoportuno, 1 por alineamiento inadecuado y 2 por mal montaje instalación inadecuado.
- De la clasificación de los equipos críticos por metodología de Pareto por modo de falla y costos de mantenimiento fueron SP134A, SP150, SP164C, SP131, SP138C, SP153C, SP136A, SP133A, SP137C.

- Las condiciones operacionales de los sellos mecánicos plan API 21, 32,62 no tienen un control adecuado no hay un seguimiento con tareas de mantenimiento que me asegure el sistema.
- El vapor que se dispone en planta para los sellos no es seco, esto es un factor que está afectando los sellos del plan 62.
- Se puede evidenciar que las frecuencias teóricas y las reales tienen un porcentaje de error que permite analizar y confiar en las muestras que se tuvieron en el estudio para generar el plan de mantenimiento y las recomendaciones a hacer en cada uno de los equipos.
- Se evidencia que los equipos utilizados en la U150 presentan deterioro por vibraciones migratorias de equipos adyacentes, y se genera la recomendación de mejorar el asilado o revisar si el que se encuentra en estos momentos es el indicado para estos equipos.

## 6. RECOMENDACIONES

- Capacitar al personal de operaciones en el tema de operación de sellos mecánicos, causa de fallas y comprometerlos como parte de su rol diario mantener bien este sistema.
- Capacitar al personal de operación en manejar un lenguaje técnico en la documentación de las tareas de mantenimiento y en el reporte de las fallas.
- Garantizar que el vapor disponible para los sistemas de sellado sea seco.
- Realizar entrenamiento a operadores de tablero en el procedimiento de cambios de corrida sea controlado en el manejo de la carga térmica para que no sobrepase la temperatura de vaporización del producto afectando las caras del sello.
- Adecuar los sistemas de sellado en instrumentación y válvulas de control de presión en los planes API 62, 32,21 que cumplan con la norma API para sellos mecánicos.
- Implementar todas las propuestas de mantenimiento planteadas en el capítulo 4.
- Capacitar al personal de mantenimiento en el armado y montaje de sellos mecánicos.
- Cambiar los rangos de Ventanas operativas de los equipos que están por debajo de su flujo mínimo de operación.

## BIBLIOGRAFIA

CAMACHO Rodolfo, FLOREZ Alfonso. Manual de operaciones U-150

CMMS. Software Elipse. Información recopilada de todos los equipos.

ESTUPIÑAN Edgar, Saavedra Pedro. Técnicas de diagnóstico para el análisis de vibraciones de rodamientos.

FLOWSERVE., Fundamentos equipos rotativos.

FLOWSERVER. Fundamentos rodamientos.

John Crane. Curso Instalaciones y funcionamiento de sellos mecánicos Barrancabermeja 2013.

John Crane. Curso Fallas de sellos mecánicos. Barrancabermeja 2011.

Marigré Córdova Aliendres, Análisis de fallas de los sellos mecánicos. Universidad de oriente nucleo de anzoategui. Barcelona abril 2009.

Nelik Lev, Jackson Cahrls. Effect of mechanical unbalance on vibrations, forcé and reliability of a single-stage centrifugal pump.

NSK. Catálogo de rodamiento NSK No.E1102c.

The Bearing Expert TM. <http://www.sourceindex.com>.