

## Caso de éxito: “Eliminación de malos actores mediante actualización tecnológica en sistemas de sello en intercambiadores de calor de alta presión”

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS

Calle 70 No. 9 – 10

Fabio Aranda López – fabio.aranda@ecopetrol.com.co  
Ingeniero de Confiabilidad e Integridad, Ecopetrol S.A.  
Km 10 vía Mamonal, Cartagena DT y C. – Colombia

### Resumen

El presente artículo expone un caso de éxito en la Refinería de Cartagena, Colombia, perteneciente al grupo ECOPEPETROL S.A., que mediante la integración de varios procesos de gestión y análisis de riesgos se logró una solución eficiente y efectiva para eliminar un mal actor en la unidad de Hydrocracking. La solución encontrada fue un desafío a nivel organización pues conllevó un gerenciamiento del cambio, cumpliendo con todas las fases de aprobación y aceptación. El resultado consistió en la implementación de una nueva tecnología de sello en intercambiadores de alta presión sin necesidad de soldadura, siendo pionera la Refinería a nivel de Latinoamérica en el uso de esta, con lo cual, ha traído beneficios tanto desde el punto de vista de integridad como de mantenibilidad y a su vez la eliminación del mal actor de alto impacto económico para el negocio.

### Unidad de Hydrocracking (U-110)

La unidad de Hydrocracking juega un papel importante en el proceso de refinación de la Refinería de Cartagena, su aporte en términos de margen de refinación y disponibilidad operacional es de gran impacto para el negocio y en especial para el país, al generar combustibles limpios de bajo contenido de azufre, elemento que contribuye en gran medida a la contaminación de las ciudades y el ambiente. La unidad de Hydrocracking es de alta conversión, su carga nominal de 38 KBD; y básicamente convierte gasóleo pesado en diésel de ultra bajo azufre (ULSD) y en otros productos valiosos como Nafta, Kero y Jet A1. La unidad opera con una presión cercana a 2100 psi ( $1.45 \times 10^7$  Pa) y llega a temperaturas del orden de 700 °F (371 °C), estas condiciones hacen que se alcance alta severidad en términos de operación para sus activos. A continuación, en la figura 1, se observa un esquema simplificado de la unidad de Hydrocracking.

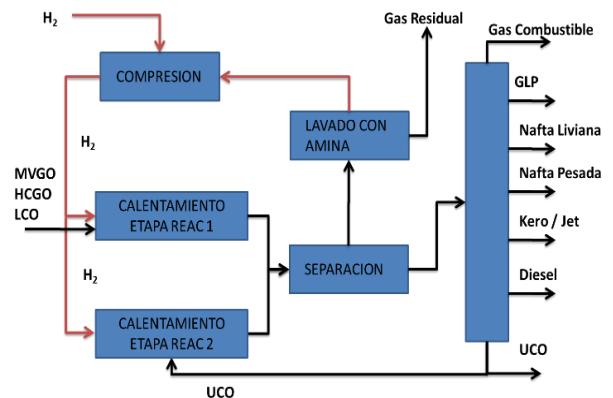


Fig 1. Esquema simplificado unidad Hydrocracking.

### Intercambiadores de alta presión

Existen intercambiadores de calor diseñados para operar a alta presión y temperatura; en la mayoría de los casos son tipo CJU y DEU bajo la norma TEMA [1], como se muestra figura 2, esto quiere decir que su configuración y diseño vienen especialmente para soportar la alta presión y evitar tener uniones bridadas en

comparación con otros tipos de intercambiadores; por tanto, cuentan con sello por diafragma soldado en la tapa canal, esta configuración representa un gran reto en términos de mantenibilidad y reparación; la unidad de Hydrocracking cuenta con 20 de este tipo de intercambiadores de calor.

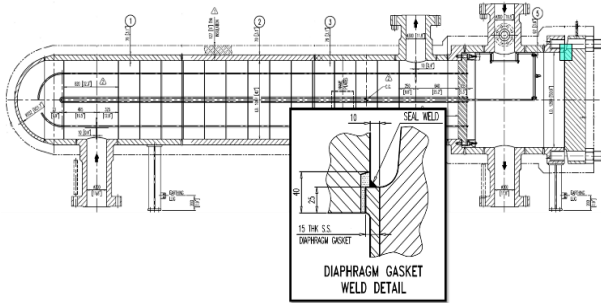


Fig 2. Configuración Intercambiador tipo DEU [1].

