



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



GESTIÓN DE RIESGOS E INTEGRIDAD POR FRACTURA FRÁGIL EN EQUIPOS CRÍTICOS: CASO DE TORRE DE ABSORCIÓN EN PLANTA DE GAS

SAMUEL RICARDO RODAS SÁNCHEZ

E.mail: samuel.rodas@ecopetrol.com.co

Barrancabermeja, Santander – Colombia

Resumen

Mediante la aplicación de la metodología RBI se identificó susceptibilidad a fractura frágil en la torre de absorción de una planta de gas, construida en 1965 y operada a 900 psi y temperaturas bajas. Dada su alta criticidad operacional, se desarrollaron evaluaciones de integridad conforme a API 579-1/ASME FFS-1, empleando mecánica de fractura según las Partes 3 y 9. Con base en los resultados, se ajustaron las ventanas de operación e integridad para controlar las variables críticas del proceso y se definió el alcance de inspección y mantenimiento mayor orientado a validar la condición estructural del equipo. Los resultados de la inspección y la evaluación actualizada por mecánica de fractura confirman la operación segura a 925 psi y -5°F . El enfoque aplicado demuestra que la integración del conocimiento del proceso, la adecuada valoración de mecanismos de daño y la gestión oportuna del riesgo permiten asegurar la operación confiable de equipos críticos dentro de niveles de riesgo aceptables.

La fractura frágil

Es un mecanismo de daño caracterizado por ruptura súbita con mínima deformación plástica, favorecida por baja tenacidad del material (Equipos fabricados ASME antes de 1987 no tenían requisitos de tenacidad), bajas temperaturas y concentradores de esfuerzo, que afecta entre otros y particularmente a los aceros al carbono y aceros de baja aleación especialmente a los antiguos, entre ellos el A-212 [1]. Una falla en la

torre de absorción de la planta de gas implicaría una posible afectación a personas y una parada general de planta con su respectiva consecuencia económica.

Objetivo

Una vez identificada la susceptibilidad de la torre de absorción al mecanismo de daño de fractura frágil, definir y ejecutar acciones de gestión de riesgo e integridad para una operación segura dentro de niveles de riesgo aceptables.

Metodología

Definición del sistema a evaluar

Se debe definir claramente el sistema o equipo a evaluar en la metodología, establecer los límites desde y hasta donde se considera el estudio, por ejemplo: desde la boquilla de entrada, desde la válvula de seccionamiento y hasta la válvula motorizada a la salida del equipo. Realizar la caracterización del equipo o sistema a evaluar, considerando al menos año de construcción, material, espesores, controles de calidad y ensayos no destructivos de su fabricación, dimensiones, inventario, fluido almacenado y condiciones actuales de proceso como temperatura, presión, flujo y niveles.



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Valoración del nivel de riesgo

El nivel de riesgo de la torre de absorción se obtiene al cruzar la consecuencia y la probabilidad de falla, empleando para su estimación la metodología del API RP580 Risk Based Inspection y API RP581 Risk Based Inspection Methodology y para su clasificación las guías y procedimientos propios del dueño del activo.

Para la consecuencia se valoran entre otros, la pérdida de contención de volumen de gas tratado en la torre de aproximadamente 50MMSCFD al modo de falla más probable, que para la fractura frágil corresponde a una rotura total del equipo, y su afectación a personas, ambiente, económica, imagen y clientes.

Respecto a la probabilidad siendo este un mecanismo de daño no dependiente del tiempo se estima la probabilidad de ocurrencia de una falla repentina, considerando el material y fecha de construcción, espesor de pared de componentes del equipo, datos de pruebas de impacto, tamaño de grano, alivio térmico, mínima temperatura del metal alcanzada (operación, arranque, paradas y condiciones anormales de proceso), presión de operación y registros de inspecciones previas.

Definición e implementación de acciones para reducir el riesgo

La gestión de riesgos se puede abordar desde 2 maneras, a través de la reducción de consecuencia o de la reducción de probabilidad.

Para la reducción de consecuencia se pueden definir entre otras, acciones como:

- a. Reducir inventarios en el equipo o sistema, teniendo en cuenta que en caso de una pérdida de contención los radios de afectación podrían ser menores y disminuir en todas las categorías la afectación.

