

Inspección Basada en Riesgo aplicada al mantenimiento eficaz de Instalaciones Industriales

Héctor Medina¹; Vicenç Espejo²; Miguel Muñoz³.

NOVOTEC CONSULTORES, SA, Grupo APPLUS+, División Energy & Industry, Departamento de Prevención de Accidentes Graves y Seguridad de Procesos. Campus UAB – Ronda de la Font del Carme, s/n, 08193. Bellaterra – Barcelona (España).

[1 hector.medina@applus.com](mailto:hector.medina@applus.com)

Técnico - Doctor en Ingeniería de Procesos Químicos, UPC.

² Jefe de Departamento

³ Director técnico - Doctor en Ingeniería de Procesos Químicos, UPC.

Abstract

La metodología inspección basada en riesgo IBR (*Risk-Based Inspection - RBI*) representa un cambio en la forma en la que las empresas gestionan sus planes de mantenimiento e inspección, ya que les permite tomar decisiones de forma sistemática y con sólido fundamento técnico basado en aquellos aspectos que repercuten directamente en el riesgo. La misma nace como una iniciativa del sector industrial para el establecimiento de planes de inspección más eficientes y simultáneamente, evitar las interrupciones no programadas, aumentar el tiempo de producción y reducir el riesgo. De esta manera, las acciones se reflejan en una reducción de costes ya que se priorizan y gestionan los esfuerzos en los planes de mantenimiento de los equipos de la instalación, así como de las paradas de planta

Aunque la metodología es de amplio uso en el mercado anglosajón y Middle East, la aprobación en Europa de la norma UNE-EN 16991:2018 hace prever una mayor aceptación y aplicabilidad en el marco europeo en un futuro cercano. El objetivo de la presente ponencia es demostrar la efectividad de la metodología tomando como referencia la citada norma UNE, que apoya su implementación de forma sistemática y eficiente para mejorar el desempeño de las industrias en materia de seguridad, salud y medio ambiente. Se presenta también un caso práctico, tomado como ejemplo una instalación industrial, sus equipos, sustancias, condiciones de proceso y su plan de inspección actual. En el ejemplo se parte de la validación de datos para la segmentación en nodos, la identificación de los mecanismos de degradación en cada uno de ellos para posteriormente evaluar el riesgo; de esa manera se identificaron los elementos críticos.

Palabras clave: IBR, RBI, Inspección, riesgo, mantenimiento, API580, UNE-EN 16991:2018.

1 INTRODUCCIÓN

La *Inspección Basada en Riesgo (IBR)* tiene un gran auge de aplicación en industrias que manipulan sustancias peligrosas, como la petroquímica y de procesos, con el fin de encontrar un equilibrio entre el cumplimiento de los cierres de actividad para realizar inspecciones obligatorias programadas y su deseo de minimizar las interrupciones de la producción, lo cual repercute en una disminución de costes ya que se priorizan y gestionan los esfuerzos en los programas de inspección.

Para ello, la metodología IBR dispone de medios para gestionar el riesgo en los equipos de una instalación, tomando en cuenta las categorías de afectación a la seguridad, a la salud y al ambiente. La misma también permite identificar equipos que no requieren de una inspección tan rigurosa o cualquier otra forma de mitigación debido a que el riesgo asociado al mismo es aceptable (API 580, 2009) (API 581, 2016).

Es sabido que, en muchas plantas químicas el riesgo se encuentra concentrado en un pequeño porcentaje de los equipos existentes. Estos equipos y sus componentes que poseen un riesgo alto requieren de una atención importante, esto se logra mediante la implementación de un plan de inspección adecuado enfocado al aprovechamiento y optimización de los recursos de la empresa.

El problema es, en muchos casos, gestionar los peligros para cada uno de los componentes de la instalación (equipos, líneas, secciones, componentes), tal y como se hace habitualmente en los estudios ACR. Esto se justifica porque se incorporan factores que consideran la degradación y aspectos de la inspección que modifican la frecuencia genérica de distinta manera. Se sabe que las condiciones de operación, las composiciones de las corrientes y flujos cambian a lo largo de la planta.

