

ESTUDIO DE SENSIBILIDAD PARAMÉTRICA EN EL MODELO CUANTITATIVO PARA RBI PROPUESTO POR API RP 581 ED 2016 AD 2020

Julian Juanes Berro/Marcos Nicolas Dasso, GIE S.A., berro@giegroup.net /dasso@giegroup.net

Sinopsis

La metodología de inspección basada en riesgo permite, a través de un análisis estructurado, el estudio de los activos estáticos y sus amenazas con el objetivo de un plan de acción para garantizar la aptitud para cumplir su cometido. Como parte de la metodología, la etapa de análisis de riesgo brinda las herramientas necesarias a los profesionales de la integridad para definir estrategias y formas de abordar el volumen de tareas que resulta del estudio.

Definir estrategias para trazar un plan de acción implica interpretar y comprender las variables del modelo de riesgo y su sensibilidad paramétrica. Particularmente, luego de varios años de interacción con el último modelo de riesgo cuantitativo propuesto por API RP 581 Ed. 2016 Ad. 2020, algunos resultados llevaron al equipo de analistas a profundizar la revisión del proceso de cálculo con el objetivo de ganar un mejor entendimiento de los resultados y su implicancia en la necesidad de contar con inputs de calidad en el análisis.

Uno de los cambios más sustanciales entre la versión 2008 y la 2016 del modelo de riesgo semicuantitativo – cuantitativo planteado por API RP 581 fue el pasaje de un modelo discreto a uno continuo para el análisis del adelgazamiento (cualquiera sea su concepción: interno, externo, bajo aislación o recubrimientos internos). Con el objetivo de comprender mejor aún ese cambio, se tomaron algunas variables de entrada al modelo y se evaluó la respuesta del mismo ante el cambio. El análisis de los resultados frente a la variación de los datos de entrada permitió comprender la naturaleza de las inconsistencias entre expectativas y realidad. La evaluación de sensibilidad paramétrica se llevó adelante con datos reales de activos, realizando proyecciones sobre los mismos y comparándolos con el mismo tratamiento sobre otros equipos cuyos datos de diseño diferían. De este modo, se logró visualizar la respuesta de la variación individual y la afectación de condiciones de diseño sobre el resultado.

Introducción

Durante el ciclo de vida operacional de los activos se ven afectados por diferentes amenazas que pueden llevarlos desde un desgaste hasta una rotura. Es por este motivo que en la industria se fue desarrollando ciencia/tecnología del mantenimiento con el objetivo de anticiparse o reducir el número de fallas de los activos, y de esta forma minimizar los tiempos de parada y reducir el daño que dichas fallas pueden traer aparejadas.

Para lograr dicha mitigación sobre los daños humanos, económicos y medioambientales potenciales, es que la industria busca adelantarse a dichos eventos mediante la implementación de actividades preventivas. Estas actividades preventivas pueden ser el cambio de uno de los componentes del activo, la aplicación de un mantenimiento general o el reemplazo total del del equipo (entre otras).

Para tomar la decisión de cuándo y cómo efectuar el mantenimiento es que se recurre a dos alternativas: a la confiabilidad o a las **inspecciones** (y el resultado de la evaluación de las mismas).

Son las inspecciones el elemento de interés de la metodología RBI (Risk Based Inspection). Dicho análisis busca ofrecer herramientas para confeccionar los planes de inspección de manera eficiente y eficaz. Desde un abordaje integral, RBI permite ordenar la información importante, analizar los mecanismos de daño potencialmente activos (pudiendo en algunos casos encontrarse validados o mitigados), lo cual permite a los analistas definir los ensayos no destructivos óptimos para su detección. Tal como indica su nombre, la metodología se basa en el cálculo del riesgo para cada activo, esta actividad permite darle un sentido de prioridad y comprender como está compuesto el riesgo de ellos. A medida que el número de activos a planificar se incrementa y la planificación aumenta en complejidad, este tipo de estudios representa una herramienta trascendental para la gestión de la integridad.

El cálculo del riesgo se puede llevar a cabo de distintas maneras, utilizando métodos cualitativos, cuantitativos o una mezcla de ambos, las variables de estudio y los escenarios analizados varían según el tipo de activo y de industria. Para el caso que estamos estudiando, API (American Petroleum Institute) nos propone en su práctica recomendada *API RP 581 Risk-based Inspection Methodology* la evaluación del riesgo para los recipientes sometidos a presión para el escenario de pérdida de contención de fluido.

En esta metodología se busca cuantificar la probabilidad de que el fluido contenido se libere a la atmosfera o al ambiente que envuelve al componente estudiado y la consecuencia asociada a dicha liberación (en términos de seguridad, económicos y medioambientales).

Dicha cuantificación se da mediante la siguiente formula:

$$R(t) = P_f(t) \cdot C_f$$

Donde $P_f(t)$ es la probabilidad de falla y una función del tiempo, C_f la consecuencia del evento asociado a la falla y $R(t)$ el riesgo asociado al evento y dependiente del tiempo. Dicha dependencia del tiempo de la probabilidad, y por ende del riesgo, se puede ver en la próxima ecuación:

$$P_f(t) = gff \cdot F_{MS} \cdot D_f(t)$$

Donde gff es la frecuencia de falla genérica para el componente según el histórico de la industria, F_{ms} es un factor de gerenciamiento, que pondera la calidad del sistema gestión de la empresa que opera los activos, y un $D_f(t)$ que el factor de daño total que engloba las amenazas asociadas a la integridad y es incremental respecto al tiempo.