- b. Ajustar de ventanas de integridad, como disminuir la presión o aumentar la temperatura de operación del equipo.
- c. Limitar personas en los radios de afectación calculados.
- d. Mantener y mejorar los sistemas de detección, alarmas y atención de emergencias.

Para la reducción de probabilidad se pueden definir entre otras, acciones como:

- a. Calcular mediante de API 579-1/ASME FFS-1, según Parte 3 (Assessment of existing equipment for brittle fracture) y Parte 9 (Assessment of crack-like flaws) la temperatura mínima del metal y tamaños máximos de grieta.
- b. Implementar de un plan de inspección para la detección de defectos definidos en el FFS y verificación de procesos de fragilización por condiciones de proceso y operación (diferente a la temperatura) que disminuyan el valor de tenacidad a la fractura.
- c. Ejecutar las recomendaciones de integridad resultado de la inspección.
- d. Realizar actualización tecnológica del material de la torre a uno menos susceptible al mecanismo de daño.

Revaloración del nivel de riesgo

Corresponde a la actualización del cálculo de riesgo inicial, por lo que igualmente se debe cruzar la consecuencia y la probabilidad de falla luego de la implementación de las acciones de gestión de riesgo. En general si las acciones son efectivas se logra una reducción en el nivel de riesgo del activo.



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Resultados

El equipo para evaluar corresponde a una **torre de absorción** de 4ft y 6in de diámetro y 44ft de sección recta del cuerpo, en material A-212-B FB en cuerpo y caps de 1-5/8 in de espesor, boquillas en A-181-1 / A-105-2 de construcción soldada, con alivio térmico y 100% radiografía con estampe ASME de 1965 diseñado para una presión de 925PSI, temperatura máxima de 650°F y MDMT de -20°F. Hace parte del sistema de aprovechamiento de gas rico, donde fluyen desde la parte inferior el gas rico y desde la parte superior el aceite pobre, que baja a través de la torre en contacto en contracorriente, enriqueciéndose a medida que desciende a través de la torre con los productos propano, butano, gasolina natural y trazas de metano y etano que luego sale por el fondo para continuar con su tratamiento, mientras que por la parte superior sale el gas pobre. Este proceso ocurre a 900PSI y -10°F.

De acuerdo con el RBI realizado el equipo es susceptible a los mecanismos de daño de adelgazamiento general con velocidades de corrosión interna de 0.3mpy, corrosión bajo aislamiento con velocidades de corrosión externa de 1.16mpy y fractura frágil, siendo este último el de mayor probabilidad de falla y el de menor seguimiento en las inspecciones realizadas durante el servicio del equipo. Clasificado como de muy alta probabilidad de ocurrencia nivel 5 de 5, mientras que la consecuencia calculada principalmente por afectación a personas se valoró en un nivel 4 de 5, dando como resultado un riesgo Alto (H).

Las acciones para gestión del riesgo se enfocan principalmente en 2 sentidos, las asociadas a reducir consecuencia:

- a. Se ajustan procesos operativos permitiendo disminuir el flujo de gas a procesamiento en la planta pasando de 50

MMSCFD a 30MMSCFD, lo que redunda en reducción del flujo de gas en un posible evento de pérdida de contención.

- b. Se mantienen disponibles los sistemas de atención a emergencias.
- c. Divulgación en personal operativo/administrativo el escenario de riesgo y respuesta ante una emergencia, como rutas de evacuación y puntos de encuentro, así como la reducción de exposición en zonas radios de afectación.
- d. De acuerdo con los resultados de la valoración FFS, se ajustaron ventanas de integridad y operativas de presión, temperatura (Se pasa de ventana de -20°F a -5°F).
- e. Se ajustan procedimientos operativos incluyendo los valores definidos como ventanas de integridad y recomendaciones como la variación controlada de la presión y temperatura del equipo en procesos de arranque y parada.

