

# “CAMBIOS EN LA TERCERA (3RA) EDICIÓN DE LA PRACTICA RECOMENDADA -METODOLOGIA DE INSPECCIÓN BASADA EN RIESGO (RBI) API 581 (2016), RESPECTO A LA SEGUNDA (2DA) EDICIÓN (2008)”

Andrés Molina Villamil. (Author)

Consultor en gestión de integridad, corrosión y riesgos

Ing. Metalúrgico, MSc. & Esp. Gestión de integridad y corrosión,

Esp. En sistemas integrados de gestión QHSE,

API 570 Inspector Authorised Cert. No 67143, API 580 RBI Professional Cert. No 70912, NDT Level II

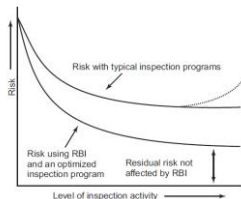
INTECORP Consulting and Engineering S.A.S

Bogotá D.C, Colombia

[andresmolina13@gmail.com](mailto:andresmolina13@gmail.com); [andres.molina@intecorpconsulting.com](mailto:andres.molina@intecorpconsulting.com)

Tel: 57 3105806072

**Abstract**— API 581 es una práctica recomendada que provee una guía metodológica para desarrollar un programa de inspección basado en riesgo en equipos estáticos y tuberías de proceso en la industria de petroquímica, el objetivo de este tipo de programas o análisis de RBI es reducir el riesgo basado en la inspección de los activos teniendo en cuenta que a mayor conocimiento del estado del activo menor será la probabilidad de falla (Ver gráfica 1).



Gráfica 1. Proyección del riesgo con RBI vs sin RBI. Fuente: API 580 (2016)

La evolución de API 581 inicia en 1993, el instituto americano de petróleo, inicia un proyecto de inspección basado en riesgo, patrocinado por la industria (Amoco; ARCO; Ashland; BP; Chevron; CITGO; Conoco; Dow Chemical; DNO Heather; DSM Services; Equistar Exxon; Fina; Koch; Marathon; Mobil; Petro-Canadá; Phillips; Saudi Aramco; Shell; Sun; Texaco; y UNOCAL), “como un método para el uso del riesgo para priorizar los esfuerzos de gestión de un programa de inspección. En una planta operativa, un gran porcentaje del riesgo relativamente alto, es asociado con un pequeño porcentaje de equipos. RBI permite manejar los recursos de mantenimiento e inspección para proveer un más alto nivel de cobertura en los ítems de más alto riesgo y un esfuerzo apropiado con los ítems de más bajo riesgo.”<sup>1</sup> La inspección basada en riesgo (RBI), se establece como metodología en la industria desde los años 90’s y con mucha acogida a partir del 2000 con la publicación del documento API 581 primera edición (Inspección basada en riesgo-BRD), como respuesta a las estrategias de mantenimiento con frecuencias establecidas que no eran las adecuadas para gestión de integridad por inspección de los activos físicos.

La práctica recomendada API 581, ha tenido dos actualizaciones: una en 2008, en donde se elimina el Apéndice A; que establecía la metodología de análisis cualitativo como herramienta de “screening” y sus módulos técnicos (con sus respectivos subfactores) de análisis semicuantitativo y cuantitativo, evolucionan a ser parte de la metodología cuantitativa de cálculo de la probabilidad por diferentes mecanismos de degradación. En abril de 2016 API publica su tercera versión de API 581, en donde se introduce el método de distribución

estadística de confiabilidad MVFOSM (Método de primer orden del momento segundo del valor medio) para eliminar las tablas genéricas que determinaban el factor de daño en unos mecanismos de daño específicos, a partir del factor “Art” simplificado volviendo a la ecuación establecida en la primera edición de este documento (2000), un valor de relación de esfuerzo ( $S_R$ ) e historial de inspecciones y su efectividad, teniendo en cuenta tres escenarios del estado del activo incluidos en esta nueva versión:

1. El daño no es peor de lo esperado
2. El daño es un poco peor de lo esperado.
3. El daño es considerablemente peor de lo esperado.

**Keywords**—RBI, Risk based inspection, inspección basada en riesgo, API 581, management, integrity, corrosion, gestión de activos..

