DISEÑO DE UN SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL RIESGO DE FORMA SISTEMATIZADA, BASADO EN LAS NORMAS API RP 580 Y 581 RISK BASED INSPECTION (RBI).

JORGE ORLANDO ACEVEDO PÉREZ
ANDY FABIAN QUINTERO CASTILLO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2013

DISEÑO DE UN SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL RIESGO DE FORMA SISTEMATIZADA, BASADO EN LAS NORMAS API RP 580 Y 581 RISK BASED INSPECTION (RBI).

JORGE ORLANDO ACEVEDO PÉREZ
ANDY FABIAN QUINTERO CASTILLO

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Metalúrgico

Director
M.Sc. IVÁN URIBE PÉREZ
Ingeniero Metalúrgico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2013

DEDICATORIA

Dedico este triunfo a Dios, por darme la vida y por permitirme crecer dentro de una familia llena de valores, principios morales y con mucho deseo de superación, porque a pesar de pequeñas dificultades siempre me ha permitido ver en su amor que la vida es una sola y que se debe vivir cada día como si fuese el ultimo.

A mi madre, porque es una mujer integra como persona, por su intachable imagen, por todo el esfuerzo que ha hecho por inculcarme el respeto y el amor verdadero, además de esto por su infinito amor y la entrega que ha tenido conmigo, porque nunca me ha dejado solo y porque cada día me demuestra lo importante que soy para su vida. Te Amo Mamita Hermosa!!

A mi padre, por su lucha incansable, por buscar un mejor futuro para nuestra familia, porque me enseño que las limitaciones están en la mente y porque siempre me ha demostrado incondicionalidad absoluta, sin importar las circunstancias que la vida nos presenta. Te Amo mi Viejo!!

A mis hermanos Mauricio, Betty y Leito por su amor, su respeto y todas las cosas bonitas que han hecho por mí. Hermanitos los amo mucho!.

A Paola mi esposa, negrita le agradezco a Dios y a la vida por haberte puesto en mi camino, porque me has entregado lo mejor de tu vida, tu amor, tu lealtad, tu incondicionalidad, tu respeto, por esa lucha incansable que has tenido por mantener nuestra relación, porque has sido mi aliento, mis ganas de luchar y sobre todo porque en tu vientre se encuentra el regalo más hermoso que me ha dado la vida, Te amo mucho amor y le pido a Dios que me permita compartir hasta el último segundo de mi existencia a tu lado.

A Nicolás mi hijo, porque desde que llegaste a nuestras vidas, te has convertido en la mayor motivación para luchar en este mundo, porque eres el fruto del amor puro que tenemos con tu mamita y porque quiero entregarte lo mejor de mí, Te amo Nico y desde ya cuento los días para poder tenerte en mis brazos y vivir la mejor etapa de mi vida.

A Darío mi primo porque siempre ha sido mi apoyo, usted sabe que lo quiero como un hermano.

A mis amigos: Hermes, Gerson, Sergio, Juan Ca, Carolina, John, Andrea, Jorge, Wilmer, Wilson por su apoyo y ayuda durante esta etapa tan importante de mi vida.

Jorge Orlando Acevedo Pérez

A Dios por brindarme la oportunidad de tener una familia y que ellos creyeran en mí.

A mis padres por apoyarme en los momentos buenos y malos que he tenido, además por darme la oportunidad de estudiar.

A Michael Álvarez quien se convirtió en mi amigo gracias a este proyecto y me brindó su apoyo incondicionalmente.

A Daniela, mi novia quien me brindó su apoyo en los momentos más difíciles del desarrollo de este proyecto y con quien he pasado momentos inolvidables.

A Iván Uribe, mi profesor y director de proyecto; quien colocó su confianza en mí, me brindó su amistad y me dio la oportunidad de llevar este proyecto como ponente a congresos internacionales.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma han aportado un granito de arena para ser lo que soy en estos momentos.

Andy Fabián Quintero Castillo

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto, agradecen a las siguientes personas:

Profesor Iván Uribe Pérez, director de proyecto de grado, por la confianza depositada en nosotros por sus concejos y por la ayuda incondicional durante el desarrollo de este proyecto.

A Michael Álvarez por el tiempo y la dedicación entregada durante el desarrollo de este proyecto.

A John Jairo Niño, por su colaboración y brindar la mejor disponibilidad de tiempo y recursos para el desarrollo de este proyecto.

Al grupo de trabajo de Campo Escuela Colorado, por su amabilidad y su cortesía.

Y a todos los profesores de la escuela de metalúrgica por brindarnos el conocimiento necesario para nuestra formación ingenieril.

A la Universidad Industrial de Santander por su excelente calidad académica y por brindarnos los recursos necesarios para nuestra formación profesional.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 18

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 20

1.1 JUSTIFICACIÓN 20
1.2 OBJETIVO GENERAL 21
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 21

2. INSPECCIÓN BASADA EN RIESGO API RP 580 "RBI" 22

2.1 OBJETIVO DE UN PROGRAMA DE INSPECCIÓN 23
2.2 RBI UNA HERRAMIENTA PARA LA ADMINISTRACIÓN DEL RIESGO 23
2.3 PROBABILIDAD Y CONSECUENCIA DE FALLA (RIESGO) 24
2.4 TIPOS DE EVALUACIÓN RBI 25
2.5 RESULTADOS DE LA RBI 26
2.6 INSPECCIÓN BASADA EN RIESGO 26
2.7 PLANES Y PROGRAMAS DE INSPECCIÓN 27
2.8 PROBABILIDAD DE FALLA 27
2.8.1 FRECUENCIA DE FALLA GENERICA 28
2.8.2 FACTOR DE DAÑO 29
2.8.3 FACTOR DE SISTEMA DE GERENCIA 29
2.8.4 CATEGORIA DE LA EFECTIVIDAD DEL PROGRAMA DE INSPECCIÓN 31
2.9 CONSECUENCIA 32
2.9.1 CATEGORIAS DE CONSECUENCIA 33
2.10 ANALISIS DE RIESGO 35
2.11 MATRIZ DE RIESGO 35
2.12 PLANES DE INSPECCIÓN 37

3. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO 38

3.1 GUIDE MATLAB 38
3.2 DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA 39
3.3 SECCIONES PRESENTES EN LA INTERFAZ PRINCIPAL DEL SOFTWARE 39
3.3.1 DISEÑO LÓGICO 39
3.4 DESCRIPCIÓN LAS INTERFACES PRESENTES EN CADA ETAPA. 40
3.5 ESTRUCTURA DE FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE BASADO EN LA METODOLOGIA DE INSPECCION BASDA EN RIESGO DE API RP 581. 41
3.5.1 PLANTAS 41
3.5.2 LAZOS DE CORROSIÓN 41
3.5.3 CONDICIONES DEL LAZO 42
3.5.4 REGISTRO DE EQUIPOS POR TAG 42

3.6 HISTORICO DE EQUIPOS....44
3.7 CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE FALLA....44
3.8 CONSECUENCIA....46
3.8.1 VALOR CUANTITATIVO DEL RIESGO....46
3.9 PLAN DE INSPECCIÓN....48
3.10 SEGUIMIENTO RISKMA....49
3.11 METODOLOGÍA PARA EL MANEJO DE RISKMA....50
4. APLICACIÓN DE SOFTWARE RISKMA AL CAMPO ESCUELA COLORADO.....51
4.1 LÍMITES DE INSPECCIÓN....51
4.2 GRUPO DE TRABAJO....51
4.3 HISTÓRICOS DE EQUIPOS....51
4.4 LAZOS DE CORROSIÓN....52
4.4.1 LC-RECOLECTORA-01 “SISTEMA DE CRUDO”....52
4.4.2 LC-RECOLECTORA-02 “SISTEMA DE GAS”....53
4.4.3 LC-RECOLECTORA-03 “SISTEMA DE AGUA”....53
4.5 USO DEL SOFTWARE PARA EVALUAR LOS EQUIPOS DE ESTACIÓN RECOLECTORA DEL CAMPO ESCUELA COLORADO. 54
4.6 DATOS NECESARIOS PARA DETERMINAR LA PROBABILIDAD Y CONSECUENCIA DE FALLA PARA LOS EQUIPOS DE LA PLANTA RECOLECTORA DE CAMPO ESCUELA COLORADO 57
4.6.1 CALCULO DEL FACTOR SISTEMA DE GERENCIA....57
4.6.2 TANQUES DE ALMACENAMIENTO....59
4.6.3 RECIPIENTES A PRESIÓN....60
4.6.4 TUBERIA ..... **¡Error! Marcador no definido.**
5. RESULTADOS FINALES 62
5.1 ESPECIFICACIONES DE PRUEBA Y CÁLCULOS DEL SOFTWARE....62
5.2 ANALISIS DE RIESGO....62
5.3 PLAN DE INSPECCIÓN....63
5.4 PANORAMA DE RIESGO DE LOS COMPONENTES DE LA ESTACIÓN RECOLECTORA DE CAMPO ESCUELA....63
5.5 ANALISIS DE RESULTADOS 65
5.5.1 TANQUES DE ALMACENAMIENTO T01 Y T02 65
5.5.2 SEPARADORES S-001, S-002 Y S-003....65
5.5.3 TUBERÍAS....66
6. CONCLUSIONES 67
7. RECOMENDACIONES 68

BIBLIOGRAFIA **69**
ANEXOS **70**

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Enfoque Continuum de RBI 25
Figura 2. Procedimiento general para consecuencia de falla 34
Figura 3. Matriz de Riesgo API RP 581 36
Figura 4. Metodología de trabajo 38
Figura 5. Diseño lógico RISKMA.....40
Figura 6. Interfaz de principal de RISKMA. 41
Figura 7. Interfaz para ingreso de datos Lazos de Corrosión. 42
Figura 8. Interfaz de condiciones lazo de corrosión. 43
Figura 9. Interfaz para ingreso de datos TAG de Equipo. 44
Figura 10. Interfaz para ingreso de Históricos de Inspección de Equipos. 45
Figura 11. Interfaz de probabilidad, en la que se determina el valor cuantitativo del Factor Frecuencia de Falla (gff) Generica (Df (t)), Factor de Daño y Factor Sistema de Gerenciamiento (FMS). 45
Figura 12. Interfaz de ingreso de datos para Consecuencia de Área Personal. 46
Figura 13. Matriz de Riesgo de Área y Financiera. 48
Figura 14. Formato plan de Inspección. 48
Figura 15. Interfaz seguimiento RISKMA. 49
Figura 16. Metodología de manejo RISKMA.....50
Figura 17. Procedimientos de inspección utilizados para evaluar los equipos del C.E.C. 58
Figura 18. Matriz de Riesgo generada para equipos de campo escuela. 62
Figura 19. Plan de Inspección generada para equipos de campo escuela. 63

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Frecuencia de Falla Genérica 28
Tabla 2. Evaluación del Sistema de Gerencia 30
Tabla 3. Categorías de Inspección Efectiva. 32
Tabla 4.Rango de valores asociados con la probabilidad y consecuencia de área 36
Tabla 5. Rango de valores asociados con la probabilidad y consecuencia financiera 36
Tabla 6. Nomenclatura de símbolos empleados para describir la prioridad en las acciones de mantenimiento correctivo, preventivo y/o predictivo. 47
Tabla 7. Identificación de mecanismos de daño. 55
Tabla 8. Equipos evaluados en el Campo Escuela Colorado. 56
Tabla 9. Datos necesarios para calcular el factor sistema de gerencia. 57
Tabla 10. Información tanques T01 y T02. 59
Tabla 11. Información separadores crudo gas. 60
Tabla 12. Información tubería crudo, agua y gas. 61
Tabla 13. Riesgo de área y financiero obtenidos para los componentes de equipos evaluados. 64

LISTA DE ANEXOS.

Pág.

ANEXO A. *MANUAL DE USUARIO RISKMA* 70

RESUMEN

TITULO: ***DISEÑO DE UN SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL RIESGO DE FORMA SISTEMATIZADA, BASADO EN LAS NORMAS API RP 580 Y 581 RISK BASED INSPECTION (RBI).***

AUTORES: ***ANDY FABIAN QUINTERO CASTILLO***
JORGE ORLANDO ACEVEDO PÉREZ

PALABRAS CLAVES: RBI, Inspección, Probabilidad, Consecuencia, Guide, RISKMA.

El proyecto *DISEÑO DE UN SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL RIESGO DE FORMA SISTEMATIZADA, BASADO EN LAS NORMAS API RP 580 Y 581 RISK BASED INSPECTION (RBI),* tiene como objeto crear un software en la plataforma GUIDE de MATLAB basado en la norma API 580 y 581, el cual mediante una metodología de Inspección basada en riesgo se ejecutan una seria de cálculos que determinan el riesgo de una planta mediante la probabilidad de falla y la consecuencia debido a la perdida de contención de fluidos.

Esta herramienta permite la creación de proyectos de integridad mediante la agrupación de equipos en lazos de corrosión para la determinación del respectivo riesgo plasmado en una matriz de Probabilidad Vs Consecuencia, para de esta forma tener un seguimiento de la integridad de los equipos, así como un plan de mantenimiento de los mismos.

La metodología RBI incluye, identificar los mecanismos de deterioro que determinan los lazos de corrosión presentes en la planta a evaluar, nivel de criticidad que está directamente relacionado con la probabilidad y la consecuencia de falla, vida útil remanente, intervalo de inspección, determinación del plan de inspección de acuerdo con los mecanismos de falla propuestos y ejecución de la inspección cumpliendo con el objetivo principal de la RBI; presentar recomendaciones para disminuir el nivel de riesgo actual de la estación separadora del campo escuela colorado y reducir costos por inspecciones innecesarias.

---

* Modalidad: Investigación

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director Iván Uribe Pérez

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A SOFTWARE FOR ANALYSIS AND RISK ASSESSMENT systematic way, standards-based API RP 580 and 581 Risk Based Inspection (RBI).

AUTHORS: ANDY FABIAN QUINTERO CASTILLO

JORGE ORLANDO ACEVEDO PEREZ

KEYWORDS: RBI, Inspection, Probability, Consequence, Guide, RISKMA.

The project DESIGN OF A SOFTWARE FOR ANALYSIS AND RISK ASSESSMENT FORM SYSTEMATIZED BASED ON STANDARDS AND 581 API RP 580 RISK BASED INSPECTION (RBI), aims to create a software platform based on MATLAB GUIDE the API 580 and 581, which means a methodology for risk based inspection run a series of calculations that determine the risk of a plant by the probability of failure and consequence due to loss of fluid containment.

This tool allows you to create projects integrity by grouping bonds corrosion equipment for the determination of the respective risk embodied in a matrix of Probability Consequence Vs, to thereby keep track of the integrity of the equipment as well as a plan their maintenance.

The RBI methodology includes identifying deterioration mechanisms that determine corrosion loops in the plant to assess criticality level is directly related to the probability and consequence of failure, remaining useful life, inspection interval, determining the plan inspection in accordance with the proposed failure mechanisms and implementation of inspection complying with the main objective of the RBI, to make recommendations to reduce the current risk level of the field separator station colorado school inspections and reduce unnecessary costs

---

* Modality: Investigation

** Faculty of Physical - Chemistry Engineering - Metallurgical Engineering school – Director: Iván Uribe Pérez

INTRODUCCIÓN

El gerenciamiento de Integridad basado en el Riesgo es la técnica más apropiada para cualquier estrategia de Inspección y mantenimiento que una empresa de producción y refinación de petróleo quiera emprender. Para hacer frente a este reto se hace necesario contar con sistemas propios, que permitan administrar toda la información disponible generada en los procesos de inspección y mantenimiento para tomar decisiones oportunas y precisas, en el menor tiempo posible, debido a esto las empresas requieren mantener un inventario de los equipos y componentes a inspeccionar dentro de un sistema de forma organizada y de fácil acceso, para permitir al inspector conocer de manera inmediata el histórico y condiciones operacionales de cada sistema que se desee evaluar. Una vez realizada una inspección a un equipo y con los datos recolectados, se evalúan los diferentes mecanismos de daño presentes de manera que se obtenga la probabilidad y consecuencia de fallas del equipo, que a su vez servirán para establecer un plan de inspección donde se establece de manera sistemática en el equipo evaluado parámetros como:

- Que tipos de daño se producen,
- Dónde deben detectarse,
- Cómo pueden detectarse y
- Cuándo o con qué frecuencia deben inspeccionarse.

El software nos permite calcular todos los parámetros requeridos para evaluar el riesgo, adquiriendo una gran importancia en el Gerenciamiento de Integridad.

