

Identificación, rediseño y captura de eficiencias de margen en sistemas de sellado mecánico de contacto húmedo en bombas de la GRC



Sergio Andres Alvarez Tatis
Ing. integral de mantenimiento y confiabilidad.
Equipo Rotativo - Soporte PHD
Ecopetrol – Refinería de Cartagena.
Cartagena, Bolivar; Colombia

Ingeniero mecánico egresado de la Universidad Tecnológica de Bolívar, con 15 años de experiencia en mantenimiento, confiabilidad y gestión de activos en sectores como Oil & Gas, palma, biocombustibles y sector azucarero. Actualmente me desempeño como Ingeniero de Mantenimiento y Confiabilidad de equipos rotativos en la Refinería de Cartagena, adscrito al departamento de Hidroprocesos.

Resumen.

La confiabilidad de los sistemas de sellado mecánico continúa siendo un factor crítico para la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de la operación en instalaciones industriales complejas como la Refinería de Cartagena. Este trabajo presenta una metodología integral para la identificación, evaluación y rediseño de aplicaciones con sellos mecánicos, orientada a mejorar el desempeño operativo y capturar eficiencias de margen. El enfoque combina criterios de seguridad de procesos, eliminación de defectos, sostenibilidad ambiental y oportunidades económicas, permitiendo priorizar intervenciones de alto impacto. Se incluyen casos de éxito en equipos críticos, donde la aplicación del método ha permitido aumentar la disponibilidad, reducir fallas repetitivas y generar beneficios económicos y operativos cuantificables.

1. DECLARACION DE OPORTUNIDAD.

En el contexto de la operación industrial moderna, la confiabilidad de los equipos rotativos es un factor determinante para la eficiencia, seguridad y rentabilidad de los procesos. **Los sellos mecánicos** juegan un papel esencial en este escenario, al evitar fugas de fluidos en bombas centrífugas, compresores y otros equipos críticos. Su correcta selección, instalación y mantenimiento impacta directamente en la disponibilidad operativa y en el cumplimiento de estándares ambientales.

La norma API 682, desarrollada por el Instituto Americano del Petróleo, establece los lineamientos técnicos para el diseño y aplicación de sistemas de sellado mecánico en bombas centrífugas utilizadas en la industria de procesos. Dentro de esta norma, se definen los llamados planes API, que son esquemas estandarizados de soporte para los sellos, diseñados para controlar parámetros como presión, temperatura, lubricación y limpieza en la cámara de sellado.

Ahora bien, Los sellos mecánicos han evolucionado significativamente en las últimas décadas, pasando de diseños convencionales a sistemas de cartucho altamente especializados,

Actualmente, se emplean materiales avanzados (carburo de silicio, grafito, aleaciones especiales) y tecnologías de monitoreo para mejorar su desempeño y confiabilidad, sin embargo estos esfuerzos por asegurar y magnificar la confiabilidad de estos dispositivos aun cuenta con proyecciones para continuar su desarrollo, pues los sellos mecánicos puntan las estadísticas de fallos en la industria, siendo los principales causas de estas fallos aspectos como, *selección inadecuada del sello o del plan API, Fallas por desgaste, vibración, cavitación o corrosión y ataque químico, errores de instalación, y deficiencias en el sistema de soporte.*

En la industria actual —y particularmente en GRC— somos conscientes de la necesidad de continuar desarrollando y perfeccionando soluciones para aquellas aplicaciones que no cumplen con los niveles esperados de mantenibilidad, confiabilidad y eficiencia operativa. Esta realidad exige la adopción permanente de metodologías de análisis de condición y procesos de evaluación que permitan monitorear el estado de los componentes críticos, como los sellos

Identificación, rediseño y captura de eficiencias de margen en sistemas de sellado mecánico de contacto húmedo en bombas de la GRC

mecánicos, dentro del marco de la gestión de activos.

En este contexto, nuestro departamento ha implementado enfoques orientados al diagnóstico técnico, integrados en programas de eliminación de defectos y retornos competitivos. Estos esfuerzos se dirigen hacia soluciones más sostenibles, como el uso de sellos con recuperación de fluido, actualización y optimización de tecnologías, sistemas de monitoreo predictivo y la aplicación de planes API optimizados. Estas estrategias no solo fortalecen la confiabilidad operativa, sino que también contribuyen a minimizar el impacto económico y ambiental asociado al mantenimiento y reemplazo de componentes.