## I. INTRODUCCIÓN.

Realizada una revisión normativa de API 581 y su evolución a partir de la primera edición publicada en 2000, segunda edición publicada en 2008 y la tercera edición publicada en abril de 2016, se presentan en este artículo en términos generales los cambios que la norma ha tenido a través del tiempo desde la segunda a la tercera edición. La metodología en su estructura general, no presenta modificaciones y sigue su proceso en tres partes:

- a) Parte 1: Metodología de planeación de la inspección
- b) Parte 2: Metodología de probabilidad de falla
- c) Parte 3: Metodología de consecuencia de falla

En la nueva edición (2016) de esta práctica recomendada los cambios que se establecieron, se concentran en el cálculo de probabilidad especialmente en los factores de daño de adelgazamiento (thinning), corrosión externa de componentes ferríticos y corrosión bajo aislamiento (CUI), los cuales se podrían resumir en los siguientes:

- La nueva versión elimina la restricción de usar la matriz genérica de 5X5 desbalanceada para mostrar los resultados del análisis de RBI, permitiendo usar matrices balanceadas y diagramas ISO
- Cambios en el concepto de riesgo objetivo “risk target” por varios objetivos o “targets” que al alcanzarse o superarse ameritan actividades de mitigación.
- Cambios en las categorías de probabilidad y consecuencia.

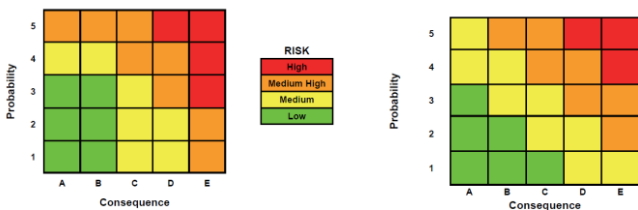
<sup>1</sup> API 581 (2000)-“Risk based inspection-Base Resource Document”

- Modificación de la metodología de cálculo del factor de daño con eliminación de las tablas genéricas de factor de daño (Df) y su limitación.
- Cambios en la ecuación de Art, para equipos sin “cladding” y diferentes a fondos de tanques atmosféricos (API650), que ya no usa directamente el espesor mínimo requerido, sino el espesor medido por inspección y elimina el sobre conservatismo en algunos aspectos de las ecuaciones de Art de la segunda edición de API 581 que afectaba el resultado final de Factor de daño (Df).
- Se introducen dos ecuaciones de cálculo de factor de relación de esfuerzos del material teniendo en cuenta el esfuerzo máximo de tensión (tensile Strength), el esfuerzo máximo de fluencia (yield strength), la velocidad de corrosión y la edad del activo.
- Se introduce el factor de esfuerzo (SR) respecto a la relación del espesor medido con el espesor mínimo y el espesor mínimo estructural.
- Según el estado de deterioro del sistema se establece, además, la confianza de la información de velocidades de corrosión en tres casos: alta confianza, media confianza, baja confianza.
- Se introduce la distribución estadística de confiabilidad para el cálculo del factor de daño MVFOSM (Método de primer orden del momento segundo del valor medio), que mide la variabilidad de la velocidad de corrosión en cada uno de los 3 escenarios presentados del estado del activo.
- Los 3 casos de estado de daño establecidos son COV de 0.050 para variables de presión, 0,020 para esfuerzos de flujo y 0.010 para adelgazamiento (thinning).
- El valor de factor de daño puede ser menor a 1, a diferencia de las tablas genéricas de API 581 segunda edición.
- Se incorpora el espesor mínimo requerido a la introducen un
- Cambios en la forma de incluir al factor de daño el número de inspecciones según su efectividad.
- El límite inferior de factor de daño pasa de ser 1 en la segunda versión de API 581 a 0.1 como valor mínimo en equipos de riesgo muy bajo en la tercera versión de API 581 (2016).
- El límite superior de factor de daño se eleva de 5000 a 6500 teniendo en cuenta que se eliminan las tablas, que limitaban el Art a 0.65 en la segunda edición.