Con el propósito de dar una mayor confiabilidad al proyecto de Gerenciamiento de la Integridad Estructural de Campo Escuela, la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad industrial de Santander; se vio en la necesidad de diseñar un software basado en los parámetros establecidos en la norma API-RP 580/ 581,

para facilitar la aplicación de los criterios y diligenciamiento de registros conducentes a establecer un panorama de riesgo de los equipos de la estación recolectora de petróleo del Campo Escuela, de tal manera que el riesgo de falla asociado al funcionamiento de los equipos, se administre sistemáticamente y con una metodología basada en valores cuantitativos de riesgo.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las paradas inesperadas o no programadas en los procesos de producción, se han convertido actualmente en el problema principal debido al impacto causado a personas, equipos, medio ambiente y principalmente el impacto económico en relación a costos adicionales de producción para las empresas, por lo tanto se requieren acciones efectivas con el objetivo de obtener soluciones de compensación que lo minimicen o corrijan. En la actualidad esperar a que se produzcan las fallas para intervenir puede llevar a resultados catastróficos y pérdidas enormes en las empresas, es por esto que se conlleva al desarrollo de nuevas técnicas o planes de inspección desarrollados bajo las normas API RP 580 y 581 (Inspección Basada En Riesgo), que lleven a las empresas a reducir costos en cuanto a la rapidez y organización de sistemas de inspección que se permitan administrar todos los equipos y plantas involucrados en los procesos de producción en un sistema de gerenciamiento de integridad.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Contar con una herramienta computacional que permita establecer una metodología de inspección basada en riesgo para la administración de datos recolectados en una inspección de planta de producción, facilita el gerenciamiento de la integridad estructural de la misma, permitiendo así la interpretación de los datos de una forma rápida y organizada.

En este trabajo de investigación se propone desarrollar un software condicionado bajo los parámetros y procedimientos dados en la norma API RP 580/581, de tal forma que se establezca una probabilidad y consecuencia de falla, representados en un riesgo de área y financiero para cada equipo, para así determinar planes de inspección que den como resultado una disminución del riesgo de gastos por paradas innecesarias sin comprometer la seguridad de la planta y que por medio del software se entregue un plan de inspección y mantenimiento que proporcione

un aseguramiento de la integridad y de la confiabilidad mecánica del equipo evaluado. ¿pero, porque crear un software si existen muchos en el mercado que permitirían realizar las actividades planteadas en la este proyecto?, la respuesta es sencilla, la creación, el diseño y la elaboración del software “RISKMA” permite a los autores del proyecto llegar a un análisis más profundo y detallado del desarrollo de una metodología de forma sistematizada para el gerenciamiento de la integridad estructural de una planta evaluada.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un software en la plataforma de “GUIDE MATLAB” con los parámetros establecidos en la norma API-RP 580 y 581 de 2008, de tal manera que el riesgo de falla asociado con el funcionamiento del equipo, se administre sistemáticamente y pueda integrarse a un sistema de gerenciamiento de integridad.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para el cumplimiento del objetivo general del proyecto se requiere lo siguiente:

- Determinar mediante el software el valor del riesgo de un equipo asociado a la probabilidad y consecuencia de falla.
- Crear una base de datos con los diferentes valores establecidos en la norma API 581, que faciliten determinar la probabilidad y consecuencia de falla en los equipos evaluados.
- Establecer un plan de inspección de forma preventiva de acuerdo a la evaluación del riesgo entregada por el software.
- Aplicar el software a la estación recolectora del CAMPO ESCUELA COLORADO UIS, utilizando datos recolectados de inspecciones realizadas.

2. INSPECCIÓN BASADA EN RIESGO API RP 580 "RBI"

El propósito de la clasificación de riesgo de un equipo es proveer las bases para tener una idea de la inspección directa para cada uno de los factores de riesgo donde los recursos de mantenimiento (tiempo y dinero) se pueden optimizar en el programa de inspección. Esto da como resultado operaciones más seguras y fiables, mientras se controlan los costos. La inspección basada en riesgo (RBI) se refiere al uso de los principios del análisis del riesgo para manejar los programas de inspección para el equipo de una planta. RBI se ha venido utilizando en la industria de la energía atómica por un cierto tiempo y también se emplea principalmente en refinerías y plantas petroquímicas.

Mientras que las plantas crecen, aumenta la actividad de inspección y los requisitos de mantenimientos pueden llegar a ser más costosos. Con los operadores que desean mejorar la seguridad y conseguir una fiabilidad optima de la planta, la inversión en el mantenimiento puede ser un punto importante para estudiar su viabilidad.

A mediados de la década de los noventa se comenzó a desarrollar la tecnología de inspección basada en riesgo y herramientas de software, ofreciendo productos que mejoran la rapidez, control y organización del día a día de la gestión de inspección de equipos. La metodología entregada por la norma API RP 581 y adoptada por estos software, referencia una amplia aplicación para la industria petroquímica y de producción de energía. Debido a la gran cantidad de datos generados por una inspección realizada bajos los requerimientos de esta norma, se necesita de un tratamiento adecuado para los mismos; siendo esto una herramienta de gran aplicación para la determinación de un plan de inspección preventivo para un equipo o una planta evaluada.

2.1 OBJETIVO DE UN PROGRAMA DE INSPECCIÓN

El propósito de un programa de inspección es definir y realizar aquellas actividades necesarias para detectar el deterioro en servicio de los equipos antes de que se produzcan las fallas, por lo tanto API RP 580 proporciona los elementos básicos para desarrollar e implementar un programa de inspección basada en riesgo (RBI). Dentro de la cual existe un modelo básico de sistema de gestión de integridad de equipos y un respectivo proceso operativo de gestión. La RBI es una herramienta integrada de administración del riesgo, produce Planes de Inspección y Mantenimiento para el equipo que identifican las acciones que deben ser implementadas para brindar una operación segura y confiable.

2.2 RBI UNA HERRAMIENTA PARA LA ADMINISTRACIÓN DEL RIESGO

La RBI proporciona una metodología consistente para evaluar la combinación óptima de métodos y frecuencias. Cada método de inspección disponible puede ser analizado y estimar su efectividad relativa en la reducción de la probabilidad de falla. Dada esta información y el costo de cada procedimiento, se puede desarrollar un programa de optimización. La clave para desarrollar tal procedimiento es la capacidad de evaluar el riesgo asociado con cada equipo y luego determinar las técnicas de inspección más apropiadas.

Existen diversas metodologías en el tema de la integridad de equipos como la PHA o HAZOP (Análisis de Peligros de Procesos), RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) entre otras; pero de manera general se puede decir, que La RBI se enfoca en los mecanismos de deterioro relacionados con la integridad mecánica y la administración de riesgos a través de la inspección.

De manera general los equipos involucrados en el proceso RBI son:

- Recipientes Presurizados—todos los componentes que contengan presión.

- Tubería de Proceso—Tubos y componentes de la tubería
- Tanques de Almacenamiento—atmosféricos y presurizados.
- Equipos rotatorios—componentes que contienen presión
- Hervidores y Calentadores—componentes presurizados
- Intercambiadores de Calor (Cuerpos, cabezotes, canales, etc.)

El uso de la evaluación de riesgos en el planeamiento de inspección y mantenimiento es exclusivo en que la información de la consecuencia, que se basa tradicionalmente en operaciones, y la información de probabilidad de falla, que se base en ingeniería/ mantenimiento/ inspección, se combinan para ayudar el proceso de planeación. Parte de este proceso es la determinación de qué inspeccionar, cómo inspeccionar (técnica), y la extensión de la inspección (cubrimiento). Determinar el riesgo de las unidades de proceso, o los equipos de proceso individuales facilita esto ya que las inspecciones ahora están priorizadas con base en el valor del riesgo.

2.3 PROBABILIDAD Y CONSECUENCIA DE FALLA (RIESGO)

El riesgo es la combinación de la probabilidad de algún evento que ocurre durante un periodo de tiempo de interés y las consecuencias (generalmente negativas) asociadas con el evento. En términos matemáticos, el riesgo puede ser calculado por la ecuación:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Consecuencia}$$

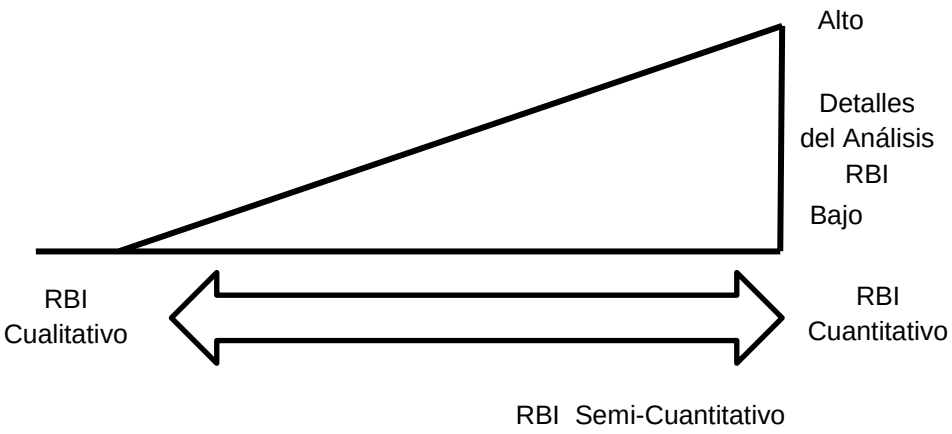
Tradicionalmente, las organizaciones se han enfocado solamente en las consecuencias de la falla o en la probabilidad sin hacer esfuerzos sistemáticos para ligarlas. No han considerado que tan probable es que ocurra un incidente indeseable, solamente considerando ambos factores puede tener lugar la toma de decisiones basada en riesgos. Generalmente, se definen los criterios de aceptabilidad del riesgo reconociendo que no todas las fallas llevan a un incidente

indeseable con consecuencias graves (ej. Fugas de agua) y que algunos incidentes de consecuencia tienen probabilidades muy bajas**. [1]**

2.4 TIPOS DE EVALUACIÓN RBI

El procedimiento de RBI puede ser aplicado cualitativamente, cuantitativamente o utilizando aspectos de ambos (ej. Semi cuantitativamente). Cada enfoque proporciona una forma sistemática para monitorear el riesgo, identificar las áreas de interés potencial y desarrollar una lista priorizada para inspección o análisis más detallado. Cada una desarrolla una medición de riesgo que se utilizará para evaluar por separado la probabilidad de falla y la consecuencia potencial de la falla. Se considera que los tres enfoques son un continuum que tiene los enfoques cualitativo y cuantitativo en los extremos y todo lo que está en medio es el enfoque semi- cuantitativo. La figura 1 ilustra este concepto; en cual se puede concluir que el análisis de mayor potencial es el análisis cuantitativo.

Figura 1. Enfoque Continuum de RBI



Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection API RECOMMENDED PRACTICE 580. First edition. Washington D.C.: API; 2002. 60p. Part 5, pag 10. API 580.

---

* [1] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection API RECOMMENDED PRACTICE 580. First edition. Washington D.C.: API; 2002. 60p. Part 5, pag 7. API 580.

2.5 RESULTADOS DE LA RBI

Los resultados de la inspección tales como mecanismos de deterioro y tolerancia de los equipos a los diferentes tipos de deterioro, deben ser usados como variables al evaluar la vida remanente y los planes de inspección futuros. Los resultados también pueden ser utilizados para comparar o validar los modelos que hayan sido utilizados para la determinación de la probabilidad de falla. El producto principal de una RBI debe ser un plan de inspección para cada equipo evaluado. El plan de inspección debe detallar el riesgo no mitigado relacionado con la operación actual. Para riesgos que se consideren inaceptables, el plan debe contener las acciones de mitigación recomendadas para reducir el riesgo no mitigado a niveles aceptables.

2.6 INSPECCIÓN BASADA EN RIESGO

La metodología API de Inspección Basada en Riesgo (RBI), se puede utilizar para administrar el riesgo específico de un equipo o el riesgo global de una planta, focalizando los esfuerzos de inspección en el equipo con el mayor riesgo, de esta manera se permite optimizar los recursos económicos empleados en el mantenimiento de los equipos, privilegiando la seguridad y confiabilidad. La API-RBI proporciona argumentos necesarios para tomar decisiones sobre la frecuencia de la inspección, el alcance de la inspección, y el tipo más adecuado de ensayo no destructivo. La metodología RBI utiliza los resultados de un análisis formal del riesgo, para dirigir y enfatizar el planeamiento de la inspección y de los procedimientos físicos. Una implementación de la inspección basada en riesgo se utiliza para:

- Asegurar que el riesgo se reduce hasta el más bajo nivel razonable.
- Optimizar la agenda de inspección.
- Enfocar los esfuerzos de la inspección en las áreas más críticas.
- Identificar y utilizar los métodos más apropiados de inspección.

2.7 PLANES Y PROGRAMAS DE INSPECCIÓN

Cuando se considera una metodología consistente en la evaluación de la probabilidad de falla y sus consecuencias, se resalta el parámetro de riesgo; el cual es tratado en un programa de inspección teniendo en cuenta que el propósito de dicho plan de inspección, es definir las actividades necesarias para detectar el deterioro en servicio de los equipos antes de que se produzcan las fallas.

Un sistema de inspección basada en riesgo, dispone para su implementación en las industrias de procesos, procedimientos de inspección; requiriendo la evaluación del sistema de gestión, resultados de inspección y propuesta de acciones correctivas.

El programa de inspección debe sistemáticamente identificar:

- Qué tipo de daño se produce.
- Dónde debe buscarse.
- Cómo puede detectarse (técnica de inspección).
- Cuándo o con qué frecuencia debe inspeccionarse.

2.8 PROBABILIDAD DE FALLA

La probabilidad de falla usada en un enfoque cuantitativo es determinada de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{P_f(t) = gff \,.\, D_f\,(t) \,.\, F_{MS}}\ \textbf{[2]}$$

- $\boldsymbol{P_f(t)}$= Probabilidad de falla
- $\boldsymbol{gff}$ = Frecuencia de Falla genérica
- $\boldsymbol{D_f\,(t)}$ = Factor de daño
- $\boldsymbol{F_{MS}}$ = Factor de sistema de Gerencia

---

* [2] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 1 pag 1-11. API 581.

2.8.1 ***Frecuencia de falla genérica.*** La frecuencia de falla genérica considera la probabilidad de falla sin mecanismos de daños presentes en el equipo, en la tabla 1 se encuentran los diferentes tipos de componentes y se fijó un valor representativo de datos de fallas de la industria petroquímica. Además de esto API RBI proporciona una lista recomendada de las frecuencias de falla para tipos de componentes y equipos, en la tabla 1 encontramos los valores establecidos. La frecuencia falla genérica total para cada tipo de componente se dividió en todos los tamaños de los orificios pertinentes, es decir, la suma de la frecuencia de falla genérica por cada tamaño del agujero es igual a la frecuencia de falla genérica total para el componente.

Tabla 1. Frecuencia de Falla Genérica

Equipment Type	Component Type	*gff* as a Function of Hole Size (failures/yr)				gff_{total} (failures/yr)
		Small	Medium	Large	Rupture	
Compressor	COMPC	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	0	3.00E-05
Compressor	COMPR	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Heat Exchanger	HEXSS	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Heat Exchanger	HEXTS	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Heat Exchanger	HEXTUBE	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Pipe	PIPE-1	2.80E-05	0	0	2.60E-06	3.06E-05
Pipe	PIPE-2	2.80E-05	0	0	2.60E-06	3.06E-05
Pipe	PIPE-4	8.00E-06	2.00E-05	0	2.60E-06	3.06E-05
Pipe	PIPE-6	8.00E-06	2.00E-05	0	2.60E-06	3.06E-05
Pipe	PIPE-8	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Pipe	PIPE-10	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Pipe	PIPE-12	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Pipe	PIPE-16	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Pipe	PIPEGT16	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Pump	PUMP2S	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Pump	PUMPR	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Pump	PUMP1S	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Tank650	TANKBOTTOM	7.20E-04	0	0	2.00E-06	7.20E-04
Tank650	COURSE-1	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
Tank650	COURSE-2	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
Tank650	COURSE-3	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
Tank650	COURSE-4	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
Tank650	COURSE-5	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
Tank650	COURSE-6	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
Tank650	COURSE-7	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
Tank650	COURSE-8	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
Tank650	COURSE-9	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
Tank650	COURSE-10	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
Vessel/FinFan	KODRUM	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Vessel/FinFan	COLBTM	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Vessel/FinFan	FINFAN	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Vessel/FinFan	FILTER	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Vessel/FinFan	DRUM	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Vessel/FinFan	REACTOR	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Vessel/FinFan	COLTOP	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 2 pag 2-16. API-581.

2.8.2 ***Factor de daño.*** Los factores de daño tienen como objetivo apoyar la metodología API RBI, proporcionando una herramienta de evaluación usada para determinar las prioridades de inspección y optimizar los esfuerzos de inspección, pero no proporcionan un definitivo “Fitness-For-Service” aptitud de servicio del componente evaluado. La función básica del factor de daño es evaluar estadísticamente la cantidad de daño que puede estar presente como una función del tiempo en servicio y la efectividad de una actividad de inspección.

La clasificación de los factores de daño se agrupa de la siguiente manera:

- Adelgazamiento
- Componentes con Recubrimiento
- Daño Externo
- Agrietamiento Bajo Esfuerzos (SCC)
- Ataque por Hidrogeno a Alta Temperatura (HTHA)
- Fatiga Mecánica (Tuberías)
- Fractura Frágil.