Es el factor de daño el principal elemento de estudio de la probabilidad para la API RP 581, allí se encuentra desarrollado el cálculo individual del factor de daño para cada una de las amenazas

(adelgazamiento, fisuración, etc). Su dependencia con el tiempo varía según la amenaza/morfología evaluada y está relacionada a la fecha de puesta en marcha o fecha de última inspección.

Entonces el factor de daño es el valor que refleja cuanto más o menos probable es que un activo falle (o pierda su capacidad de contener fluido). Se espera que, en cierta medida, este valor refleje los resultados de las inspecciones y de la evaluación de integridad junto con el criterio del personal de mantenimiento.

Pero durante la práctica y los procesos de implementación esto no siempre ocurre, el valor para la probabilidad/factor de daño no refleja los resultados de la evaluación de integridad y estado del equipo. Equipos nuevos con probabilidades elevadas de falla o equipos con espesores medidos cercanos o inferiores al espesor requerido con bajas probabilidades de falla.

Estas son observaciones que surgieron durante la implementación de RBI en instalaciones de todas las cuencas de Argentina, con más de 4000 activos en total evaluados. Como parte del proyecto se buscó identificar cuáles era las causas de dicha disonancia entre los valores esperados y los obtenidos.

Como el cálculo del factor de daño puede ser complejo y contiene una dependencia con muchas variables para cada una de las amenazas/morfologías evaluadas se optó por un análisis de sensibilidad para las variables claves. A través de la evaluación del riesgo para las condiciones de interés se busca entender la dependencia e influencia de cada una en el valor final de la probabilidad.

Desarrollo

El análisis de sensibilidad responde a la necesidad de evaluar la dependencia de un sistema multifactorial complejo frente a algunas variables. Esto se debe a que muchas veces la complejidad del cálculo no permite a simple vista establecer un patrón de comportamiento directo ante la variación de uno de los parámetros de cálculo.

Para este caso en particular se seleccionó el cálculo del factor de daño para la morfología de adelgazamiento externo/interno. Esto se debe a que es en dicho factor donde se produjeron el principal número de observaciones y donde la metodología más se vio modificada en los últimos años. Esta modificación implicó un cambio de un modelo semicuantitativo del cálculo del riesgo (cálculo mediante la utilización de variables discretas) a un modelo cuantitativo (cálculo mediante fórmulas con resultado continuo).

El factor de daño por adelgazamiento se determina en función del espesor medido/nominal del activo y las condiciones ya sean externas o internas que favorecen su reducción. Para ello API RP 581 ed. 2016 nos propone las siguientes ecuaciones:

$$D_{fb}^{Thin} = \left[\frac{\left(Po_{p1}^{Thin} \Phi(-\beta_1^{Thin}) \right) + \left(Po_{p2}^{Thin} \Phi(-\beta_2^{Thin}) \right) + \left(Po_{p3}^{Thin} \Phi(-\beta_3^{Thin}) \right)}{1.56E - 04} \right]$$

Donde β es el índice de confiabilidad, P_o es la probabilidad posterior a inspección y Φ es la función acumulada de distribución estándar normal. La probabilidad posterior a inspección (P_o) es un factor que es sencillo de resolver como se observa a continuación:

$$\begin{aligned} P_{o_{p1}}^{Thin} &= \frac{I_1^{Thin}}{I_1^{Thin} + I_2^{Thin} + I_3^{Thin}} & I_1^{Thin} &= Pr_{p1}^{Thin} (Co_{p1}^{ThinA})^{N_A^{Thin}} (Co_{p1}^{ThinB})^{N_B^{Thin}} (Co_{p1}^{ThinC})^{N_C^{Thin}} (Co_{p1}^{ThinD})^{N_D^{Thin}} \\ P_{o_{p2}}^{Thin} &= \frac{I_2^{Thin}}{I_1^{Thin} + I_2^{Thin} + I_3^{Thin}} & I_2^{Thin} &= Pr_{p2}^{Thin} (Co_{p2}^{ThinA})^{N_A^{Thin}} (Co_{p2}^{ThinB})^{N_B^{Thin}} (Co_{p2}^{ThinC})^{N_C^{Thin}} (Co_{p2}^{ThinD})^{N_D^{Thin}} \\ P_{o_{p3}}^{Thin} &= \frac{I_3^{Thin}}{I_1^{Thin} + I_2^{Thin} + I_3^{Thin}} & I_3^{Thin} &= Pr_{p3}^{Thin} (Co_{p3}^{ThinA})^{N_A^{Thin}} (Co_{p3}^{ThinB})^{N_B^{Thin}} (Co_{p3}^{ThinC})^{N_C^{Thin}} (Co_{p3}^{ThinD})^{N_D^{Thin}} \end{aligned}$$