Las acciones asociadas a reducción de probabilidad:

- a. Se calcula mediante de API 579-1/ASME FFS-1, según las Partes 3 y Parte 9 la temperatura mínima del metal (-5°F para una presión de 925PSI condición de diseño) y tamaños máximos de grieta que serán para la altura 0.126in (3.22 mm) y longitud 0.761in (19.35mm) considerando degradación de la tenacidad del material, y altura de 0.225in (5.73 mm) y longitud 1.354 in (34.39 mm) sin considerar degradación de la tenacidad (diferente a la afectación por baja temperatura) valores superiores colocan la torre en riesgo de falla por fractura frágil.
- b. Se realiza análisis de condición de integridad y se define un plan de inspección a ejecutar con el equipo fuera de servicio e incluye entre otras actividades los siguientes ensayos luego de retirar el



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



100% del aislamiento externo y la limpieza adecuada: Inspección mediante Spot UT scan A en una superficie mayor al 50% de cuerpo y caps de la torre y 100% de boquillas, Inspección visual 100% tanto interna como externamente, partículas magnéticas al 100% soldaduras boquillas y ruanas – cuerpo, Couplings – cuerpo de la torre, ACFM en el metal base cerca de la junta casco – Cap superior y cerca la junta casco – cap inferior – faldón, UT TOFD array en el 100% de las juntas circunferenciales y longitudinales del cuerpo y caps, medición de durezas y réplicas metalográficas. Durante la inspección no se hallaron defectos tipo grieta en las soldaduras, pero si se encontraron defectos tipo laminaciones en las láminas del cuerpo (virola4) que obligó a una revaloración de FFS.

- c. Como recomendación de la inspección se ejecutaron actividades de reposición de válvulas, conexiones menores, recubrimiento y aislamiento.
- d. Se realiza la valoración de los defectos encontrados en la inspección mediante API 579-1/ASME FFS-1, según las Partes 3 y Parte 9 y se concluye que no existe condición de riesgo por agrietamiento o fractura a -5°F para una presión de 925PSI condición de diseño, ya que los defectos o indicaciones reportadas son inferiores en dimensión al tamaño límite calculado.

De acuerdo con la última versión de API 579-1, en su numeral 3.2.4 (Supplemental Guidance for SA-212 Grade B Material), se reconoce la ocurrencia de fallas por fractura frágil en componentes fabricados con material SA-212 Grado B, evidenciando que, en algunos casos, los valores reales de tenacidad a la fractura pueden ser inferiores a los estimados mediante correlaciones o supuestos generales. Si bien el material de la torre puede presentar microestructuras de grano

fino o grueso, siendo este último más susceptible al mecanismo de fractura frágil, la norma no establece de manera explícita la condición microestructural de los materiales involucrados en los eventos históricos de falla. En el caso de la torre analizada, a pesar de identificarse una microestructura de grano fino, esta incertidumbre inherente en la predicción de la tenacidad fue gestionada mediante la aplicación de factores de seguridad conservadores en la estimación de esfuerzos dentro de la evaluación Fitness for Service, permitiendo una conclusión de integridad coherente con el enfoque de gestión de riesgos adoptado y con la criticidad del equipo.

Luego de la implementación de las acciones de reducción de consecuencia y reducción de probabilidad, así como las consideraciones propias del análisis FFS se realiza una nueva valoración del riesgo asociado al equipo, clasificado como de nivel 2 de 5 (ha ocurrido en empresa o en la industria), mientras que la consecuencia se recalculó por afectación a personas en caso de un evento de pérdida de contención y simulando los radios de afectación por incendio/explosión valorada en un nivel 5 de 5 dando como resultado un riesgo Medio (M).

Conclusiones

El desarrollo del caso de la torre de absorción de la planta de gas evidencia que la gestión de riesgos e integridad por fractura frágil en equipos críticos requiere un enfoque estructurado que integre la identificación adecuada del mecanismo de daño, la evaluación del nivel de riesgo y la aplicación de herramientas de integridad mecánica, particularmente en equipos antiguos fabricados sin requisitos históricos de tenacidad.

La aplicación de la metodología RBI permitió identificar la fractura frágil como el mecanismo de



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



mayor impacto potencial sobre el activo, considerando su material de fabricación, condiciones de operación a bajas temperaturas y su alta criticidad dentro del proceso, justificando la priorización del equipo dentro del programa de gestión de integridad y riesgos.