2.8.3 ***Factor de sistema de gerencia.*** Este factor mide la efectividad de la compañía en administrar los sistemas de gestión de seguridad de sus instalaciones y su efecto sobre la integridad de sus equipos. La metodología RBI nos proporciona una fórmula para calcular esta afectación y modificar directamente la probabilidad de falla de un componente. La herramienta consiste en una valoración del gerenciamiento de diferentes áreas de la planta (Tabla 2):

1. Liderazgo y administración
2. Seguridad de procesos

3. Análisis de peligros en el proceso
4. Gestión de cambios
5. Procedimientos operativos
6. Practicas seguras de trabajo
7. Entrenamiento
8. Aseguramiento de la integridad mecánica
9. Revisión de seguridad previo al arranque
10. Respuesta a emergencias
11. Investigación
12. Contratistas
13. Auditoria de gestión de procesos peligrosos

Tabla 2. Evaluación del Sistema de Gerencia

Table	Title	Questions	Points
2.A.1	Leadership and Administration	6	70
2.A.2	Process Safety Information	10	80
2.A.3	Process Hazard Analysis	9	100
2.A.4	Management of Change	6	80
2.A.5	Operating Procedures	7	80
2.A.6	Safe Work Practices	7	85
2.A.7	Training	8	100
2.A.8	Mechanical Integrity	20	120
2.A.9	Pre-Startup Safety Review	5	60
2.A.10	Emergency Response	6	65
2.A.11	Incident Investigation	9	75
2.A.12	Contractors	5	45
2.A.13	Audits	4	40
Total		**101**	**1000**

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 2 pag 2-19. API-581.

Para Calcular el Factor de Sistema de Gerencia, primeramente se calcula el % de cumplimiento de las respuestas obtenidas de la encuesta según:

$$\boldsymbol{pscore} = \frac{\boldsymbol{Score}}{\mathbf{1000}} . \mathbf{100}\ [\boldsymbol{units}\ \%] \quad \textbf{[3]}$$

* [3] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 2 pag 2-13. API 581

Posteriormente el Factor de Sistema de Gerencia se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_{MS} = 10^{(-0.02x\ pscore+1)} \quad \textbf{[4]}$$

2.8.4 ***Categoría de la efectividad del programa de inspección.*** Los programas de inspección y la combinación de métodos NDE tales como visuales, ultrasónicos, radiográficos, etc., frecuencia y ubicación de las zonas a intervenir, varían en su efectividad para localizar y dimensionar el deterioro, y así determinar sus promedios de deterioro. Después de haber identificado los mecanismos de deterioro probables, se determina los métodos de más alta categoría de inspección con respecto a los mecanismos de deterioro que afecten la integridad del equipo.

Los factores de daño son determinados como una función de la efectividad de la inspección mediante 5 categorías de inspección. La efectividad actual de cualquier técnica de inspección depende de varios factores como los ya mencionados, entre ellos la pericia del inspector en los puntos de inspección seleccionados.

---

* [4] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 2 pag 2-19. API 581

Tabla 3. Categorías de Inspección Efectiva.

TIPO	CATEGORÍA DE LA EFECTIVIDAD CUALITATIVA DE LA INSPECCIÓN	DESCRIPCIÓN
A	Altamente Efectiva	Los métodos de inspección identificarán correctamente el estado real de los daños en casi todos los casos (confiabilidad del 80% al 100%).
B	Usualmente Efectiva	Los métodos de inspección identificarán correctamente el estado real de los daños la mayor parte de los casos (confiabilidad del 60% al 80%).
C	Regularmente Efectiva	Los métodos de inspección identificarán correctamente el estado real de los daños sobre la mitad de las veces (confiabilidad del 40% al 60%).
D	Pobremente Efectiva	Los métodos de inspección identificarán correctamente el estado verdadero del daño (confiabilidad del 20% al 40%).
E	Inefectiva	Los métodos de inspección proporcionarán ninguna o casi ninguna información de identifique correctamente el estado verdadero del daño y se consideran inefectivo para la detección del mecanismo de daño especifico (confiabilidad menor al 20%).

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 2 pag 2-19. API-581.

2.9 CONSECUENCIA

La evaluación del análisis de la consecuencia de falla en API RBI es realizada para ayudar a establecer una clasificación de los equipos en una base de riesgo bajo unos criterios de categorías cuantitativas. Las medidas de la consecuencia se

establecen de tal manera que se establezcan las prioridades para los programas de inspección. Se consideran consecuencias por:

- Daños a componentes
- Daños al personal
- Pérdidas de producción
- Impactos ambientales indeseables

2.9.1 ***Categorías de consecuencia.*** Las categorías de las principales consecuencia se analizan utilizando cuatro técnicas, entre ellas tenemos:

a) Consecuencias inflamables y explosivas

Se calculan utilizando arboles de eventos para determinar la probabilidad de ocurrencia o forma de dispersión del fluido almacenado, como lo dispersión segura, pool fires, flash fires, vapor cloud explosions (VCE), Fireball). La consecuencia de área puede ser determinada basándose en lesiones al personal y daños a componentes. Las pérdidas financieras son también determinadas basado en las áreas afectadas.

b) Consecuencias toxicas

Para determinar la consecuencia de área como resultado de la sobreexposición del personal a concentraciones toxicas dentro de una nube de vapor, se tiene en cuenta las situaciones en las que los fluidos son tóxicos e inflamables, la probabilidad de exposición a eventos tóxicos se elimina, debido a que las sustancias tóxicas se consumen con el fuego la consecuencia toxica es insignificante.

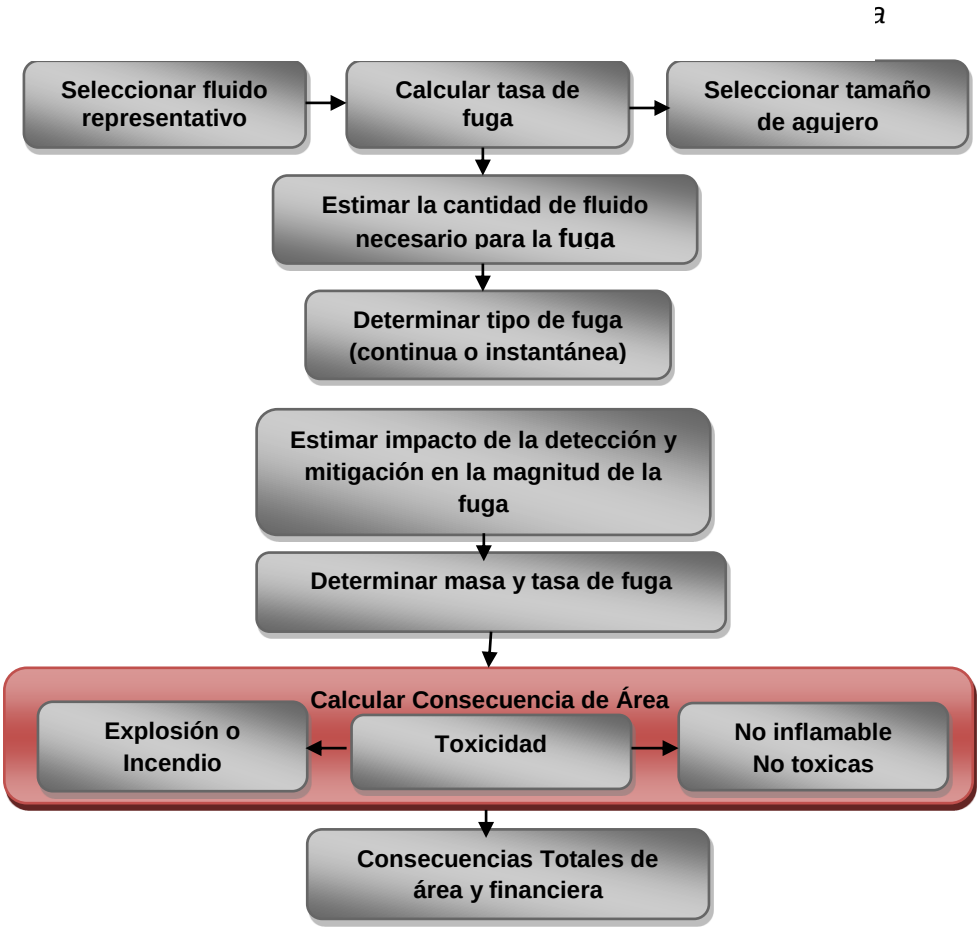
c) Consecuencia no inflamable – no toxica

Las emisiones no inflamables no toxicas también son consideradas, ya que pueden conllevar a graves consecuencias. Las sustancias químicas pueden generar salpicaduras y quemaduras por vapores a alta temperaturas; y es por ello que la consecuencia de este tipo se determina en base a las lesiones graves al personal.

d) Consecuencia financiera

El cálculo de las consecuencias financieras incluye las pérdidas por interrupción de producción y los costos asociados con emisiones al medio ambiente. Se estiman en función de los resultados de consecuencia inflamable y no inflamable. Las consecuencias ambientales se determinan directamente a partir de la masa disponible para la liberación o de la velocidad de liberación.

Figura 2. Procedimiento general para consecuencia de falla



Fuente: Los Autores

2.10 ***Análisis de riesgo.*** *El cálculo del riesgo puede ser determinado por la siguiente fórmula:*

$$\boldsymbol{R}\ (\boldsymbol{t}) = \ \boldsymbol{P_f}(\boldsymbol{t}).\boldsymbol{C}\ (\boldsymbol{t})$$ **[5]**

Dependiendo si el riesgo se expresa como una zona de impacto o en términos financieros:

$$\boldsymbol{R}\ (\boldsymbol{t}) = \ \boldsymbol{P_f}(\boldsymbol{t}).\boldsymbol{C}\ A \rightarrow$$ *Riesgo de Área* ***[6]***

$$\boldsymbol{R}\ (\boldsymbol{t}) = \ \boldsymbol{P_f}(\boldsymbol{t}).\boldsymbol{FC} \rightarrow$$ *Riesgo Financiero* ***[7]***

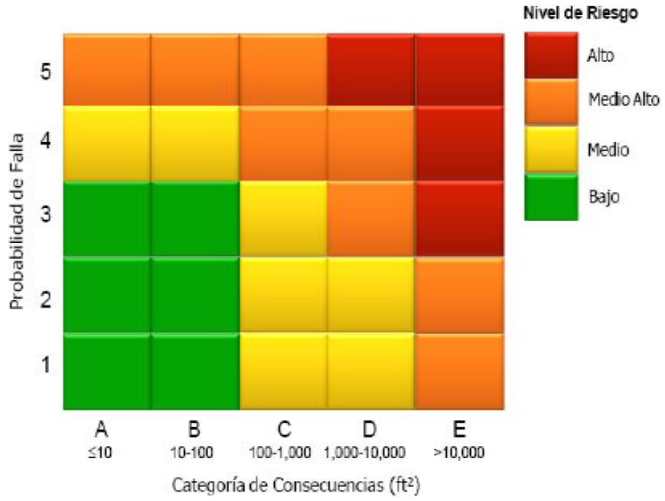
En estas ecuaciones, CA es el área de impacto, consecuencia expresada en unidades de área y FC es la consecuencia financiera expresada en términos económicos.

2.11 Matriz de riesgo. La presentación de los resultados en una matriz de riesgo es una forma efectiva de mostrar la distribución de los riesgos para los distintos componentes en una unidad de proceso sin valores numéricos. En la matriz de riesgo, las categorías de las consecuencias y probabilidades se organizan de tal manera que los componentes de más alto riesgo son en la parte superior derecha de la esquina. En la figura 3 se presenta la matriz de riesgo proporcionada por la norma para ubicar el equipo de acuerdo con los resultados obtenidos de probabilidad y consecuencia. Para categorizar el riesgo obtenido, bien sea de área o financiero para un componente se tiene en cuenta los rangos establecidos en la norma API RP 581, estos valores se presentan en las tablas 4 y 5 respectivamente.

---

*[5],[6], [7], AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 1 pag 1-14. API 581.

Figura 3. Matriz de Riesgo API RP 581



Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 1, pag 1-22. API-581.

Tabla 4.Rango de valores asociados con la probabilidad y consecuencia de área

Probability Category (1)		Consequence Category (2)	
Category	**Range**	**Category**	**Range (ft^2)**
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**	$CA > 10000$

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 1, pag 1-19. API-581.

Tabla 5. Rango de valores asociados con la probabilidad y consecuencia financiera

Probability Category (1)		Consequence Category (2)	
Category	**Range**	**Category**	**Range ($)**
1	$D_{f-total} \leq 2$	**A**	$FC \leq 10,000$
2	$2 < D_{f-total} \leq 20$	**B**	$10,000 < FC \leq 100,000$
3	$20 < D_{f-total} \leq 100$	**C**	$100,000 < FC \leq 1,000,000$
4	$100 < D_{f-total} \leq 1000$	**D**	$1,000,000 < FC \leq 10,000,000$
5	$100 < D_{f-total} \leq 1000$	**E**	$FC > 10,000,000$

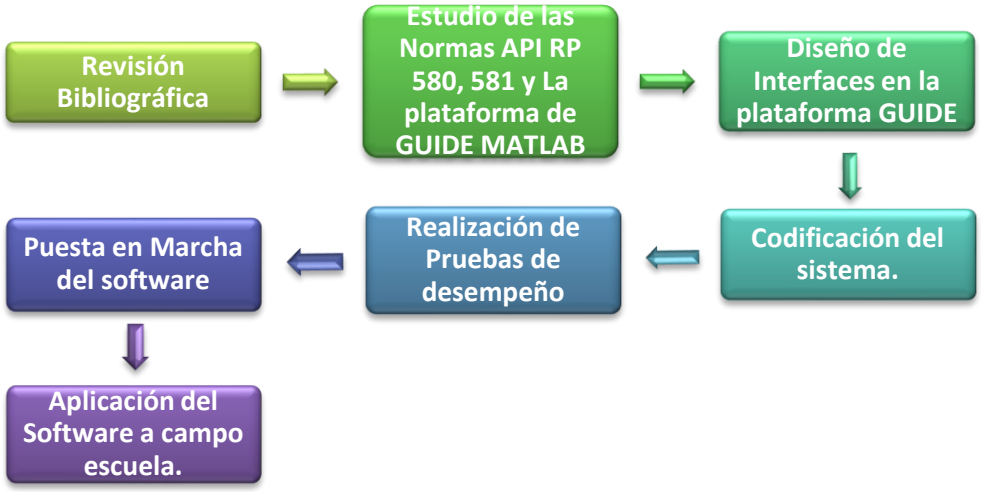
Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 1, pag 1-19. API-581.

2.12 ***Planes de inspección.*** Conociendo los mecanismos de falla y los intervalos de inspección que presenta cada equipo a evaluar, se determina el plan de inspección que contenga los ensayos no destructivos que permita monitorear cada uno de los mecanismos de daño y reducir la probabilidad de falla, alterando directamente nivel de riesgo debido a que se afecta una de las variables de las cuales depende. A partir de los resultados obtenidos en la inspección se generan una serie de recomendaciones necesarias para minimizar el riesgo. Además debe actualizarse la información o base de datos que exista del equipo evaluado.

3. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO

A continuación se presentan las etapas de ejecución de este trabajo de investigación. En términos generales, en la primera etapa del proyecto se recopilará la información que permita obtener una visión global sobre la problemática relacionada con la administración del riesgo basado en la norma actualizada API RP 581. Seguido, se consultarán los desarrollos hechos hasta el momento en la búsqueda de la solución, de tal manera que se visualice una perspectiva sobre las posibles soluciones, se planteará el diseño de las interfaces y codificación del software en matlab que por medio de unas pruebas de desempeño se logre la aplicación del software a campo escuela colorado.

Figura 4. Metodología de trabajo



Fuente: Los Autores.

3.1 GUIDE MATLAB

La plataforma de GUI de MATLAB permite realizar tareas de forma interactiva a través de controles, como botones y barras de desplazamiento entre otros; los cuales ayudan a una mejor interacción entre el entorno grafico desarrollado

(GUIDE) y el usuario. Para obtener más control sobre el diseño y el desarrollo de una GUIDE, se crea un código de MATLAB que define todas las propiedades de los componentes y comportamientos; que finalmente regirán los resultados de los cálculos del software.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA

Mediante la utilización del entorno para la creación de interfaces gráficas en MATLAB, se diseña un software basado en la metodología cuantitativa de inspección basada en riesgo (API 581). El cual se trata de una herramienta computacional llamada RISKMA (Risk-Management Integrity) y permite la generación de planes de inspección para equipos estáticos basado en el riesgo asociado por medio de la probabilidad y consecuencia de falla de cada equipo evaluado. Mediante el ingreso de los datos reportados en los históricos de los equipos o de aquellos recolectados en la última inspección, se determinan factores de riesgo que plasmados en una matriz, en donde se seleccionan las tareas adecuadas de prevención y mitigación de los mecanismos de deterioro, estimando de esta manera la frecuencia de inspección.

GUIDE es un entorno de programación visual disponible en MATLAB para realizar y ejecutar programas que necesiten ingreso continuo de datos. Tiene las características básicas de todos los programas visuales como Visual Basic o Visual C++.

3.3 SECCIONES PRESENTES EN LA INTERFAZ PRINCIPAL DEL SOFTWARE

Para establecer las secciones presentes en la interfaz principal se procede a realizar el siguiente diseño lógico.