2. OBJETIVOS.

Desarrollando y perfeccionando soluciones para aquellas aplicaciones que no cumplen las expectativas los niveles de servicio esperados y/o que son objetos de mejora y optimización en nuestras operaciones y a partir de método de análisis de desempeño que incluya los siguientes criterios.

- *Seguridad de procesos.*
- *Eliminación de defectos/Mal Actor (Costos, Disponibilidad)*
- *Oportunidades de capitalización de margen.*
- *Reducción de impacto a medio Ambiente.*

3. METODOLOGIA APLICADA

La metodología desarrollada para analizar el desempeño de los sellos mecánicos se fundamenta en cuatro pilares estratégicos que permiten evaluar integralmente su comportamiento, impacto operacional y contribución al negocio. Este enfoque surge de la necesidad de contar con un modelo que trascienda la evaluación tradicional basada únicamente en fallas o costos directos, incorporando dimensiones críticas como la

seguridad operativa, la confiabilidad del activo, el impacto económico y la sostenibilidad ambiental.

El propósito central del método es proporcionar una herramienta estructurada y cuantificable que permita identificar oportunidades de mejora, priorizar intervenciones, reducir eventos no deseados y aumentar la disponibilidad de los equipos rotativos que dependen de sellos mecánicos para mantener la integridad del proceso.

• Seguridad de procesos

Este pilar concentra los elementos asociados al impacto de la operación del sello en la integridad del proceso y en el desempeño ambiental de la instalación. El análisis incluye variables como:

Seguridad de procesos: Evaluación del riesgo asociado a emisiones fugitivas, fugas visibles, potencial de liberación de producto, alarmas recurrentes u operación fuera de especificación.

Medio ambiente: Identificación del impacto de fugas o consumos exagerados de fluidos de barrera.

Huella de agua: Relación entre la operación del sello y el uso de recursos hídricos.

Eficiencia energética: Determinación del efecto del sello (y su condición) en el consumo energético del sistema de bombeo.

Este pilar se relaciona con lineamientos corporativos y normativos, y permite priorizar aplicaciones donde un desempeño deficiente del sello representa un riesgo significativo para la seguridad o el medio ambiente.

• Pilar de Optimización y Captura de Margen

Este componente identifica aplicaciones donde la mejora del desempeño del sello o de la bomba

Identificación, rediseño y captura de eficiencias de margen en sistemas de sellado mecánico de contacto húmedo en bombas de la GRC

puede generar **valor económico directo**. Se considera el potencial del proceso para mejorar su eficiencia y rentabilidad a través de:

Corrientes de alto valor: Equipos que manejan productos con alto costo unitario o impacto en la cadena de refinación o transformación.

Caracterización del proceso: Identificación de variaciones en condiciones operativas que afectan la estabilidad del sello y que pueden optimizarse.

Valorización de la molécula: Reducción de pérdidas de producto, disminución de emisiones fugitivas, o mejoras que permiten mantener mayor disponibilidad para procesar volúmenes valiosos.

• Pilar de Eliminación de Defectos (PED)

Este pilar se basa en principios de confiabilidad para identificar fallas repetitivas y causas raíz asociadas al sello mecánico, Incluye:

RCA (Root Cause Análisis): Uso de metodologías estructuradas para entender causas técnicas, operativas o de diseño detrás de las fallas del sello.

Identificación de Malos Actores: Equipos con alta frecuencia de fallas, costos elevados de mantenimiento, repetitividad en modos de falla o impacto en disponibilidad.

El esquema general resume cómo los tres pilares convergen en un proceso de toma de decisión que permite seleccionar de manera objetiva las aplicaciones objetivo donde intervenir con mejoras en sellos mecánicos.

La metodología no busca evaluar los sellos únicamente desde la óptica de fallas, sino desde una visión más amplia donde interactúan la seguridad, la sostenibilidad, el desempeño económico y la confiabilidad operacional.

