Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ingeniería Química

Colegio de Ingeniería en Materiales

“RETROINGENIERÍA EN LA INSPECCIÓN POR YUGO ELECTROMANÉTICO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS SECAS EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE SOSA AL 25%”

Tesis presentada para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería en Materiales

Presenta:

Aldo Montes Méndez

Director De Tesis:

Dr. Marco Antonio Morales Sánchez

Puebla, Pue. Noviembre 2022

BUAP

Oficio No. FIQ/AC/030/2022
Asunto: Registro de Tema de Tesis

C. ALDO MONTES MÈNDEZ
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA EN MATERIALES
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la **Licenciatura en Ingenieria en Materiales** cuyo título es el siguiente:

"RETROINGENIERÌA EN LA INSPECCION POR YUGO ELECTROMAGNÈTICO POR PARTÌCULAS MAGNÈTICAS SECAS EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE SOSA AL 25%"

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Director de Tesis: Dr. Marco Antonio Morales Sánchez.

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **UNICAMENTE POR UN AÑO**.

Atentamente
"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"
H. Puebla de Z., a 27 de enero de 2022

Dra. Valeria Jordana González Coronel
Secretaria Académica

C.c.p. Director de Tesis: Dr. Marco Antonio Morales Sánchez.
C.c.p. Archivo.

Facultad de Ingeniería Química
Av. San Claudio s/n, Col. San Manuel, Ciudad Universitaria, Puebla, Pue. C. P. 72590
01 (222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251

INDICE

CAPÍTULO 1: Marco Teórico....7
1.1 Planteamiento del Problema....7
1.2 Justificación....8
1.3 Objetivo General....10
1.4 Objetivos Específicos....10
1.5 Hipótesis....11
1.6 Antecedentes del Electromagnetismo....11
1.7 Aleaciones Ferrosas....14
1.8 Clasificación de los Aceros de Acuerdo con AISI y SAE....14
1.9 Tratamientos Térmicos de los Aceros....16
1.10 Materiales Ferromagnéticos....17
1.11 Recipientes Sujetos a Presión....18
1.12 Materiales para Recipientes Sujetos a Presión....19
1.13 Peligros Potenciales de los Recipientes Sujetos a Presión....20
1.14 Normatividad Asociada a la Inspección de RSP....22
1.15 Ensayos No Destructivos....30
1.15.1 Partículas Magnéticas con Yugo Electromagnético....35
1.16 Metodología de la Inspección Basada de Riesgos (RBI) API 581....39
1.17 Metodologías de Retrofit....41
CAPÍTULO 2: Metodología para la Inspección por Yugo Electromagnético....45
2.1 Equipo de Inspección....45
2.2 Técnica de Inspección por Yugo Electromagnético....46
2.3 Selección del Tipo de Partículas Magnéticas....50
2.3.1 Metodología de Secuencia de Operación Continua para Inspección de Yugo Electromagnético....53
2.3.2 Indicadores de Flujo de Campo Magnético....54
2.3.3 Evaluación de Discontinuidades en los Materiales....55
2.3.4 Tipos de Discontinuidades Para Detectar....56
2.3.5 Evaluación de Resultados Obtenidos por la Técnica de Inspección de Yugo Electromagnético....56
2.4 Metodología de Retroingeniería para la Inspección por Yugo Electromagnético....63
CAPÍTULO 3: Resultados de la Metodología de Retroingeniería para Inspección por Partículas Magnéticas....66

3.1 Análisis y Adquisición de Información para el Procedimiento PRC-I-010 66
3.2 Adquisición de Datos Mediante la Técnica de Inspección por Yugo Electromagnético 68
3.3 Procedimiento de Inspección 70
3.4 Ejemplos de Modelos Abstractos por Retroingeniería para la Inspección por Yugo Electromagnético 72
3.5 Resultados de la Metodología de Retroingeniería para Inspección por Yugo Electromagnético 73
Conclusiones 77
Apéndice A. 79
BIBLIOGRAFÍA 82

GLOSARIO DE FIGURAS

FIG. 1.1 A) GENERADOR DE VAPOR DE 25M3 CON CAPACIDAD TÉRMICA DE 6.97 MW. B) TANQUE SUAVIZADOR DE AGUA CRUDA, VOLUMEN 4.4 M3. C) INTERCAMBIADOR DE CALOR DE ACEITE TÉRMICO, VOLUMEN 0.5 M3. 8

FIG. 1.2 A) IMÁN DE BARRA/CIRCULAR, B) IMÁN DE HERRADURA, REPRESENTACIÓN DE LÍNEAS DE CAMPOS MAGNÉTICOS. 12

FIG. 1.3 A) LEY DE INDUCCIÓN DE FARADAY, B) LEY DE GAUSS DE CAMPO ELÉCTRICO, C) LEY DE GAUSS DE CAMPO MAGNÉTICO Y D) LEY DE AMPERE-MAXWELL. 13

FIG. 1.4 DIAGRAMA DE FASES HIERRO-CARBONO (FE-C). 14

FIG. 1.5 PRINCIPIO DE EXCLUSIÓN DE PAULI PARA ORBITALES 3D. 18

FIG. 1.6 DISEÑO DE UNA FICHA TÉCNICA QUE CUMPLE CON LOS DATOS ESPECIFICADOS POR LA NORMA OFICIAL MEXICANA 020 EMITIDA POR LA SECRETARÍA DEL TRABAJO Y PREVISIÓN SOCIAL EN 2011 PROPORCIONADA DE LA BASE DE DATOS DE LA COMPAÑÍA ESPECIALIZADA EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS M&M INGENIEROS®……..……...29

FIG. 1.7 INSPECCIÓN POR YUGO ELECTROMAGNÉTICO A TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE DIESEL CON FONDO CONTRASTANTE. 36

FIG. 1.8 A) DOMINIO MAGNÉTICO APLICADO A UNA BARRA DE METAL FERROSO. B) DISTORSIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO APLICADO POR FRACTURA PRESENTE EN LA SUPERFICIE. C) INSPECCIÓN Y APLICACIÓN DE LIMADURAS DE HIERRO EN LA SUPERFICIE CON CAMPO MAGNÉTICO INDUCIDO, ACUMULACIÓN DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS PRODUCIENDO UNA INDICACIÓN RELEVANTE. D) DISCONTINUIDAD INTERNA Y PARALELA A LAS LÍNEAS DE FUERZA DE CAMPO INDUCIDAS EN LA PLACA DE METAL. 37

FIG. 1.9 REQUERIMIENTOS GENERALES DEL PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN POR ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS MEDIANTE YUGO ELECTROMAGNÉTICO[17] 37

FIG. 1.10 JERARQUÍAS DE DECISIÓN DE DOUGLAS 42

FIG. 2.1 INSPECCIÓN DE SOLDADURA EN PLACA DE METAL POR YUGO ELECTROMAGNÉTICO. 48

FIG. 2.2 MAGNETIZACIÓN CON YUGO ELECTROMAGNÉTICO PARA ÁNGULOS DE 90° O MENORES CON AMBOS POLOS[19]. 49

FIG. 2.3 A) MAGNETIZACIÓN POR YUGO ELECTROMAGNÉTICO CON SEPARACIÓN MÍNIMA DE 2”, B) MAGNETIZACIÓN POR YUGO ELECTROMAGNÉTICO CON SEPARACIÓN MÁXIMA DE 6”. 49

FIG. 2.4 MAGNETIZACIÓN INCORRECTA POR YUGO ELECTROMAGNÉTICO CON SEPARACIÓN DE POLOS QUE EXCEDE LAS 6” DE SEPARACIÓN RECOMENDADAS. 50

FIG. 2.5 DIFERENTES PRESENTACIONES DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS DE ACUERDO CON ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE MAGNAFLUX®. 52

FIG. 2.6 KIT PARA INSPECCIÓN POR EL MÉTODO DE YUGO ELECTROMAGNÉTICO, CONSTITUIDO POR YUGO ELECTROMAGNÉTICO PORTÁTIL, PARTÍCULAS MAGNÉTICAS (LIMADURAS DE HIERRO BLANCAS Y ROJAS), PERILLAS DE APLICACIÓN TIPO SALERO….52

FIG. 2.7 INSPECCIÓN POR SECUENCIA DE OPERACIÓN CONTINUA CON FONDO DE TINTA CONTRASTANTE CON MEDICIONES DE 90° ENTRE UNO Y OTRO PASO DE PRUEBA. 54

FIG. 2.8 DETECTOR DE CAMPO MAGNÉTICO TIPO LAINA[19]. 55

FIG. 2.9 DETECTOR DE CAMPO MAGNÉTICO TIPO PASTEL. 55

FIG. 2.10. REPRESENTACIÓN DE LA INDICACIÓN FORMADA A PARTIR DE LA DISTORSIÓN DE LAS LÍNEAS DE FLUJO DEL CAMPO MAGNÉTICO INDUCIDO. 56

FIG. 2.11 METODOLOGÍA GENÉRICA DE RETROFIT PARA EL PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN MEDIANTE MODELOS ABSTRACTOS. 64

FIG. 3.1 MODELOS DE ABSTRACCIÓN PARA RETROFIT. 72

FIG. 3.2: MODELOS DE ABSTRACCIÓN ACOPLADOS DE RETROFIT A PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN A TANQUE DE ALMACENAMIENTO. 73

FIG. 3.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL ACOPLAMIENTO DE LAS METODOLOGÍAS DE RETROFIT AL PROCEDIMIENTO PRC-I-010. 75

FIG. A1. CURVA DE HISTÉRESIS PARA MAGNETIZACIÓN Y DESMAGNETIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS. 80

FIG. A2. TIPOS DE CURVAS DE HISTÉRESIS PRESENTE EN MATERIALES FERROMAGNÉTICOS[22]. 81

CAPÍTULO 1: Marco Teórico

1.1 Planteamiento del Problema

Dentro de la industria química, se llevan a cabo procesos químicos que satisfacen necesidades en la demanda del almacenamiento de materia prima o el envasado de productos terminados, en ello podemos encontrar a los recipientes sujetos a presión (RSP) como una de las herramientas fundamentales donde se llevan a cabo reacciones y otro tipo de tareas específicas dentro de los procesos.