Donde Pr y Co son constantes, pero se seleccionan en función del nivel de confianza en la velocidad de corrosión y datos utilizados en el análisis. La única variable es el número de inspecciones para cada una de las efectividades definidas por API 581 (N_A , N_B , N_C , N_D). Entonces el número de inspecciones llevadas a cabo, su efectividad y el nivel de confianza que deriva de ellas afectará el cálculo de riesgo. Mientras que el cálculo de β es un poco más complejo:

$$\begin{aligned} \beta_1^{Thin} &= \frac{1 - D_{S_1} \cdot A_{rt} - SR_p^{Thin}}{\sqrt{D_{S_1}^2 \cdot A_{rt}^2 \cdot COV_{\Delta t}^2 + (1 - D_{S_1} \cdot A_{rt})^2 \cdot COV_{S_f}^2 + (SR_p^{Thin})^2 \cdot COV_p^2}}, \\ \beta_2^{Thin} &= \frac{1 - D_{S_2} \cdot A_{rt} - SR_p^{Thin}}{\sqrt{D_{S_2}^2 \cdot A_{rt}^2 \cdot COV_{\Delta t}^2 + (1 - D_{S_2} \cdot A_{rt})^2 \cdot COV_{S_f}^2 + (SR_p^{Thin})^2 \cdot COV_p^2}}, \\ \beta_3^{Thin} &= \frac{1 - D_{S_3} \cdot A_{rt} - SR_p^{Thin}}{\sqrt{D_{S_3}^2 \cdot A_{rt}^2 \cdot COV_{\Delta t}^2 + (1 - D_{S_3} \cdot A_{rt})^2 \cdot COV_{S_f}^2 + (SR_p^{Thin})^2 \cdot COV_p^2}}. \end{aligned}$$

Donde D_s y COV son constantes y A_{rt} y SR_p las variables de la ecuación. Se observa que tanto el factor de fracción de pérdida de espesor (A_{rt}) y el parámetro de relación tensional (SR_p) se encuentran tanto en el numerador como el denominador de la ecuación. Ambos factores son entonces los que contienen las variables de interés que queremos evaluar. Comenzando por SR_p :

$$SR_p^{Thin} = \frac{S \cdot E}{FS^{Thin}} \cdot \frac{Max(t_{min}, t_c)}{t_{rdi}} \quad FS^{Thin} = \frac{(YS + TS)}{2} \cdot E \cdot 1.1$$

Donde E es la eficiencia de junta, S la tensión admisible del cálculo de diseño, YS y TS las tensiones de rotura y fluencia del material, t_{min} es el espesor mínimo requerido, t_c es el espesor estructural requerido y t_{rdi} es el espesor nominal/medido. De estas variables se seleccionan la tensión admisible y los espesores mínimos requeridos y medidos. Por el lado de A_{rt} :

$$A_{rt} = \frac{C_{r,bm} \cdot age_{tk}}{t_{rdi}}$$

Donde C_r es la velocidad de corrosión, Age_{TK} es el tiempo desde la última medición de espesor y t_{rdi} es el espesor nominal/medido como se mencionó previamente. Se observa que A_{RT} es el factor que se incrementa con el tiempo, mientras que SR_P se mantiene constante, pero depende de los valores de ingreso al modelo.

El espesor medido se encuentra tanto en el factor de A_{RT} como en el SR_P y es un valor que se obtiene de los resultados de las inspecciones. El espesor requerido se encuentra definido por diseño y es el valor mínimo que debe poseer el componente para que el equipo pueda operar en las condiciones a las cual fue diseñado. La diferencia entre ambos se define como el espesor remanente y es un indicador sencillo de la integridad del equipo. Por ello es una medida que se utilizara dentro del análisis. Es de esperar que menores espesores remanentes incrementen el factor de daño del equipo.

Las tensiones admisibles, de fluencia y rotura parecerían ser constantes. Pero en la práctica nos encontramos que un mismo material o materiales similares pueden tener tensiones admisibles distintas dependiendo del código de diseño utilizado y el año del mismo. Para los equipos diseñados por ASME VIII el factor de seguridad utilizado para calcular la tensión admisible se redujo de 4 a 3.5 en el año 1999.

El objetivo del análisis es intentar esclarecer aquellas situaciones donde los resultados del RBI no coincidían con los esperados. Estas situaciones se pueden resumir en las siguientes preguntas:

- ¿Por qué un equipo con baja vida remanente tiene una probabilidad más baja que un equipo con mayor vida remanente/nuevo?
- ¿Por qué si mi equipo tiene una vida remanente igual a 0 el nivel de riesgo no es elevado?
- ¿Por qué un equipo recientemente instalado/reparado tiene una probabilidad mayor al estándar de la industria?

Para resolver estas preguntas es que se procedió a efectuar el análisis de sensibilidad para variables de: espesor requerido, espesor medido, material y numero de inspecciones. Tomando el resto de las variables los siguientes valores:

- C_r : 0.025 mm/año
- Age_{TK} : 5 años
- Nivel de Confianza: Medium
- Factores de Ajuste (todos): 1
- El resto de las variables son constantes y se encuentran descriptas dentro de API RP 581 ed 2016 ad 2020.

Para el primer caso se evalúa el impacto del espesor requerido en función del espesor remanente:

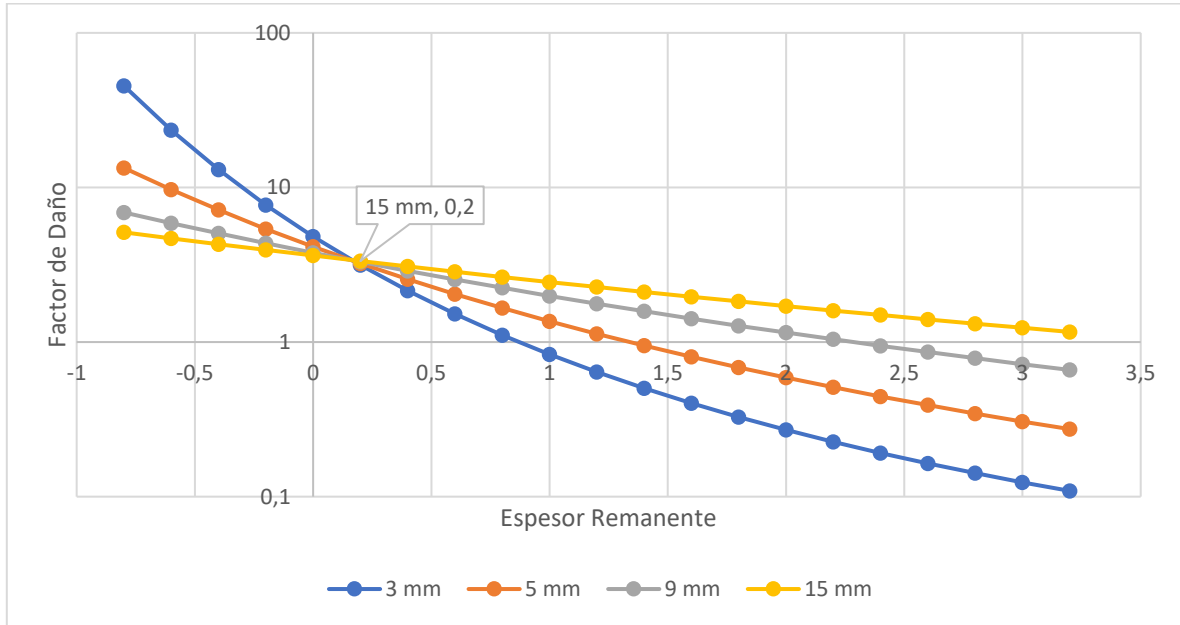


Gráfico 1. Factor de Daño en función del espesor remanente.

Se puede observar cómo dependiendo del espesor requerido el factor de daño difiere, siendo mayor para los espesores de mayor requerido con espesores remanentes altos y mayor para los requeridos bajos cuando los valores de espesor remanente son negativos. Esto se puede explicar debido a una dependencia del factor de daño con el espesor remanente porcentual y no absoluto, como se observa en el siguiente gráfico:

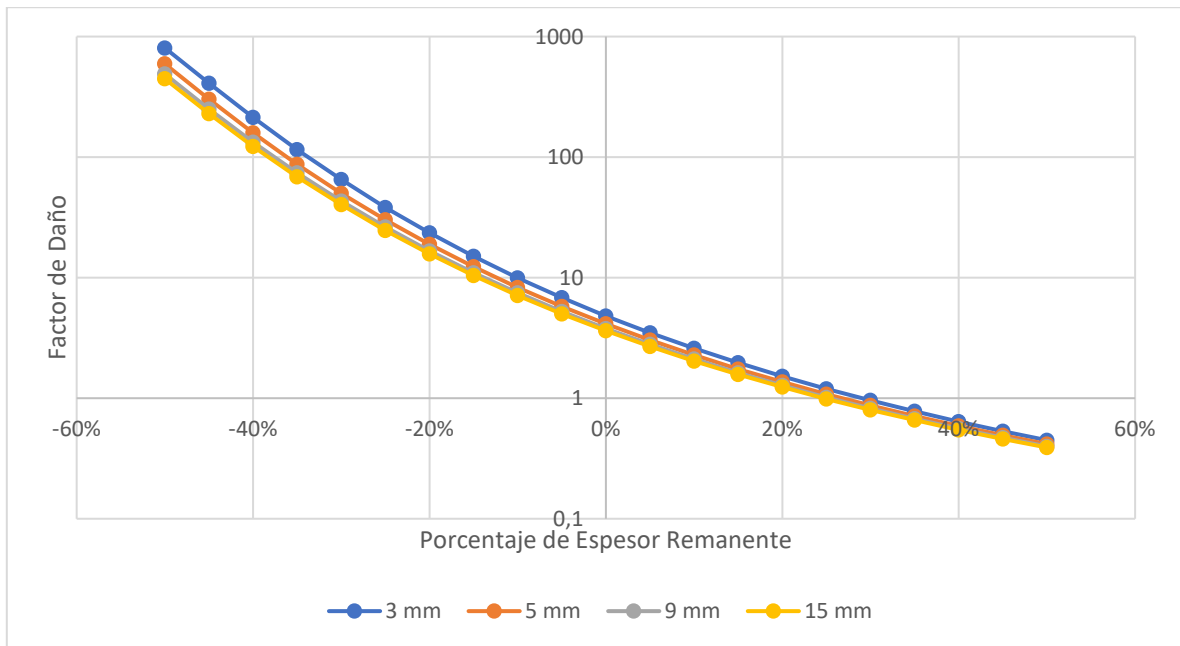


Gráfico 2. Factor de Daño en función del espesor remanente porcentual.

Vemos como las tendencias se unifican, pero no se solapan completamente. Aquí se evidencia una dependencia inversa del requerido con el factor de daño. A menores requeridos mayor es el factor de daño. Esto explica en parte porque para vidas remanentes bajas el factor de daño puede ser bajo. Ya que altos espesores requeridos poseen menores factores de daño debido a que estadísticamente los componentes de mayor espesor tienden a fallar menos. Es importante a la hora de evaluar los resultados de un análisis establecer cuál es el espesor remanente porcentual y no el absoluto. Otra observación que se puede realizar es que bajos espesores requeridos tienden a poseer mayor probabilidad de falla incluso a igual espesor porcentual remanente.