La convergencia de estos tres enfoques asegura que las aplicaciones seleccionadas para intervención representen **máximo beneficio para la operación**, ya sea por eliminar pérdidas, reducir riesgos o aumentar disponibilidad.

3.1 Selección y evaluación de la aplicación.

El proceso analítico de evaluación inicia con la identificación de una *Aplicación Objetivo*, seleccionada por su impacto potencial en seguridad, confiabilidad, sostenibilidad o eficiencia del proceso. Una vez definida, se activa un trabajo colaborativo entre las áreas clave: Producción, Mantenimiento y Laboratorio de Sellos, así como Ingeniería de Procesos. Estas disciplinas aportan datos operativos, historial de desempeño, condiciones de proceso y restricciones técnicas que permiten construir una caracterización precisa de la aplicación. Con esta información, el Departamento de Confiabilidad (PFE – Equipo Rotativo y Estático) ejecuta un análisis riguroso que incluye estandarización de soluciones, simulaciones de desempeño, validación frente a premisas de diseño y estimación del potencial de valorización. Paralelamente, se realiza un proceso estructurado de evaluación con fabricantes, quienes presentan propuestas técnicas alineadas con los criterios establecidos. La convergencia entre análisis técnico, modelamiento, premisas operacionales y propuestas de ingeniería permite



Ilustración 1- Metodología de análisis de desempeño en sellos.

Identificación, rediseño y captura de eficiencias de margen en sistemas de sellado mecánico de contacto húmedo en bombas de la GRC

determinar la alternativa óptima para la aplicación evaluada.

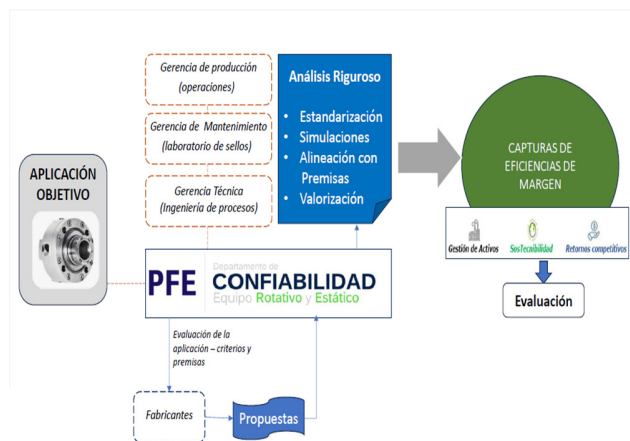


Ilustración 2- Diagrama de flujo proceso evaluativo de aplicación objetivo

4. IMPLEMENTACION DE LA METODOLOGIA Y CASOS DE ÉXITO RELEVANTES

La aplicación sistemática de la metodología de evaluación y selección de aplicaciones objetivo ha permitido desarrollar, implementar y validar iniciativas de alto impacto en los sistemas de sellado de GRC. A través de un proceso estructurado basado en análisis técnico riguroso, estandarización, simulaciones, y alineación con premisas operativas, se han logrado intervenciones que no solo incrementan la confiabilidad de los equipos rotativos, sino que además generan retornos económicos sostenidos y mejoras en sostenibilidad operacional. La línea de tiempo presentada recoge los casos más representativos ejecutados en los últimos años, incluyendo proyectos de incremento de margen, rediseños para eliminar *Malos Actores* y actualizaciones tecnológicas que han ampliado la vida útil de los sellos, optimizado el desempeño del proceso y capturado eficiencias significativas. Estos ejemplos demuestran cómo la metodología, aplicada en campo y combinada con una gestión colaborativa entre producción,

mantenimiento, ingeniería y fabricantes, se convierte en un habilitador clave para transformar problemas recurrentes en oportunidades de valor comprobado.