3.3.1 ***Diseño lógico.*** El diseño lógico de los datos permite que estos se puedan representar usando de manera eficiente posibles recursos y modelar

restricciones disponibles en el modelo lógico. A continuación se presenta el diseño lógico establecido para RISKMA.

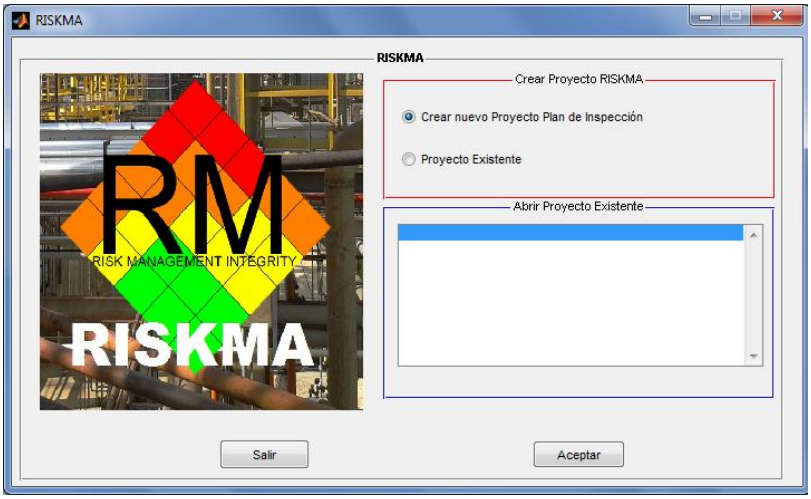
Figura 5. Diseño lógico RISKMA

Fuente: Los Autores.

3.4 DESCRIPCIÓN LAS INTERFACES PRESENTES EN CADA ETAPA.

Esta herramienta que permite la creación de proyectos de integridad mediante la agrupación de plantas y el análisis de equipos dentro de un lazo de corrosión para la determinación del respectivo riesgo plasmado en una matriz de Probabilidad Vs Consecuencia. A la vez me permite buscar en su base de datos los diferentes análisis de riesgo que se hayan realizado anteriormente, para de esta forma tener un seguimiento de la integridad de los equipos, así como un plan de mantenimiento de los mismos. En la figura 6 se presenta la interfaz principal y las opciones de ingreso de datos, es decir si se realiza un nuevo proyecto o se requiere hacer una reevaluación en algún proyecto existente.

Figura 6. Interfaz de principal de RISKMA.



Fuente: Los Autores.

3.5 ESTRUCTURA DE FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE BASADO EN LA METODOLOGIA DE INSPECCION BASDA EN RIESGO DE API RP 581.

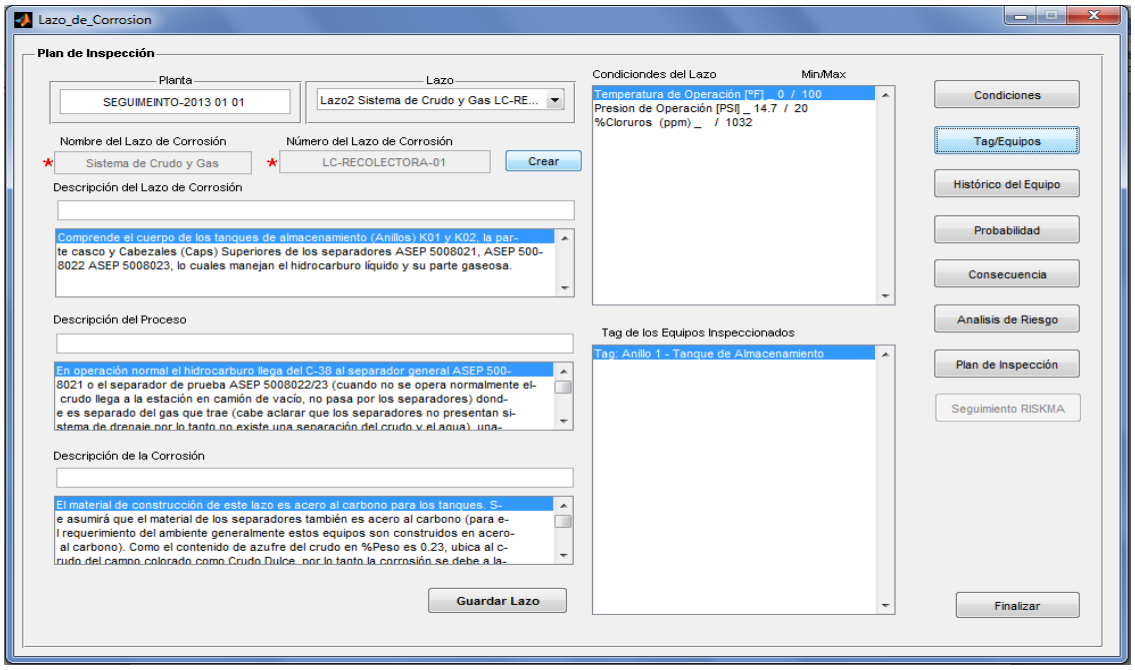
3.5.1 ***Plantas.*** La interfaz de plantas nos permite registrar los siguientes datos:

- Compañía
- Dependencia
- Planta
- Fecha de Inspección (Año, mes y día de la primera inspección)

3.5.2 ***Lazos de corrosión.*** La creación de lazos de corrosión consiste en determinar un grupo de equipos los cuales tienes similares condiciones de operación, Mecanismos de daño y material de construcción. Como se observa en la Figura 7 se permite realizar en esta interfaz una descripción del lazo en donde se describen los equipos asociados a este, la descripción del proceso que acompaña los equipos de este lazo y la descripción de corrosión, en la cual se describe los diferentes mecanismos de daño asociados al lazo de corrosión. Por medio de esta interfaz RISKMA permite organizar el estudio de inspección basada en riesgo (RBI), de tal forma que

se administre para cada equipo perteneciente a un lazo de corrosión una probabilidad y consecuencia de área y financiera.

Figura 7. Interfaz para ingreso de datos Lazos de Corrosión.



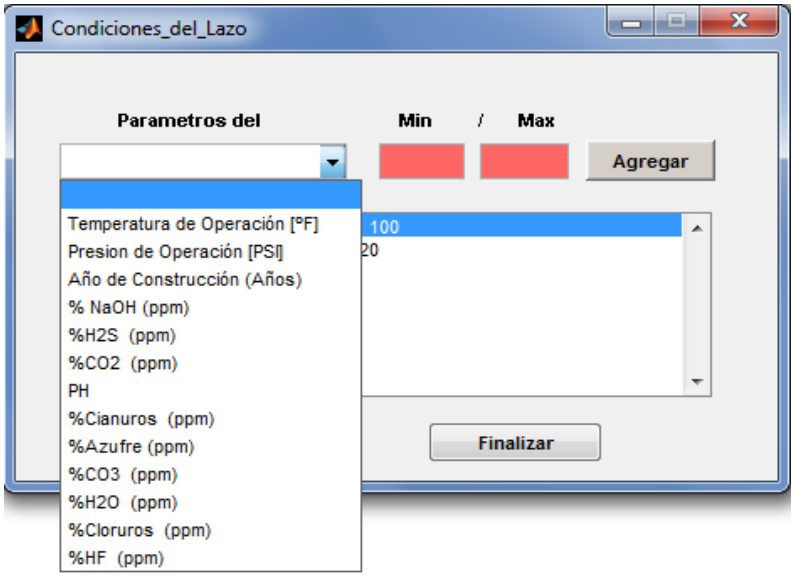
Fuente: Los Autores.

3.5.3 ***Condiciones del lazo.*** Las condiciones del lazo hacen referencia a ciertas características y condiciones similares en los procesos de operación y/o equipos involucrados en el lazo de corrosión, es decir parámetros como presión, temperatura, material de construcción y fluido transportado. En la figura 8 se presenta el formato de ingreso de datos.

3.5.4 ***Registro de equipos por tag.*** El Tag de equipos es un consecutivo usado para identificar con exactitud cada equipo perteneciente al lazo de corrosión en el cual están descritos algunos datos principales como son fecha de instalación y datos propios asignados por la empresa. La interfaz presenta botones en donde aparecen algunas opciones para seleccionar el tipo de

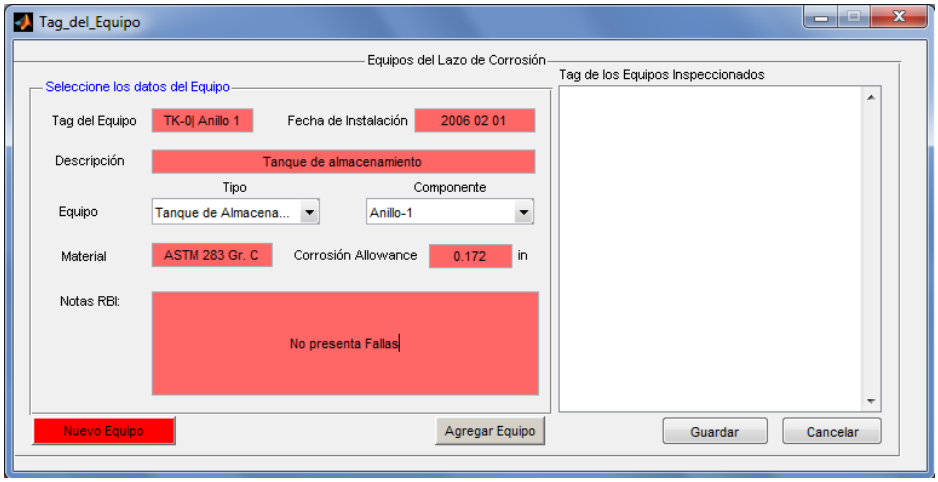
equipo y el componente, conjunto a esto existen otras opciones editables por el usuario como son: tag de equipo, fecha de instalación, descripción del equipo, material de construcción, rata de corrosión y un espacio llamado notas RBI, con esto el inspector tendrá la opción de describir características intrínsecas del componente sometido a inspección. Por ultimo encontramos el botón “cargar equipo” usado para guardar tag de un equipo y procede a limpiar la ventana para facilitar el registro de nuevos tag. En la figura 9 encontramos la ventana de ingreso de datos.

Figura 8. Interfaz de condiciones lazo de corrosión.



Fuente: Los Autores.

Figura 9. Interfaz para ingreso de datos TAG de Equipo.



Fuente: Los Autores.

3.6 HISTORICO DE EQUIPOS.

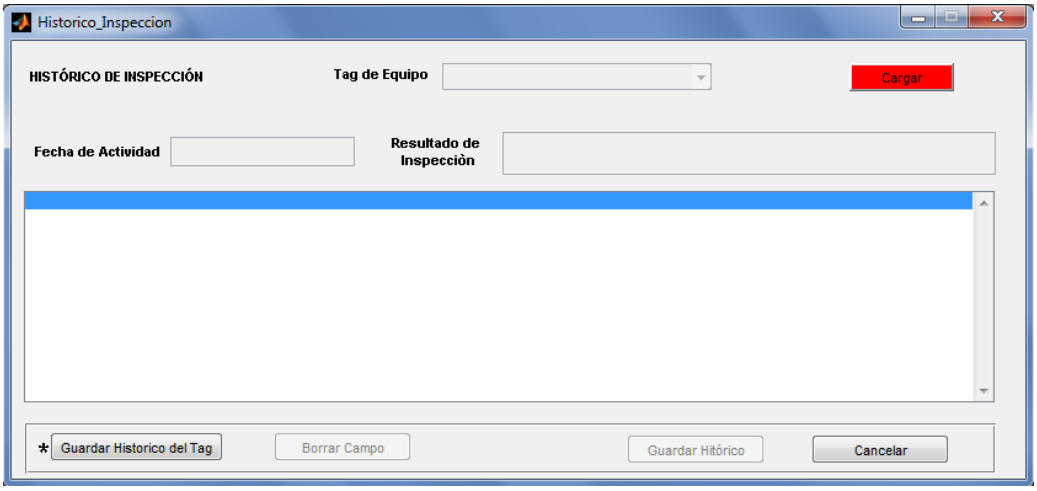
Los históricos de fabricación, montaje, operación mantenimiento, inspección y parámetros operativos, son información fundamental para el desarrollo de la RBI. Mediante el registro de las diferentes actividades de inspección realizadas a cada equipo se puede tener un histórico actualizado y debidamente registrado con fecha de inspección, con el propósito de obtener siempre un histórico actualizado de los cambios o variaciones en la operación de los equipos. Por lo cual se tiene una interfaz en la cual se podrán registrar los diferentes sucesos de operación, actividades de inspección y control de cambios de material que se realice a cada equipo con su respectiva fecha. En la figura 10 encontramos la interfaz para el ingreso de datos para históricos de equipos.

3.7 CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE FALLA

El factor de daño ajusta la frecuencia de falla genérica basado en los mecanismos de daño a los que el componente está sujeto, y considera la susceptibilidad al mecanismo de daño y / o la velocidad con la que el daño se acumula. El factor de daño también toma a consideración los datos históricos de inspección y la eficacia

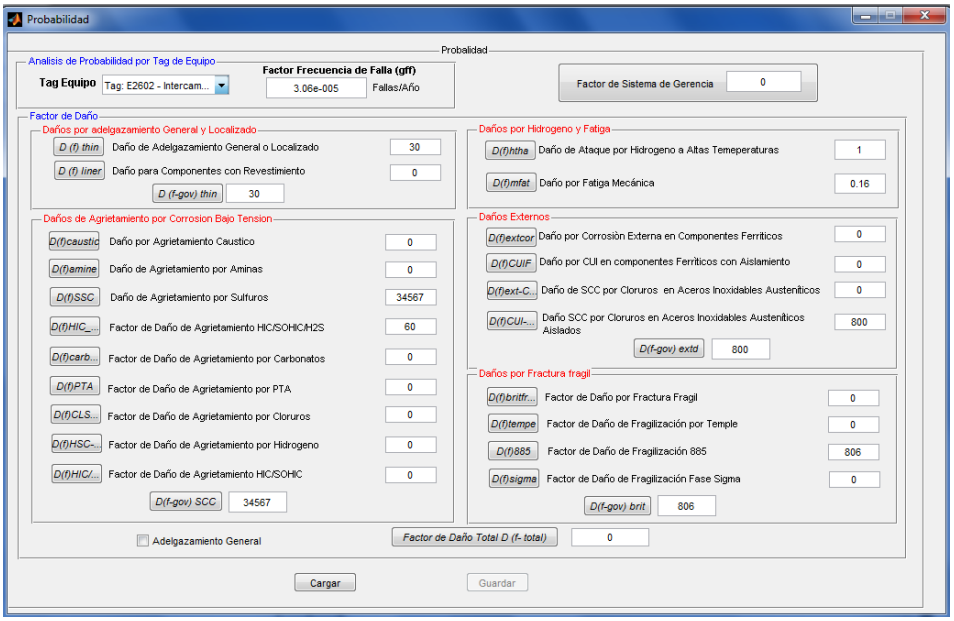
de inspecciones pasadas y futuras, el factor sistemas de gerenciamiento, se ajusta a la influencia del sistema de gestión establecido en la planta para su la integridad mecánica.

Figura 10. Interfaz para ingreso de Históricos de Inspección de Equipos.



Fuente: Los Autores.

Figura 11. Interfaz de probabilidad, en la que se determina el valor cuantitativo del Factor Frecuencia de Falla (gff) Generica (Df (t)), Factor de Daño y Factor Sistema de Gerenciamiento (FMS).



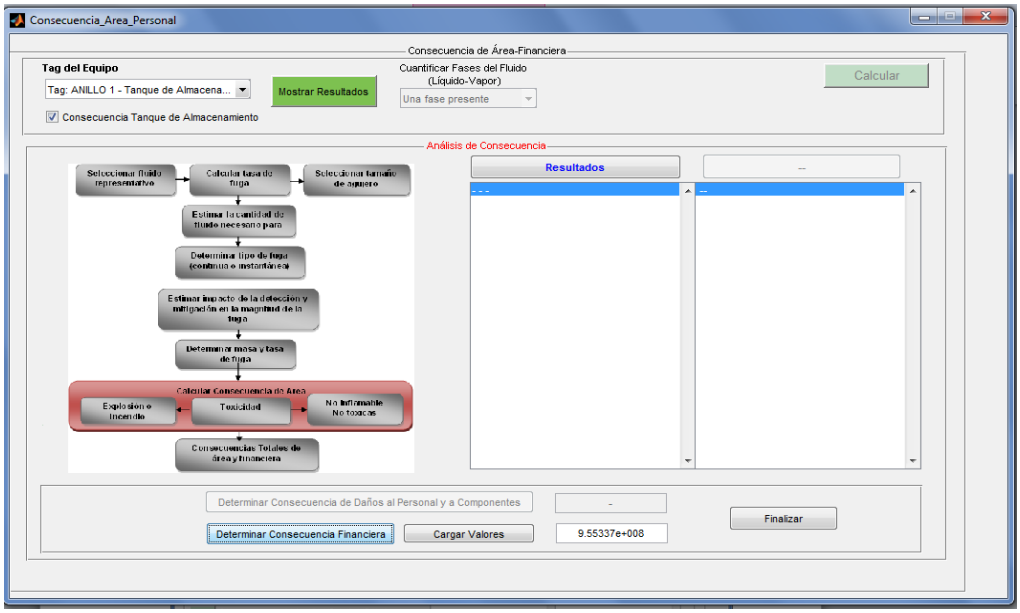
Fuente: Los Autores.