En la tabla 1, se muestra un orden por severidad conforme a las presiones y temperaturas de diseño asociadas a los intercambiadores de alta presión de la unidad de Hydrocracking.

Tabla 1. Ranking por severidad de los intercambiadores de calor de alta presión.

Ranking	TAG Equipo	Severidad
1	110-HCU-E-006 A/B/C/D	Muy Alta
2	110-HCU-E-002 A/B	Alta
3	110-HCU-E-012 A/B	Alta
4	110-HCU-E-001 A/B	Alta
5	110-HCU-E-005	Alta
6	110-HCU-E-003 A/B	Alta
7	110-HCU-E-004 A/B/C/D	Media
8	110-HCU-E-115	Media
9	110-HCU-E-007 A/B	Baja

## Función de los intercambiadores de calor 110-HCU-E-006 A/B/C/D

La función de los intercambiadores de calor 110-HCU-E-006 A/B/C/D dentro de la unidad es tomar el efluente del reactor 2 y aprovechar la energía adquirida para calentar la carga de este, antes de pasar por el horno (ver figura 3), con el fin de aprovechar la energía alcanzada en la reacción exotérmica del reactor y obtener una ganancia energética.

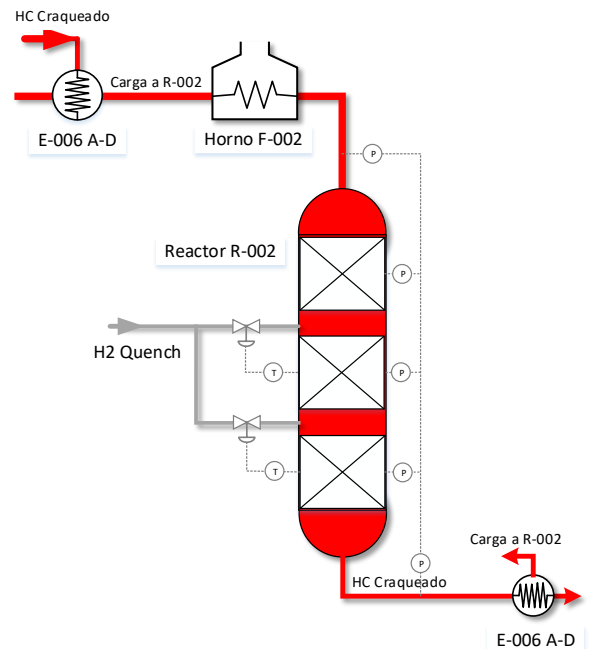


Fig 3. Diagrama Grande de Control, sección reactor 2.

## Caso de estudio: eventos en Intercambiadores de alta presión

Una de las características principales en las unidades de Hydroproceso de la industria Oil & Gas es encontrar intercambiadores de alta presión, a su vez se han presentado eventos asociados a estos. Dentro de los cuales comúnmente los casos se relacionan con la soldadura de sello del diafragma y ejecutar reparaciones en esta soldadura es todo un reto

por su alta complejidad. Los intercambiadores de alta presión de la unidad de Hydrocracking no son ajenos a este tipo de problemas, después de la puesta en servicio de la unidad de Hydrocracking en el 2016, se presentaron eventos periódicos, todos asociados con la soldadura del diafragma; en total se han presentado cinco (5) eventos con impacto en la disponibilidad operacional de la unidad. A continuación, en la figura 4 se muestra una línea de tiempo con los diferentes eventos de los intercambiadores 110-HCU-E-006 A/B/C/D.