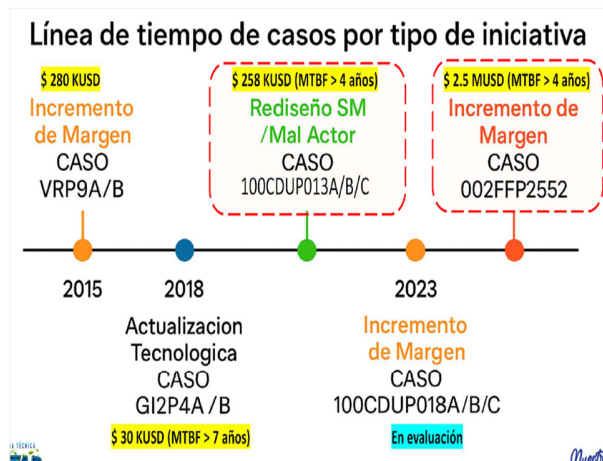


Ilustración 3 Línea de Tiempo casos de relevancia - implementación de soluciones en la GRC

4.1 Caso de implementación Exitosa Bombas 100-CDU-P013.

En la Sección Atmosférica de la Unidad de Destilación Combinada U-100, se dispone de un sistema de bombeo de Crudo Reducido que envía carga caliente hacia la sección de Vacío. Este sistema se compone de un set de (3) tres bombas 100-CDU-P-013ABC la filosofía de operación consiste en (1) una bomba Stand by y (2) dos bombas en servicio para un flujo rateado total de 101 KBEPD.

Las bombas corresponden a la clasificación API 610 OH2 “Overhung”, que describe una bomba con impulsor en voladizo (ver Figura 4) y están provistas de un sistema de sellado mecánico doble tipo cartucho asistido por un plan API 53B con líquido barrera presurizado Royal Purple 56 y Plan API 23_autoflush.

Identificación, rediseño y captura de eficiencias de margen en sistemas de sellado mecánico de contacto húmedo en bombas de la GRC

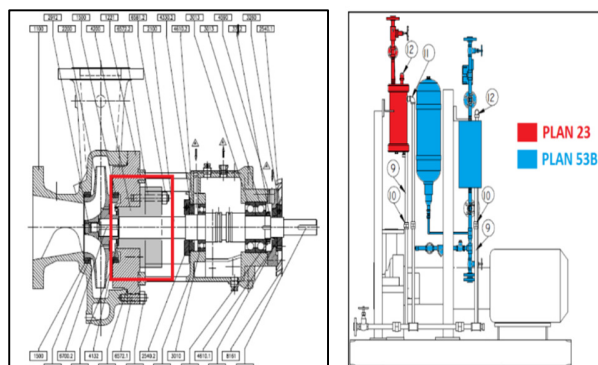


Ilustración 4 Bomba API tipo OH2 y esquema de plan API

Los sellos mecánicos instalados corresponden al diseño original tipo cartucho (doble), adquiridos en la compra global de los equipos durante la etapa de construcción y montaje del proyecto de ampliación y modernización de la Refinería. Estos cartuchos arreglo Face to Back (FB) con cabezales rotativos tipo fuelle. La ilustración No 5 muestra el diseño de este tipo de sello.

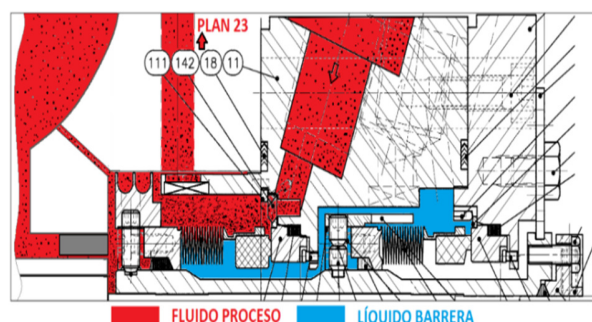


Ilustración 5 Seccional sello mecánico instalado.

• Identificación y diagnóstico de la condición.

Desde la puesta en servicio de la U100 en octubre de 2015 se tiene registrado un total de (11) once fallas por fuga en sellos mecánicos, así mismo registra (9) nueve mantenimientos menores por flushing y fugas por conexiones en los planes de sello. Mediante la aplicación del proceso de Eliminación de Defectos (Análisis de Causa Raíz) se identificaron (2) dos aspectos que originan la falla de los cartuchos:

- Obstrucción de los Planes 23.
- Atascamiento de los fuelles rotativos.

Evidencias y registros de fallas.