3.8 CONSECUENCIA

Es la evaluación de la consecuencia de daño al personal, componentes y equipos donde involucra el fluido y se evalúan cuatro aspectos importantes e intrínsecos, estos son: Flamabilidad, Toxicidad, No toxico – No Inflamable y consecuencia Financiera. En la figura 12 encontramos el procedimiento general para Consecuencia de Falla, el cual se trata de una metodología según la norma API RP 581 y que es adoptada paso a paso por el software para determinar la consecuencia de área y financiera.

A continuación de se presenta la interfaz de datos para determinar la consecuencia de área personal.

Figura 12. Interfaz de ingreso de datos para Consecuencia de Área Personal.



Fuente: Los Autores.

3.8.1 ***Valor cuantitativo del riesgo.*** Al finalizar la evaluación de la probabilidad de falla y consecuencia de liberación de un fluido se prosigue a determinar y categorizar de manera cuantitativa el riesgo, mediante una matriz de riesgo en función del área y financiera. Los resultados de probabilidad están dados de “1” a “5”, siendo “1” la probabilidad más baja y “5” la probabilidad más alta

y se presenta en el eje de las ordenadas. Los resultados de consecuencia se dan desde la letra “A” hasta la letra “E”, siendo “A” la consecuencia más baja y “E” la consecuencia más alta, estos datos se encuentran en el eje de las abscisas. La intersección de los datos de probabilidad y consecuencia nos arroja el nivel de riesgo en el que se encuentra el componente evaluado mediante la metodología RBI, clasificándose en una escala de colores que va de la siguiente manera:

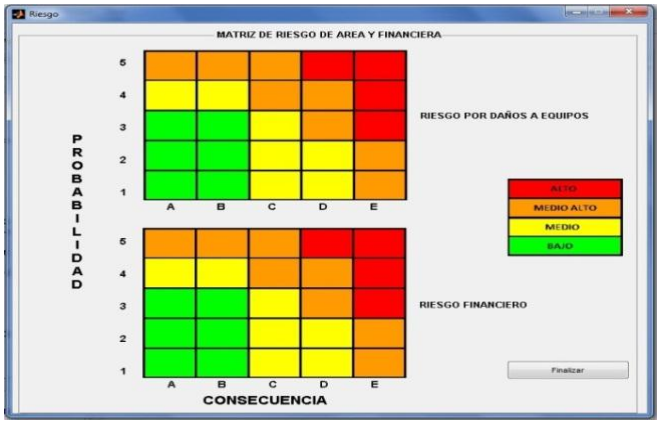
Tabla 6. Nomenclatura de símbolos empleados para describir la prioridad en las acciones de mantenimiento correctivo, preventivo y/o predictivo.

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
	Riesgo muy alto. Confiabilidad nula o muy baja. La estructura o componente requiere acciones correctivas inmediatas de mantenimiento o cambio, por el alto grado de deterioro o peligro que representa.
	Riesgo Alto. Confiabilidad Baja. La estructura o componente necesita acciones correctivas a corto plazo, con el fin de evitar accidentes o paradas en la planta.
	Riesgo medio. Confiabilidad media. La estructura o componente requiere inspecciones y mantenimiento periódico para garantizar su correcto funcionamiento y la seguridad del personal.
	Riesgo bajo o mínimo. Confiabilidad Alta. La estructura o componente no presenta inconvenientes, aunque requiere mantenimiento preventivo y/o predictivo para conservar sus condiciones y aumentar su vida útil.

Fuente: Los Autores.

En la figura 13 se presenta la interfaz en la que se van a clasificar los equipos de acuerdo a los resultados obtenidos de probabilidad y consecuencia.

Figura 13. Matriz de Riesgo de Área y Financiera.

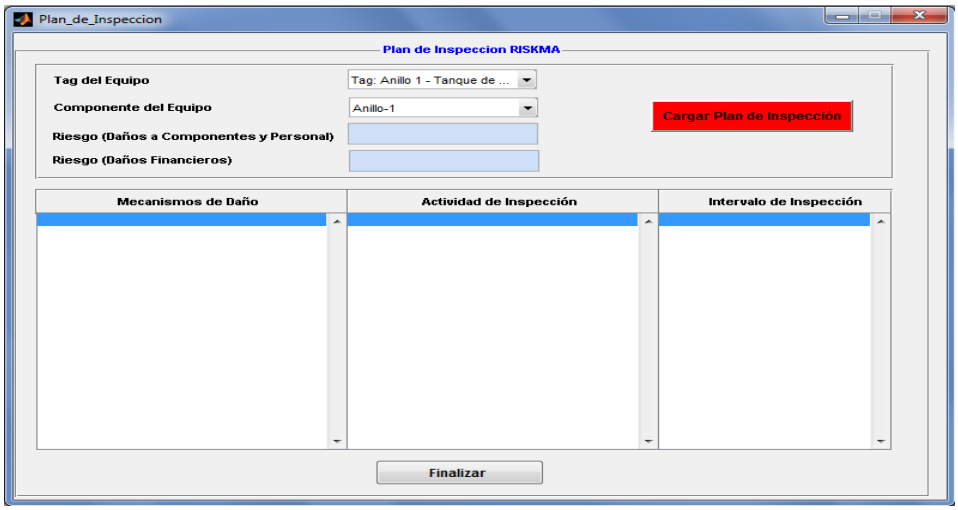


Fuente: Los Autores.

3.9 PLAN DE INSPECCIÓN

El plan de inspección corresponde a un resultado de la metodología realizada por el usuario, que mediante el software determina un nivel de riesgo y que respecto a este se establece un plan de inspección; teniendo en cuenta parámetros como los mecanismos de daño asociados al componente, la correspondiente actividad de inspección (Tipo A) y un intervalo de inspección. En la figura 14 se presenta el formato impreso de plan de inspección entregado por el software.

Figura 14. Formato plan de Inspección.

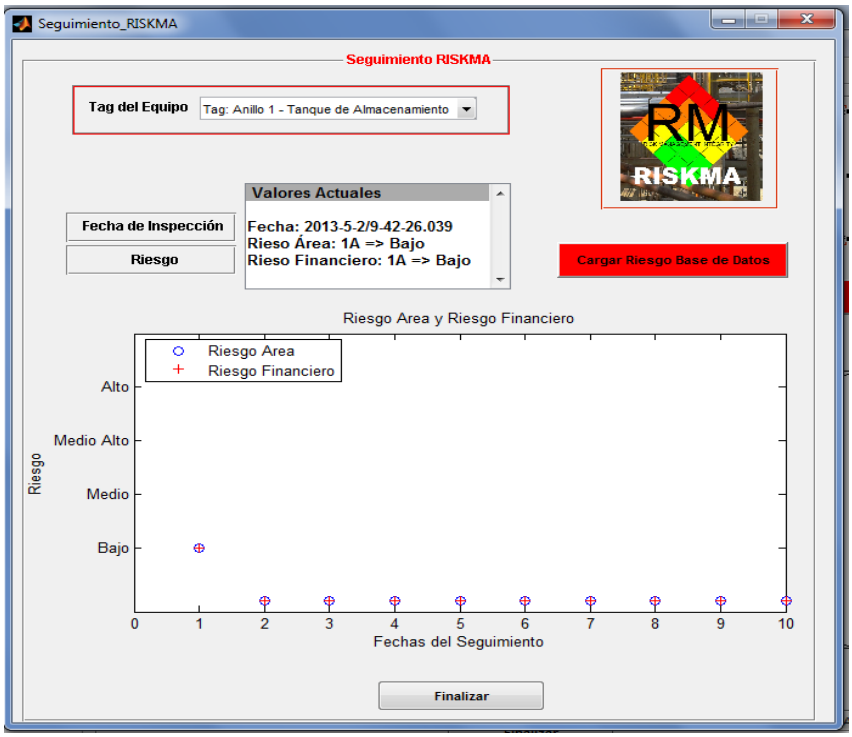


Fuente: Los Autores.

3.10 SEGUIMIENTO RISKMA.

El software RISKMA además de calcular riesgos y plasmar planes de inspección para cada componente de los equipos evaluados, también posee una estructura de programación basada en el tratamiento de datos, lo cual hace que el software tenga la posibilidad de dar al usuario las opciones de guardar proyectos. Por lo tanto, se tiene acceso a la información de una inspección que se haya realizado en una fecha específica y poder modificar los datos de dicha inspección para convertirla en una nueva evaluación del riesgo. La interfaz de seguimiento RISKMA plantea un panorama de riesgo para cada componente atreves del tiempo, dando como resultado un seguimiento de la fluctuación del riesgo, y así dar al usuario la opción de poder plantear alternativas que ayuden a la mitigación del riesgo.

Figura 15. Interfaz seguimiento RISKMA.

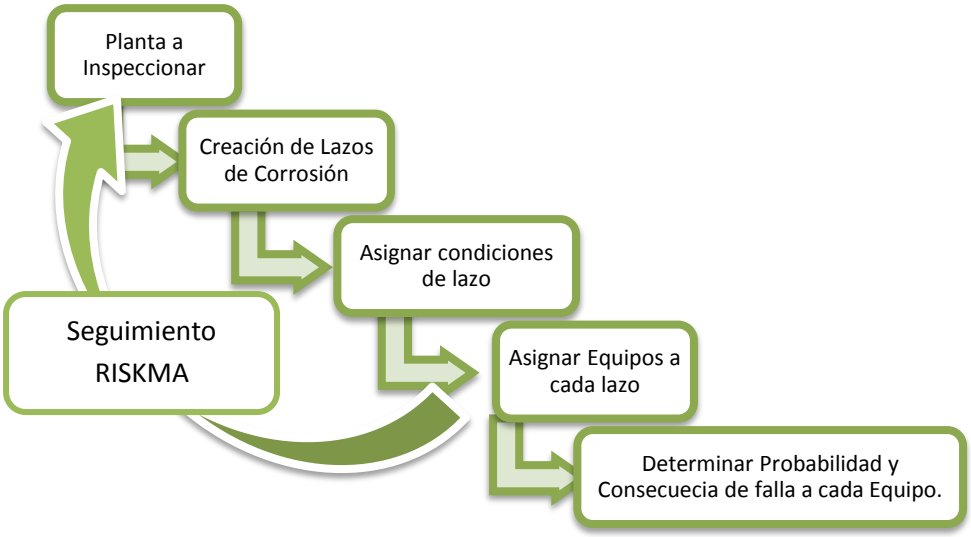


Fuente: Los Autores.

3.11 Metodología para el manejo de riskma.

Para el manejo del software se establece una metodología, la cual debe realizarse para cada equipo agrupado a un lazo de corrosión, para así de esta manera determinar el riesgo de área y financiero para cada equipo.

Figura 16. Metodología de manejo RISKMA



Fuente: Los Autores

4. APLICACIÓN DE SOFTWARE RISKMA AL CAMPO ESCUELA COLORADO.

4.1 LÍMITES DE INSPECCIÓN

La metodología de inspección basada en riesgo se realizó en la Estación Recolectora del Campo Escuela Colorado; Los recipientes evaluados son:

- Tanque de almacenamiento de crudo T 01;
- Tanque de almacenamiento de crudo T 02;
- Separador General S-001;
- Separador de prueba conformado por los tambores S-002 y S-003.
- Además es necesario evaluar la tubería de gas, crudo y agua identificados con el Tag Di"-GAS-LCG-A53-G01, Di"-OIL-LCC-A53-G02 y Di"-WAT-LCA-A53-G03.

4.2 GRUPO DE TRABAJO

Para efectos del siguiente proyecto, los integrantes del equipo de trabajo serán apoyados por los Ingenieros IVAN URIBE PEREZ Y JOHN JAIRO NIÑO GÓMEZ responsables del proyecto Gerenciamiento de la Integridad Estructural de Campo Escuela Colorado, quienes en su facultad de trabajo permiten el suministro de la información necesaria para realizar una evaluación de integridad de la estación recolectora.

4.3 HISTÓRICOS DE EQUIPOS

Los históricos de fabricación de los tanques fueron suministrados en el proyecto DESARROLLO DE UN PANORAMA DE RIESGO DE LA ESTACIÓN SEPARADORA DEL CAMPO ESCUELA COLORADO TOMANDO COMO BASE

LAS NORMAS API-580 Y API RP-581, desarrollado por Olga Lucia Pérez Galán y Astrid Pérez Zambrano en el año 2008; los históricos de las tuberías y separadores no existen. Los tanques de almacenamiento de crudo y las líneas internas a la estación son relativamente nuevas (año de construcción 2006) en los históricos no se encontró ningún reporte de fallas, por lo tanto no existen histogramas de fallas.

4.4 LAZOS DE CORROSIÓN

Para realizar la evaluación de integridad se plantearon los siguientes lazos de corrosión teniendo en cuenta los sistemas de operación: Aguas agrias, Crudo y Gas).

4.4.1 **Lc-recolectora-01 "sistema de crudo".** Descripción del lazo. Comprende el cuerpo (anillos) de los tanques de almacenamiento T01 y T02, la parte casco de los separadores S-001, S-002 y S-003 y las líneas de la planta recolectora que se encuentran dentro de los límites de trabajo.

a) Descripción del proceso

En operación normal el hidrocarburo llega del C-38 al separador general S-001 o al separadores de prueba S-001/2 (cuando no se opera normalmente el crudo llega a la estación en camión de vacío, no pasa por los separadores) donde es separado del gas que trae (cabe aclarar que los separadores no presentan sistema de drenaje por lo tanto no existe una separación del crudo y el agua), una vez separado el hidrocarburo pasa a los tanques de almacenamiento T 01 y T 02 para su almacenamiento hasta él envió de este a la estación La Cira – 07.

a) Descripción de la corrosión

El material de construcción de este lazo es acero al carbono para los tanques. Se asumirá que el material de los separadores también es acero al carbono (para el requerimiento del ambiente generalmente estos equipos son construidos en acero

al carbono). Teniendo en cuenta el servicio de estos equipos para el almacenamiento de crudo, se debe retomar el estudio de la composición química de este; y se trata de un crudo bastante limpio, libre de H2S y con un porcentaje de azufre de 0.23%; lo cual lo categoriza como un crudo dulce.

4.4.2 **Lc-recolectora-02 "sistema de gas".** Descripción del lazo. Comprende la parte de los caps superiores de los separadores y las líneas de la planta recolectora que se encuentran dentro de los límites establecidos, y que manejan el transporte de gas.

a) Descripción del proceso

Los gases que se escapan de los tanques quedan confinados al interior de los tanques y en la parte superior de los separadores, para después salir por la tubería de transporte de gas hacia la tea.

b) Descripción de la corrosión

El material de construcción de los equipos y tuberías de este lazo al igual que el anterior es acero al carbono. El gas separado del crudo contiene CO2, que es el gas que combinado con el agua genera como resultado de la reacción ácidos corrosivos.

4.4.3 **Lc-recolectora-03 "sistema de agua".** Descripción del lazo. Comprende la parte inferior de los separadores, el fondo de los tanques y las líneas de transporte de agua; debido a que los separadores son bifásicos y no permite la separación agua-crudo, teniendo como resultado agua remanente parte inferior de estos equipos.

a) Descripción del proceso

Como los equipos no permiten el drenaje del agua que contiene el crudo y teniendo en cuenta la densidad del crudo (0.8443 g/Ml); hacen que este sea

menos denso que el agua, generando dos fases en el recipiente. En la parte superior el crudo y el agua en las zonas inferiores de los tanques y separadores.

b) Descripción de la corrosión

El material de construcción de los equipos de este lazo es acero al carbono. Las aguas agrias contienen principalmente los siguientes contaminantes CN-, Hidrocarburos, H2S, cloruros, CO2, O2, NH3; lo que hace de estas aguas un ambiente corrosivo.

4.5 USO DEL SOFTWARE PARA EVALUAR LOS EQUIPOS DE ESTACIÓN RECOLECTORA DEL CAMPO ESCUELA COLORADO.

Para hacer uso del software fue necesario hacer una recolección de datos de inspecciones realizadas a la estación recolectora, históricos de equipos, resultados de inspecciones realizadas en los equipos, algunos proyectos de grado etc. De acuerdo a los datos suministrados por campo escuela colorado en relación a los análisis cromatográficos y de composición química de los fluidos, los históricos de construcción e inspección de los equipos evaluados; se realizó una equiparación entre los datos suministrados y los criterios de evaluación para los mecanismos de daño.

Como resultado de este ejercicio y teniendo en cuenta los criterios de asignación dados por la norma API RP 581, se obtuvieron tres mecanismos de daño, los cuales son presentados en la tabla 7.

Tabla 7. Identificación de mecanismos de daño.