Para el cumplimiento de las revisiones de los equipos que se fabrican día con día surge una importante rama en la industria que engloba una serie de actividades a desarrollar como la integridad mecánica de RSP. La integridad mecánica son todas aquellas actividades necesarias para asegurar el buen funcionamiento de los equipos, sistemas o componentes críticos de las operaciones y procesos que contengan materiales peligrosos, procurando que estén siempre bajo las condiciones de diseño como presión, temperatura, volumen y espesores de materiales. El uso de calderas o generadores de vapor y recipientes sujetos a presión es cotidiano en la industria de procesos, sin embargo, este uso representa un riesgo para la integridad de los trabajadores, de las instalaciones y del medio ambiente ya que por fallas en la superficie de los equipos o errores en la operación de estos existe una alta probabilidad de terminar en accidentes[1].

La continua evaluación de procedimientos de mantenimiento proporciona parámetros de cumplimiento con respecto a requerimientos técnicos y económicos, pero a menudo, este tipo de procedimientos requieren de la mejora continua en donde estos se vean modificados para tener un óptimo desarrollo en conjunto de nuevas implementaciones. Todo ello se enfoca precisamente en las metodologías de Retroingeniería, pues es la herramienta adecuada para modificar un procedimiento existente y mejorarlo sin la necesidad de desecharlo por completo o crear uno nuevo. La modificación no consiste simplemente en eliminar pasos del procedimiento para reducir tiempos, si no que el alcance de la misma metodología va más allá de los enfoques de seguridad y calidad que exigen un rendimiento mayor.

Los recipientes sujetos a presión como generadores de vapor, calderas o tanques de almacenamiento forman una parte esencial en la vida cotidiana de cualquier tipo de industria. Por ejemplo, los generadores de vapor o calderas (Ver Fig. 1.1 A) son utilizados en la industria química para los sistemas de calentamiento para vapor húmedo o seco, tanques de almacenamiento para disponer de materia prima o envasado de productos terminados (Ver Fig. 1.1 B), intercambiadores de calor (Ver Fig. 1.1 C) para el aprovechamiento de energía en los sistemas de reflujo de los procesos químicos entre otros.

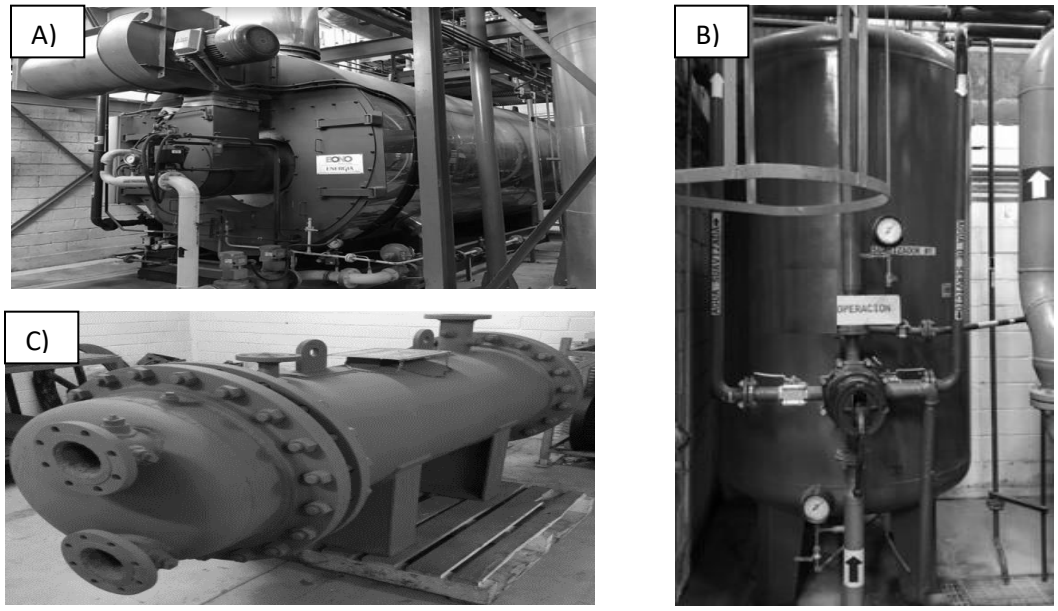


Fig. 1.1 a) Generador de vapor de 25m3 con capacidad térmica de 6.97 mW. b) Tanque suavizador de agua cruda, volumen 4.4 m3. c) Intercambiador de calor de aceite térmico, volumen 0.5 m3.

1.2 Justificación

Para asegurar el funcionamiento de los RSP, estudios de integridad deben cumplir la aprobación, certificación del diseño, funcionamiento y desarrollo de exámenes no destructivos de los equipos con normas específicas dentro del territorio nacional mexicano. A partir de esto, para la operación de los RSP se debe cumplir con los estatutos legales que la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS) demanda en la Norma Oficial Mexicana 020 (NOM-020-STPS-2011) según la Ley Federal del Trabajo se debe de avisar a la Secretaría del Trabajo de equipos clasificados como Categoría III que funcionen en centros de trabajo para el cumplimiento de la norma y regulación de los equipos.

Para minimizar el riesgo de fallas en los equipos de proceso que podrían resultar en la liberación de químicos peligrosos, lesiones al personal operativo, daños al medio ambiente o interrupciones comerciales significativas, se establece un plan de mantenimiento e inspección para cumplir con los requisitos mandatorios por la STPS. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana 020 emitida por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social en el año 2011 (NOM-020-STPS-2011) se deben establecer los requisitos de seguridad para el funcionamiento de los recipientes sujetos a presión, recipientes criogénicos y generadores de vapor o calderas en los centros de trabajo a fin de prevenir riesgos a los trabajadores y daños en las instalaciones.

En ese sentido, se diseñan programas específicos de revisión y mantenimiento a los equipos clasificados en categorías I, II y III que deberán contener los siguientes aspectos: fechas de

ejecución, periodo de ejecución, tipo y descripción de las actividades a realizar, nombre o nombres del o los responsables de la programación y ejecución de las actividades. De acuerdo con la teoría de la inspección basada en riesgos (RBI por sus siglas en inglés) antes de diseñar un plan de mantenimiento para la revisión e inspección de los equipos, se deben establecer parámetros y alcances para el correcto análisis de sus componentes.

Actualmente dentro de la industria química se puede encontrar una infinidad de RSP los cuales necesitan normalizarse bajo los criterios de trabajo de la STPS. De acuerdo con lo anterior, se llega al problema de un tanque de almacenamiento que en función a la programación del plan de mantenimiento y a la renovación de la autorización de trabajo ante la secretaría, debe de ser inspeccionado, en caso de ser rechazado por la inspección que se lleve a cabo se deberá de reparar y posteriormente inspeccionar una vez más para cumplir con lo solicitado por la norma oficial 020.

Las circunstancias actuales en las que se encuentra el tanque de almacenamiento requiere una inspección por ensayos no destructivos pero a solicitud del área de producción, las inspecciones que desarrollen técnicas de trabajo que impliquen una fuente de ignición deberán ser descartadas pues el tanque de almacenamiento presenta trabajo continuo de transferencia por lo que el vaciado y limpieza del tanque para inspección interna no es viable debido a la alta demanda del proceso que se está llevando a cabo. El tiempo de libranza solicitado para la inspección por el ensayo no destructivo como líquidos penetrantes requiere de al menos 5 días hábiles por las maniobras que se requieren para la habilitación del tanque ya que se encuentra instalado en un área denominada como “área de tanques” donde este recipiente coexiste con otros tanques que almacenan y transfieren solventes en grandes cantidades. Es por esto que, se analizan las posibilidades de realizar una inspección externa del tanque de almacenamiento tomando en cuenta las medidas anteriormente solicitadas, pues se busca evitar en lo posible pérdidas de tiempo por libranza del equipo que afecten al proceso de producción y accidentes que repercutan en la integridad del área de trabajo y medio ambiente. En la tabla 1, se describen las características del tanque de almacenamiento.

Características del Recipiente Sujeto a Presión					
Nombre	Material de Diseño	Volumen de Diseño (m^3)	Fluido de Almacenamiento	Estado	Categoría
Tanque de Almacenamiento	SA-285-C	25	SOSA AL 25%	Usado	III

Tabla 1. Propiedades de diseño y trabajo del Recipiente Sujeto a Presión.

Dentro del presente trabajo se aspira a proponer la técnica de yugo electromagnético con partículas magnéticas secas como una alternativa de inspección por retroingeniería para recipientes sujetos a presión que no sean capaces de ser liberados por el área de producción para inspección y mantenimiento y descartar el desarrollo de una técnica que genere una fuente de ignición. La aplicación de la inspección de partículas magnéticas secas por yugo electromagnético en el presente trabajo se dirige directamente hacia los recipientes sujetos a presión dentro de la industria química gracias a la sencillez de la aplicación y desarrollo de la técnica, el bajo costo, rapidez de la inspección, detección de discontinuidades bajo condiciones diferentes a las normales y reporte de las posibles fallas presentes en los recipientes sujetos a presión para la reparación de estas y la prevención de riesgo de fallas en los equipos de proceso que pueden resultar en la liberación de químicos peligrosos, lesiones al personal operativo, daños al medio ambiente, interrupción de la producción y por consiguiente afectaciones comerciales significativas.

Dada la problemática anteriormente descrita, se busca desarrollar una técnica de inspección que satisfaga las necesidades solicitadas por el área de producción, se plantea el siguiente objetivo general:

1.3 Objetivo General

- Desarrollar mediante retroingeniería e inspección basada en riesgos, la técnica de inspección por yugo electromagnético como alternativa del aseguramiento de la integridad mecánica de un tanque de almacenamiento de Sosa al 25% bajo la NOM-020-STPS-2011.

1.4 Objetivos Específicos

- Reducción del tiempo a través del acoplamiento de la metodología de retroingeniería y la metodología de la inspección basada en riesgos para determinar la técnica de inspección adecuada.
- Interpretación de datos de los parámetros atmosféricos con respecto a la metodología de inspección basada en riesgos para yugo electromagnético.
- Revisión de normas aplicables para el aseguramiento en la sanidad del tanque de almacenamiento.
- Evaluación y clasificación de las indicaciones obtenidas a través de la inspección por yugo electromagnético.
- Propuesta de un esquema de retroingeniería para la mejora en el proceso de inspección por yugo electromagnético.

1.5 Hipótesis

La técnica de inspección por yugo electromagnético permite determinar las indicaciones superficiales y subsuperficiales en uniones por soldadura del recipiente sujeto a presión, lo cual previene los riesgos a los trabajadores y daño a los equipos industriales.