Al realizar los diversos análisis y evaluación de la condición de los sistemas de sellado de forma integral, se soporta con tecnologías y herramientas el diagnóstico, donde es evidente un funcionamiento inadecuado de los sistemas auxiliares impactando en la funcionalidad del sello.



Ilustración 6 Evidencia estado de componentes del sello

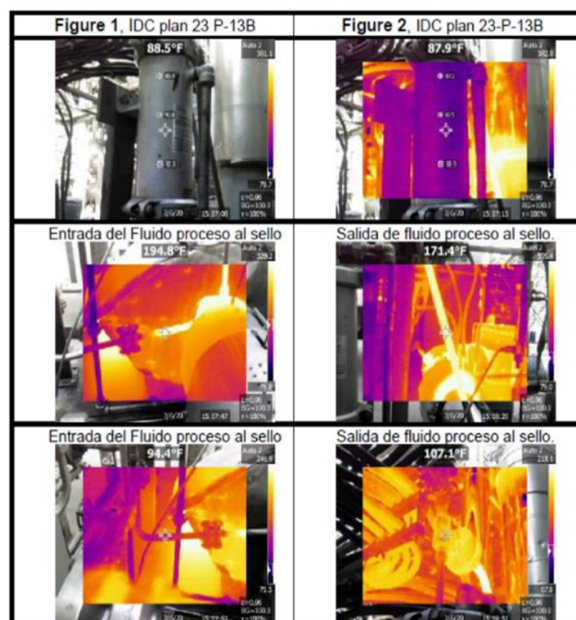


Ilustración 7 Termogramas de evaluación en planes API

Identificación, rediseño y captura de eficiencias de margen en sistemas de sellado mecánico de contacto húmedo en bombas de la GRC

• Planteamiento de las Alternativas de solución.

Se plantearon 3 alternativas de solución a la problemática y eliminación de los modos de falla las cuales surtieron su proceso de evaluación riguroso de acuerdo con los procedimientos y metodología actual de la compañía.

Alternativa 1: Mantener configuración actual (Plan23, Plan53B).

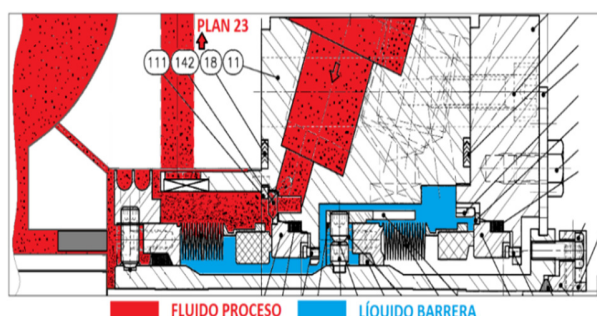


Ilustración 8 Seccional de sello mecánico - alternativa 1

Alternativa 2: Implementar modificación en Plan de Sellado (eliminar Plan 23, adicionar Plan 32 y Plan 62 permanentes), mantener diseño del cartucho.

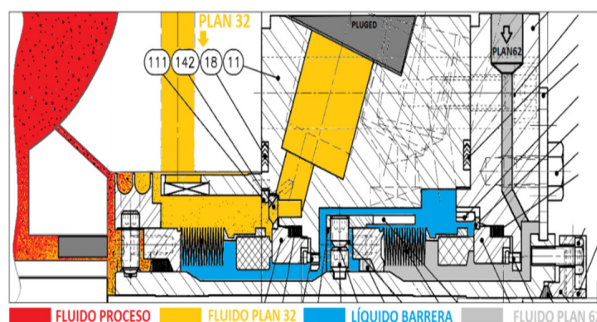


Ilustración 9 Seccional de sello mecánico - alternativa 2

Alternativa 3: Implementar modificación en Plan de Sellado (eliminar plan 23, adicionar Plan 32 intermitente y Plan 62 permanente), con cambio en el diseño del cartucho.