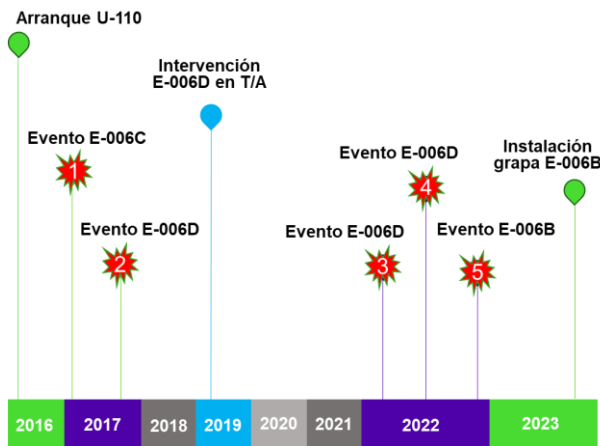


Fig 4. Línea de tiempo de los eventos presentados en los intercambiadores 110-HCU-E-006 A/B/C/D.

Durante el 2022 la disponibilidad operacional de la Refinería fue altamente impactada por la intervención repetitiva de los intercambiadores 110-HCU-E-006 B y D, disminuyendo en un 1.69% dicha disponibilidad, contra una meta referente de máximo 1.5% por eventos programados y no programados.

Dentro de las causas raíz encontradas productos de las fallas en los intercambiadores de calor 110-HCU-E-006 A/B/C/D se destacan las siguientes:

- Sobretensión en soldadura de sello del diafragma por diferencial de expansión térmica debido a disimilitud de materiales,

Material base: SA 336 F22 Cl. 3 (2-1/4 Cr); material weld overlay: SS-347; Material Diafragma: Alloy 825; Aporte soldadura: NiCrMo-3.

- Stress Corrosión Cracking (SCC) por cloruros, que son alojados entre el diafragma y el weld overlay del canal, API-571 [2].
- Agrietamiento por ácidos politionicos, con mayor probabilidad de ocurrencia durante intervenciones o reparaciones de los equipos, NACE SP0170 [3] - API 571 [4].

### Identificación y gestión de malos actores

Debido a los múltiples eventos y el impacto sobre la disponibilidad operacional de la Refinería en el año 2022, fue clasificado como un mal actor VH (very high) el sistema de intercambiadores 110-HCU-E-006 A/B/C/D, consecuentemente se trazó un plan desde el Departamento de Confiabilidad de Equipo Rotativo y Estático para la gestión y eliminación del mal actor; el plan básicamente consistió en buscar alternativas y soluciones que garantizaran recuperar la confiabilidad del sistema de intercambiadores del alta presión 110-HCU-E-006 y evitar impactos negativos en la disponibilidad operacional de la Refinería de Cartagena. Dentro de las alternativas vistas, surgió el cambio de la tecnología de sello de estos equipos, una solución que no había sido implementada aún en Latinoamérica, esta alternativa fue sometida a análisis y referenciación previamente a ser llevada a talleres de cuestionamiento y aprobación del control de cambio por parte de la Gerencia. Dando como resultado que la solución con mayor reducción de riesgo de pérdida de contención y mayor probabilidad de éxito era el cambio de tecnología de sello de diafragma a sello por anillo cónico Taper-Lok.

## Evaluación y análisis de alternativas

Se realizó una serie de revisiones y análisis de alternativas ante las fallas presentadas en los intercambiadores de calor, todas las alternativas planteadas fueron sometidas a sesiones de análisis multicriterio, se realizaron una serie de consultas a otras Refinerías donde se han implementado soluciones ante problemas o fallas en intercambiadores de alta presión con diafragma, lo anterior a modo de referenciación. Las opciones planteadas como alternativas fueron las siguientes:

- Reparación conforme diseño original.
- Reparación con cambio de metalurgia de SS 347 a Alloy 825 en el weld overlay, ver figura 5.
- Cambio de tecnología de sello, de diafragma a Taper Lok, ver figura 6.