## II. CAMBIOS EN LA TERCERA VERSIÓN API 581 (2016)

### Eliminación de Restricción de usar el matriz genérica desbalanceada.

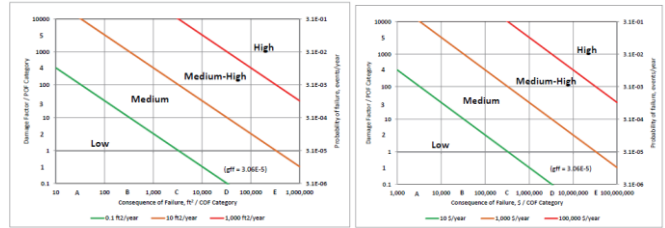
En el numeral 4.3.3.2, la tercera edición expone dos ejemplos de matrices: balanceada o desbalanceada. En la segunda edición (2008), se establecía únicamente la matriz desbalanceada en donde “las categorías de riesgo son asimétricas para indicar que la categoría de consecuencias recibe mayor ponderación” [2], determinación que debería ser establecida por la organización según sus necesidades y no preestablecida desde API 581.



a) Matriz desbalanceada b) matriz balanceada.

Grafica 2. Tipos de matriz RBI recomendadas.

Además, se presenta la opción al usuario el poder presentar los niveles de riesgo de los activos evaluados, según diagramas de líneas ISO basados en área de consecuencia o en consecuencia financiera:



a) Diagrama ISO b) matriz balanceada. Grafica 3. Diagramas ISO-plot remonedados API 581(3ra. Ed. 2016)

### Cambios en la concepción de riesgo objetivo “risk target” por varios objetivos o “targets”

En la segunda edición, se establecía que el riesgo objetivo dependía de del “riesgo aceptable” o en otras palabras de la tolerancia al riesgo definido para propósitos de planeación de inspección en términos de áreas de consecuencia o financieros únicamente. En la tercera edición (2016), los “targets” u objetivos limite establecidos, se definen como el máximo nivel aceptable para continuar en operación sin requerir acciones de mitigación [3]. A continuación, se presentan aquellos que podrían establecerse en un programa de RBI según esta edición:

- Riesgo objetivo (risk target)
- Probabilidad objetivo (PoF target)
- Factor de daño objetivo (DF target):
- Consecuencia objetivo (CoF target):
- Espesor objetivo (Thicknes target)
- Máximo intervalo objetivo de inspección (Máximum interval target)

### Cambios en las categorías de probabilidad y consecuencia.

La nueva edición de API 581, cambia las categorías de probabilidad y consecuencia, establecidas en las tablas 4.1, 4.1M, definiendo las categorías en términos de rango de probabilidad, rango de factor de daño (Df) y áreas de consecuencia, también se elimina la tabla 4.2 que establecía las categorías de consecuencia según términos financieros. A criterio del autor una buena decisión pues la tolerancia al riesgo en términos financieros varía de una organización a otra dependiendo su tamaño o capacidad financiera y tolerancia al riesgo. Además, se hacía difícil establecer y sustentar estas categorías genéricas en todas las organizaciones como lo establecía la segunda edición.

Probability Category (1)		Consequence Category (2)	
Category	Range	Category	Range (ft <sup>2</sup> )
1	$D_{f-total} \leq 2$	A	$CA \leq 100$
2	$2 < D_{f-total} \leq 20$	B	$100 < CA \leq 1000$
3	$20 < D_{f-total} \leq 100$	C	$1000 < CA \leq 3000$
4	$100 < D_{f-total} \leq 1000$	D	$3000 < CA \leq 10000$
5	$D_{f-total} > 1000$	E	$CA > 10000$

Tabla 1. Categorías de Pof y Cof, Tabla 4.1 de API 581 2da. Ed (2008)

Probability Category (1,2)		Consequence Category (3)	
Category	Probability Range	Damage Factor Range	Category
1	$P_f(t, I_E) \leq 3.06E-05$	$D_{f-total} \leq 1$	A
2	$3.06E-05 < P_f(t, I_E) \leq 3.06E-04$	$1 < D_{f-total} \leq 10$	B
3	$3.06E-04 < P_f(t, I_E) \leq 3.06E-03$	$10 < D_{f-total} \leq 100$	C
4	$3.06E-03 < P_f(t, I_E) \leq 3.06E-02$	$100 < D_{f-total} \leq 1,000$	D
5	$P_f(t, I_E) > 3.06E-02$	$D_{f-total} > 1,000$	E

Tabla 2. Categorías de Pof y Cof, Tabla 4.1 de API 581 3ra. Ed (2016),

De las nuevas categorías establecidas por API 581 (2016), se puede evidenciar que el factor de daño como límites mínimo, puede llegar a ser menor a 1 y no 2 como en la segunda edición, más adelante se explica en detalle el valor mínimo definido por la tercera edición.