1.6 Antecedentes del Electromagnetismo

W.E. Hoke descubrió el principio que permite el empleo de los campos magnéticos y de las partículas ferromagnéticas en la detección de grietas en materiales magnéticos, al observar que las partículas metálicas finas que se producían durante el rectificado de piezas de acero, en algunos casos, se acumulaban formando una especie de red que dibujaban las grietas producidas durante el rectificado. Así mismo, observó que este fenómeno sólo se producía cuando para sujetar las piezas se utilizaban platos magnéticos. Por lo tanto, se establecía una relación entre el campo magnético, las partículas ferromagnéticas y la detección de grietas.

En 1829, A. V. De Forest estableció las bases del método e introdujo la innovación de magnetizar mediante el paso de corriente eléctrica, lo que significó un rápido desarrollo del método de partículas magnéticas tal y como se conoce hoy. La idea de De Forest de hacer pasar corrientes de elevada intensidad a través de las piezas es de aplicación universal y actual, propugnando la utilización de polvos magnéticos de tamaño, forma y propiedades perfectamente controladas, con el fin de poder garantizar la producción y seguridad de los resultados.

Se puede decir que este es un método que permite la detección de grietas, incluso finas y de poca profundidad en materiales ferromagnéticos tanto en los procesos de fabricación y montaje como durante el mantenimiento incidiendo ligeramente en el coste final del producto, aunque también es posible aplicarlo con limitaciones para la detección de discontinuidades e inclusiones no metálicas próximas a la superficie. Este ensayo se basa en que las líneas de fuerza fluyen desde un polo a otro en todos los imanes, siendo el flujo magnético la fuerza que atrae a otros materiales magnetizables hacia los polos magnéticos. Por ejemplo, si se tiene un imán de herradura, el flujo magnético o líneas de fuerza saldrán de un polo y entrarán al polo opuesto del imán, es así como, este imán atraerá otros materiales magnetizables que se encuentren circundantes en su periferia, únicamente donde las líneas de fuerza salgan o entren al imán. Si se cierra el imán hasta alcanzar casi un círculo, se seguirá comportando como la herradura (Ver Fig. 1.2).

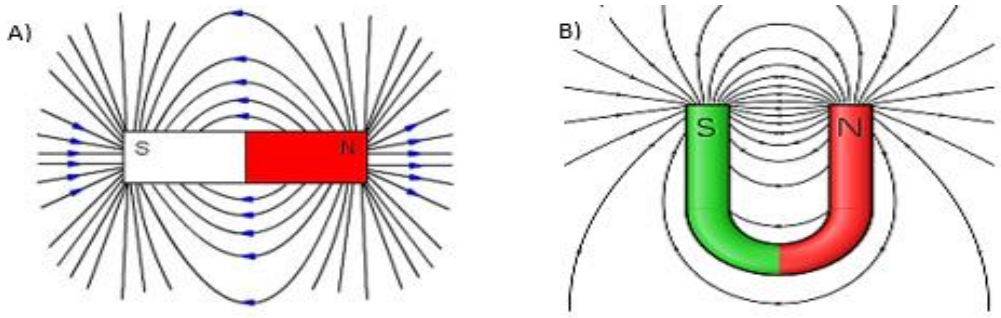


Fig. 1.2 A) Imán de barra/circular, B) Imán de herradura, representación de líneas de campos magnéticos.

En 1927, Roux, describe un método de prueba para soldaduras en placas de acero produciendo un flujo magnético en la placa de metal obteniendo un patrón de flujo magnético que presenta una fuga en el tamizado de limaduras de hierro sobre un papel como fondo contrastante para la detección del campo de fuga en la soldadura. Una soldadura defectuosa que no tiene penetración tiene una resistencia magnética más alta que una porción correspondiente del material base. Esto indica una fuga de campo magnético del metal alrededor del defecto causando una acumulación de polvo en el defecto. La junta fue magnetizada por un equipo electromagnético portátil con piezas de polos magnéticos que abarca la simetría de la junta de la soldadura. Por la interpretación de las propiedades de los patrones que se forman por las limaduras de hierro, el operador a menudo puede detectar la presencia de defectos. El método de aplicación de limadura de hierro magnética apareció para ofrecer una solución al problema de la localización de grietas[5].

Leyes del Electromagnetismo: En 1865 James Clerk Maxwell resumió y amplió el conocimiento empírico que se conocía sobre el tema de la electricidad y el magnetismo hasta el momento. Maxwell pudo demostrar, de forma teórica, que el medio electromagnético se podía propagar como una onda transversal en el éter luminífero. Resolviendo la velocidad de la onda, llegó a una expresión en términos de propiedades eléctricas y magnéticas del medio. La conclusión era inevitable: *la luz era una perturbación electromagnética en forma de ondas propagadas a través del éter*[10]. A continuación se explican de forma matemática las ecuaciones de Maxwell para electromagnetismo.

- Ley de inducción de Faraday: Aplicación del campo magnético en la superficie del material ferromagnético a partir de la inducción del campo eléctrico rotacional.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \bar{\bar{B}}}{\partial t}$$

- Ley de Gauss de campo eléctrico: Producción de flujo eléctrico a partir de carga eléctrica inducida, donde ρ_{total} es la densidad de carga total y ϵ es la permitividad eléctrica en la superficie del material.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_{total}}{\epsilon_0}$$

- Ley de Gauss magnética: Inexistencia de monopolos magnéticos, flujo magnético 0 en entorno cerrado, esta ley es aplicada directamente a la identificación de discontinuidades en la superficie del material, pues las líneas de campo magnético que se generan en un polo se deben cerrar en el polo opuesto.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

- Ley de Ampere Maxwell: Producción de flujo magnético rotacional a partir de flujo eléctrico, donde $\vec{B}$ es el campo magnético, $\mu_0 \vec{J}$ es la densidad de corriente eléctrica libre y $\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ es la corriente de desplazamiento para cumplir la ley de la continuidad[11].

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

En la siguiente figura se muestra de forma gráfica las 4 leyes del electromagnetismo (Ver Fig. 1.3)

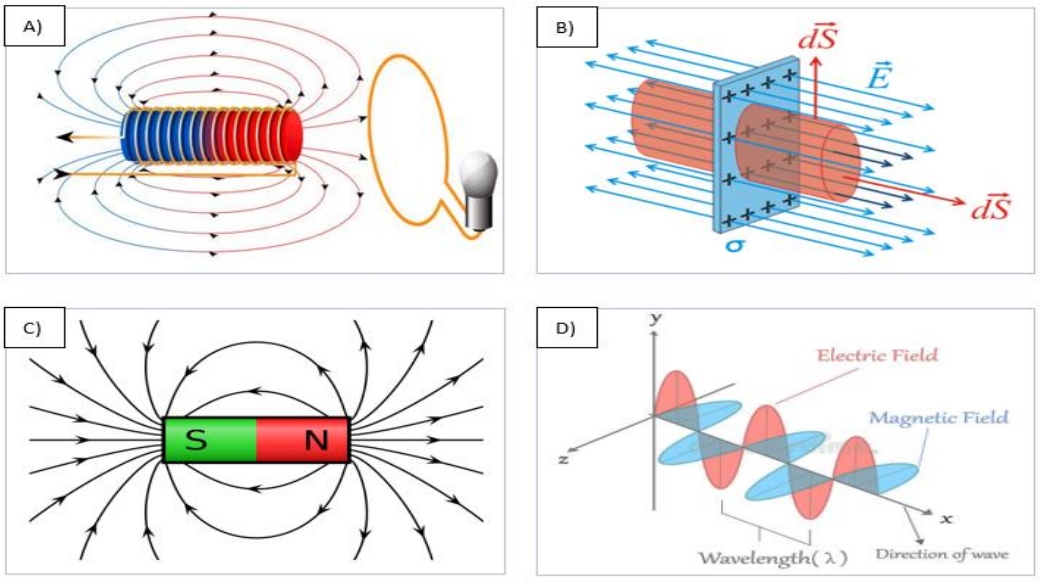


Fig. 1.3 A) Ley de inducción de Faraday, B) Ley de Gauss de Campo Eléctrico, C) Ley de Gauss de campo magnético y D) Ley de Ampere-Maxwell.

1.7 Aleaciones Ferrosas

Las aleaciones ferrosas se basan en aleaciones de hierro y carbono, incluyen los aceros al bajo carbono, los aceros aleados, aceros de herramientas y los hierros fundidos. Los aceros se producen de dos formas, por el refinado del mineral de hierro o reciclando chatarra de acero.

El punto que diferencia los aceros de los hierros fundidos es el 2.11% de C, donde la reacción eutéctica es posible. En el caso de los aceros, el enfoque se concentra en la parte eutectoide de la Fig. 1.4, en la que las líneas de solubilidad y la isoterma eutectoide están especialmente identificadas. Casi todos los tratamientos térmicos del acero están orientados a producir la mezcla de ferrita y cementita que da la combinación correcta de propiedades. La perlita es un microconstituyente formado por una mezcla laminar de ferrita y cementita. En la bainita, que se obtiene por transformación de austenita en un subenfriamiento grande, la cementita está más redondeada que en la perlita. La martensita revenida, una mezcla de cementita muy fina y casi redondeada en ferrita, se forma cuando la martensita se recalienta después de su formación[7].

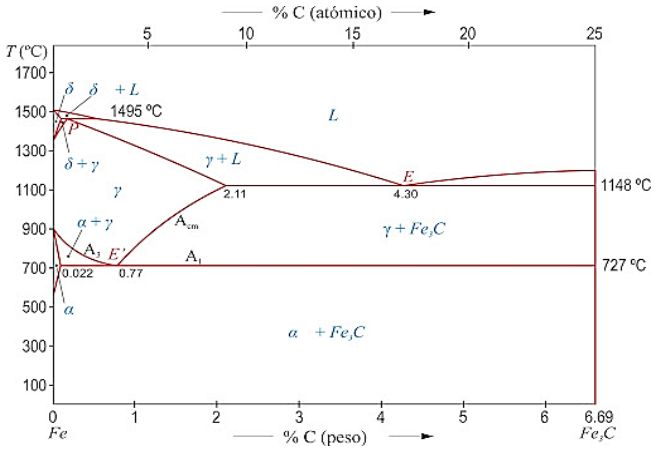


Fig. 1.4 Diagrama de fases hierro-carbono (Fe-C).