La evaluación de integridad desarrollada mediante API 579-1/ASME FFS-1, empleando mecánica de fractura (Partes 3 y 9), proporcionó criterios cuantificables para la toma de decisiones, al definir la temperatura mínima admisible del metal, los tamaños máximos de grieta aceptables y las ventanas de operación e integridad.

La incorporación de resultados reales de inspección durante la parada general permitió una gestión dinámica de la integridad, evidenciando la necesidad de reevaluar el estado del equipo frente a hallazgos no previstos y confirmando que, bajo las condiciones operativas controladas, la torre puede operar de forma segura sin comprometer su integridad estructural.

El uso de metodologías y herramientas cuantitativas resulta fundamental para refinar la estimación de la probabilidad y la consecuencia de falla en equipos críticos. En el presente caso, los modelamientos y simulaciones realizados mediante software especializado de análisis de consecuencias permitieron identificar escenarios con mayor severidad que los inicialmente considerados, lo que conllevó a un ajuste del nivel de consecuencia y del nivel de riesgo calculado. Esto permitió una valoración del riesgo más alineada con escenarios operacionales creíbles y una mejor toma de decisiones fundamentada desde el punto de vista de integridad y gestión de activos.

La estrategia de gestión integral del riesgo se fortaleció con la implementación de medidas operativas y técnicas orientadas tanto a la

reducción de la probabilidad de falla como a la gestión de la consecuencia, como resultado el nivel de riesgo del activo se redujo de Alto a Medio, evidenciando que se puede mantener la operación de equipos críticos antiguos dentro de niveles de riesgo aceptables, alineando seguridad de procesos, confiabilidad operacional y objetivos de negocio.

Finalmente, el caso presentado confirma que la gestión de riesgos e integridad por fractura frágil no se limita al análisis del material, sino que constituye una práctica transversal de gestión de activos, replicable en otras instalaciones con equipos críticos y condiciones de diseño desafiantes, aportando valor sostenible a la operación y a la toma de decisiones basadas en riesgo.

Bibliografía

- [1] API RP 571, Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, Third Edition 2020.
- [2] API RP 580, Risk-Based Inspection, Third Edition 2016.
- [3] API RP 581, Risk-Based Inspection Methodology, Third Edition 2016.
- [4] API 579-1/ASME FFS-1, Fitness-For-Service 2021.
- [5] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, Edition 2025.
- [6] ASTM A212/A212M, Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, High-Strength, for Moderate- and Lower-Temperature Service, ASTM International.
- [7] BS 7910, Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, British Standards Institution, London, 2019.
- [8] Anderson, T. L., Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 4th ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2017.



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



[9] W. F. Boggs, Brittle Fracture and Ductile-to-Brittle Transition in Carbon Steels, ASM Handbook, Volume 11: Failure Analysis and Prevention, ASM International, 2002.

[10] U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), Metallurgical Evaluation of Williams Olefins Ruptured Reboiler EA-425B, Investigation Report, Washington, D.C., 2016.

[11] Ecopetrol S.A., Informe de determinación de la temperatura mínima admisible por mecánica de fractura — Torre de Absorción Planta de Gas, Gerencia de Integridad, 2025.

Samuel Ricardo Rodas Sánchez, Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad Nacional de Colombia, Especialista en Gestión de integridad y corrosión, Maestría en Gestión de integridad y

corrosión de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, con certificación API510, API570, API653 y API580, experiencia de 16 años en la industria de Oil and Gas, en diseño y fabricación e inspección, así como en la gestión de integridad de activos estáticos. Actualmente Ingeniero de confiabilidad e integridad en Ecopetrol.

Datos de contacto

1. Nombre del autor Samuel Ricardo Rodas Sánchez
2. Teléfono celular 3166986945
3. Dirección del autor
 - a. Oficina bloque 2 - 25 de agosto Refinería Barrancabermeja
 - b. samuel.rodas@ecopetrol.com.co / samuelrodas@gmail.com
 - c. Barrancabermeja, Colombia