El reto consiste precisamente en gestionar la información proporcionada y los datos de forma sistemática para estimar el riesgo y así definir posteriormente, planes de inspección y mantenimiento óptimos en las empresas.

2 MARCO LEGAL Y NORMATIVA

Desde el año 1991, la American Society of Mechanical Engineers (ASME) publicó una serie de documentos técnicos en el marco de Inspección basada en Riesgo el cual explica como la metodología puede optimizar las estrategias de inspección.

Posteriormente, la American Petroleum Institute (API) ha publicado una serie de estándares, la Guía Recomendada 580 - Risk-Based Inspection y la Guía Recomendada 581 - Risk-Based Inspection (RBI) Methodology para industrias del sector refinería, plantas petroquímicas, químicas y de gas. Para muchas aplicaciones en la ingeniería, estos últimos documentos han servido como marco referencial en el tema.

En el marco europeo, la pre- norma europea CWA 15740:2008 corresponde a Procedimientos de Inspección y Mantenimiento basados en el Riesgo para la

industria europea (RIMAP) (Risk-Based Inspection and Maintenance Procedures) (Soo Song et al, 2021).

En 2018 se publica la UNE-16991, Marco de la Inspección Basada en el Riesgo, el cual proporciona una guía eficaz para la optimización de las operaciones y el mantenimiento, así como la gestión de la integridad de los activos. También ayuda a mejorar la gestión de riesgos y, por tanto, la seguridad de las plantas y su funcionamiento.

3 METODOLOGÍA

3.1 Iniciativas

Los enfoques sobre la inspección y mantenimiento en la industria han avanzado desde sus inicios en la década de 1990, desde un punto de vista más prescriptivos hasta uno más detallado que está basado en el riesgo. Su implementación ha ido en aumento debido a los excelentes resultados que ha brindado al sector industrial para la implementación de los planes de inspección y con el desarrollo de herramientas de cálculo para gestionar la información de forma eficiente.

3.2 Objetivos de la metodología

Los objetivos de la evaluación de la IBR incluyen (ABS, 2003):

- Tener la capacidad de definir y valorar el riesgo, creando una herramienta poderosa para gestionar los demás elementos en las plantas de procesos, en este caso las inspecciones y el mantenimiento.
- Prioriza ciertas zonas o equipos basados en consideraciones de riesgo, lo cual permite optimizar los recursos de la empresa.
- Permite una planificación óptima para minimizar las interrupciones de las operaciones, por ejemplo, paradas de plantas.
- Optimiza los recursos destinados para la inspección: personal, tiempo y costes.
- Permite seleccionar un método, intervalo y tipo de inspección adecuado para cada equipo.
- Mejora las condiciones de seguridad de la empresa, por tanto, el bienestar de sus empleados, la comunidad y la imagen de la misma.

3.3 Etapas de la evaluación

Para llevar a cabo la evaluación se deben cumplir las siguientes etapas (UNE 16991, 2018):

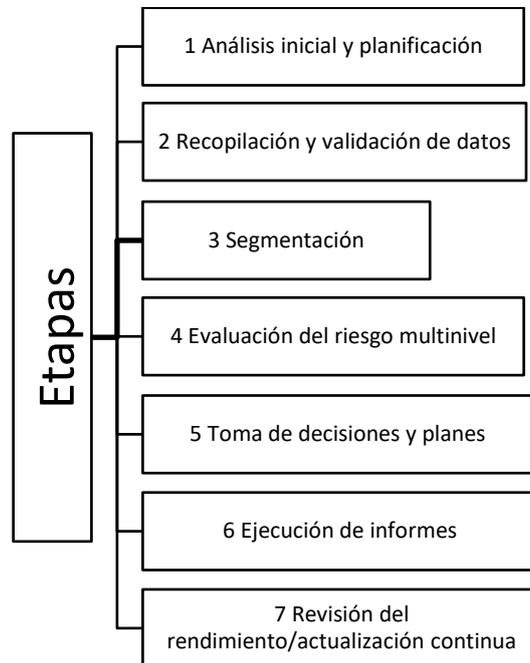


Figura 1. Etapas del proceso de Evaluación IBR

A continuación, se explican brevemente cada uno de las etapas:

3.3.1 Análisis inicial y planificación

Es una etapa importante en el proceso y para ello se deben definir:

- Los objetivos de la evaluación: para de esta manera trazar metas tangibles, ya sea por temas de salud, ambiente y seguridad en la empresa, optimización de personal, tiempo, recursos, costes, cumplir con la legislación, mejorar las condiciones de los trabajadores y de fiabilidad de la planta o extender la vida útil de servicio de la planta.
- Definir el alcance del análisis: incluyendo las condiciones de operación, cargas y situaciones excepcionales (arranque/parada, perturbaciones).
- Definir las fuentes de información disponibles: como datos de diseño/funcionamiento, datos históricos de mantenimiento e inspección, mecanismos de degradación.
- Regulaciones a considerar: incluye la calificación de los miembros del equipo que hará la evaluación y del coordinador IBR así como de las herramientas a utilizar. Dichas herramientas se usan para gestionar la gran cantidad de datos de entrada, correspondiente a cada nodo, sus condiciones de operación y diseño, los mecanismos de degradación, el procesamiento de dichos datos y los resultados. Normalmente se emplea software especializado y actualizado según los marcos de referencia.

- Aceptación de la metodología por parte de la dirección de la planta para que se pueda establecer el compromiso y recursos para su implementación.

3.3.2 Recopilación y validación de datos

Es una etapa importante desde el punto de vista técnico, ya que a partir de dicha información se valida el riesgo obtenido de la probabilidad y consecuencias de fallo. El equipo de IBR debe especificar los requisitos de los datos para planificar la evaluación y luego gestionarlos en bases de datos.

La información mínima necesaria que se debe aportar incluye:

- Datos de la planta, diagramas de flujo de proceso (PFD), diagramas de tubería e instrumentación (P&ID).
- Datos de diseño, fabricación y construcción disponibles
- Datos operativos: fluidos, fases, condiciones
- Datos de funcionamiento, histórico de arranques/paradas
- Registros y procedimientos de mantenimiento e inspección de cada uno de los componentes o equipos, puede incluir análisis de fallos.
- Sistemas de seguridad existentes (ej. Detección incendios, alarmas, sistemas de alivio de presión, etc.)

3.3.3 Segmentación de la instalación

Definir sistemas, subsistemas, secciones, nodos o bucles y los equipos a considerar (equipos, tanques, líneas, válvulas, etc.): se definen límites físicos o funcionales que permite evaluar problemas específicos tomando en cuenta:

- Fluidos
- Materiales de los equipos
- Condiciones de procesos
- Funciones de proceso
- Mecanismos de degradación de los equipos
- Tasas de corrosión
- Inventario

3.3.4 Análisis de riesgo multinivel para cada sección

Se evalúa el riesgo tomando en cuenta:

- La identificación de peligros
- La identificación de la degradación de los equipos y modos de fallo
- La determinación de la consecuencia de fallo
- La determinación de la probabilidad de fallo
- Determinación del riesgo y la clasificación del equipo (ej. en mapas de riesgo)

3.3.5 Toma de decisiones y planes

Con la información obtenida previamente y los resultados de la IBR se puede:

- Identificar los elementos que presentan un riesgo mayor que el aceptado
- Seleccionar y priorizar zonas de inspección
- Definir acciones para los diferentes mecanismos de degradación
- Planificar próximos intervalos de inspección y mantenimiento
- Establecer el método de inspección más adecuado

- Estimar costes
- Tomar acciones correctivas planificadas

3.3.6 Ejecución de informes

Normalmente deben incluir en forma general las siguientes actividades:

- Selección de trabajos basados en riesgos
- Ejecución de trabajos
- Herramientas y bases de datos
- Informe y documentación de trabajo
- Análisis

3.3.7 Revisión del rendimiento/actualización continua

Se mide el rendimiento de la evaluación mediante indicadores que deben contemplar los principales objetivos para la planta, la empresa o el propietario.