**Modificación de la metodología de cálculo del factor de daño con eliminación de las tablas genéricas de factor de daño (Df) y su limitación.**

La tercera edición de esta práctica recomendada para RBI, establece un nuevo acercamiento a los cálculos del factor de daño para la probabilidad (POF) en los factores de daño de adelgazamiento (thinning), corrosión externa de componentes ferríticos y corrosión bajo aislamiento (CUI), que incluye de alguna manera un poco más de complejidad en los cálculos; pero que en términos de resultados son más precisos especialmente en las categorías de probabilidad de falla medio altos y altos.

El nuevo acercamiento involucra las ecuaciones establecidas por el modelo distribución estadística de confiabilidad MVFOSM (Método de primer orden del momento segundo del valor medio) para el cálculo del factor de daño y se eliminan las tablas genéricas (tabla 3) de factor de daño (Df) dependientes del factor de relación de la fracción de pérdida de espesor en cualquier punto en el tiempo de vida operacional del activo “Art”, que ha sido introducido desde la primera edición del año 2000 (Para fondos de tanques se mantiene la tabla de factores de daño).

A <sub>r</sub>	Inspection Effectiveness												
	E	1 Inspection				2 Inspections				3 Inspections			
		D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A
0.02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.04	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.06	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.08	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.10	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.12	6	5	3	2	1	4	2	1	1	3	1	1	1
0.14	20	17	10	6	1	13	6	1	1	10	3	1	1
0.16	90	70	50	20	3	50	20	4	1	40	10	1	1
0.18	250	200	130	70	7	170	70	10	1	130	35	3	1
0.20	400	300	210	110	15	290	120	20	1	260	60	5	1
0.25	520	450	290	150	20	350	170	30	2	240	80	6	1
0.30	650	550	400	200	30	400	200	40	4	320	110	9	2
0.35	750	650	550	300	40	600	300	60	10	540	150	20	5
0.40	900	800	700	400	50	700	400	120	30	600	200	50	10
0.45	1050	900	810	500	70	800	500	160	40	700	270	60	20
0.50	1200	1100	970	600	100	1000	600	200	60	900	360	80	40
0.55	1350	1200	1130	700	150	1100	750	300	100	1000	500	130	60
0.60	1500	1400	1250	850	200	1300	900	400	230	1200	620	250	210
0.65	1900	1700	1400	1000	300	1600	1100	670	530	1300	880	550	500

A <sub>r</sub>	Inspection Effectiveness												
	E	4 Inspections				5 Inspections				6 Inspections			
		D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A
0.02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.04	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.06	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.08	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.10	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.12	6	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
0.14	20	7	2	1	1	5	1	1	1	4	1	1	1
0.16	90	30	5	1	1	20	2	1	1	14	1	1	1
0.18	250	100	15	1	1	70	7	1	1	50	3	1	1
0.20	400	180	20	2	1	120	10	1	1	100	6	1	1
0.25	520	200	30	2	1	150	15	2	1	120	7	1	1
0.30	650	240	50	4	2	180	25	3	2	150	10	2	2
0.35	750	440	90	10	4	350	70	6	4	280	40	5	4
0.40	900	500	140	20	8	400	110	10	8	350	90	9	8
0.45	1050	600	200	30	15	500	160	20	15	400	130	20	15
0.50	1200	800	270	50	40	700	210	40	40	600	180	40	40
0.55	1350	900	350	100	90	800	260	90	90	700	240	90	90
0.60	1500	1000	450	220	210	900	360	210	210	800	300	210	210
0.65	1900	1200	700	530	500	1100	640	500	500	1000	600	500	500

Tabla 3. Factores de daño (Df) segunda edición api 581 (2008).