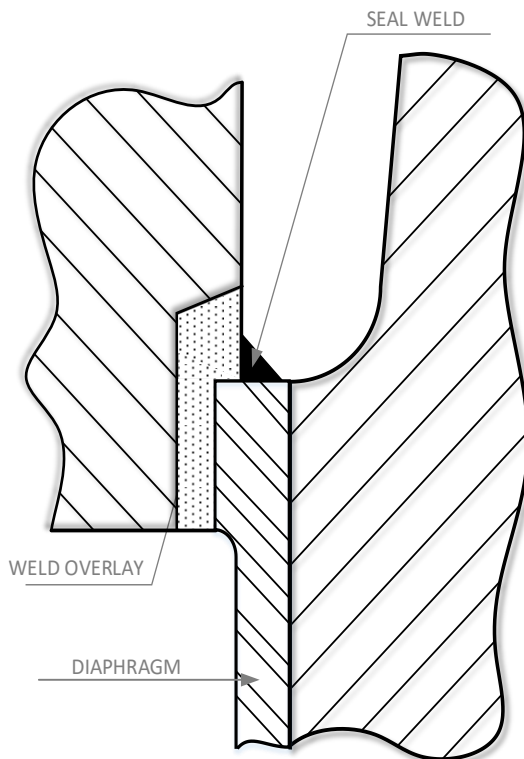


Fig 5. Detalle weld overlay y cambio a Alloy 825.



Fig 6. Esquema simple con anillo cónico (color rojo) Taper Lok.

Los aspectos evaluados y sometidos a análisis se demarcan a continuación, también se puede visualizar el área de mayor cobertura de beneficio en la figura 7:

- Reducción del riesgo
- Complejidad
- Costo-beneficio
- Duración de la implementación
- Reducción tiempos de mantenimiento

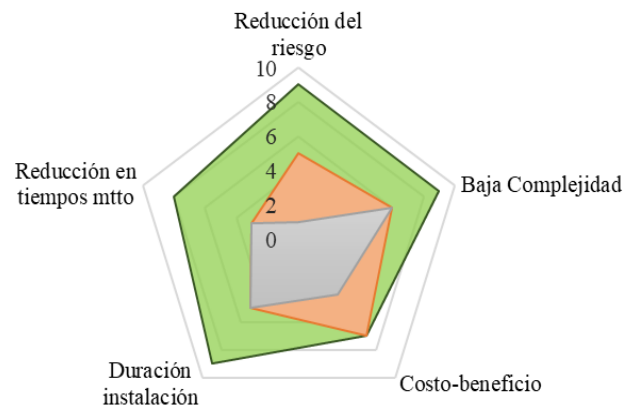


Fig 7. Diagrama radial comparativo alternativas.



Como podemos observar en la figura anterior la alternativa que mayor área cubre y la que ofrece un mejor desempeño a nivel global es la de cambio de tecnología de sello, pues esta solución elimina la soldadura y por consiguiente la complejidad de removerla e instalarla en cada intervención del equipo, también se elimina el diafragma en Alloy 825 que implica un repuesto de alto costo.

Producto de la evaluación multicriterio se concluyó que la opción con mayor puntaje ponderado es la implementación de la alternativa de cambio de sello a Taper Lok, como se observa en la tabla 2.

Tabla 2. Resultado evaluación multicriterio alternativas

Criterio	Alternativas		
	Reparación original	Weld Overlay a Alloy 825	Taper Lok
Reducción del riesgo	1	5	9
Baja Complejidad	6	6	9
Costo-beneficio	4	7	7
Duración instalación	5	5	9
Reducción en tiempos mto.	3	3	8
<b>Sumatoria</b>	<b>19</b>	<b>26</b>	<b>42</b>

### Gestión Dinámica de Riesgos

Una vez evidenciado el riesgo de pérdida de contención en los intercambiadores de alta presión 110-HCU-E-006 A/B/C/D y mediante la metodología de Gestión Dinámica de Riesgos (GDR) se administró dicho riesgo, evaluando y minimizando de manera continua y sistemática, para la toma de decisiones, implementación de barreras, hasta la eliminación por completo del mismo; siempre basado en evaluación,

evolución e incertidumbre del riesgo. Las fases que surgieron a raíz del riesgo son: Identificar; Planear; Tratar y Monitorear, siendo un proceso cíclico e iterativo.

Identificar: Se identifica y declara el riesgo o los riesgos potenciales en los activos, en este caso la pérdida de contención con posible afectación a personas e impacto económico.

Planear: Durante esta fase se proyectó y evaluó las diferentes alternativas de mitigación, aceptación o eliminación del riesgo. Para el caso de los intercambiadores 110-HCU-E-006, se planearon y ejecutaron reparaciones temporales (grapa tipo ASME [5]), reparaciones definitivas y por ultimo la eliminación del riesgo mediante la instalación de la nueva tecnología de sello Taper Lok.