MECANISMO DE DAÑO	CRITERIOS DE ASIGNACIÓN	SIGLA DE IDENTIFICACIÓN
ADELGAZAMIENTO GENERAL	Evaluación de espesores	M-01
DAÑO A RECUBRIMIENTO	Evaluación del recubrimiento	M-02
AGRIETAMIENTO POR CARBONATOS	Material de construcción Presencia de carbonatos en el fluido	M-03

Fuente: Autores

Tabla 8. Equipos evaluados en el Campo Escuela Colorado.

EQUIPO	COMPONENTE	LAZO DE CORROSIÓN	MEC. DE DAÑO	CONSECUENCIA DE ÁREA	CONSECUENCIA FINANCIERA
Tanque de almacenamiento de crudo T 01	ANILLO 1	LC-01	M-01 M-02	NO	SI
	ANILLO 2	LC-01	M-01 M-02	NO	SI
	ANILLO 3	LC-01	M-01 M-02	NO	SI
	FONDO	LC-03	M-01 M-03	NO	SI
Tanque de almacenamiento de crudo T 02	ANILLO 1	LC-01	M-01 M-02	NO	SI
	ANILLO 2	LC-01	M-01 M-02	NO	SI
	ANILLO 3	LC-01	M-01 M-02	NO	SI
	FONDO	LC-03	M-01 M-03	NO	SI
S-001	CAPS SUPERIOR	LC-02	M-01 M-02	SI	SI
	CASCO	LC-01	M-01 M-02	SI	SI
	CAPS INFERIOR	LC-03	M-01 M-03	SI	SI
S-002	CAPS SUPERIOR	LC-02	M-01 M-02	SI	SI
	CASCO	LC-01	M-01 M-02	SI	SI
	CAPS INFERIOR	LC-03	M-01 M-03	SI	SI
S-003	CAPS SUPERIOR	LC-02	M-01 M-02	SI	SI
	CASCO	LC-01	M-01 M-02	SI	SI
	CAPS INFERIOR	LC-03	M-01 M-03	SI	SI
3”-GAS-LCG A53-G01	TUBERÍA	LC-02	M-01 M-02	SI	SI
4”-OIL-LCC-A53-G02	TUBERÍA	LC-01	M-01 M-02	SI	SI
4”-WAT-LCA-A53-G03.	TUBERÍA	LC-03	M-01 M-03	SI	SI

Fuente: Autores.

4.6 DATOS NECESARIOS PARA DETERMINAR LA PROBABILIDAD Y CONSECUENCIA DE FALLA PARA LOS EQUIPOS DE LA PLANTA RECOLECTORA DE CAMPO ESCUELA COLORADO

4.6.1 ***Calculo del factor sistema de gerencia.*** Para obtener el valor del factor de sistema de gerencia se realizaron una serie de entrevistas a diferentes departamentos de campo escuela colorado; estos se seleccionaron de acuerdo a su estructura organizacional. En la tabla 9 se especifica el puntaje obtenido en dichas entrevistas.

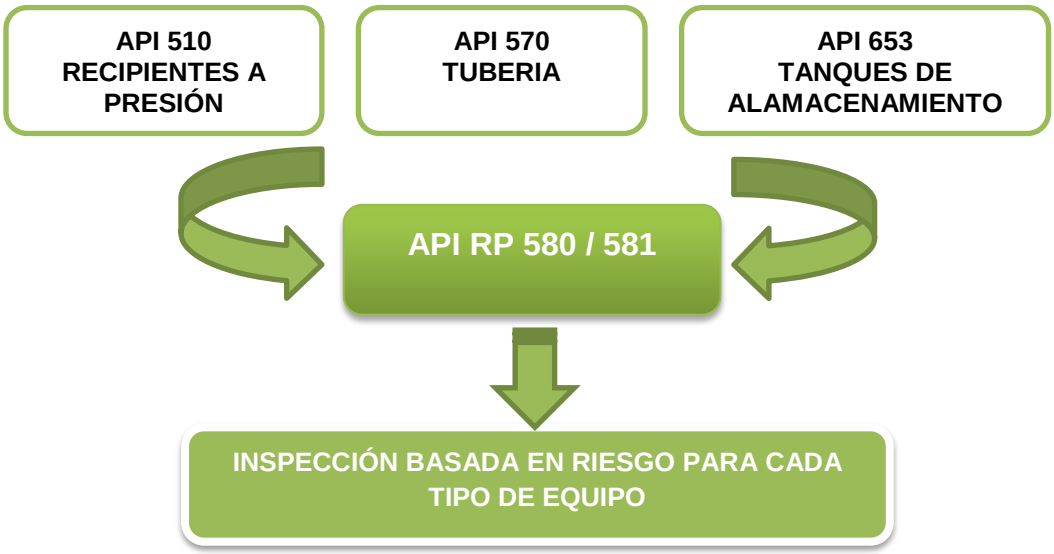
Tabla 9. Datos necesarios para calcular el factor sistema de gerencia.

DEPARTAMENTO	PUNTAJE
Organismo Operacional	81
Departamento de Seguridad	123
Coordinación de Inspección	42
Departamento de capacitación	50
Puntaje Total	296
Factor de Sistema de Gerencia	**2.558**

Fuente: Autores

Para la evaluación de riesgo de área y financiero se tiene en cuenta el tipo de equipo a evaluar, ya que cada uno difiere en la metodología a aplicar para obtener un resultado cuantitativo del riesgo. Para nuestro caso utilizaremos los procedimientos descritos en API RP 581, tomando como referencia las normas API 510, 570 y 653 para grupos de equipos como recipientes a presión, tubería y tanques de almacenamiento respectivamente.

Figura 17. Procedimientos de inspección utilizados para evaluar los equipos del C.E.C.



Fuente: Los Autores.

Los siguientes datos fueron tomados del proyecto "DESARROLLO DE UN PANORAMA DE RIESGO DE LA ESTACIÓN SEPARADORA DEL CAMPO ESCUELA COLORADO TOMANDO COMO BASE LAS NORMAS API-580 Y API RP-581", desarrollado en la estación separadora del campo escuela colorado por Olga Lucia Pérez Galán y Astrid Pérez Zambrano en el año 2008.

Para determinar los factores asociados a los mecanismos de daño y consecuencia de área y financiera en cada componente, se necesitan una seria de datos para la evaluación de cada equipo, los cuales se presentan en las tablas 10, 11, 12, pero cabe denotar que para cada componente varía de acuerdo al análisis de consecuencia y los mecanismos de daño presentes. Para este caso se presenta un ejemplo con las tablas de los datos necesarios para la evolución de riesgo de los equipos en campo escuela.

4.6.2 Tanques de almacenamiento.

Tabla 10. Información tanques T01 y T02.

DATOS	TANQUE T01	TANQUE T02
Número Inspecciones	1	1
Categoría de inspección efectiva	D	D
Rata de corrosión	3 Mpy	3 Mpy
Tiempo en servicio desde la última inspección	5 años	5 años
Espesor original	0,187 In	0,187 In
Espesor mínimo:	0,0145 in	0,0144 in
Ultima lectura espesor:	0,266 in	0,263 in
(C.A) Corrosión Allowance	0,172 in	0,172 in
Tipo de Fluido	Crudo	Crudo
Fase almacenada del Fluido	Liquida	Liquida
Barrera de protección	Si	Si
Condición del recubrimiento	Promedio	Promedio
Posee un plan de mantenimiento	No	No
Estado de asentamientos	No inspeccionado	No inspeccionado
Laminas soldadas	Si	Si
Tipo de suelo	Arena Arcillosa	Arena Arcillosa
Diámetro del tanque (ft)	21,87	21,87
Altura del tanque (ft)	8,28	8,28
Altura de llenado (ft)	7,87.	7,87.
Altura del anillo (ft)	6,02; 2,01; 0,24.	6,03; 2,00; 0,24.
Costo en parada por día US/día	21,774.63	21,774.63
Costo en perdida de producción US	19,052.80	19,052.80
Factor de frecuencia de falla	0.0001	0.0001
Factor de sistema de gerencia	0.265	0.265

Fuente: los Autores

4.6.3 Recipientes a presión.

Tabla 11. Información separadores crudo gas.

DATOS SEPARADORES	S-001	S-002	S-003
Número Inspecciones	1	1	1
Categoría de Inspección Efectiva	D	D	D
Rata de Corrosión	3 Mpy	3 Mpy	3 Mpy
Tiempo en servicio desde la última inspección	5 años	5 años	5 años
Espesor original	0,370 In	0,351 In	0,369 In
Espesor mínimo:	0,0343 in	0,0165 in	0,0219 in
Ultima Lectura espesor	0,427 in	0,482 in	0,489 in
(C.A) Corrosión Allowance	0,0625 in	0,0625 in	0,0625 in
Tipo de Fluido	Crudo/gas/agua	Crudo/gas/agua	Crudo/gas/agua
Fase del Fluido Almacenado	Liquido/Gas	Liquido/Gas	Liquido/Gas
Temperatura de Servicio (°F)	100	100	100
Presión de Servicio (°F)	20	20	20
Masa del Componente (Lbs)	2419,15	2419,15	2419,15
Masas Asociadas (Lbs)	0	0	0
Diámetro (Tubería o recipiente) (in)	49.488	25.039	30.039
Existe Sistema de Aislamiento en caso de Fugas	si	Si	Si
Existe Sistema de Detección de Fugas	No	No	No
Existen sustancias tóxicas en el proceso	No	No	No
Factor de frecuencia de falla	3.06e-005	3.06e-005	3.06e-005
Factor sistema gerencia	0.265	0.265	0.265

Fuente: Los Autores.

4.6.4 Tubería.

Tabla 12. Información tubería crudo, agua y gas.

DATOS TUBERIA	CRUDO 4"	GAS 3"	AGUA 4 "
Tiempo en servicio desde la última inspección	5 años	5 años	5 años
Espesor Original (in)	0,237	0,216	0,237
Ultima Lectura de Espesor (con o sin cladding)	0,234	0,219	0,234
Rata de Corrosión metal Base	3 mpy	3 mpy	3 mpy
C.A Corrosión Allowance	0.125	0.125	0.125
Espesor Mínimo	0,208	0,201	0,208
Monitoreo On-line (Solo Tubería)	No	No	No
Puntos Muertos (Solo tubería)	No	No	No
Puntos de Inyección (Solo tubería)	No	No	No
Tipo de Recubrimiento	Orgánico	Orgánico	Orgánico
Condición del Recubrimiento	Promedio	Promedio	Promedio
Temperatura de Operación (°F)	100	100	100
Presión de Operación (PSI)	130	130	130
Marcas de Calentamiento	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Existencia de Grietas	No	No	No
El equipo en su fabricación posee PWHT	Si	Si	Si
Presencia de Fugas de Vapor	No	No	No
Tiempo en servicio	7 años	7 años	7 años
Factor de frecuencia de falla			
Factor sistema de gerencia	0.265	0.265	0.265

Fuente: Los Autores

5. RESULTADOS FINALES

A continuación se presentan los resultados entregados por el software RISKMA de acuerdo al ingreso de datos de inspección registrados en el capítulo anterior para cada uno de los equipos intervenidos.

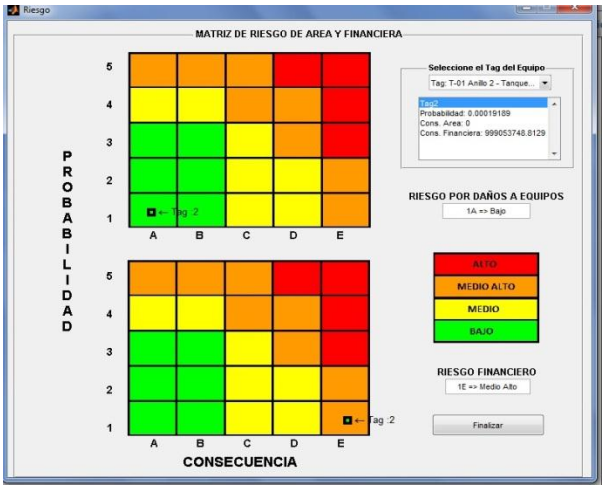
5.1 ESPECIFICACIONES DE PRUEBA Y CÁLCULOS DEL SOFTWARE

Para realizar una validación de cálculos del software se realizaron unas pruebas preliminares con datos que solo tenían como objetivo obtener la veracidad de dichos cálculos establecidos en la norma API 581 para probabilidad y consecuencia, obteniéndose de esta manera el resultado del riesgo en los equipos de la planta y un plan de inspección, el cual contiene el componente inspeccionado, mecanismos de daño asociados al componente, actividad de inspección e intervalo de inspección.

5.2 ANALISIS DE RIESGO

En el análisis de riesgo se presenta la ubicación de los equipos dentro de la matriz de riesgo.

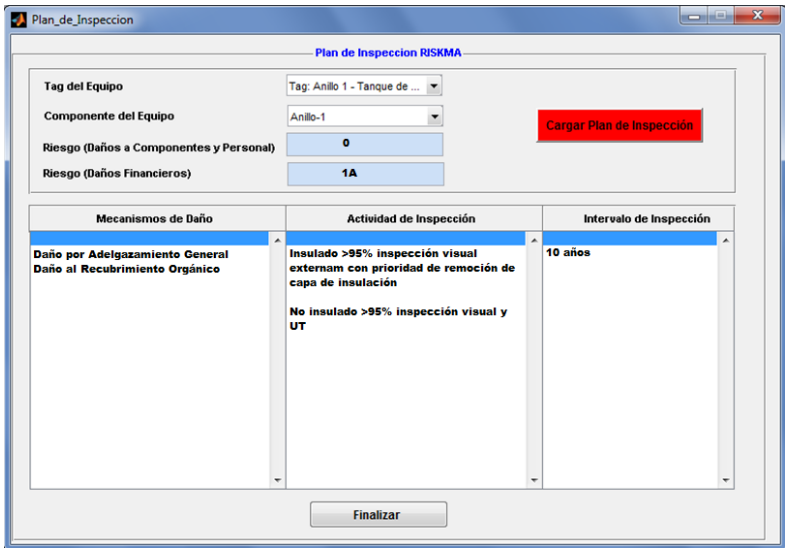
Figura 18. Matriz de Riesgo generada para equipos de campo escuela.



Fuente: Los Autores.

5.3 PLAN DE INSPECCIÓN

Figura 19. Plan de Inspección generada para equipos de campo escuela.



Fuente: Los Autores.

5.4 PANORAMA DE RIESGO DE LOS COMPONENTES DE LA ESTACIÓN RECOLECTORA DE CAMPO ESCUELA

Teniendo en cuenta la metodología aplicada y los resultados obtenidos como se mostró anteriormente, de esta misma forma se aplicó para cada componente de cada equipo dicha metodología con el objetivo de determinar el riesgo de área y financiero y su debido plan de inspección. En la siguiente tabla se presenta un panorama de riesgo para la planta, con la información del riesgo de cada equipo y un plan de inspección asignado.

Tabla 13. Riesgo de área y financiero obtenidos para los componentes de equipos evaluados.

EQUIPO	COMPONENTE	RIESGO DE AREA	RIESGO FINANCIERO
TANQUE DE ALMACENAMIENTO T-01	ANILLO 1	--	MEDIO ALTO
	ANILLO 2	--	MEDIO ALTO
	ANILLO 3	--	MEDIO ALTO
	FONDO	--	MEDIO ALTO
TANQUE DE ALMACENAMIENTO T-02	ANILLO 1	--	MEDIO ALTO
	ANILLO 2	--	MEDIO ALTO
	ANILLO 3	--	MEDIO ALTO
	FONDO	--	MEDIO ALTO
SEPARADOR GENERAL S-001	CAPS SUPERIOR	BAJO	MEDIO ALTO
	CASCO	MEDIO	MEDIO ALTO
	CAPS INFERIOR	MEDIO ALTO	BAJO
SEPARADOR DE PRUEBA S-002	CAPS SUPERIOR	BAJO	MEDIO ALTO
	CASCO	MEDIO	MEDIO ALTO
	CAPS INFERIOR	MEDIO ALTO	BAJO
SEPARADOR DE PRUEBA S-003	CAPS SUPERIOR	BAJO	MEDIO ALTO
	CASCO	MEDIO	MEDIO ALTO
	CAPS INFERIOR	MEDIO ALTO	BAJO
3”-GAS-LCG A53-G01	TUBERIA	BAJO	MEDIO ALTO
4”-OIL-LCC-A53-G02	TUBERIA	BAJO	MEDIO ALTO
4”-WAT-LCA-A53-G03.	TUBERIA	MEDIO ALTO	BAJO

Fuente: Los Autores.

5.5 ANALISIS DE RESULTADOS

5.5.1 ***Tanques de almacenamiento t01 y t02.*** Respecto a los análisis de riesgo realizados a los tanques de almacenamiento T01 y T02 de la planta recolectora de campo escuela colorado, se ejecutó una metodología para determinar solamente el riesgo financiero para el cuerpo (Anillos) y el fondo del tanque, ya que el modelo de análisis de consecuencia para tanques atmosféricos de almacenamiento según API RP 581 solo provee este tipo de análisis; en el cual se tienen en cuenta impactos económicos y ambientales; por lo tanto el riesgo determinado para los tanques en mención fue MEDIO ALTO.