Teniendo en cuenta que al usar estados continuos como en la segunda edición de API 581, las variables propias de proceso o del material, podían afectar directamente la velocidad de corrosión (corrosión rate), API 581 en esta nueva edición, Establece el modelo de cálculo basado en MVFOSM que provee la desviación estándar y desviación media de funciones de estado limite. “En MVFOSM estos dos valores son utilizado para construir una medida de la fiabilidad. La medida se denomina índice de fiabilidad y sirve como un sustituto de la probabilidad de falla. Este índice de confiabilidad es preciso para las funciones de estado límite lineal, pero sufre de la denominada invariancia cuando la función de estado límite no es lineal. Esto es

porque si la función de estado límite es lineal, entonces su desviación media y estándar son exactamente calculados. Por el contrario, si la función de estado límite es no lineal, entonces se utilizan aproximaciones la función de primer orden.” [4]

Se sabe que MVFORM es menos preciso al estimar la POF a valores muy pequeños (alto índice de confiabilidad β), en comparación con otros métodos de estimación (por ejemplo, el Método de Fiabilidad de Primer Orden (FORM), Método de Confiabilidad de Segundo Orden (SORM), etc.), para ecuaciones de estados límite no lineales. MVFORM puede ser excesivamente conservador si las distribuciones de variables de entrada no son normalmente distribuidas. [5]

**Cambios en la ecuación de Art, para equipos sin cladding y diferentes a fondos de tanques atmosféricos (API650)**

El nuevo acercamiento al DF se calcula utilizando la teoría de la confiabilidad estructural con la distribución ya explicada. Asignando la cantidad de incertidumbre en la tasa de corrosión y que se determina por el número y la efectividad de las inspecciones y el monitoreo en línea que se ha realizado. El Df se actualiza basándose en el aumento de la confianza y en la velocidad de corrosión medida proporcionada por el uso del teorema de Bayes.

Para explicar mejor lo anterior, la tercera versión tiene cambios substanciales que se exponen a continuación:

- **Introducción de ecuación de factor de esfuerzo ultimo o “flow stress”**

Se introdujo el factor de esfuerzo ultimo o “flow stress” a la ecuación de Art, el cálculo se realiza por medio de la ecuación (1) de factor de relación de esfuerzos del material teniendo en cuenta el esfuerzo máximo de tensión (tensile Strength) y el esfuerzo máximo de fluencia (yield strength).

$$FS^{thin} = \frac{(YS + TS)}{2} \cdot E \cdot 1.1 \quad (Eq.1)$$

Se simplifico la ecuación para calcular el Art, teniendo en cuenta la edad del activo, relación del espesor medido con el espesor mínimo medido y la velocidad de corrosión base:

La Ecuación (2) de Art fue establecida para equipos con “cladding” o recubrimiento metálico u otro, diferentes a tanques de almacenamiento (ecuación que se mantiene para fondos de tanques de almacenamiento atmosféricos, API 581 2Ed. (2008):

$$A_r = \max \left[ \left( 1 - \frac{t_{rd} - C_{r,lm} \cdot age_{tk}}{t_{min} + CA} \right), 0.0 \right] \quad (Eq.2)$$

Nueva Ecuación (3) de Art equipos sin cladding diferentes a tanques de almacenamiento, API 581 3ra. (2016):

$$A_r = \frac{C_{r,lm} \cdot age_{tk}}{t_{rd}} \quad (Eq.3)$$

Además, para equipos con cladding también se modificó y establecieron 2 ecuaciones, se introdujo un condicional en cuanto a la relación de la vida remanente del cladding y el tiempo desde la última inspección del equipo o en servicio, para usar una u otra ecuación.  $Age_{tk} \leq Age_{rc}$  o  $Age_{tk} \geq Age_{rc}$ .