El siguiente parámetro de interés es el material y la tensión admisible seleccionada. Para este caso el espesor requerido es de 5mm.

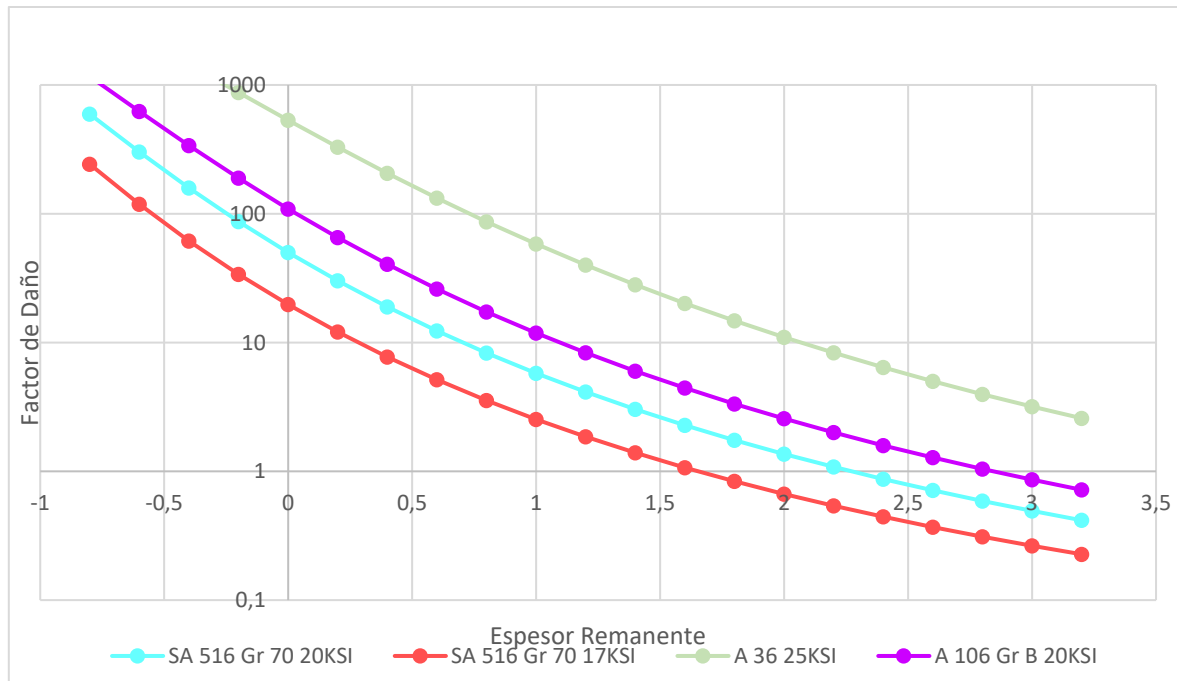


Gráfico 3. Factor de Daño en función del material seleccionado.

Se puede observar cómo materiales con mayores tensiones admisibles poseen mayores factores de daño. Esto se puede deber a que cuanto mayor es la tensión admisible más cerca se trabaja de la tensión de rotura, lo que implicaría una mayor probabilidad de falla. Aquí se puede llegar a explicar cómo equipos nuevos que poseen mayores tensiones admisibles tienden a tener mayores factores de daño. También como en función de la norma de diseño, los activos incluidos en cada una poseerán grupos distintos de riesgo.

La separación de las curvas no da una idea en términos relativos de la diferencia del impacto entre el espesor requerido y el material (y la tensión admisible) utilizado. Las curvas para el caso del espesor se encuentran mucho más cercanas que para el caso del material. Se hace más evidente si nos posamos en un valor del eje x y notamos que la diferencia es del 130% para un caso y del 2300% para el otro.

Resta evaluar el impacto del número de inspección y de la fecha desde la última inspección. Si tomamos el espesor requerido igual al espesor medido y evaluamos el impacto del número de inspecciones obtenemos:

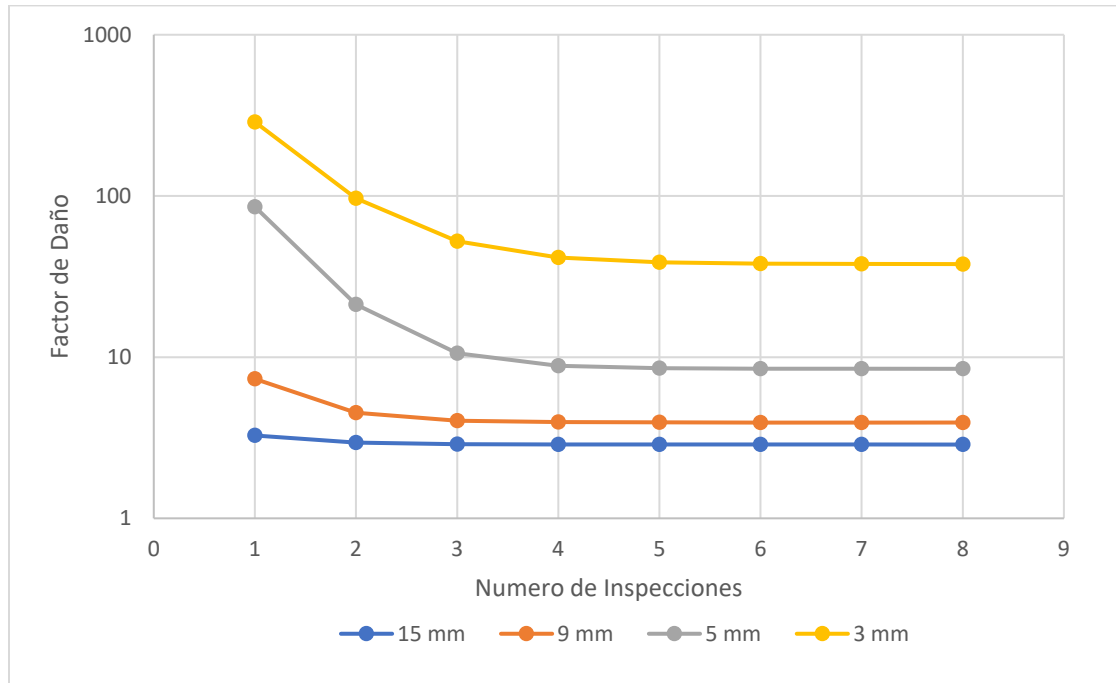


Gráfico 4. Factor de Daño en función del número de inspecciones.

Se vuelve a observar cómo los espesores requeridos más altos poseen factores de daño menores. El impacto de las primeras inspecciones es más relevante en menores espesores y a partir de cierto número la cantidad se hace irrelevante. Esto se explica debido a que el factor de daño intenta establecer una relación entre la probabilidad de falla y el nivel de confianza/incertidumbre por sobre su estado. A medida que el número de inspecciones se incrementa la confianza y comprensión sobre el estado real del equipo también lo hacen. Aquí vemos como a veces un equipo nuevo sin su primera inspección puede poseer factores de daño superiores a un equipo con muchos años en servicio.

Por último, como vimos la probabilidad es una función del tiempo. Es por ello que es necesario evaluar cómo se expresan los hallazgos a lo largo del tiempo:

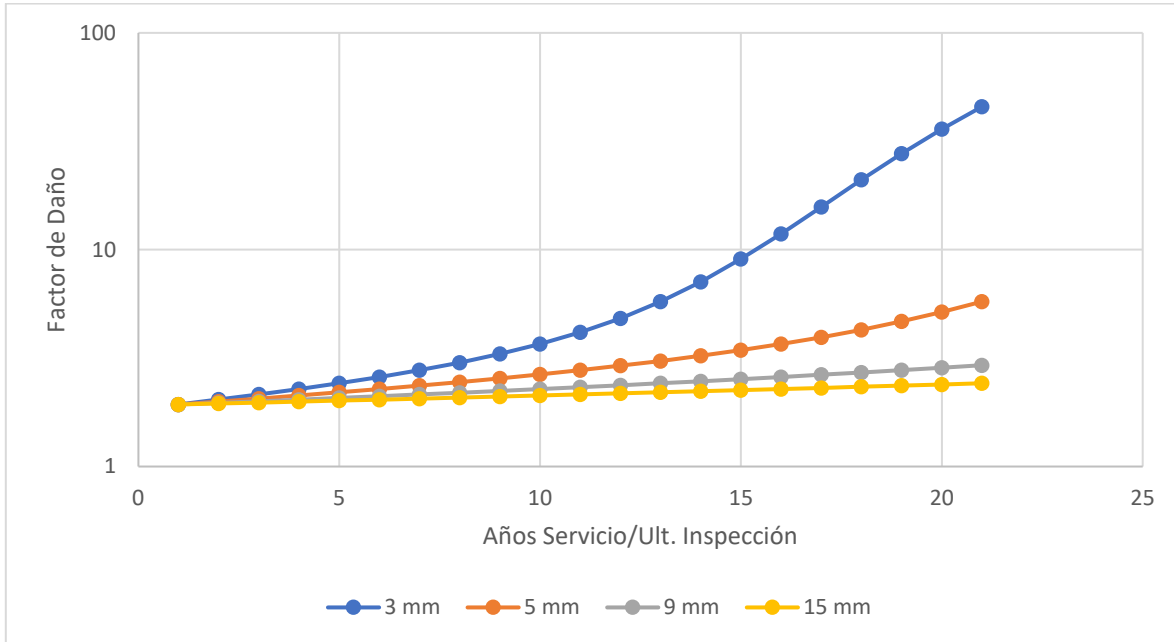


Gráfico 5. Factor de Daño en función del tiempo en servicio sin inspección (en función del esp. req.).

Se ve como los espesores requeridos más bajos son más sensibles al paso del tiempo. El incremento del factor de daño será superior en aquellos equipos que posean espesores de pared requeridos inferiores. Esto se puede explicar teniendo en cuenta que, para una misma velocidad de corrosión, la pérdida porcentual del espesor tendrá un mayor impacto en aquellos con menor requerido. Si la velocidad de corrosión se expresa como una fracción del espesor requerido se obtiene:

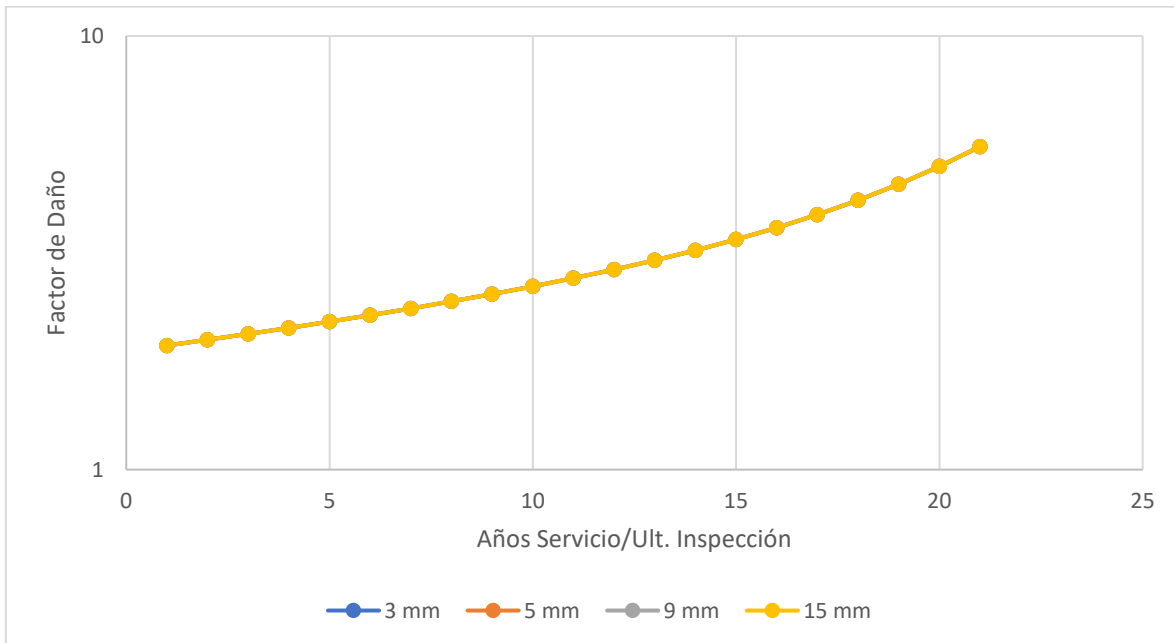


Gráfico 6. Factor de Daño en función del tiempo en servicio sin inspección (esp. rem/vel. corr constante)

Vemos como el comportamiento a lo largo del tiempo es idéntico para todos los espesores requeridos si la pérdida de espesor se estima como proporcional a cada uno.

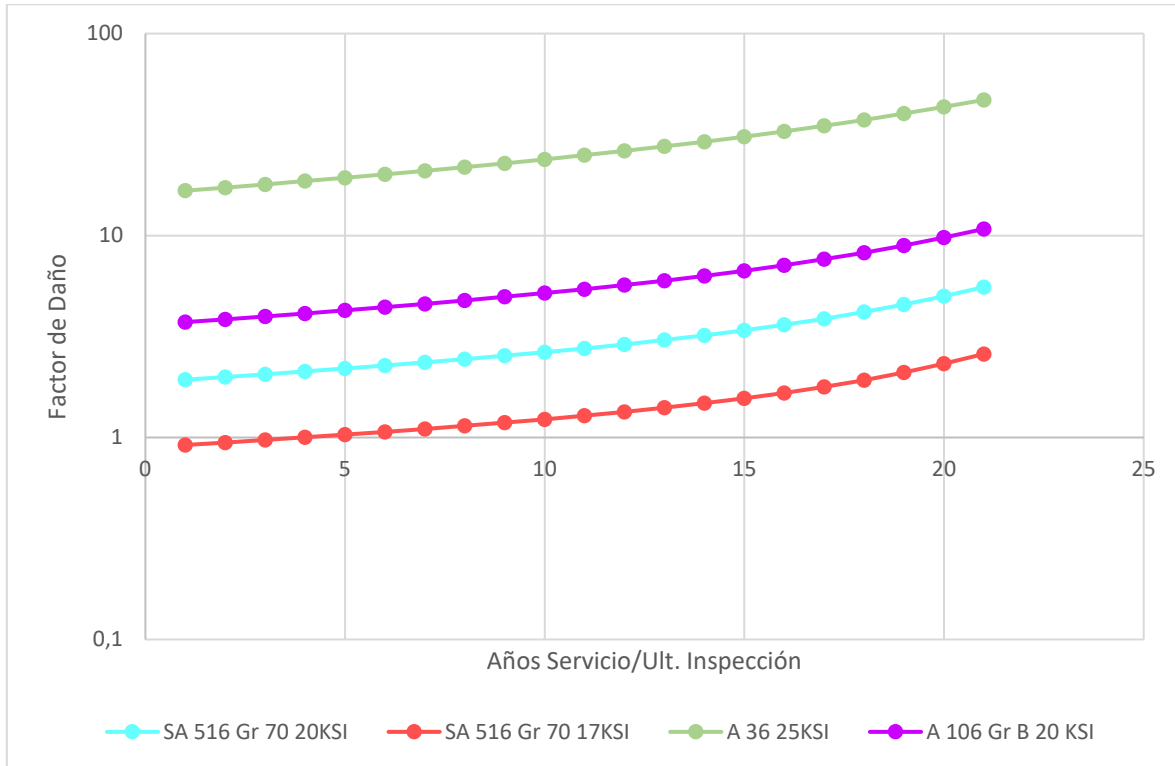


Gráfico 7. Factor de Daño en función del tiempo en servicio sin inspección (en función material)

En el caso de los materiales, la tendencia se mantiene a lo largo del tiempo y siendo siempre aquellos materiales con las tensiones admisibles más cercanas a la de rotura los que mayores factores de daño poseen.