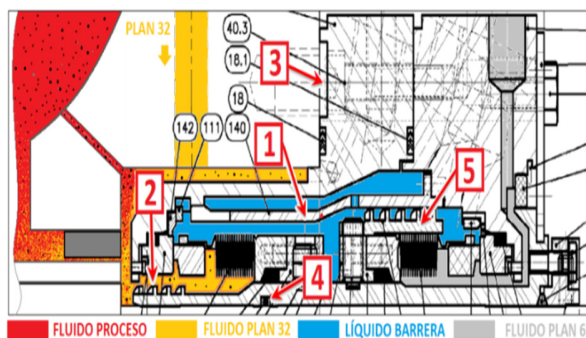


Ilustración 10 Seccional de sello mecánico - alternativa 3

• Evaluación y comparativo de aspectos claves en cada alternativa.

ITEMS	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
PLAN 23	CONTINUA	DESMANTELAR	DESMANTELAR
PLAN 32	-	IMPLEMENTAR	IMPLEMENTAR
PLAN 53B	CONTINUA	CONTINUA	CONTINUA
PLAN 62	-	IMPLEMENTAR	IMPLEMENTAR
DISEÑO CARTUCHO SELLO MECÁNICO	FACE TO BACK	FACE TO BACK	BACK TO BACK
CORRECCIÓN ESFUERZOS - VALIDACIÓN FLEXIBILIDAD	-	SI	SI
INVERSIÓN			
Materiales, mano de obra, instalación y puesta en servicio	USD -	USD 93.009	USD 254.550
COSTOS MANTENIMIENTO			
Costo unitario por reparación (mano de obra y repuestos)	USD 32.147	USD 32.147	USD 32.147
Intervenciones de mantenimiento	CANT 3.00	CANT 1.00	CANT 0.50
Total Costo Mantenimiento Anual	USD 96.440	USD 32.147	USD 16.073
COSTOS OPERACIONALES			
Costo MIVGO Flushing Plan 32	47.755 USD/BBL		
BBL MIVGO	0	BBL 126.045	BBL 2.479
Costo Vapor Plan 62	0,009 USD/KG		
Kg Vapor	0	KG 1.051.200	KG 1.051.200
Total Costo Operación Anual	USD -	USD 4.524.494	USD 127.550

Al finalizar el ejercicio de evaluación, se selecciona la Alternativa 3, por las ventajas que ofrece para la operación y los costos relacionados e integrados positivos para la continuidad de la función.

4.2 Caso de implementación Exitosa Bombas 002-FF-P-2552A/B

Los equipos 002-FF-P-2552A/B corresponden a las bombas de slurry de la unidad U002. Se trata de bombas centrífugas tipo OH, equipadas con sellos mecánicos de cartucho sencillo que operan con los planes API 32 y 62.

- *Plan API 32:* Inyección de ALC (fluido limpio) hacia las caras del sello, a una

Identificación, rediseño y captura de eficiencias de margen en sistemas de sellado mecánico de contacto húmedo en bombas de la GRC

presión de 120 psig y un flujo de 2.5 gpm. Este fluido lubrica y refrigera las caras, mezclándose posteriormente con el producto bombeado.

- *Plan API 62*: Inyección de vapor a 5 psig para limpieza de los diámetros internos del sello, con salida directa a la atmósfera.

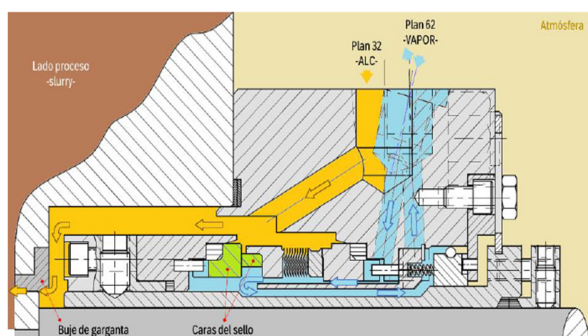


Ilustración 11 Seccional de sello mecánico de la aplicación

- **Identificación y diagnóstico de la condición.**

El plan API 32 se utiliza debido a que el producto bombeado (slurry) no posee propiedades adecuadas para lubricar ni refrigerar el sello. Sin embargo, esta configuración presenta las siguientes limitaciones

-El sello depende completamente del plan API 32. Si la presión de operación cae por debajo del valor requerido, se compromete la lubricación y refrigeración, lo que puede provocar la falla del sello

-Ante una falla del sello, se pierde la contención del producto bombeado, que se libera a la atmósfera sin respaldo.