4 POTENCIALIDAD Y PLAN DE ACCIÓN PARA LA APLICACIÓN AL SECTOR INDUSTRIAL

La metodología basada en riesgo ha cambiado la forma en la que las empresas gestionan sus planes de mantenimiento e inspección, ya que les permite tomar decisiones de forma sistemática basada en aquellos aspectos, variables y condiciones que repercuten en el riesgo en lugar de aquellos que simplemente se consideran importantes en la instalación.

Otro aspecto a mencionar es que resulta una alternativa más rentable que los planes tradicionales de inspección, generalmente emplean pruebas no destructivas y que aseguran que los equipos existentes sean confiables durante su ciclo de vida. Con este tipo de estudio, se considera la degradación del material y su influencia en las operaciones, al final todo ello se traduce en una recuperación de la inversión, ya que se optimizan los recursos invertidos.

El desarrollo de la metodología Inspección basada en Riesgo tiene cada vez más demanda en el sector industrial, en parte debido al establecimiento de estándares reconocidos, al desarrollo de herramientas potentes y al éxito de los resultados en las empresas en las cuales se ha aplicado.

Se requieren de los siguientes requisitos para su implementación:

4.1 Requisitos de personal

Para la aplicación de la metodología se requiere de un personal altamente calificado y con experiencia en áreas de:

- Análisis de riesgos,
- Seguridad industrial,
- Inspección y mantenimiento,
- Procesos industriales,
- Instrumentación y control de procesos
- Manejo de bases de datos y procesamiento de información
- Comunicación y liderazgo

Tal y como ocurre en otros estudios, se requiere de un líder de equipo que coordine las actividades a desarrollar en la metodología de forma sistemática.

4.2 Requisitos técnicos

Una parte crucial de la evaluación es la gestión de la información, sobre todo por la cantidad de datos que se manejan en las instalaciones. Inevitablemente para el desarrollo de la metodología de IBR es obligatorio el uso de software de referencia internacional. Conviene evitar el uso de sistemas ad-oc de hojas de cálculo ya que no son sistemáticas en el manejo de la información, por lo menos cuando se hace un estudio integral de varias planta o instalaciones.

El software que se emplea debe permitir gestionar los datos de una forma secuencial, ordenada y sencilla, con criterios basados en el marco de referencia vigente y que se cumpla con los requisitos legales locales. La herramienta debe conducir al usuario por las etapas de la evaluación, a la vez que almacena, calcula, representa gráficamente y reporta resultados. También se debe asegurar que se pueda cumplir con el alcance y los objetivos dados para la evaluación.

Un ejemplo que ilustra las potencialidades de la metodología se presenta a continuación (Elaya, P, 2014).

5 CASO DE ESTUDIO

El presente caso de estudio tiene como objetivo mostrar las etapas de la metodología IBR aplicado un sistema que consiste en el almacenamiento y flujo de crudo a través de un sistema de tubería. En la Figura 2 se presenta un diagrama del proceso.

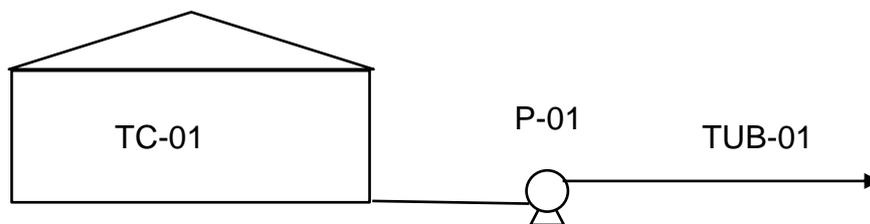


Figura 2. Diagrama del proceso

5.1.1 El análisis inicial y planificación:

La evaluación se plantea con el fin de optimizar los recursos, se desea establecer prioridades en los equipos y sus componentes para enfocar los esfuerzos en aquellos que tengan mayor riesgo, tomando en cuenta las condiciones de la instalación, las sustancias y los materiales empleados.