1.8 Clasificación de los Aceros de Acuerdo con AISI y SAE

De acuerdo con el American Iron and Steel Institute (AISI) y la Society of Automotive Engineers (SAE), se proporcionan sistemas de designaciones que se basan en un número de cuatro o cinco dígitos para la clasificación de los aceros. Los primeros dos números se refieren a los principales elementos de aleación presentes, y los últimos dos o tres números señalan el porcentaje de carbono. Un acero AISI 1040 es un acero al bajo carbono con 0.40% de C. Un acero SAE 10120 es un acero al bajo carbono que contiene 1.20% de C. Un acero AISI 4340 es un acero de aleación que contiene 0.40% de C. Es necesario mencionar que la American Society for Testing of Materials (ASTM) tiene

una forma diferente de clasificar estos materiales, pues ha elaborado una lista de especificaciones que describe aceros apropiados para distintas aplicaciones[7].

Los aceros se pueden clasificar con base en su composición. Los aceros al carbono contienen hasta 2% de este elemento. Estos aceros pueden también contener otros elementos, por ejemplo, Si (máximo 0.6%), Cu (hasta 0.6%) y Mn (hasta 1.65%). Los aceros descarburizados contienen menos de 0.005% de C. Los aceros al carbono ultra bajo contienen un máximo de 0.3% de carbono. También contienen muy bajos niveles de otros elementos, como Si y Mn. Los aceros al bajo carbono contienen 0.04 a 0.15% de carbono. Estos aceros se emplean para fabricar carrocerías de automóviles y cientos de otras aplicaciones.

El acero dulce contiene 0.15 a 0.3% de carbono y se usa en edificios, puentes, tuberías, etc. Los aceros al medio carbono contienen 0.3 a 0.6% de carbono y se usan para fabricar maquinaria, tractores, equipo de minería, etc. Los aceros al alto carbono contienen más de 0.6% de carbono y se usan para fabricar resortes, ruedas para ferrocarril y otros objetos semejantes. Se sabe que los hierros colados son aleaciones de Fe-C que contienen de 2 a 4% de carbono. Los aceros aleados son composiciones que contienen niveles más altos de elementos de aleación[7].

EL AISI define los aceros aleados como “aceros que exceden uno o más de los siguientes límites de composición: ≥1.65% de Mn, 0.6% de Si o 0.6% de Cu. El contenido total de carbono es de hasta 1% y el contenido total del elemento de aleaciones está por debajo de 5%”.

Un material es también un acero aleado si se especifica una concentración definida de elementos de aleación como Ni, Cr, Mo, Ti, etc. Estos materiales se usan para fabricar herramientas como martillos, cinceles, etc., también piezas como ejes, flechas y engranajes. Ciertos aceros de calidad especial pueden contener niveles más altos de azufre (>0.1%) o plomo (~0.15 a 0.35%) para facilitar su maquinado. Sin embargo, estos aceros no pueden soldarse con facilidad. Recientemente, investigadores han ideado un “acero verde” donde el plomo, una toxina ambiental, es sustituido con estaño y/o amonio (Ver Tabla 2)[7].

AISI-SAE	% C	% Mn	% Si	% Ni	% Cr	Otros
1020	0.18-0.23	0.30-0.60				
1040	0.37-0.44	0.60-0.90				
1060	0.55-0.65	0.60-0.90				
1080	0.75-0.88	0.60-0.90				
1095	0.90-1.03	0.30-0.50				
1140	0.37-0.44	0.70-1.00				0.08-0.13% S
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.15-0.30		0.80-1.10	0.15-0.25% Mo
4340	0.38-0.43	0.60-0.80	0.15-0.30	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.300% Mo
4620	0.17-0.22	0.45-0.65	0.15-0.30	1.65-2.00		0.20-0.30% Mo
52100	0.98-1.10	0.25-0.45	0.15-0.30		1.30-1.60	
8620	0.18-0.23	0.70-0.90	0.15-0.30	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25% Y
9260	0.56-0.64	0.75-1.00	1.80-2.20			

Tabla 2. Composiciones de algunos aceros por AISI-SAE[8].

Los aceros también pueden clasificarse con base en su procesamiento. Por ejemplo, el término “aceros obtenidos por colada continua” se refiere a aceros colados continuamente. Los aceros galvanizados tienen un recubrimiento de zinc para resistir la corrosión. Del mismo modo, el acero con recubrimiento de estaño se usa para fabricar latas y otros productos resistentes a la corrosión. El estaño se deposita por medio de un proceso denominado galvanoplastia, también conocido como “electrodeposición de recuadro continuo”. Los “aceros E” se funden usando un horno eléctrico mientras que los “aceros B” contienen una concentración pequeña pero significativa de boro (0.0005 a 0.003%)[7].

1.9 Tratamientos Térmicos de los Aceros

Es el cambio o modificación de las propiedades de un material con calentamiento y enfriamiento controlado, este término incluye proceso de reblandecimiento, endurecimiento y tratamiento de superficies. El reblandecimiento incluye, liberar esfuerzos, recocido, normalización y esferoidización. El endurecimiento abarca procesos como templado en martensita, templado en austenita y endurecimiento entre sí. Entre los procesos para tratamiento de superficie se encuentra la nitruración, cianuración, carburación, endurecimiento por inducción y a la flama. Estos procesos se efectúan para aumentar la resistencia y dureza, mejorar la ductilidad, mejorar la facilidad de trabajo, liberar esfuerzos, endurecer herramientas y modificar las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales. El tratamiento térmico, incluye calentar y enfriar la pieza de trabajo para alterar su estructura. Para evitar o minimizar los efectos indeseables de la configuración de la pieza de trabajo, en el acabado de la superficie y en las tolerancias dimensionales, la preparación del trabajo y el tipo de pieza de trabajo antes del tratamiento, son factores que deben considerarse. Se ha encontrado que la forma física o el diseño de una pieza se refleja en el tratamiento térmico. Por lo tanto, se debe

tener en cuenta factores básicos, como el equilibro de las áreas de masa, evitar esquinas agudas y cortes internos como cuñeros y mantener el mismo espesor de los cubos de engranes, poleas y herramientas de corte[9].

1.10 Materiales Ferromagnéticos

Toda la materia responde a un campo magnético, la escala de medición de la respuesta de los electrones y los átomos de un material determina si es magnético o no magnético[7]. Estrictamente hablando, no existe ningún material "no magnético". Todo está formado por átomos y los átomos están formados por electrones que giran alrededor de los átomos, de un modo parecido a una espira portadora de corriente que genera un campo magnético (según el modelo de Bhor). Entonces, toda la materia responde a un campo magnético. La forma en que se mide la escala de esta respuesta de los electrones y los átomos de un material determina si es muy magnético o poco magnético y también da lugar a muchos tipos de fenómenos. Ejemplo de materiales ferromagnéticos son el hierro (Fe), níquel (Ni), cobalto (Co) y algunas de sus aleaciones. Además, incluyen numerosos materiales cerámicos, como la ferrita de níquel zinc y la ferrita de manganeso zinc. Por lo general, el término "no magnético" significa que el material no es ferromagnético ni ferrimagnético. Estos materiales "no magnéticos" se clasifican como diamagnéticos (superconductores) o paramagnéticos. También se encuentran materiales que son antiferromagnéticos o superparamagnéticos. Los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos suelen subclasificarse como materiales magnéticos blandos o duros. Los aceros al carbono puro o al hierro de alta pureza son ejemplos de material magnéticamente blando porque pueden magnetizarse, pero cuando la fuente magnetizante se retira pierden el comportamiento semejante al de un imán[7].

El comportamiento ferromagnético es provocado por los niveles de energía que no están totalmente ocupados en el nivel 3d del hierro, el níquel y el cobalto de acuerdo con el principio de exclusión de Pauli, donde los dos electrones dentro de un mismo orbital deben tener espines opuestos (Ver Fig. 1.5)[7].

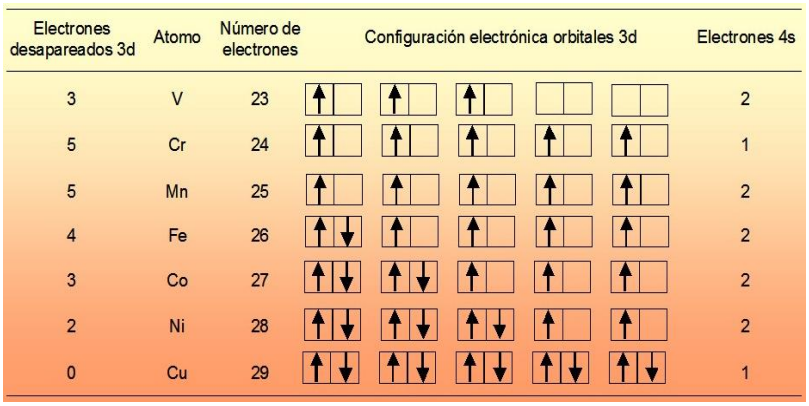


Fig. 1.5 Principio de Exclusión de Pauli para orbitales 3d.

1.11 Recipientes Sujetos a Presión

Un recipiente sujeto a presión (RSP) es el equipo construido para operar a una presión de operación superior a la atmosférica o sometido a vacío. La presión puede ejercerse sobre la superficie interior, exterior y/o los componentes del recipiente. Dicha presión puede provenir de fuentes externas o mediante la aplicación de calor, desde una fuente directa, indirecta o cualquier combinación de estas[3].

De acuerdo con las tareas que desempeñará este tipo de equipo (RSP), surge la necesidad de dotarlos de múltiples características para asegurar un buen funcionamiento en el área industrial; entre ellos destacan, espesores mínimos necesarios para la operación del RSP, conexiones dotadas de acuerdo con el libraje de presión de diseño y operación, implementación de dispositivos de seguridad para el relevo de presión, instrumentos de temperatura para el monitoreo continuo del proceso, termopozos, controladores PLCs, entre otros; esto ayuda a facilitar el transporte de fluidos peligrosos, inertizar materia prima o producto terminado a partir del uso de nitrógeno en estado gaseoso, transferencias entre uno y otro equipo conectado en serie, realizar procesos de separación, lavado de gases, reacciones, oligomerizaciones, polimerizaciones, cambio de estado de la materia, entre otras características.