-El ALC es un producto valioso que podría ser reprocesado en otras corrientes para generar margen adicional en la unidad.

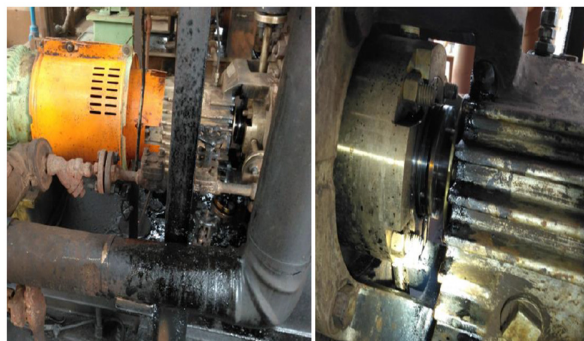


Ilustración 12 Evidencias de modo de falla

Se estima que se dejan de obtener aproximadamente 2,5 MUSD/año debido al uso de ALC como fluido para plan 32: 2.5 gpm = 171 bpd. Las deficiencias operativas, el riesgo de pérdida de contención y el potencial de ahorro al reprocesar el ALC justifican la propuesta de cambio de sello y plan API.

- **Evaluación y comparativo de aspectos claves en cada alternativa.**

Con el objetivo de eliminar el uso de ALC como fluido de barrera y mejorar la contención del sello, se propone instalar un **sello doble presurizado con plan API 53B**, utilizando aceite sintético como fluido barrero. Esto permitiría retirar la línea de ALC y redirigirla a otra corriente de proceso. El plan 62 (vapor) se mantendría como parte del nuevo esquema.

Durante la evaluación de esta alternativa, se consideraron aplicaciones similares en otras unidades, con condiciones de proceso y tipo de producto bombeado equivalentes. Los criterios de selección fueron:

- 1- Estandarización e intercambiabilidad de partes y componentes.
- 2- Tiempo medio entre fallas (MTBF) superior a 3 años.
- 3- Eliminación o uso parcial del plan API 32.

Identificación, rediseño y captura de eficiencias de margen en sistemas de sellado mecánico de contacto húmedo en bombas de la GRC

Con base en estos criterios, se identificó una aplicación de alto rendimiento que cumple con los requerimientos. El diseño del sello fue sometido a un análisis técnico desde la perspectiva del usuario, identificando oportunidades de mejora en conjunto con el fabricante para garantizar robustez y confiabilidad en el servicio.

A continuación, Sketch del del diseño seleccionado para la aplicación.

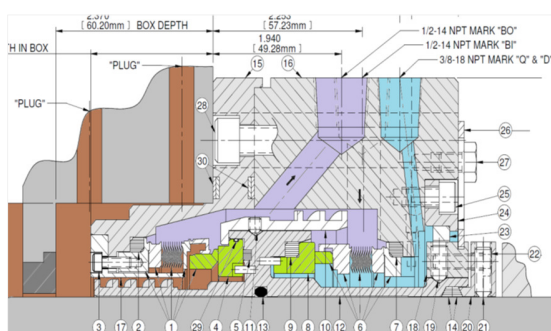


Ilustración 13 Seccional de diseño de sello seleccionado.

La aplicación fue actualizada completamente, quedando definida con un **sello doble presurizado operando bajo los planes API 53B y 62**, eliminando el uso de ALC y mejorando la eficiencia operativa y económica del sistema.