5.1.2 Recopilación de datos:

Se especifican los datos de la planta, condiciones de operación, diagramas de flujo, datos de diseño aportados por fabricantes de los equipos. Históricos de mantenimientos e inspecciones y sistemas de seguridad existentes.

Tabla 1. Datos aportados para el estudio

Tubería y bomba	Tanque
Acero al carbono	3000 m ³
Fuerza de fluencia = 2500 bar	D= 19 m
Resistencia a la tensión = 4000 bar	H= 12 m
Diámetro nominal = 600 mm (24")	Vertical - Acero
ε=13 mm	Fuerza de fluencia = 8000 bar
tasa corrosión = 0,1 mm/año	Resistencia a la tensión = 8000 bar
P = 5 MPa	Chapa: ε=5 mm
Tolerancia a la corr. = 2 mm	Fondo: ε =8 mm
No monitoreo online	Techo: ε=5 mm
T= 25 °C, P = 45 bar	

5.1.3 Segmentación de las instalaciones

Se definen las secciones aislables de la instalación en función del equipo, del material de construcción y del mecanismo de degradación.

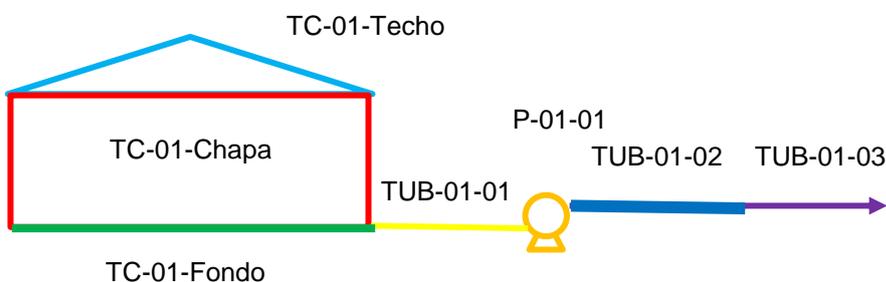


Figura 3. Segmentación de la instalación

Las secciones a objeto de estudio son:

Tabla 2. Componentes a analizar

Equipo	Componente	Nota
Tanque (TC)	TC-01-Techo	Inspección usualmente efectiva
	TC-01-Chapa	Bastante efectiva
	TC-01-Fondo	Bastante efectiva
Tubería (TUB-01)	TUB-01-01	Inspección altamente efectiva
	TUB-01-02	Inspección pobre Afectación a la producción con amenaza al personal y ambiente
	TUB-01-03	Inspección inefectiva Afectación a la producción con amenaza al personal y ambiente
Bomba (P-01)	P-01-01	Inspección usualmente efectiva Amenaza al personal y el ambiente

Los mecanismos de degradación son corrosión externa y adelgazamiento interno para las tuberías, para la bomba se considera adicionalmente la erosión / corrosión. Para el tanque se ha considerado la corrosión externa, corrosión bajo aislamiento y el adelgazamiento del material y del recubrimiento interno.

5.1.4 Análisis de riesgos

Bajo las condiciones operativas y con los datos aportados, se dan de alta los componentes de los equipos mediante el software y se determina la matriz de riesgo inicial para los intervalos de tiempo. Dependiendo de los datos aportados se pueden plantear varias vías para la determinación del riesgo: cualitativa, semi cuantitativa o cuantitativa, se ha usado el enfoque semicuantitativo. Los periodos seleccionados para la determinación del riesgo son de 5 años a partir de enero de 2000.

Cuando el enfoque es cuantitativo, el riesgo se determina por el producto de la probabilidad de ocurrencia del evento y las consecuencias.

$$\text{Riesgo} = \left(\text{Ff} \times \text{FM} \times \text{FG} \right) \times \text{Consecuencias}$$

Figura 4. Determinación del riesgo

La probabilidad considera:

- La frecuencia de fallo genérica (Ff), típica para el tipo de componente
- Factor de modificación (FM)
 - Mecanismos de degradación existentes
 - Tiempo (Fallo esperado en cada periodo)
 - Efectividad del programa de inspección para cada mecanismo de degradación
 - Frecuencia de puesta fuera de servicio del componente del equipo, estabilidad en la operación, operación dentro del rango de diseño, problemas por reparaciones recurrentes.
- Factor de gestión de la Empresa (FG).