Este tipo de equipos se encuentran implementados como:

- Torres de destilación
- Tanques de almacenamiento
- Tanques de expansión

- Reactores
- Condensadores
- Intercambiadores de calor de tubos o placas
- Torres empacadas como lavadoras de gases
- Calderas o Generadores de vapor
- Filtros tipo lenteja
- Autoclaves
- Evaporadores de película, por mencionar algunos.

El tipo de industria en el que se pueden emplear son diversos, entre los que destacan:

- Farmacéutica
- Química
- Cosmética
- Inyección de Plásticos
- Siderúrgica
- Petrolera
- Alimentos

1.12 Materiales para Recipientes Sujetos a Presión

Teóricamente cualquier tipo de RSP es apto para el desarrollo de un proceso químico siempre y cuando cumpla con las características físicas, químicas y mecánicas de acuerdo con el estudio previo del mismo proceso. De acuerdo con lo anterior, se debe tener análisis de la termodinámica a la que se expondrá el recipiente, se procederá a la base de datos de las normas aplicables por medio de la American Society of Mechanical Engineers (ASME) pues esta contiene listas de materiales, procedimientos y requerimientos necesarios para la fabricación y puesta en marcha de los recipientes[1].

Durante mucho tiempo y en la actualidad, gran mayoría de los recipientes sujetos a presión están hechos a base de acero, ya que las normas actuales demandan el empleo de este material por sus

diversas características como la resistencia al impacto en procesos que emplean bajas temperaturas según la materia a almacenar. Es importante mencionar que existe un sinfín de fluidos dentro y fuera de la industria, un caso particular es el ácido clorhídrico, si bien este ácido no es recomendable almacenarlo en tanques de acero al carbono o de acero inoxidable por su alto ataque químico. Existe un área específica que menciona el uso de materiales como la fibra de vidrio, fibra de carbono, CPVC, PVC, entre otros, los cuales por sus propiedades químicas resultan ser materiales de contención excelentes para este tipo de fluidos. Aunado a esto, otra gama de fluidos como el antes mencionado, no es conveniente presurizarlos y se recomienda el almacenamiento en recipientes atmosféricos que también deben de cumplir con normas específicas; el desarrollo de estos equipos queda fuera del alcance de este estudio.

Gracias al avance en la ciencia e ingeniería de materiales, los recipientes sujetos a presión a base de acero al carbono o inoxidables pueden, ser combinados con otro tipo de materiales para aumentar la vida remanente de los mismos. Un claro ejemplo es el uso de ChemLine 784/32® como agente anticorrosivo utilizado en producción de plásticos que utilicen precursores a partir de cloro como materia prima para su fabricación.

1.13 Peligros Potenciales de los Recipientes Sujetos a Presión

Hasta hace unos 25 o 30 años, dentro de la industria química era común la producción mediante el empleo de recipientes totalmente atmosféricos, pues se desconocía en gran medida un dispositivo de seguridad o un sistema de reacción química cerrado. Este factor propiciaba accidentes o incidentes dentro del lugar de trabajo, pues se generaba una gran exposición del personal técnico en cierto tipo de reacciones ya que el desconocimiento de la integridad mecánica era casi nulo. No se tenía en cuenta el uso de recipientes herméticos, no se conocía el concepto de presión y todos los equipos funcionaban atmosféricamente liberando grandes cantidades de energía, vapores tóxicos al medio ambiente y reacciones totalmente exotérmicas que aceleraban un inminente accidente principalmente a la salud del trabajador. Debido al carente sentido del uso de un mantenimiento preventivo, los accidentes productivos eran algo común de ver pues las limpiezas si bien en la actualidad se siguen realizando de forma mecánica (manual), en estos años se hacían sin un correcto estudio de riesgos potenciales a los que se encontraban expuestos como áreas con riesgo de explosión e intoxicación alto.

Un recipiente sujeto a presión que no cuente con el certificado de fabricación, prueba hidrostática o estampado ASME y se encuentra en trabajo de producción es un riesgo potencial para el trabajador, las instalaciones y el medio ambiente mismo.

Durante las inspecciones es común detectar equipos que por el ambiente en el que desempeñan tareas específicas, presentan corrosión, desgaste, daños estructurales y rupturas específicas en elementos de su periferia, pues en un 80% de los casos, los equipos se encuentran a la intemperie por su misma naturaleza. Es por esto que: una de las tareas primordiales de un supervisor de producción, es reportar al ingeniero de integridad mecánica y confiabilidad todos los hallazgos encontrados durante recorridos periódicos de seguridad, pues el mantenimiento a recipientes sujetos a presión y estructuras no es tarea única de la ingeniería de integridad mecánica.

Los riesgos potenciales comunes a los que específicamente la industria química se expone son:

- Intoxicaciones o envenenamientos
- Explosiones
- Implosiones (por uso incorrecto de los dispositivos de seguridad)
- Incendios
- Quemaduras químicas
- Quemaduras por radiación térmica
- Bloqueo eléctrico incorrecto
- Atrapamiento en espacios confinados
- Entre otros.

Por lo anterior mencionado es de suma importancia contar con estudios de inspección basada en riesgos para determinar las condiciones en las que se desea desarrollar un mantenimiento en específico. Se deberá solicitar al fabricante estudios de ensayos no destructivos principalmente: estudios de uniones soldadas por líquidos penetrantes o partículas magnéticas (según aplique las especificaciones del equipo), certificado de pruebas de hermeticidad como pruebas hidrostáticas o neumáticas (recientemente las pruebas neumáticas no son empleadas con mucha frecuencia debido al alto riesgo que estas representan), estampado ASME de acuerdo con los datos de presión y temperatura de diseño, especificación de presión máxima de trabajo y datos de presiones negativas (vacío si es que aplica para el equipo) y espesores mínimos del equipo entre otros datos de fabricación para su operación.

Por otro lado, debido al constante cambio de circunstancias a las que se enfrenta el mantenimiento de recipientes sujetos a presión, es pertinente conocer el área y las condiciones de trabajo en las que se pretende realizar el trabajo requerido. A continuación, se expone la normatividad básica para

la identificación de riesgos tanto para ambientes con atmósferas explosivas, como para ambientes que presenten riesgos por contacto con sustancias químicas peligrosas y como estas permiten un óptimo desempeño del mantenimiento a los RSP.

1.14 Normatividad Asociada a la Inspección de RSP

Uno de los objetivos principales dentro de cualquier tipo de industria, es llevar a cabo el mayor mantenimiento con respecto al menor costo posible. A partir de lo anterior, la seguridad industrial funge un papel importante en el desarrollo de trabajos de mantenimiento, por lo que, la capacitación y desarrollo de las normas aplicables en las áreas de trabajo se deberán gestionar con un alto grado de cumplimiento.

El uso de buenas prácticas y el apego a las normas aplicables en los sitios de trabajo, se refleja en la reducción de accidentes y en el aumento de beneficios productivos pues a través de los lineamientos de ecología higiene y seguridad se vislumbra la mitigación de los factores presentes que afecten el mantenimiento u operación de los equipos y por consiguiente se genere un área de trabajo segura para el técnico que desarrolle dicho mantenimiento.

Además, para el análisis correcto del desarrollo de una técnica adecuada de inspección, surge la necesidad de abordar las normas aplicables con base en las condiciones de trabajo en las que se encuentra el equipo, ya que estas serán referencia ante el plan de respuesta a emergencias.

a) NOM-002-STPS-2010: Condiciones de seguridad-prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo.

El enfoque de esta norma se dirige hacia los lineamientos específicos con los que debe contar un centro de trabajo y que deberán cumplirse los mandatorios que esta dicta.

Ya que las condiciones en las que se encuentra el tanque de almacenamiento son adversas al desarrollo de la inspección por técnicas que impliquen fuentes de ignición; se deberá corroborar el cumplimiento de esta norma en el área de trabajo, específicamente en el área en la que se encuentra instalado.

Con base en lo anterior, dentro de la norma en el apartado número 4, punto 32 se define un *trabajo en caliente* como:

"todos aquellos procesos o actividades en que se manejen equipos que generen flama, calor, chispa, arco eléctrico o incandescencia, tales como soldadura, corte, abrasión y fundición, entre otros" [26]

Para el desarrollo de este tipo de trabajo se deberá hacer un recorrido previo para conocer las condiciones del área de trabajo como se menciona a continuación con base en el apartado 7 de la presente norma:

1. Disposición e identificación de extintores de acuerdo con el lay-out del sitio de trabajo, verificar componentes y especificaciones con los que estos deberán contar.
2. Identificar las áreas clasificadas como riesgo de incendio alto.
3. Que la señalización de tuberías sea visible conforme a la NOM-026-STPS-2008 o las que le sustituyan.
4. Contar con señalizaciones de obligaciones y prohibiciones dentro del área de trabajo.
5. Identificación de elevadores y señalamientos de prohibición de uso en caso de incendio.
6. Que los equipos contra incendio se encuentren libres de cualquier tipo de obstrucción, sean de fácil acceso y que las rutas de evacuación se encuentren debidamente señaladas.
7. Salidas y rutas de evacuación con forme a la NOM-026-STPS-2008 o las que le sustituyan.
8. Extintores disponibles en las áreas de trabajo con forme a lo establece la norma.

El manejo de la distribución e implementación de medidas y protocolos de seguridad tendrá que ser validado por las áreas o departamentos competentes dentro del lugar de trabajo con base en la norma de apoyo y así mismo se deberán actualizar de acuerdo con un tiempo de trabajo establecido.

b) NOM-018-STPS-2015 Sistema armonizado para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo.

La norma que se menciona a continuación tiene como objetivo principal: presentar los requisitos necesarios con base al sistema globalmente armonizado a fin de identificar y comunicar los peligros y riesgos, a los que se enfrentan los trabajadores y el personal que actúe en casos de emergencia en el sitio de trabajo a razón de prevenir daños con sustancias peligrosas[27].

De acuerdo con el plan de inspección y mantenimiento al tanque en cuestión, esta norma desarrolla la banda de control (*control banding)* con base en el punto 4.11 de la presente norma. Esta técnica utiliza la evaluación y administración de riesgos laborales, propone medidas de control para la protección de los trabajadores y se centra en las categorías de peligro y exposición potencial en el sitio.