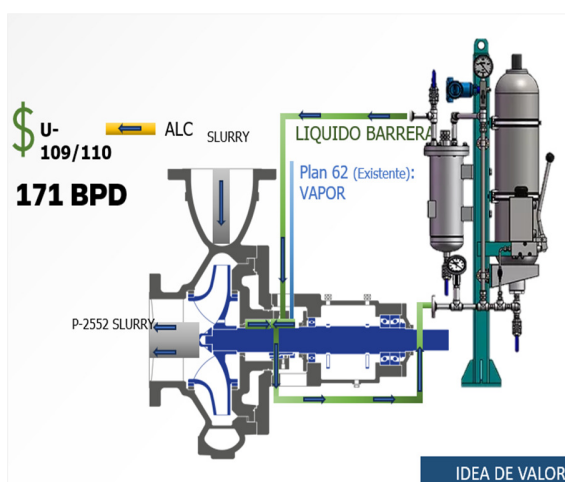


Ilustración 14 Esquema de instalación y plan API

5. CONCLUSIONES.

En un entorno industrial cada vez más exigente, la búsqueda de nuevas alternativas que optimicen el desempeño de los activos es una necesidad estratégica. Las aplicaciones críticas requieren soluciones que no solo resuelvan problemas operativos, sino que también generen valor económico, reduzcan el impacto ambiental y aseguren la continuidad del servicio. La evolución tecnológica en sistemas de sellado y planes API debe responder a estos desafíos, promoviendo configuraciones más confiables, sostenibles y adaptadas a las condiciones reales de operación.

La revisión de los sistemas de sellado en las bombas FF-P-2552A/B y 100-CDU-P-013ABC ha evidenciado cómo configuraciones auxiliares mal optimizadas, como el uso continuo de Plan API 32 o la obstrucción del Plan 23, pueden comprometer la confiabilidad operativa y generar pérdidas económicas significativas. En el primer caso, el consumo constante de ALC como fluido de barrera representa una pérdida estimada de 2.5 millones de USD anuales, mientras que, en el segundo, las fallas recurrentes en los sellos mecánicos han afectado la disponibilidad de equipos clave en la unidad de destilación.

La implementación de soluciones basadas en sellos dobles presurizados ha demostrado ser una estrategia efectiva para mitigar estos riesgos. Estas configuraciones permiten mejorar la contención del producto bombeado, reducir la dependencia de insumos costosos, y extender la vida útil de los componentes críticos. Además, al eliminar o reducir el uso de planes vulnerables como el 23 y el 32, se fortalece la estabilidad del sistema de sellado y se mejora la capacidad de respuesta ante condiciones operativas exigentes.

Identificación, rediseño y captura de eficiencias de margen en sistemas de sellado mecánico de contacto húmedo en bombas de la GRC

En conjunto, estas decisiones reflejan un enfoque técnico orientado a la confiabilidad operativa y al retorno económico, alineado con los principios de gestión de activos y sostenibilidad industrial. La experiencia adquirida en ambos casos sienta las bases para replicar soluciones eficientes en otras unidades, consolidando una cultura de mejora continua y control de pérdidas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] API Standard 682, *Pumps – Shaft Sealing Systems for Centrifugal and Rotary Pumps*, 4th ed., American Petroleum Institute, Washington D.C., 2014.
- [2] API Standard 610, *Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries*, 12th ed., American Petroleum Institute, Washington D.C., 2021.
- [3] API Technical Report 685, *Sealless Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Gas Industry Process Units*, API, 2nd ed., 2022.
- [4] ISO 55000, *Asset Management—Overview, Principles and Terminology*, International Organization for Standardization, Geneva, 2014.
- [5] J. Moubray, *Reliability-Centered Maintenance (RCM II)*, 2nd ed., Industrial Press, New York, 1997.
- [6] A. Smith and G. Hinchcliffe, *RCM—Gateway to World Class Maintenance*, Elsevier, 2004.
- [7] D. G. Benjamín and K. Murphy, *Root Cause Analysis Handbook*, ABS Consulting, 2020.
- [8] E. B. Flitney, *Seals and Sealing Handbook*, 6th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2014.
- [9] J. L. Rogers, *Practical Guide to API 682 Seal Systems*, John Crane Inc., 2018.
- [10] A. F. Bannister, *Mechanical Seals for Pumps: Application Guidelines*, Pumping Machinery Technical Series, 2013.
- [11] John Crane, *Mechanical Seal Application Guide*, Technical Manual, 2019.
- [12] T. R. Goodman, *Maintenance Engineering Handbook*, McGraw-Hill, 2014.
- [13] A. Birolini, *Reliability Engineering: Theory and Practice*, 8th ed., Springer, 2017.
- [14] N. E. Battikha, *Plant Engineer's Handbook of Performance Tools*, McGraw-Hill, 2007.