Para la estimación de las consecuencias, según el enfoque semi-cuantitativo, se considera:

- Área afectada
- Factor de presión, potencial de incendio, toxicidad y explosión
- Efecto sobre la producción
- Ubicación del componente en la instalación
- Tiempo de rectificación de la falla del componente, amenaza al personal y al ambiente
- Medidas de seguridad

Los resultados se presentan en la Figura 5, en la que en una matriz 5 x 5, se representa el riesgo de cada componente. Como se ha empleado un enfoque semi-cuantitativo se definen rangos que van desde muy bajo a muy alto según: A, B, C, D, E para las consecuencias y 1, 2, 3, 4 y 5 para la probabilidad.

Algunos componentes dan valores resultantes de riesgo muy altos, mientras que otros resultan bastante aceptables (bajo, medio, muy bajo).



Figura 5. Matriz de riesgo inicial para los intervalos de tiempo seleccionados correspondiente a equipos de procesos (tubería, bomba) y el tanque

Tabla 3. Resultados para equipos de procesos y tanque

Equipo	Componente	AP1	AP2	AP3
P-01	P-01-01	1C	1C	4C
TUB-1	TUB-1-1	1A	1A	1A
	TUB-1-2	1B	3B	4B
	TUB-1-3	1C	3C	5C
TC-01	TC-01-Fondo	5E	5E	5E
	TC-01-Chapa	5E	5E	5E
	TC-01-Techo	2A	2A	2A

5.1.5 Toma de decisiones

Para la toma de decisión se puede tomar una referencia según los diferentes niveles de riesgos (UNE 16991, 2018).

Tabla 4. Criterios de decisión/acción

Nivel de riesgo	Criterio de decisión/acción
Muy alto	Definir las medidas inmediatas necesarias para reducir el riesgo, por ejemplo, considere la reparación/reemplazo del equipo. También se puede considerar un posible rediseño.
Alto	Definir el programa de inspección y mantenimiento requerido para reducir el riesgo.
Medio	Reducir el riesgo a través de medidas de mitigación tan bajas como sea razonablemente posible (ALARP). Para el riesgo de negocio, encontrar el coste óptimo.
Bajo	Si no existe un plan de programa de inspección y mantenimiento, no es obligatorio establecer uno. De lo contrario, ajuste el programa para encontrar los costes óptimos y siga el principio ALARP.
Muy bajo	Sin acción

Especial atención merece el tanque de almacenamiento (TC-01), sobre los componentes de la chapa y el fondo existe un riesgo muy alto, debido al tipo de degradación al que están sometidos. Otro factor importante que se considera en este caso es la ubicación del componente, el acceso al fondo de un tanque para

una inspección es más difícil y en el caso de la chapa se requiere de andamios; por tanto, requieren de una metodología más eficiente al planteado inicialmente. Por su parte, luego de analizar una posible modificación en la efectividad de la inspección del techo del tanque, se observó que no influye notablemente en el valor del riesgo.

Para los componentes del tanque con riesgo alto, se propone:

- incrementar la efectividad de la inspección para detectar cualquier degradación y
- aumentar la protección contra la corrosión mediante recubrimiento y aislamiento de las paredes del tanque.

Por su parte, para el resto de componentes de la planta se puede disminuir la efectividad de la inspección sin que llegue a implicar un aumento del riesgo a valores muy altos, esta consideración puede ser asumida, por ejemplo, por razones económicas.

Luego de aplicar dichas modificaciones se recalcula la matriz de riesgo para el tanque, como se muestra en la Figura 6.