Aunado a ello, se debe cumplir con el entrenamiento y capacitación que la norma demanda en cuestión a la identificación de las sustancias o mezclas presentes en el área de trabajo, pues es de vital importancia conocer las hojas de seguridad diseñadas bajo los puntos del sistema globalmente armonizado, así como las señaléticas con las que deben contar los recipientes sujetos a presión estacionarios o móviles de alta y baja capacidad. Además de contar con la actualización cada

determinado tiempo, cada vez que se actualicen las hojas de seguridad, o exista un nuevo compuesto químico peligroso en el centro de trabajo con base en el apartado número 11.1 de la presente norma.

Las hojas de seguridad están constituidas por 16 secciones a tomar en cuenta como mandatorios en la presente norma para una capacitación e identificación de riesgos presentes en el centro de trabajo:

a. Identificación de la sustancia química peligrosa o mezcla y del proveedor o fabricante
b. Identificación de los peligros
c. Composición/información sobre los componentes
d. Primeros auxilios
e. Medidas contra incendios
f. Medidas que deben tomarse en caso de derrame o fuga accidentales
g. Manejo y almacenamiento
h. Controles de exposición/protección personal
i. Propiedades físicas y químicas
j. Estabilidad reactividad
k. Información toxicológica
l. Información ecotoxicológica
m. Información relativa a la eliminación de los productos
n. Información relativa al transporte
o. Información reglamentaria
p. Otras informaciones incluidas a las relativas a la preparación y actualización de las hojas de datos de seguridad.

Por otro lado, la señalización de las sustancias químicas peligrosas deberá encontrarse a la vista de los trabajadores, contratistas y personal especializado en respuesta a emergencias en el centro de trabajo. Estas deberán de ser colocadas en los lugares más visibles de los recipientes sujetos a presión, deberán estar fabricadas de materiales resistentes al medio en el que se encuentran instaladas y al ambiente natural al que están expuestas. Las tintas deben ser indelebles para evitar inconsistencia en la información y deberán ser fáciles de leer y comprender.

La práctica y capacitación del uso de las señaléticas de sustancias químicas peligrosas y el conocimiento del uso de las hojas de seguridad, es vital para determinar el equipo de protección personal adecuado para desarrollar el trabajo de inspección y mantenimiento, por consiguiente, facilitar la comunicación de los peligros químicos.

c) NOM-020-STPS-2011 Recipientes sujetos a presión, recipientes criogénicos y generadores de vapor o calderas- funcionamiento – condiciones de seguridad.

Esta norma presenta como objetivo los requisitos de seguridad necesarios para el funcionamiento y puesta en marcha de recipientes sujetos a presión a fin de prevenir riesgos a los trabajadores y daños a las instalaciones en los sitios de trabajo en los que aplique. La norma oficial mexicana 020, de acuerdo con el punto número 13, apartado 1 enuncia que[3]:

“Para los equipos nuevos clasificados en las categorías II y III, que cuenten con certificado de fabricación o el estampado de cumplimiento con el código o norma de construcción, la primera prueba de presión o los primeros exámenes no destructivos se deberán practicar antes de que se cumplan diez años de la emisión de dicho certificado o de haber obtenido el estampado, y las siguientes pruebas o exámenes al menos cada cinco años, dentro de los sesenta días naturales previos a la conclusión de cada quinquenio.”

“Tratándose de equipos nuevos clasificados en las categorías II y III, que no cuenten con el certificado de fabricación o el estampado de cumplimiento con el código o norma de construcción, o los equipos usados de las mismas categorías, con o sin el certificado o el estampado antes citados, la primera prueba de presión o los primeros exámenes no destructivos se deberán practicar antes de su puesta en funcionamiento y posteriormente, al menos cada cinco años, dentro de los sesenta días naturales previos a la conclusión de cada quinquenio.” En la Tabla 3 se muestra la categorización de los equipos según sus características de fabricación y trabajo conforme a la Norma Oficial Mexicana 020:

Categoría	Fluido	Presión	Volumen
I	Agua, Aire y/o fluido no peligroso	Menor o igual a 490.33 kPa	Menor o igual a 0.5m^3
II	Agua, Aire y/o fluido no peligroso	Menor o igual a 490.33 kPa	Mayor a 0.5m^3
	Agua, Aire y/o fluido no peligroso	Mayor a 490.33 kPa y menor o igual a 784.53 kPa	Menor o igual a 1m^3
	Fluidos Peligrosos	Menor o igual a 686.47 kPa	Menor o igual a 1m^3
III	Agua, Aire y/o fluido no peligroso	Mayor a 490.33 kPa y menor o igual a 784.53 kPa	Mayor a 1m^3
	Agua, Aire y/o fluido no peligroso	Mayor a 784.53 kPa	Cualquier Volumen
	Fluidos Peligrosos	Menor o igual a 686.47 kPa	Mayor a 1m^3
	Fluidos Peligrosos	Mayor o igual a 686.47 kPa	Cualquier Volumen

Tabla 3. Tipos de Categorías para Recipientes Sujetos a Presión[3].

Para realizar un programa de revisión y mantenimiento a los equipos, *NOM-020-STPS-2011 punto 10* menciona los puntos específicos para los equipos categorizados como II y III, donde se priorizará la categoría III debido a la naturaleza del equipo en cuestión.

Las fechas de ejecución

a) *El periodo de ejecución*

b) *El tipo y la descripción general de las actividades por realizar y*

c) *El nombre del (de los) responsable(s) de la programación y ejecución de las actividades.*

Por otro lado, el punto número 11 apartado 3 hace referencia al *procedimiento el mantenimiento de los equipos:*

1. *Para el mantenimiento*
   1.1. Para los equipos clasificados en la categoría III, se deberá contar con el manual de mantenimiento que considere al menos:
   a) *El alcance del mantenimiento*
   b) *La descripción de las principales actividades por orden de ejecución*
   c) *Las medidas de seguridad por adoptar durante su ejecución*
   d) *El equipo de protección personal o colectiva a utilizarse para cada tipo de actividad de trabajo*
   e) *Los aparatos, instrumentos y herramientas por utilizar*
   f) *Los permisos de trabajo requeridos y*
   g) *Las instrucciones de respuesta a emergencia.*

Conforme a esta norma, en el punto número 19 apartado 2 menciona las unidades de verificación de la siguiente manera:

Tratándose de los equipos clasificados en la categoría III, el patrón tendrá la opción de:

a) *Constituir su propia unidad de verificación Tipo "B", para que evalúe el cumplimiento de sus equipos con la Norma y emita los dictámenes de evaluación de la conformidad, con independencia de juicio, integridad en relación con sus actividades y sin conflicto de intereses o*

b) *Contratar los servicios de una unidad de verificación tipo "A", "B" o "C", para que evalúe el cumplimiento de los equipos con la Norma y emita los dictámenes de evaluación de la conformidad o*

c) *Contratar los servicios de una unidad de verificación tipo "C", para que preste los servicios de elaboración, ejecución y validación de los requerimientos establecidos en esta Norma y*

la verificación de su grado de cumplimiento, y emita el dictamen de evaluación de la conformidad con reporte de servicios.

Los servicios de elaboración, ejecución y validación de los requerimientos establecidos en la Norma que proporcionen las unidades de verificación tipo "C", deberán comprender, entre otros:

a) La elaboración de programas, procedimientos y memorias de cálculo, entre otros

b) El aval de las memorias de cálculo con su nombre, número de cédula profesional y firma

c) La impartición de capacitación a los trabajadores y/o

d) La aplicación de pruebas de presión y exámenes no destructivos, así como la interpretación de sus resultados

El patrón podrá consultar el directorio vigente de las unidades de verificación acreditadas y aprobadas por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social.

Las unidades de verificación que evalúen la conformidad con la Norma deberán aplicar los criterios de cumplimiento establecidos en el procedimiento para la evaluación de la conformidad del capítulo 20 de la misma Norma.

Las unidades de verificación deberán emitir un dictamen o dictamen con reporte de servicios, los cuales habrán de contener:

a) Datos del centro de trabajo

1. El nombre, denominación o razón social

2. El domicilio completo y

3. El nombre y firma del representante legal

b) Datos de la unidad de verificación

1. El nombre, denominación o razón social

2. El número de acreditación otorgado por la entidad de acreditación

3. Las fechas de otorgamiento de la acreditación, y de la aprobación por parte de la Secretaría

4. El nombre y firma del responsable de emitir el dictamen

5. El lugar y fecha de emisión del dictamen y

6. *La vigencia del dictamen*

c) *Datos del equipo*

1. *El nombre genérico del equipo*
2. *El número de serie o único de identificación, la clave del equipo o número de TAG*
3. *El número de control asignado por la Secretaría, en su caso*
4. *El año de fabricación*
5. *El (los) fluido(s) manejado(s)*
6. *La(s) presión(es) de diseño*
7. *La(s) presión(es) de operación*
8. *La(s) presión(es) de calibración, en su caso*
9. *La capacidad volumétrica en el caso de recipientes sujetos a presión y recipientes criogénicos*
10. *La capacidad térmica, en el caso de generadores de vapor o calderas*
11. *La(s) temperatura(s) de diseño*
12. *La(s) temperatura(s) de operación*
13. *El tipo de dispositivos de relevo de presión*
14. *El número de dispositivos de relevo de presión y*
15. *El área de ubicación del equipo*