Tratar: Mediante la toma de decisión, el riesgo fue tratado hasta lograr su eliminación, para este caso específico fue inicialmente monitoreado con inspecciones recurrentes hasta la intervención y reparación inicial. Posteriormente se presentó una nueva falla, la cual fue tratada con la instalación de una grapa tipo ASME y finalmente en la parada de planta de 2024 de la unidad, fue eliminado el riesgo con la instalación de la tecnología de sello Taper Lok.

Monitorear: El monitoreo continuo de la condición de los activos es el elemento clave en la GDR debido que los riesgos no son constantes en el tiempo, evolucionan y su valoración igual, en el caso de análisis el riesgo estuvo en constante monitoreo, ante la falla inicial, gracias al monitoreo, se logró llevar hasta una parada técnica programada de forma controlado el riesgo de pérdida de contención, sin tener afectación a personas, ambiente, imagen ni activos de la organización, esta fase de monitoreo fue llevada a cabo inclusive

después de eliminado el riesgo como parte de la evaluación y efectividad de la solución.

### Implementación de nueva tecnología de sello Taper-Lok

Para ser llevada a cabo la implementación de la nueva tecnología de sello en los intercambiadores de alta presión 110-HCU-E-006 A/B/C/D se siguieron las siguientes etapas:

Planeación: Durante la fase de planeación fueron puestas en análisis, cuestionamiento y evaluación varias soluciones potenciales, hasta que finalmente se determinó como mejor alternativa la tecnología de sello Taper Lok, la cual elimina por completo el común denominador de todas las fallas presentadas: “La soldadura de sello” posterior a esto se llevó a cabo una fase de referenciación con otras Refinerías y negocios donde se ha implementado esta tecnología, con resultados satisfactorios. Fue necesario planear la modificación o mecanizado del canal de los intercambiadores para ser instalado el nuevo anillo cónico junto con su respectiva tapa canal, ver figura 8 como ejemplo.

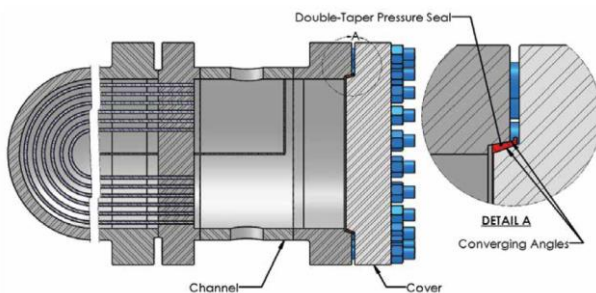


Fig 8. Esquema tecnología de sello con anillo cónico Taper Lok.

Como resultado de la planeación se logró identificar mejoras sustanciales en los tiempos de ejecución de mantenimiento de los intercambiadores de alta presión, al no tener actividades asociadas a soldadura de sello. En la

tabla 3, se muestra la optimización de actividades, lo que conlleva ahorros en tiempos de intervención.

Tabla 3. Optimización de actividades de mantenimiento con tecnología Taper Lok.

Act	Diseño Original	Taper Lok
1	Destensionado de pernos	Destensionado de pernos
2	Retiro tapa canal	Retiro tapa canal
3	Remoción soldadura de sello	Inspección área de sello y anillo
4	Rectificado Overlay/Diafragma	Instalación tapa canal
5	END	Tensionado de pernos
6	Instalación de diafragma	OPTIMIZACIÓN DEL 60% EN TIEMPOS DE EJECUCIÓN
7	Instalación de tapa canal	
8	Tensionado 50% pernos	
9	Soldadura de diafragma	
10	Tensionado 50% pernos	
11	Fin Soldadura diafragma	
12	tensionado 100% pernos	
13	END	

Alistamiento: En la fase de alistamiento se organizó la logística para la intervención de los intercambiadores 110-HCU-E-006 A/B/C/D, adicionalmente se realizó verificación de materiales y control dimensional. Fue necesario contar con tornos portátiles de gran tamaño y herramientas de precisión para el mecanizado de la brida del canal para así crear una nueva área de sello, donde se alojaría el anillo cónico Taper Lok. Por otra parte, se realizaron sesiones de entendimiento y análisis de riesgos “What if” para evitar desviaciones en el procedimiento de modificación e imprevistos durante la fase de ejecución.