- *Se incorpora la relación de esfuerzo:*

Se incorporó el factor de esfuerzo (SR) a partir del esfuerzo máximo “Flow stress” (FS), con dos ecuaciones según espesor mínimo requerido (interno o externo), el espesor mínimo medido y los factores de diseño como factor de junta y SMYS, según los esfuerzos al que está sometido el activo ya sean esfuerzos internos y/o externos (Eq. 4) o cuando se evalúa solamente el esfuerzo interno (Eq. 5 o de código de diseño, relación usada por API 579 en los análisis de aptitud para el servicio-FFS):

$$SR_p^{thin} = \frac{S \cdot E}{FS^{thin}} \cdot \frac{Max(t_{min}, t_c)}{t_{rd}} \quad (Eq.4)$$

$$SR_p^{thin} = \frac{P \cdot D}{\alpha \cdot FS^{thin} \cdot t_{rd}} \quad (Eq.5)$$

- *Nueva metodología de inclusión del número de inspecciones según su efectividad al factor de daño.*

Una de las grandes ventajas es la nueva metodología del cálculo del DF que incluye la cantidad de inspecciones (N) y efectividad (A,B,C,D,E) sin la restricción de seleccionar una sola con una efectividad específica como lo establecía la segunda edición con el fin de seleccionar un valor de DF en la tabla 3, pues en la tercera edición el DF se calcula con ecuaciones establecidas según mezcla de estas inspecciones (N<sub>A</sub>, N<sub>B</sub>, N<sub>C</sub>, N<sub>D</sub>, N<sub>E</sub>).

- *Según el estado de deterioro del sistema, se establece, además, la confianza de la información de velocidades de corrosión en tres casos: alta confianza, media confianza, baja confianza.*

Los datos de velocidades de corrosión, que se introducen en la distribución para calcular el factor de daño DF, depende en la tercera edición de API 581 de la confianza de la fuente de los datos de velocidad de corrosión. Las siguientes son las categorías de confianza establecidas en esta edición:

**1) Fuentes de información de baja confianza para las tasas de corrosión** - Fuentes como datos publicados, tablas de tasas de corrosión y opinión de expertos. Aunque a menudo utilizado para las decisiones de diseño, la tasa de corrosión real que se observará en la situación del proceso puede diferir significativamente del valor de diseño.

**2) Fuentes de información de confianza mediana para las tasas de corrosión** - Fuentes como pruebas de laboratorio con condiciones de proceso simuladas o corrosión in-situ limitada, pruebas de cupones. datos de la tasa de corrosión desarrollados a partir de fuentes que simulan las condiciones del proceso suelen proporcionar un mayor nivel de confianza en las velocidades de corrosión.

**3) Fuentes de información de alta confianza para las tasas de corrosión** - Fuentes como Amplios datos de campo de inspecciones minuciosas. los datos de cupones, que reflejan cinco o más Años de experiencia con el equipo de proceso (suponiendo que no ha ocurrido cambios en el proceso) proporcionan un alto nivel de confianza en las velocidades de corrosión. Si se dispone de suficientes datos de la experiencia real del proceso, entonces es muy probable que la corrosión esté cerca del valor esperado bajo condiciones.

- *Se introdujo la distribución estadística de confiabilidad para el cálculo del factor de daño MVFOSM (Método de primer orden del segundo momento del valor medio).*

Uno de los cambios más sobresalientes de la tercera edición, es la introducción del método estadístico de confiabilidad MVFOSM, Esta

distribución de confiabilidad mide la variabilidad de la velocidad de corrosión en cada uno de los 3 escenarios del estado del activo que se incluyeron en esta nueva edición de API 581. Estos tres estados son escenarios que multiplican a la velocidad de corrosión (Corrosion rate) por 1x, 2x o 4x:

**Estado de Daño 1:** El daño no es peor de lo esperado, se aplica un factor de 1 la tasa de corrosión esperada

**Estado de Daño 2:** El daño no es peor de lo esperado, se aplica un factor de 2 la tasa de corrosión esperada

**Daño Estado 3:** Daño no es peor de lo esperado, un factor de 4 se aplica a la tasa de corrosión esperada.

- *Se asignaron para tres medidas clave el coeficiente de variaciones, COV, que afectan POF:*

**Coefficiente de varianza para el espesor t** COV<sub>Δt</sub>: 0.200; Incertidumbre en la inspección precisión de la medición

**Coefficiente de varianza para la tensión de flujo, S f** COV<sub>P</sub>: 0.200; Incertidumbre de la TS real y YS propiedades de los equipos materiales de construcción

**Coefficiente de varianza para la presión, P** COV<sub>Sf</sub>: 0.050; La incertidumbre es la exactitud de Mediciones de presión.