Discusión de Resultados

Volvemos a las preguntas que inspiraron al trabajo:

- ¿Por qué un equipo con baja vida remanente tiene una probabilidad más baja que un equipo con mayor vida remanente/nuevo?

Se vio que espesores requeridos bajos resultan en mayores factores de daño porque, para una misma velocidad de corrosión, el impacto porcentual de la pérdida de espesor es mayor que para espesores requeridos más elevados. Para una misma velocidad de corrosión componentes esbeltos o con espesores bajos de diseño se vean más impactados por la velocidad de corrosión como se ve en el Gráfico 5. Algo parecido ocurre cuando se habla de pérdidas de espesor, los espesores requeridos más bajos poseen una mayor sensibilidad a las reducciones de espesores, dado que en términos porcentuales la tasa de cambio es mayor

Aunque donde mayores variaciones se observaron es en la diferencia de los resultados para los distintos materiales, dicha variable puede ser independizada del resto y aun así producir por si sola una variación superior al 1000%. Esto sirve para responder como en los tanques atmosféricos, donde los códigos de diseños establecen tensiones admisibles cercanas a la tensión de rotura los factores de daño son muchos más elevados, incluso en condiciones de elevadas vidas remanentes. La combinación o presencia de uno de estos factores es lo que genera que se observen factores de daño superiores en componentes con vidas remanentes elevadas.

- ¿Por qué si mi equipo tiene una vida remanente igual a 0 el nivel de riesgo no es elevado?

En los Gráficos 1 y 2 se observa que la dependencia del factor de daño con el espesor remanente es inversamente proporcional y guarda una relación exponencial, pero dicha relación es continua y no se dispara o no observa un cambio en la tendencia a medida que nos acercamos a un espesor remanente del 0% o de 0 mm. Se observa que la relación con el tiempo sin inspección o la ausencia de inspecciones es muchas veces más determinante que cuan cerca se está operando del espesor de retiro para el cálculo del riesgo. Esto se debe a que en RBI se prioriza la ausencia de inspecciones e información y en donde la información nos indica una deficiencia en la integridad del componente las acciones no deberían ser una inspección del equipo si no otras medidas correctivas.

- ¿Por qué un equipo recientemente instalado/reparado tiene una probabilidad mayor al estándar de la industria?

Como se respondió previamente el espesor requerido y el material utilizado pueden ser un factor importante cuando se observan desviaciones respecto a lo esperado. Adicionalmente, el análisis del número de inspecciones también nos ayuda a responder algunas de las dudas (Gráfico 4). Equipos recientemente instalados va a tener factores de daño superiores a su gemelo con más años en servicio. Esto también tiende a ser contra intuitivo, pero es parte del modelo basado en el nivel de incertidumbre.

Conclusiones

De acuerdo con los análisis de sensibilidad realizados, se puede concluir a modo de resumen, que cuando surgen de valores de riesgo que no conciden con los esperados la respuesta a se puede buscar en:

- El valor absoluto del espesor requerido utilizado.
- El material y el código de norma utilizado.
- El número de inspecciones realizadas en el equipo.

Todos estos factores ayudan a que durante los procesos de implementación se produzcan resultados que no responden a lo esperado y generan desconfianza en el modelo. En especial cuando las vidas remanentes son bajas y las probabilidades de falla no son elevadas, el modelo no resulta ser un reflejo de la evaluación de integridad, sino que es más un indicador del nivel de confianza de cada activo. El modelo busca priorizar aquellos componentes donde la ausencia de información sobre el estado es más crítica, como equipos con altas tasas de corrosión donde no se llevaron inspecciones.

También insta a agrupar los resultados por familias de equipo, ya que la variación entre los resultados para los distintos códigos de diseño puede ser elevada en algunos casos.

Los resultados sirven para enfatizar la necesidad que las evaluaciones sean realizadas por personal con conocimientos y competencias de RBI e Integridad, para lograr establecer prioridades de inspección más allá de los resultados de RBI, entendiendo que es solo una de las herramientas necesaria para poder establecer una planificación de los activos de una planta y que es necesario integrarla con los conocimientos del proceso, del historial de las instalaciones y con los resultados de las evaluaciones de integridad. Sobre todo, cuando se trabaja con equipos con vidas remanentes bajas. También la necesidad de interpretar los datos en función de la tipología de equipos, a pesar de los intentos de la metodología para ofrecer un resultado unificado para todas las instalaciones o componentes a través de la industria.

Bibliografía

API RP 581 Risk-based Inspection Methodology ed.2016 Ad 2020

CV

Julian Juanes Berro, Ingeniero Químico por la Universidad Nacional de Mar del Plata

Con 5 años de trayectoria en la industria del O&G desempeñándose como Ingeniero de integridad, realizó implementaciones de sistemas de gestión de integridad en instalaciones de Argentina y Perú. El área de especialidad es la inspección basada en riesgo y la evaluación de integridad de equipos estáticos.

Cargo actual en GIE GROUP: Analista de Integridad y Riesgo de activos no lineales

Marcos Nicolas Dasso, Ingeniero Mecánico por la Universidad Nacional de Mar del Plata

Con 15 años de trayectoria en la industria del O&G desempeñándose como Ingeniero de integridad, realizó implementaciones de sistemas de gestión de integridad en diversos puntos de Latinoamérica. El área de especialidad es la inspección basada en riesgo y la evaluación de integridad de equipos estáticos.

Cargo actual en GIE GROUP: Especialista en Integridad y Riesgo de activos no lineales