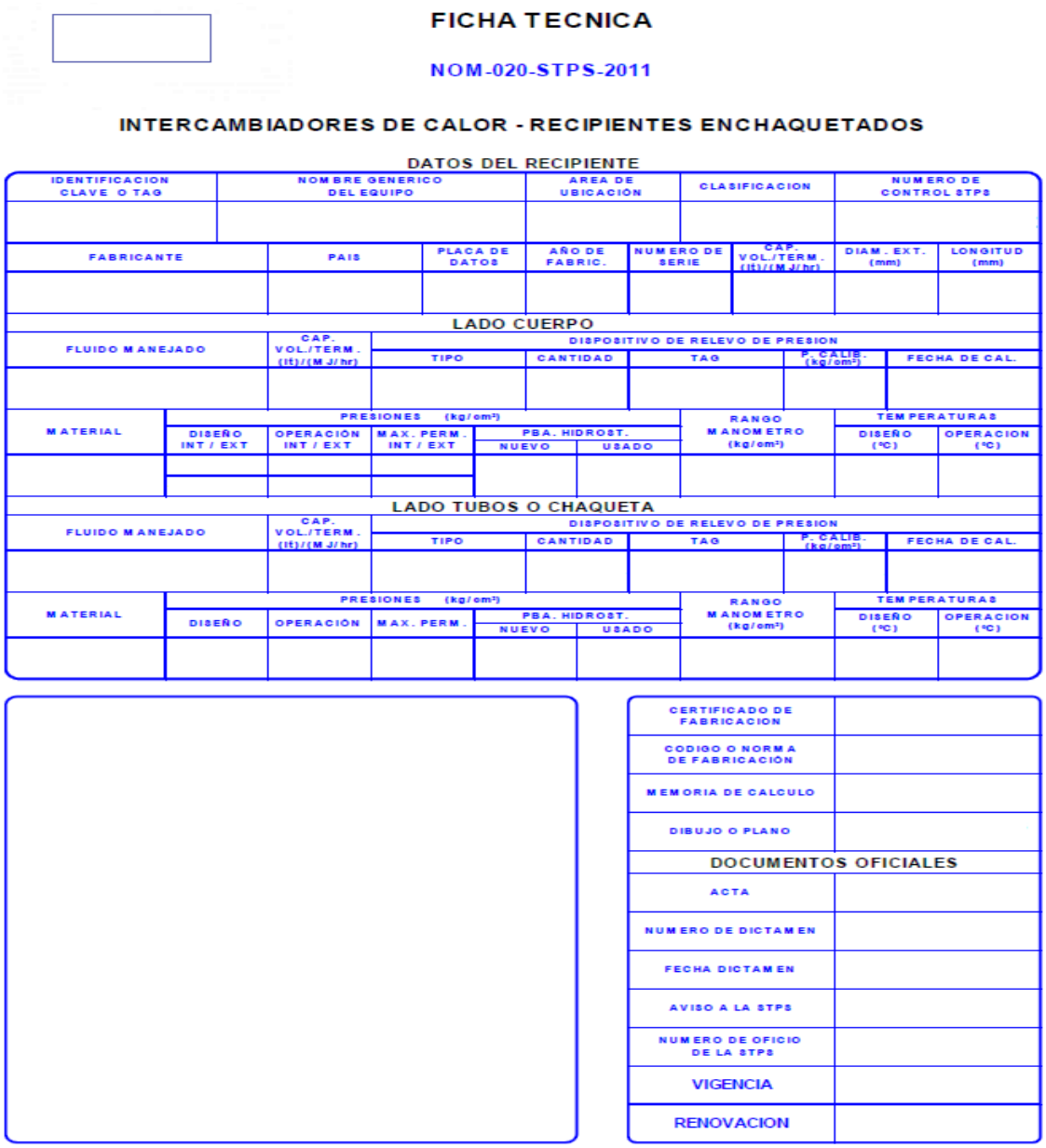
d) *Datos de las pruebas de presión, exámenes no destructivos o métodos alternos realizados al equipo:*

1. *El tipo de pruebas de presión, exámenes no destructivos o métodos alternos y*
2. *El resultado de las pruebas de presión, exámenes no destructivos o métodos alternos y*

e) *Número de dictamen o de dictamen con reporte servicios*

La vigencia de los dictámenes o de los dictámenes con reporte de servicios, emitidos por las unidades de verificación, será de diez años, tratándose de equipos nuevos, y de cinco años, en el caso de equipos usados.

A continuación, se presenta el detallado de datos específicos en una ficha técnica de recipientes sujetos a presión de acuerdo con la unidad de inspección por ensayos no destructivos (Ver Fig. 1.6).



FICHA TECNICA

NOM-020-STPS-2011

INTERCAMBIADORES DE CALOR - RECIPIENTES ENCHAQUETADOS

DATOS DEL RECIPIENTE

IDENTIFICACION CLAVE O TAG	NOMBRE GENERICO DEL EQUIPO	AREA DE UBICACION	CLASIFICACION	NUMERO DE CONTROL STPS

FABRICANTE	PAIS	PLACA DE DATOS	AÑO DE FABRIC.	NUMERO DE SERIE	CAP. VOL./TERM. (lt)/(MJ/hr)	DIAM. EXT. (mm)	LONGITUD (mm)

LADO CUERPO

FLUIDO MANEJADO	CAP. VOL./TERM. (lt)/(MJ/hr)	DISPOSITIVO DE RELEVO DE PRESION				
		TIPO	CANTIDAD	TAG	P. CALIB. (kg/cm²)	FECHA DE CAL.

MATERIAL	PRESIONES (kg/cm²)					RANGO MANOMETRO (kg/cm²)	TEMPERATURAS	
	DISEÑO INT / EXT	OPERACIÓN INT / EXT	MAX. PERM. INT / EXT	PBA. HIDROST. NUEVO	PBA. HIDROST. USADO		DISEÑO (°C)	OPERACION (°C)

LADO TUBOS O CHAQUETA

FLUIDO MANEJADO	CAP. VOL./TERM. (lt)/(MJ/hr)	DISPOSITIVO DE RELEVO DE PRESION				
		TIPO	CANTIDAD	TAG	P. CALIB. (kg/cm²)	FECHA DE CAL.

MATERIAL	PRESIONES (kg/cm²)					RANGO MANOMETRO (kg/cm²)	TEMPERATURAS	
	DISEÑO	OPERACIÓN	MAX. PERM.	PBA. HIDROST. NUEVO	PBA. HIDROST. USADO		DISEÑO (°C)	OPERACION (°C)

CERTIFICADO DE FABRICACION	
CODIGO O NORMA DE FABRICACIÓN	
MEMORIA DE CALCULO	
DIBUJO O PLANO	
DOCUMENTOS OFICIALES	
ACTA	
NUMERO DE DICTAMEN	
FECHA DICTAMEN	
AVISO A LA STPS	
NUMERO DE OFICIO DE LA STPS	
VIGENCIA	
RENOVACION	

Fig. 1.6 Diseño de una ficha técnica que cumple con los datos especificados por la Norma Oficial Mexicana 020 emitida por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social en 2011 proporcionada de la base de datos de la compañía especializada en ensayos no destructivos M&M Ingenieros®.

d) API 510: Código de Inspección a Recipientes a Presión en Servicio

Este código de inspección cubre la inspección de equipos en servicio, reparaciones, alteraciones y clasificaciones de actividades para recipientes a presión y dispositivos de protección de relevo de presión a recipientes a presión. Este código de inspección aplica a todos los recipientes a presión de procesos de hidrocarburos y procesos químicos que hayan sido puestos en servicio excluyendo a equipos nuevos que son inspeccionados bajo los criterios de aceptación con el código ASME.

Si uno de los recipientes no se rige por el código ASME debido a la nueva orientación de construcción, requerimientos de diseño, materiales, fabricación, la inspección será realizada conforme a API 510 en vez de evaluarse con código ASME.

El intento de este código es especificar la inspección de recipientes en servicio y el monitoreo de las condiciones que son necesarias para determinar la integridad del recipiente a presión y los dispositivos de relevo presión. El programa debe proporcionar evaluaciones razonablemente precisas y oportunas para determinar si algún cambio en la condición del equipo a presión podrá comprometer la operación continua segura.

Para realizar el plan de mantenimiento a recipientes a presión en servicio, el código API 510 punto 5.1 menciona que: el plan de inspección de mantenimiento debe ser establecido para todos los recipientes a presión y los dispositivos de relevo de presión.

Con respecto al punto 5.1.1: desarrollo del plan de inspección; el plan de inspección será desarrollado por un inspector o un ingeniero. Se deberá consultar a un especialista en corrosión cuando sea necesario clarificar el mecanismo de daño potencial y especificar las áreas donde esto pueda ocurrir. Se consultará al especialista en corrosión cuando se desarrolle el plan de inspección de recipientes que operen a temperaturas elevadas cercanas a 400°C (750°F).

El plan de inspección es desarrollado a partir de la recolección de datos de operación de diversas fuentes. El equipo será evaluado en base en presencia o posibles tipos mecanismos de daño. Se evaluará el alcance y los métodos de ensayos no destructivos para asegurar que se identifica el mecanismo de daño y la gravedad del daño[25].

1.15 Ensayos No Destructivos

La industria de fabricación de materiales se enfrenta a la regulación, control de procesos y mejora continua de materiales. Por ello se encuentra en la necesidad de crear procedimientos, planes de trabajo, desarrollo de técnicas de caracterización física, óptica, mecánica y métodos que aseguren

el desempeño adecuado de materiales específicos como lo son metales, cerámicos, polímeros, materiales inteligentes, semiconductores y materiales optoelectrónicos entre otros.

Los métodos de ensayos destructivos aplicados a la producción de materiales son benéficos para la detección y determinación de propiedades específicas en ellos. Por otro lado, se ven limitados gracias a que este tipo de ensayos solo se puede aplicar una vez en una población representativa de un lote producción más no así a todo el lote, lo que imposibilita el aseguramiento desempeño de todo el lote de producción, esto conlleva a hacer una distribución global de propiedades en las piezas producidas. Así mismo, encontramos los ensayos no destructivos, este tipo de ensayos permite la inspección del lote completo de la producción de los materiales sin dañar ni alterar sus propiedades físicas o químicas. Esto fortalece el área de calidad de la fabricación de materiales ya que la obtención de las propiedades no es solamente puntual si no que son globalmente seguras; esto se reditúa en un ahorro de costos como beneficios económicos y un incremento en la confiabilidad de los materiales fortaleciendo la prevención de accidentes y su mejora continua[6]. Es importante destacar que las técnicas de ensayos no destructivos no reemplazan a las técnicas de ensayos destructivos, pues las propiedades que se pueden obtener a través de estas son totalmente diferentes.

Los ensayos no destructivos han seguido en los últimos años una línea de progreso ascendente, tanto en la mejora de los métodos convencionales como en el desarrollo de nuevas técnicas, permitiendo conocer mejor tanto cualitativa como cuantitativamente el estado de los distintos defectos que presentan los materiales, tanto los producidos durante su fabricación como los que se originan durante su transformación, así como los que se derivan de su posterior utilización[6].

La inspección de servicio consta de la aplicación correcta de los ensayos no destructivos con el fin de reducir y eliminar en medida de lo posible las fallas existentes en los materiales a través de los mantenimientos preventivos en la producción de materiales o equipos, por ello se busca mitigar la capacidad de desarrollar defectos y mejorar el desempeño diseñado de estos. Con el fin específico de alcanzar una producción libre de fallos estructurales son necesarios los sistemas de inspección basados en riesgos, a partir de ellos nos vemos facilitados en la creación de procedimientos para la inspección adecuada con el mejor método de ensayo que este estudio nos proporcione. El éxito de la inspección por ensayos no destructivos se rige mediante dos principios básicos: que el ensayo permita desarrollar correctamente las etapas básicas de la inspección de manera que se pueda realizar al ritmo de la producción y que el ensayo sea programado bajo los criterios de rendimiento y de beneficio económico máximo[6].