Los índices de confiabilidad β<sub>1</sub>(índice para el estado 1), β<sub>2</sub> (índice para el estado 2), β<sub>3</sub>(índice para el estado 3), se calculan de acuerdo la ecuación (7) de MVFOSM adecuada para RBI de API 581:

Ecuación original MVFOSM:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 - 2\rho_{RS}\sigma_R\sigma_S + \sigma_S^2}} \quad (Eq. 6)$$

Ecuación MVFOSM adecuada para RBI de API 581:

$$\beta_1^{thin} = \frac{1 - D_S \cdot A_T - SR_p^{thin}}{\sqrt{D_S^2 \cdot A_T^2 \cdot COV_{\Delta t}^2 + (1 - D_S \cdot A_T)^2 \cdot COV_{Sf}^2 + (SR_p^{thin})^2 \cdot COV_P^2}} \quad (Eq.7)$$

Para calcular el DF se establece la siguiente ecuación en donde se involucran la probabilidad posterior de cada uno de los tres estados de daño y los índices de confiabilidad del respectivo escenario para los tres factores de daño, donde Φ es la distribución normal acumulativa:

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

$$D_{f}^{exc} = \left[ \frac{(PO_{p1}^{exc} \Phi(-\beta_1^{exc})) + (PO_{p2}^{exc} \Phi(-\beta_2^{exc})) + (PO_{p3}^{exc} \Phi(-\beta_3^{exc}))}{1.56E-04} \right] \quad (Eq.8)$$

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

- *El límite inferior de factor de daño pasa a ser 1 en la segunda versión de API 581 a 0.1 como valor mínimo en equipos de riesgo muy bajo en la tercera versión de API 581 (2016).*

En la segunda edición se establecía 1.0 como valor mínimo del DF base (thinning), y que en ese caso no debía aplicarse el factor de gerenciamiento, debido a que valores inferiores a este generarían una relación donde la probabilidad de falla sería menor a la tasa de falla genérica [POF ≤ Gff], en la tercera versión de API 581 el valor mínimo de DF se limita a 0.1 o el DF base (Eq. 9):

$$D_f^{thin} = \max \left[ \left( \frac{D_{FB}^{thin} \cdot F_{IP} \cdot F_{DL} \cdot F_{WD} \cdot F_{AM} \cdot F_{SM}}{F_{OM}} \right), 0.1 \right] \quad (\text{Eq.9})$$

- **El límite superior de factor de daño se eleva.**

El límite superior máximo que se puede obtener de este nuevo acercamiento al DF, se puede realizar asumiendo que POF sea 1 o 100% y remplazando en la ecuación (9),

$$Dfb = \left( \frac{1.0}{1.56 E-04} \right) = 6410$$

Se puede observar un gran aumento en el factor de daño DF respecto a lo establecido en la tabla 3 de este documento (tabla de Art de API 581 2da Ed.), en donde se puede evidenciar que la tabla tenía una restricción incomprensible a máximo valor de Art de 0.65 con un máximo valor de DF de 1900 y que se debía extrapolar hasta 1.0 donde su máximo valor era de 5000. Lo cual evidencia un incremento de casi 30% en este valor y que beneficia en la aproximación al DF en que existe una mayor exactitud y discriminación en los niveles de riesgo medio-alto y alto que permite tomar mejores decisiones de inspección o mitigación en estos niveles.

### III. COSAS QUE SE MANTIENEN EN LA TERCERA EDICIÓN API 581 (2016).

La metodología para calcular el riesgo en un programa de RBI en equipos PRD (pressure relieve devices), de haz de tuberías de intercambiadores de Calor y tanques de almacenamiento se mantienen de la misma manera que en la segunda edición. Para los haz de tubería o “bundle” de intercambiadores de Calor y PRD se sigue contemplando la distribución Weibull para calcular los factores  $\beta$  (parámetro de forma de distribución weibull) y  $\eta$  (parámetro vida de característica de weibull en años) y la probabilidad de falla según la ecuación (10) de Weibull.

$$P_f(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (\text{Eq.10})$$

Para los demás factores de daño diferentes a los tratados en la parte II de este documento, la metodología de cálculo de probabilidad se mantiene igual que en la segunda edición sin cambios aparentes, pero adaptándose a los nuevos valores de las categorías de probabilidad y consecuencia de la tabla 2.