Este resultado implica que los costos asociados a una falla de contención del equipo son significativamente altos, si se tiene en cuenta que las implicaciones bajo las cuales se determina este nivel de riesgo son ambientales y económicas, por lo cual no solamente incurrirían gastos de reparación del equipo, si no también multas o sanciones por el impacto ambiental que se genera con la falla del equipo.

5.5.2 ***Separadores s-001, s-002 y s-003.*** La categoría del riesgo de área resultante de los separadores fue de BAJO, MEDIO Y MEDIO ALTO, para los componentes Caps Superior, Casco y Caps Inferior del equipo respectivamente. Para este panorama riesgo se focaliza como área de mayor riesgo la parte inferior de los separadores, ya que cada uno de estos obtuvieron los mismos niveles de riesgo de área. Por lo cual se determina que este nivel de riesgo se presenta por los mecanismos de daño que presenta este componente, resaltando la relación entre cantidad de carbonatos y el pH que presenta el fluido almacenado. Para este mismo componente en relación al riesgo financiero se presenta un caso contradictorio al riesgo de área, ya que para este componente se obtiene un nivel de riesgo BAJO. Este caso se presenta si se tienen en cuenta

parámetros como costos de afectación ambiental y costos por daños al personal, lo cuales son evaluados para determinar este tipo de riesgo, por lo tanto estos costos son bajo si se tiene en cuenta que el fluido evaluado es aguas agrias.

5.5.3 ***Tuberías.*** Las tuberías presentes dentro de los límites establecidos en este proyecto se evaluaron en tres grupos; tuberías de gas, crudo y agua. Las cuales están conformadas por varias líneas que se encuentran organizadas en los grupos mencionados; el riesgo se evalúa por medio de un Tag general, el cual se caracteriza por tener el mayor diámetro de ellas en cada grupo. A nivel general el nivel de riesgo presentado es BAJO en un panorama de área y para aspectos económicos el riesgo es MEDIO ALTO. Las líneas que pertenecen al lazo de corrosión de gas y crudo se encuentran dentro del foco de mayor riesgo financiero, esto se presenta por los costos de contaminación, daños a personas, y afectación de la producción que incurrirían para la mitigación en caso de una consecuencia de falla de estos equipos.

6. CONCLUSIONES

a) En este trabajo se diseñó e implementó un software basado en la metodología de riesgo de API 581 para la planta recolectora de campo escuela colorado (CEC). Los objetivos y metas propuestos fueron alcanzados satisfactoriamente, dado que el software implementado logró determinar un plan de inspección con los parámetros establecidos inicialmente de componente inspeccionado, mecanismos de daño presentes en el componente, actividad de inspección y su respectivo intervalo de inspección.

b) A partir de la implementación de la metodología de inspección basada en riesgo se puede concluir que el nivel de riesgo actual de la estación recolectora del campo escuela colorado es medio alto en la matriz de riesgo financiera; ya que esta es la mayor en toda la planta (Fig. 18). La presentación de los resultados se realizó una matriz de riesgo, ya que esta es una manera eficaz de mostrar la distribución de los riesgos para los diferentes componentes en una unidad de proceso sin valores numéricos y así determinar la integridad estructural de los equipos de CEC.

c) Gracias a la realización de este proyecto se consiguió conocer una metodología de inspección basada en riesgo bajo el procedimiento de la norma API 581 y junto a esto realizar una administración de datos de inspección que ayudan al mejoramiento de la integridad estructural de una planta y el buen manejo económico con respecto a paradas inesperadas. Es por esto que la realización de este tipo de proyectos contribuye a un mayor vínculo entre el estudiante y la industria de tal manera que se crea el fortalecimiento profesional en áreas tan importantes como lo es el gerenciamiento de la integridad de equipos.

7. RECOMENDACIONES

a) Para determinar la velocidad de corrosión real de todo el sistema se recomienda la instalación de cupones en los tanques con una duración mínima de seis meses para tener un registro de la agresividad del medio al que están expuestos los equipos.

b) Se recomienda implementar un plan de mantenimiento para las válvulas de compuerta con el fin de evitar en eventuales taponamientos por parafinas y contribuir en la confiabilidad de los equipos.

c) Es necesario implementar el sistema de protección catódica para la estación, con el fin de disminuir o eliminar los efectos corrosivos del crudo, y con esto aumentar la vida residual y cumplir con los requerimientos de la industria estándar.

d) Se recomienda desarrollar un sistema de drenaje para el agua que contiene el crudo, con el fin de eliminar el efecto de aguas agrias en los tanques de almacenamiento.

e) El software construido puede mejorarse en muchos aspectos, tales como el funcionamiento y facilidades que el usuario tenga para el manejo de datos, en donde la determinación de un plan de inspección se pueda lograr de una manera más rápida y unificada, así como nuevas ideas que brindaran nuevos aplicativos para el software.

BIBLIOGRAFIA

[1] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection API RECOMMENDED PRACTICE 580. First edition. Washington D.C.: API; 2002. 60p. Part 5, pag 7. API 580.

[2] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 1 pag 1-11. API 581.

[3] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 2 pag 2-13. API 581

[4] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 2 pag 2-19. API 581

[5] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 1 pag 1-14. API 581.

[6] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 1 pag 1-24. API 581.

[7] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Base Resource Document. Second edition. Washington D.C.: API; 2008. 654p. Part 1 pag 1-27. API 581.

ANEXO A. *MANUAL DE USUARIO RISKMA*

INTRODUCCIÓN

El software RISKMA es una herramienta computacional que permite instruir una metodología de inspección basada en riesgo (RBI) bajos los parámetros de la norma API 581, en la cual se plantea una serie de pasos que determinan la probabilidad y consecuencia de falla de un equipo, o planta en general. Este software es una aplicación desarrollada bajo el ambiente de Windows, de fácil manejo para el usuario como herramienta de integridad. Mediante la creación de interfaces en GUIDE de MATLAB y bajo la programación de la plataforma MATLAB versión 2010a. Gracias a que es un laboratorio matricial se involucró en la forma de programación el trabajo de matrices que facilitan el manejo de un gran número de tablas dadas por la norma.

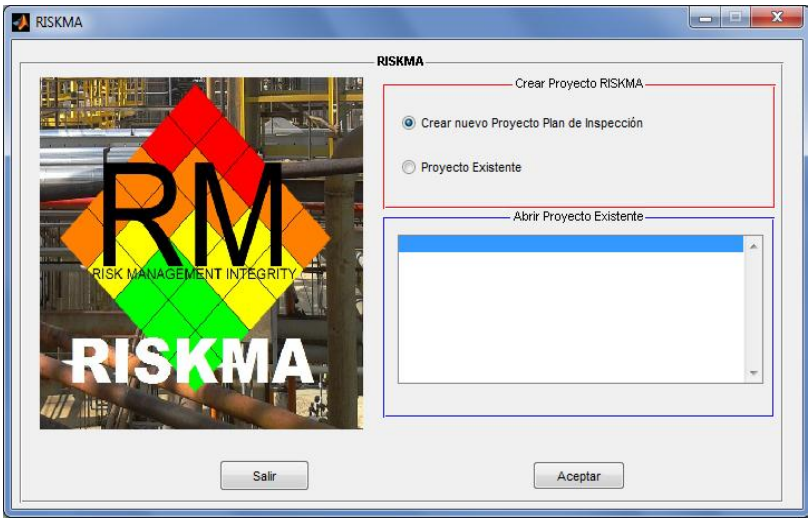
INSTALACIÓN DEL SOFTWARE

Para la instalación del software se realiza una copia de la carpeta “RISKMA” dentro de la cual se encuentra el ejecutable con el nombre de “Riskma.exe”, dando clic sobre este se procede a la utilización del software. Se debe tener en cuenta que para la ejecución del software como condición de uso, el usuario debe instalar MATLAB.2010a.

INGRESO A RISKMA

Mediante el cuadro de dialogo presentado y haciendo clic sobre este, se visualiza la presentación del software como ejecutable:

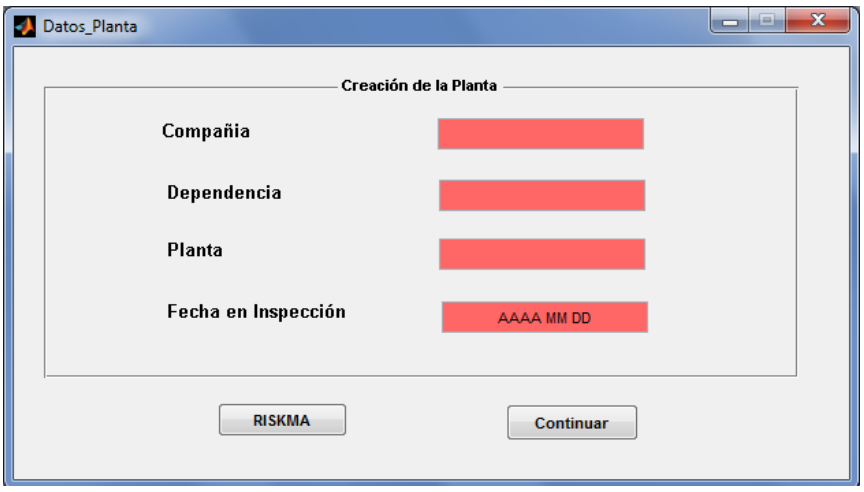
Figura 1. Menú de entrada



Fuente: Los Autores

Mediante esta interfaz (Figura 1.) se presentan dos opciones; la creación de un nuevo proyecto o la elección de un proyecto ya existente en donde se puede apreciar que funciona mediante la visualización de una lista de proyectos que al hacer clic sobre alguno de ellos para seleccionarlo y darle aceptar se cargará la ventana lazo de corrosión con su información respectiva a esa inspección.

Figura 2. Planta a inspeccionar.

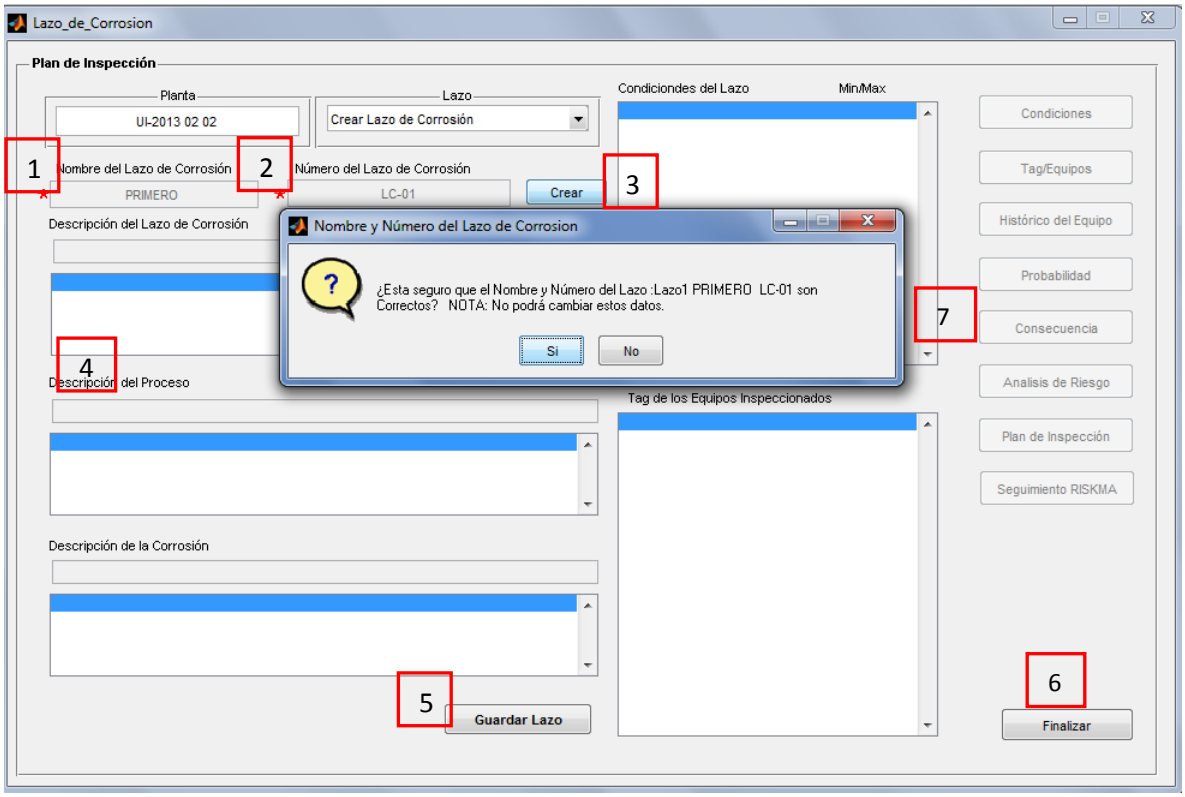


Fuente: Los Autores.

En la ventana Datos de la planta a inspeccionar se debe llenar el nombre de la compañía, el departamento y su respectiva planta, para así de esta forma proponer como cabeza principal la planta a la cual pertenecen los lazos que se crearán para la inspección de esta misma. Es decir se da un nombre de planta, que dentro de ella se encontrarán una serie de lazos de corrosión para agrupar los equipos que se encuentran en la planta. Así mismo se debe registrar la fecha de inspección con un formato de Año, mes y día, separado por cualquier forma adoptada por el usuario.

Cuando el usuario hace clic sobre “Continuar” se abre la interfaz Lazo de corrosión o si hace clic sobre “Cancelar” se cierra la ventana y se cancela la creación del proyecto.

Figura 3. Lazo de corrosión



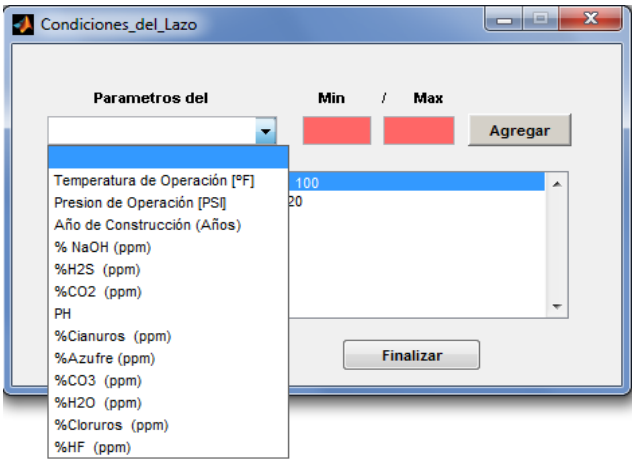
Fuente: Los Autores.

1. ***Nombre del Lazo de Corrosión:*** Nombre de lazo que es asignado y digitado por el usuario.
2. ***Número del lazo de Corrosión*****:** Es un número de identificación que el usuario determina y digita para el lazo de corrosión
3. ***Crear:*** Mediante este botón el usuario asigna el número y nombre al lazo, por lo cual no se podrá cambiar estos datos cuando se pulse la opción “SI” de la advertencia de creación de lazo de corrosión.
4. ***Descripción del Lazo de Corrosión:*** Para esta opción el usuario ingresa la información en los espacios editables, para introducir la debida descripción de características del lazo de corrosión en cuanto al proceso y mecanismos de corrosión presentados.
5. ***Guardar lazo:*** Esta opción permite guardar toda la información suministrada en el lazo tanto, la digitada y la administrada por las interfaces que se encuentran en el numeral 9.
6. ***Finalizar:*** Una vez guardada la información del lazo de corrosión, mediante este botón se cierra esta interfaz y se dirige a la interfaz del menú de entrada.
7. ***Botones de Ingreso de Información:*** Por medio de estos botones el usuario podrá ingresar a las ventanas de ingreso de datos para de esta manera seguir una metodología de inspección y determinar la probabilidad, consecuencia de falla, riesgo, plan de inspección de la planta y un seguimiento de riesgo en situaciones donde se presenten varios análisis de riesgo para un mismo componente.

PRINCIPALES INTERFACES

1. ***Condiciones del Lazo de Corrosión:*** Son las condiciones designadas por el usuario que permiten la creación de un lazo de corrosión bajo condiciones similares de operación, año de construcción y fluido en servicio.

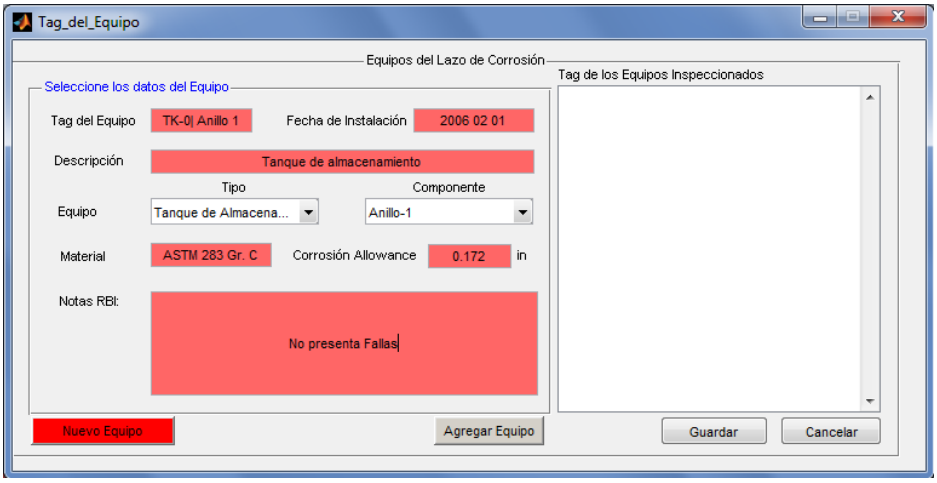
Figura 4. Condiciones de lazo



Fuente: Los Autores

2. ***Tag de los Equipos inspeccionados:*** Es una lista de los equipos con su Tag de identificación, fecha de construcción, tipo de equipo y componente, el material de construcción y el corrosión allowance que pertenecen al lazo de corrosión asignado por el usuario.