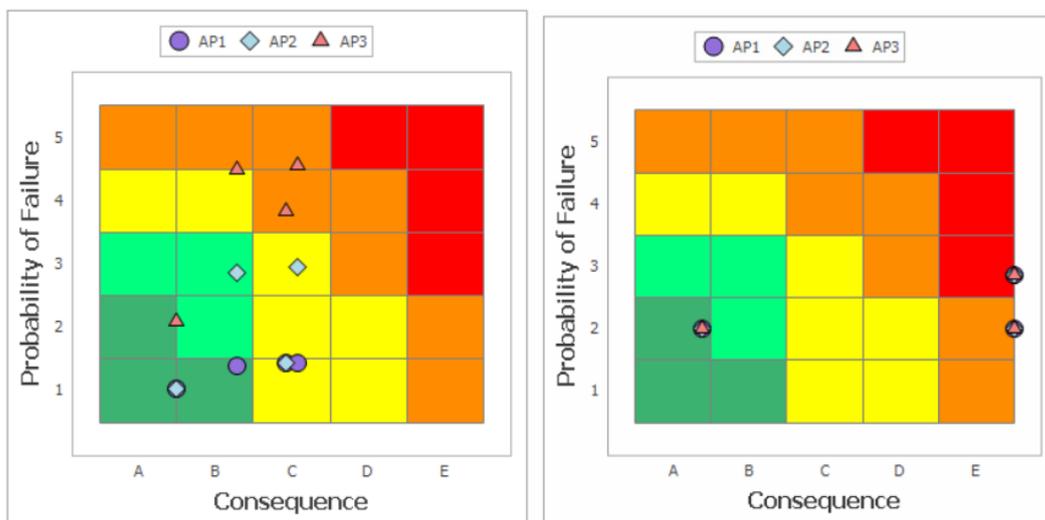


Figura 6. Matriz de riesgo luego de las modificaciones para los equipos de procesos (tubería, bomba) y el tanque

Tabla 5. Resultados para equipos de procesos y tanque luego de las modificaciones

Equipo	Componente	AP1	AP2	AP3
P-01	P-01-01	1C	1C	4C
	TUB-1-1	1B	1B	2B
TUB-1	TUB-1-2	1B	3B	4B
	TUB-1-3	1C	3C	5C
TC-01	TC-01-Chapa	2E	2E	2E
	TC-01-Fondo	3E	3E	3E
	TC-01-Techo	2A	2A	2A

6 CONCLUSIONES

La inspección basada en riesgo (IBR) de plantas industriales es una metodología aceptada para la implementación de planes de inspección y mantenimiento eficaz ya que no solo permite hacer un registro de las condiciones de seguridad de los equipos y componentes de forma localizada en la instalación, sino proyectar su desempeño en el tiempo.

Las matrices de riesgo reflejan las condiciones de seguridad de la instalación luego de aplicar las modificaciones propuestas, basado en el alcance y los objetivos planteados al inicio del estudio. El manejo de la información y datos mediante el uso de herramientas especializadas permite proponer propuestas referentes a mantenimiento e inspección para optimizar los recursos, en aquellas situaciones que se permita hacer una estimación cualitativa de riesgo y en el cual se pueda considerar el factor de coste tanto de los equipos como de las consecuencias de los accidentes que se puedan presentar.

En cualquier caso, un estudio coste-beneficio para cada propuesta permitirá tomar la mejor decisión, considerando el riesgo y la inversión más conveniente.

7 REFERENCIAS

- ABS. (2003). *Guide for Surveys using IBI for offshore industry*.
- API 580. (2009). *Risk-Based Inspection*. API.
- API 581. (2000). *Risk-Based Inspection. Base Resource Document*. API.
- API 581. (2016). *Risk-Based Inspection Methodology*. API.
- Elaya, P. (2014). Corrosion Risk Analysis, Risk Based Inspection and a Case. *Procedia Engineering*(86), 597-605.
- RiskWISE. (s.f.). *RiskWISE Brochure*. Cambridge.
- Soo Song et al. (2021). Quantitative Risk-Based Inspection approach for high-energy piping using a probability distribution function and modification factor. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*.
- UNE 16991. (2018). *Marco de la inspección basada en el riesgo*.
- VELOSI. (2019). *Risk Based Inspection (RBI)*. Obtenido de <https://velosiaims.com/Services/RBI>