La parte 3 de API 581 que refiere a la metodología de consecuencias de falla nivel 1 y nivel 2 se mantienen en la misma metodología de API 581 2da. edición respecto a consecuencias de área y consecuencias económicas (Consecuencias flamable, toxicas, no flamable y financieras) que son usadas para finalmente calcular el riesgo del activo (Eq 11 y 12)

$$R(t) = P_f(t) \cdot CA \quad (\text{Eq.11})$$

$$R(t) = P_f(t) \cdot FC \quad (\text{Eq.12})$$

Se deja en claro en la nueva edición que el escenario de BLEVE (boiling liquid expansion vapor explosión) no se tiene en cuenta en los resultados de Nivel 1 únicamente para los cálculos de consecuencia nivel 2, pues en la segunda edición existía ambigüedad en varias partes del documento.

### IV. CONCLUSIONES.

- Los cambios más relevantes en la tercera edición de API 581 se encuentran centrados en los cálculos de probabilidad específicamente en los factores de daño (DF) de adelgazamiento (thinning), corrosión externa de componentes ferríticos y corrosión bajo aislamiento (CUI).
- Se incluyó un nuevo acercamiento en cálculo de factor de daño (DF) incluyendo distribución estadística confiabilidad MSFOSM (Método de primer orden del momento segundo del valor medio), eliminando las tablas de factor de daño relacionada al Art, al que incluye el factor de esfuerzo ultimo o “flow stress” y se permite mezclar la cantidad de inspecciones y sus categorías de efectividad sin estricciones de seleccionar una sola.
- Se incluyen 3 estados de daño y tres categorías de confiabilidad de los datos de velocidad de corrosión para calcular el factor de daño definidos.
- Las categorías de probabilidad y consecuencia cambian y se incluyen valores de factor de daño menores a 1, se incluye como recomendación para presentar los resultados de riesgo las matrices balanceadas, desbalanceadas y los diagramas “ISO-plot”.
- El nuevo acercamiento metodológico por MVFOSM permite tener un “screening” o discriminación mucho más evidente en los ítems de riesgo medio alto y alto, pero no es muy preciso en los ítems de riesgo bajo.
- No se evidenciaron cambios en la metodología de cálculo de riesgo de PRD, haz de tuberías de intercambiadores de calor o tanques de almacenamiento. Además, no se evidenciaron cambios en metodología de cálculo de probabilidad de factores de daño diferentes a adelgazamiento (thinning), corrosión externa de componentes ferríticos y corrosión bajo aislamiento (CUI) Tampoco en la metodología de cálculos de consecuencia nivel 1 y 2.

### V. REFERENCIAS.

- [1] API Recommended Practice 581 1<sup>st</sup>. Ed., Risk-based Inspection Base resource Document, Washington, D.C, 2000.
- [2] API Recommended Practice 581 2<sup>nd</sup> Ed., Risk-based Inspection Methodology, Washington, D.C, 2008.
- [3] API Recommended Practice 581 3<sup>rd</sup>. Ed., Risk-based Inspection Methodology, Washington, D.C, 2016
- [4] Professor Terje Haukaas, Mean-value First-order Secondmoment Method (MVFOSM), University of British Columbia, Vancouver [www.inrisk.ubc.ca](http://www.inrisk.ubc.ca), February 22, 2014.
- [5] Kaley, L.C., Trinity Bridge, API 581 Risk-Based Inspection Methodology – Kaley, L.C., Trinity Bridge, API 581 Risk-Based Inspection Methodology – Basis for Thinning Probability of Failure Calculations, September 2013.
- [6] Kaley, L.C., Trinity Bridge, API 581 Risk-Based Inspection Methodology – Basis for Thinning Probability of Failure Calculations, September 2013.
- [7] Kaley, L.C., Trinity Bridge, API 581 Risk-Based Inspection Methodology – Kaley, L.C., Trinity Bridge, API 581 Risk-Based Inspection Methodology – Demonstrating the technology through a worked example problem, 2011.
- [8] Base Resource Document on Risk-Based Inspection for API Committee on Refinery Equipment, Det Norske Veritas (USA), Inc., January 1998 (API 581 Base Resource Document – Draft Report).