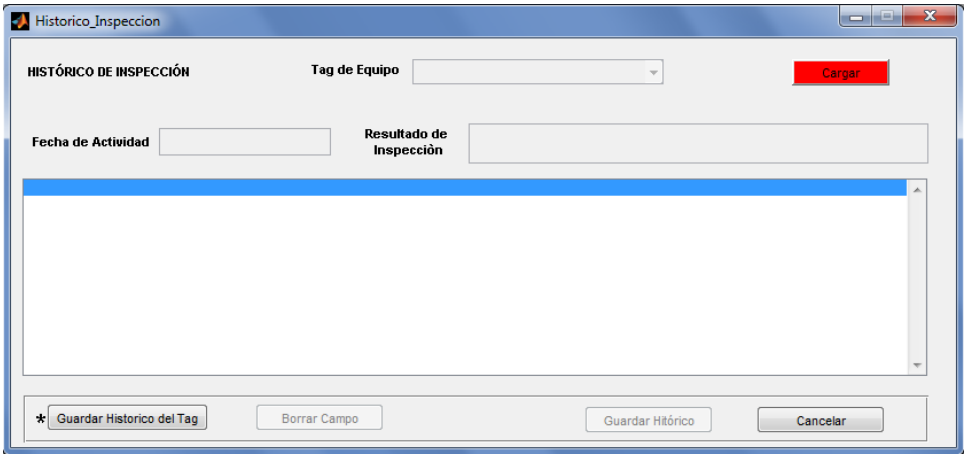
Figura 5. Tag de equipos



Fuente: Los Autores.

3. ***Histórico de Equipos:*** Se trata de una interfaz en la cual se edita la información existente respecto a tareas de inspección y mantenimiento para cada componente del equipo con su respectiva fecha.

Figura 6. Histórico de equipos.



Fuente: Los Autores

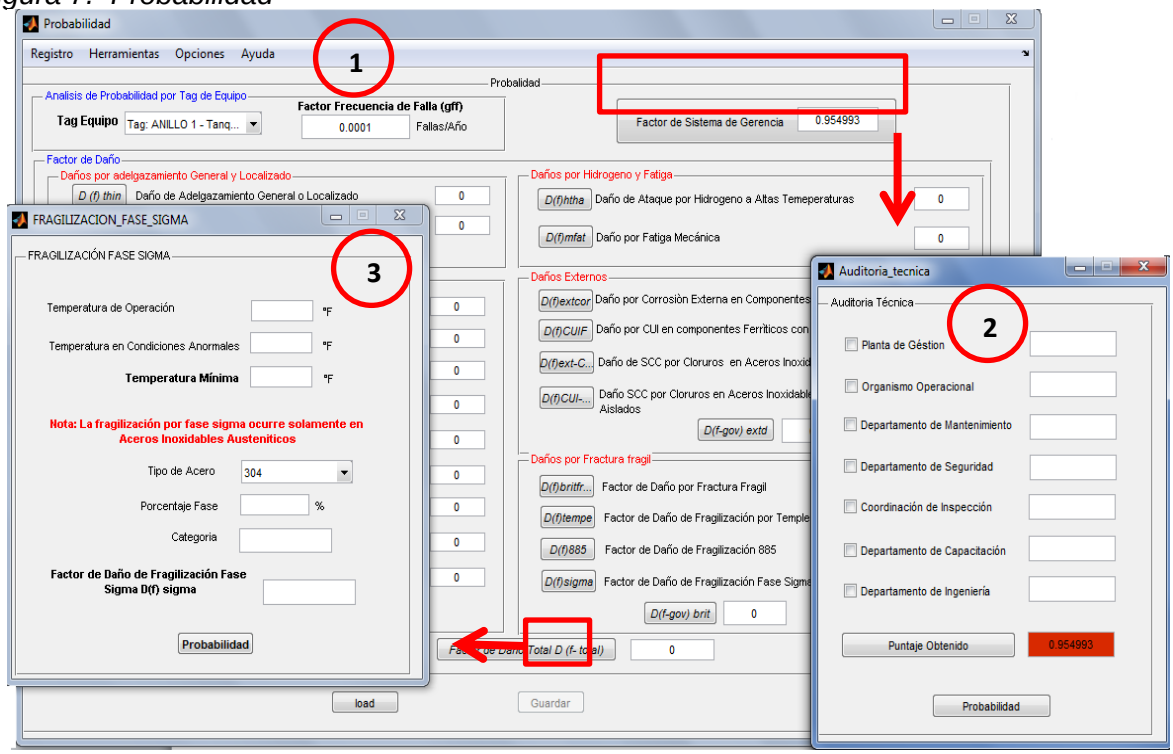
4. ***Probabilidad:*** Para cada componente perteneciente al equipo evaluado se realiza un análisis de la probabilidad de falla, en la cual se tiene en cuenta el producto de tres factores. El primero es la frecuencia de falla (Nota 1), el segundo se trata de una auditoría realizada para determinar cuantitativamente el factor sistema de gerencia (Nota 2) y por último se establecen los mecanismos de daño (Nota 3) que afectan el componente; para así determinar el valor de la probabilidad.

5. ***Consecuencia de área y financiera:*** Para esta interfaz existen dos metodologías. La primera es cuando es para evaluación de tanques de almacenamiento y la segunda para recipientes a presión o tuberías, como se muestra en la figura 1.

    1. **Metodología para Tanques de Almacenamiento** (Ver Figura 8.)

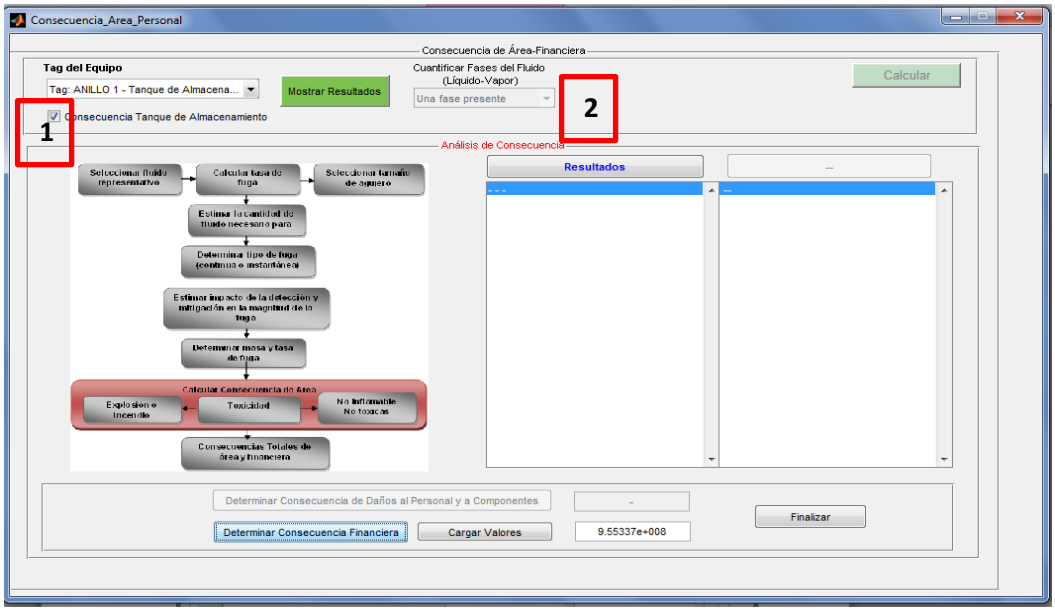
2. Metodología para Recipientes a Presión y Tuberías (Ver Figura 9.)

Figura 7. Probabilidad



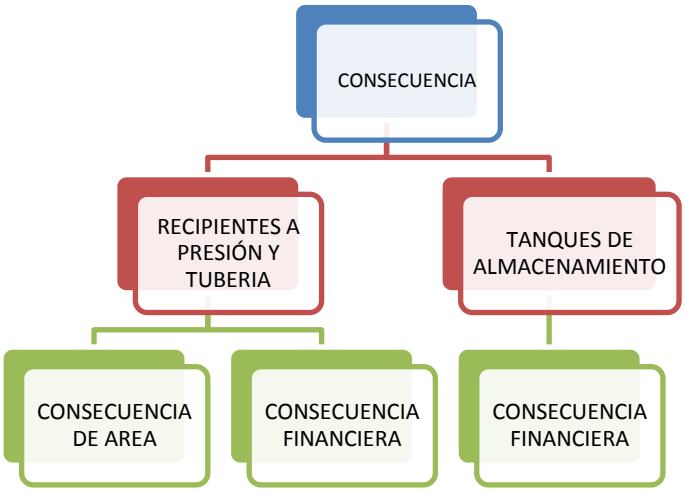
Fuente: Los Autores.

Figura 8. Consecuencia de área y financiera.



Fuente: Los Autores.

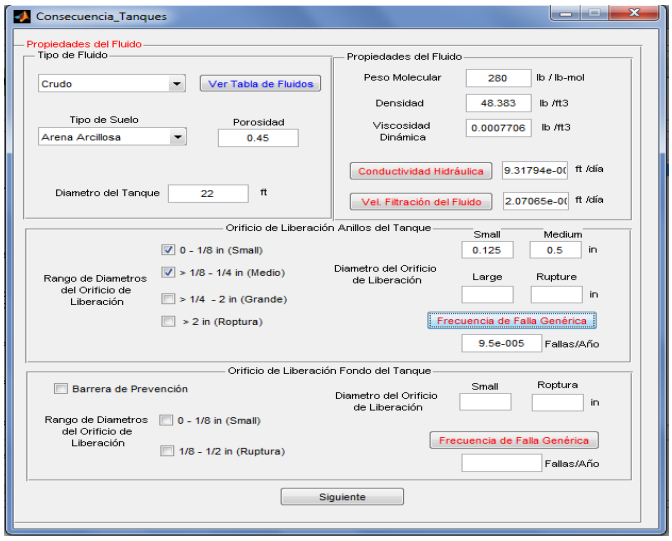
Figura 9. Metodologías para el cálculo de consecuencia



Fuente: Los Autores.

a) *Tanques de Almacenamiento*: Para la metodología 1. Se activa la interfaz de Consecuencia de Tanques.

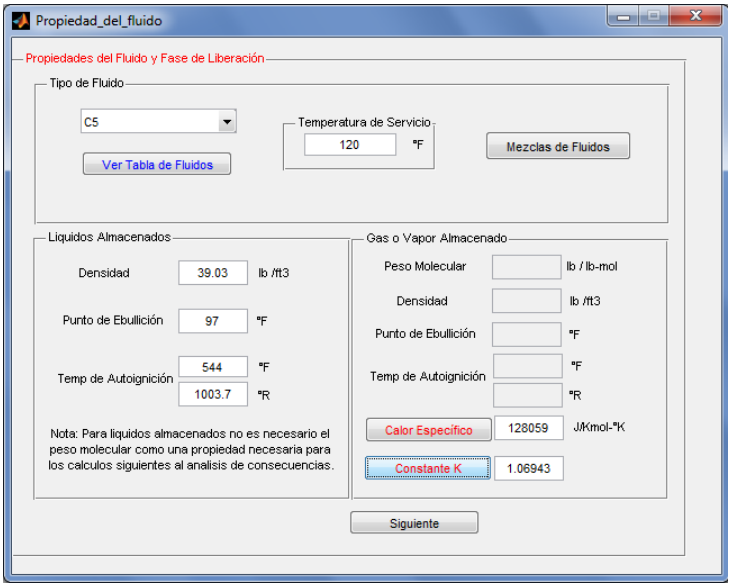
Figura 10. Consecuencia tanques



Fuente: Los Autores.

b) *Recipientes a presión:* Para la metodología 2. Se activa la interfaz de Propiedad del Fluido.

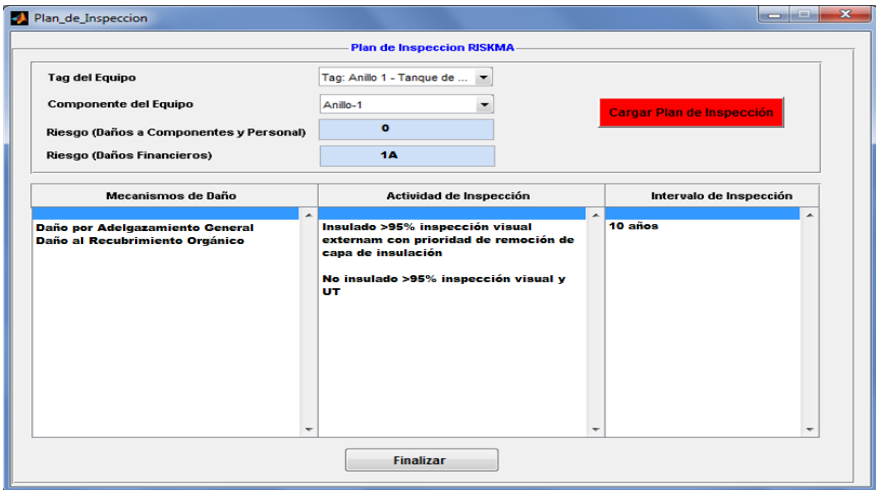
Figura 10. Propiedad del fluido



Fuente: Los Autores.

6. ***Plan de Inspección:*** En esta interfaz el usuario puede elegir el Tag del Equipo para observar su plan de inspección, en cual encontrará; el componente del equipo, mecanismos de daño, actividad de inspección y un intervalo de inspección.

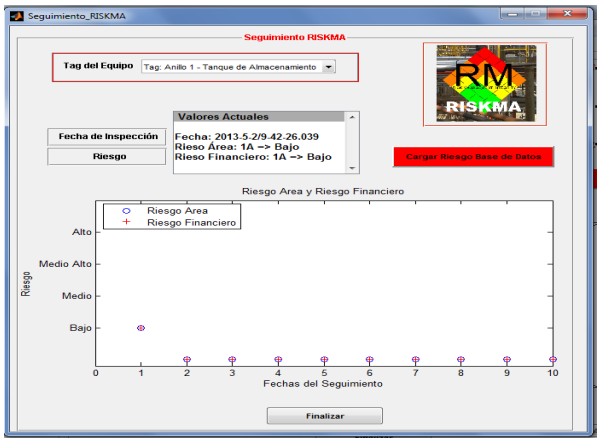
Figura 10. Plan de inspección



Fuente: Los Autores.

7. ***Seguimiento RISKMA:*** En esta interfaz se realiza un seguimiento del riesgo a través del tiempo para cada componente evaluado, en el cual el usuario puede observar gráficamente el comportamiento del riesgo del componente.

Figura 10. Seguimiento RISKMA



Fuente: Los Autores.

CONDICIONES DE MANEJO DEL SOFTWARE:

1. Las fechas deben ser editadas según el formato establecido por el software. (AAA, MM, DD) El año, mes y día se separan por espacios.

2. Cuando se pulsa la opción “SI” con respecto a la asignación de un nombre y número para el lazo de corrosión, estos datos no se podrán modificar.

3. Cuando no se realice ninguna operación en la interfaz ejecutada, se debe cerrar con el botón “cerrar” de Windows, para no provocar errores de una ejecución falsa en el software.

4. Una vez realizada todas las operaciones de un lazo de corrosión se debe dar clic el botón “Guardar Lazo”, así de esta manera; se guardaran todos los cálculos realizados en el lazo de corrosión.

5. Cuando se ingrese a una interfaz, se debe dar clic en los botones “Cargar” de cada una de ellas, así de esta manera se verifica visualmente la información verdadera a cada cálculo realizado.

6. Para realizar algún manejo de cálculo para algún Tag de equipo se debe ir al pop menú y elegir el Tag, así de esta forma se asegura una ejecución de cálculo para cada Tag elegido.

7. Al momento de la ejecución de la interfaz Seguimiento RISKMA se debe tener en cuenta que solo será útil cuando existan cambios en los valores de probabilidad y consecuencia de área o financiera con otra fecha diferente, la cual será establecida automáticamente con la fecha del computador donde se esté ejecutando el software.

8. En la interfaz Tag de equipos se debe agregar el equipo a evaluar dando clic en el botón “Agregar equipo”; cuando se ejecute nuevamente la interfaz se debe dar clic una sola vez al botón en el rojo “Nuevo Equipo”, se ingresa la información y se da clic en el botón “Agregar equipo”. Así de esta forma se asegura el buen funcionamiento de la interfaz.