Ejecución: Una vez la unidad de Hydrocracking estuvo fuera de servicio y descontaminada, se realizó la modificación del canal, montaje del

anillo cónico, tapa canal y pruebas de la nueva tecnología de sello, el primer paso consistió en remover los diafragmas actuales, posterior a ello realizar el mecanizado de los canales, instalar los nuevos anillos cónicos Taper Lok, instalar la nueva tapa canal, tensionar y realizar las respectivas pruebas hidrostáticas de aceptación.

A continuación, en las figuras 9, 10 y 11 se muestra un paso a paso de cómo se realizó la implementación de la nueva tecnología.



Fig 9. Ejecución mecanizado canal 110-HCU-E-006D.



Fig 10. Posicionamiento anillo cónico Taper Lok.



Fig 11. Instalación nueva tapa canal.

Evaluación y cierre: Recibida a satisfacción la prueba hidrostática en los intercambiadores de alta presión 110-HCU-E-006 A/B/C/D, se cumplió el hito de aceptación formal de la nueva tecnología de sello. Como resultado de este cambio tecnológico se logró recuperar la confiabilidad en el sistema y consecuentemente mejorar la disponibilidad operacional. También, optimizar tiempos de ejecución en paradas de planta disminuyendo la complejidad en la mantenibilidad de estos equipos.

### Conclusiones y Resultados

- La implementación de nuevas tecnologías y diseños en intercambiadores de calor de alta presión demuestra que es posible mejorar la Confiabilidad en este tipo de equipos, eliminando elementos de alta complejidad como son las soldaduras de sello en diafragmas, siendo esta un común denominador en las fallas que se han presentado a nivel mundial.
- Este caso de éxito se destacó por ser una solución radical que logró eliminar un mal actor de la Refinería de Cartagena, adicionalmente en estos equipos de difícil intervención se logró disminuir su



complejidad en la mantenibilidad y reparación, a su vez se optimizaron los tiempos y costos de ejecución, al eliminar actividades de soldadura y no contar con diafragmas en Alloy 825.

- Mediante la implementación de nuevas tecnologías se logró mejorar tiempos de intervención en equipos complejos y obtener optimización de actividades de reparación de soldaduras de difícil ejecución.
- Finalmente se demuestra un beneficio a nivel Refinería, al mejorar la disponibilidad operacional de la unidad de Hydrocracking, disminuyendo significativamente los riesgos de paradas no programadas e impactos potenciales del orden de los 10 MUSD por falla en estos intercambiadores de calor de alta presión.

### Bibliografía

- [1] NORMA TEMA, SECTION 1; Heat Exchanger Nomenclature, Figure N-1.2.
- [2] NORMA API-571, Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, Pag 86.
- [3] NORMA NACE SP0170 -2018 Protection of Austenitic Stainless Steels and Other Austenitic Alloys from Polythionic Acid Stress Corrosion Cracking During a Shutdown of Refinery Equipment, Pag 4.
- [4] API-571, Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, Pag 86 (PTASCC) Pag 265.
- [5] NORMA ASME PCC-2, Repair of Pressure Equipment and Piping, Mechanical Clamp Repair, Article 3.6 - Pag 107.

### Fabio Aranda López

Ingeniero Mecánico, Universidad Industrial de Santander (UIS). Especialista en Gerencia de Proyectos, Universidad Tecnológica de Bolívar (UTB). Project Manager Profesional (PMP-PMI) e Inspector Autorizado API-570. Ingeniero de Confiabilidad e Integridad de la Refinería de Cartagena, con más de 15 años de experiencia en el sector minero energético y Oil&Gas



Fabio Aranda López

3102789203

Diagonal 32 #80-919 Edificio Torres de Madeira Apto 702A

Oficina: Km 10 vía Mamonal

fabio.aranda@ecopetrol.com.co

Cartagena – Colombia.