Los métodos de ensayos no destructivos se pueden aplicar en diferentes áreas entre las que destacan:

- Defectología: se trata de la detección de heterogeneidades, discontinuidades e impurezas, evaluación de los deterioros producidos por agentes ambientales y de la determinación de los efectos que producen los distintos tipos de tratamientos térmicos.
- Caracterización de los materiales: permite conocer las características químicas, estructurales, mecánicas, tecnológicas, propiedades físicas, elásticas, eléctricas y electromagnéticas y la transferencia de calor que tiene lugar en los distintos procesos de transformación.
- Metrología: se tiene en cuenta el control de las dimensiones, presentando especial atención a los recubrimientos que se efectúan en determinados materiales con el fin de mejorar algunas de sus características.

Estos métodos se pueden clasificar de forma general de acuerdo con el principio físico que desempeñan como son (Ver Tabla 4):

a) Pruebas No Destructivas Superficiales

Permiten encontrar discontinuidades en la superficie del material de prueba, y en casos específicos, también discontinuidades subsuperficiales o ligeramente debajo de la superficie; entre estas se encuentran, inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas (yugo electromagnético) y medición de espesores.

b) Pruebas No Destructivas Volumétricas

Este tipo de pruebas nos proporcionan información de la integridad interna de los materiales inspeccionados, se consideran radiografía, ultrasonido industrial y emisión acústica.

c) Pruebas No Destructivas de Hermeticidad

Para los recipientes o elementos sometidos a presión, se encuentran las pruebas que proporcionan datos como, prueba neumática, prueba hidrostática, prueba de burbuja, prueba de fuga, prueba por espectrómetro de masas y pruebas de fuga con rastreadores de halógeno.

E.N.D	Detección	Ventajas	Aplicaciones	Limitaciones
Ultrasonido	Cambios en impedancia acústica	Materiales de bajo espesor. Puede ser autonomizado	Soldadura, fundiciones, recubrimientos	Requiere un medio acoplante, superficie lisa
Líquidos Penetrantes	Grietas, porosidades	Fácil de utilizar, costo medio, sensible a defectos pequeños	Soldadura, cerámicas, plásticos	Defectos superficiales, no útil en materiales porosos
Medición de Espesores	Espesores reales	Capacidad de automatización	Monitoreo para vida remanente de equipos	Sin límites
Partículas Magnéticas	Campos de fuga causados por defectos	Costo moderado, sensible a defectos superficiales	Soldadura, fundiciones, forjas	Materiales ferromagnéticos
Inspección Visual	Cambios superficiales	Capacidad de automatización	Sin límites	Tratamiento superficial

Tabla 4. Campo de Aplicación de los Ensayos No Destructivos[2].

Por otro lado, los END en equipos o piezas en servicio son técnicas de inspección que se utilizan para verificar la sanidad interna y externa de elementos y materiales sin deteriorarlos ni alterar o afectar de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales[3].

Los END pueden ser usados en el material base, durante el proceso de fabricación, en el equipo o pieza final, así como para encontrar discontinuidades que se desarrollen durante el servicio, lo cual permite la remoción o reparación de la pieza dañada y prevenir así el riesgo de operación en los procesos.

Técnicas de Inspección Volumétrica

- Ultrasonido industrial
- Radiografía industrial
- Emisión acústica
- Neutrografía

Técnicas de Inspección Superficial

- Líquidos penetrantes
- Inspección visual
- Medición de espesores

- Partículas magnéticas con yugo electromagnético

Las etapas básicas de una inspección se pueden resumir en 3 sencillos pasos: determinación del método apropiado, lectura de indicaciones obtenidas e interpretación y evaluación de estas.

1. Determinación del Método

Para la determinación del método, se debe tener en cuenta la naturaleza del material o equipo, conocer los procesos por los que fue fabricado, las alteraciones que ha sufrido, el tamaño y la morfología, ya que todos los métodos presentan limitaciones independientemente de los criterios de los cuales se rijan y ventajas presentes entre todos ellos. Conociendo la sensibilidad de cada uno de los métodos se debe determinar previamente el nivel de calidad o de aceptabilidad que éste requiera, deben ser especificados los límites de sensibilidad como las tolerancias para cada uno de los ensayos al mismo tiempo que estos deben de ser plasmados en un acuerdo contractual para cumplir con el alcance y las demandas solicitadas por el cliente[6].

2. Obtención de una Indicación

Este tipo de indicaciones se obtienen a través de los métodos indirectos, en otras palabras, se pueden obtener características buscadas en los materiales a partir de propiedades totalmente diferentes a lo que se espera hallar. De acuerdo con la morfología y naturaleza de los materiales o equipos las indicaciones se van a determinar conforme a las orientaciones que estos materiales presenten, la heterogeneidad de los materiales juega un papel fundamental en la determinación de la falla de los materiales, gracias a esta propiedad, es de suma importancia que se conozca el proceso por el que el equipo en cuestión fue conformado[6].

3. Interpretación y Evaluación de la Indicación

La interpretación y determinación de las indicaciones observadas mediante la inspección se rige por la morfología y naturaleza del equipo o material. La evaluación trata de hacer una correlación entre la naturaleza del equipo, las condiciones en las que se encuentra, las tareas que desempeña y las condiciones de su medio ambiente para así determinar el grado de confiabilidad de las indicaciones que se reporten[6].

A continuación, se hace referencia a los términos asociados que se desglosan a partir de las etapas de inspección:

Discontinuidad: Falta de homogeneidad o interrupción en la superficie de los materiales, esta puede ser causada por el tipo de conformado de obtención del material o bien, puede ser causada intencionalmente por la mano del hombre.

Indicación: Respuesta emitida de la aplicación del ensayo no destructivo desarrollado que necesita ser interpretado para la determinación de su relevancia.

- *Indicaciones relevantes:* Indicación causada por la aplicación de trabajo continuo o sometimiento de esfuerzos a equipos, piezas o estructuras. Estas requieren de evaluación para determinar si pueden ser aceptables o rechazables con base en criterios de aceptación según las normas aplicables de los materiales en inspección.
- *Indicaciones no relevantes:* Causadas por la configuración y estructura de los materiales, conformado de los equipos o acabado superficial, pero no son referentes a imperfecciones por esfuerzos de trabajo.
- *Indicaciones falsas:* Indicaciones mal logradas por la incorrecta aplicación del ensayo no destructivo.

Evaluación: Determinación de la indicación de la discontinuidad no intencional arrojada por ensayos no destructivos para el cumplimiento de los criterios de aceptación especificados.

Interpretación: Determinación del tipo de indicación obtenida como relevante, no relevante o falsa. Para realizar una correcta interpretación, el técnico de inspección debe de tener horas efectivas de trabajo en base a la práctica recomendada por ASNT, experiencia en la aplicación de los ensayos no destructivo, conocer el tipo de material, el método de obtención o fabricación, la configuración geométrica y el uso final al cual será sometido.

El resto de esta sección se dará una introducción al método de inspección por partículas magnéticas con el uso de yugo electromagnético.

1.15.1 Partículas Magnéticas con Yugo Electromagnético

Este método de prueba se basa en el principio físico conocido como magnetismo, el cual exhibe principalmente los materiales ferrosos como el acero al carbón y consiste en la capacidad o poder de atracción entre metales. Es decir, cuando un metal es magnético, atrae en sus extremos o polos a otros metales igualmente magnéticos o con capacidad de magnetizarse.

De acuerdo con lo anterior, si un material magnético presenta discontinuidades en su superficie, estas actuarán como polos, por tal, atraerán cualquier material magnético o ferromagnético que esté cercano a los mismos. De esta forma, un metal ferromagnético puede ser magnetizado local o globalmente y se le puede esparcir sobre la superficie pequeñas partículas magnéticas. Esto permite observar cualquier acumulación de partículas, que evidencia la presencia de discontinuidades superficiales o subsuperficiales en el metal.

En algunas aplicaciones de inspección por partículas magnéticas se utiliza un equipo portátil en forma de “C” que se denomina *yugo electromagnético*, el cual induce un campo magnético longitudinal entre sus polos a partir de la inducción de una corriente eléctrica. Cuando este, se pone en contacto con la pieza a inspeccionar se induce dicho campo y la pieza se magnetiza localmente. Posteriormente se esparcen partículas de material ferromagnético en la superficie de la pieza, y en las zonas donde existan discontinuidades dichas partículas se concentran por la fuga de campo magnético, por lo que se ven afectadas las líneas de fuerza del campo (Ver Fig. 1.7).

El tipo de partículas que se utilizan en estas pruebas, también han sido desarrolladas y clasificadas de acuerdo con la forma en que se transportan y al contraste que se proporciona respecto a la pieza de prueba. Estas clasificaciones las consideran como partículas secas o húmedas (suspendidas en un vehículo líquido), así como partículas visibles o fluorescentes.

Este método de ensayo no destructivo está limitado a la detección de discontinuidades superficiales y en algunas ocasiones subsuperficiales dependiendo el área de contacto, los tipos de corriente empleadas y el alcance de la sensibilidad determinado. Su aplicación también se encuentra limitada por su carácter magnético, es decir, solo puede ser aplicada en materiales ferromagnéticos, aun así, este método es ampliamente utilizado en el ámbito industrial[14,15].

Fig. 1.7 Inspección por yugo electromagnético a tanque de almacenamiento de Diesel con fondo contrastante.

A continuación, se expone la técnica y los pasos necesarios para su desarrollo, las áreas de aplicación, las ventajas y desventajas que este método ofrece.

Técnica de Inspección por Yugo Electromagnético: Los tipos de discontinuidades más frecuentes que se pueden detectar son grietas, traslapes, costuras, laminaciones, entre otros. Para este método, primero se magnetiza el área a inspeccionar y se aplican partículas ferromagnéticas (limaduras de hierro finas) a la superficie. Las partículas formarán líneas en la superficie donde las grietas y otras discontinuidades distorsionen el campo magnético normal. La sensibilidad máxima debe alinear las discontinuidades con una orientación perpendicular hacia las líneas de flujo del campo aplicado (Ver Fig. 1.8).

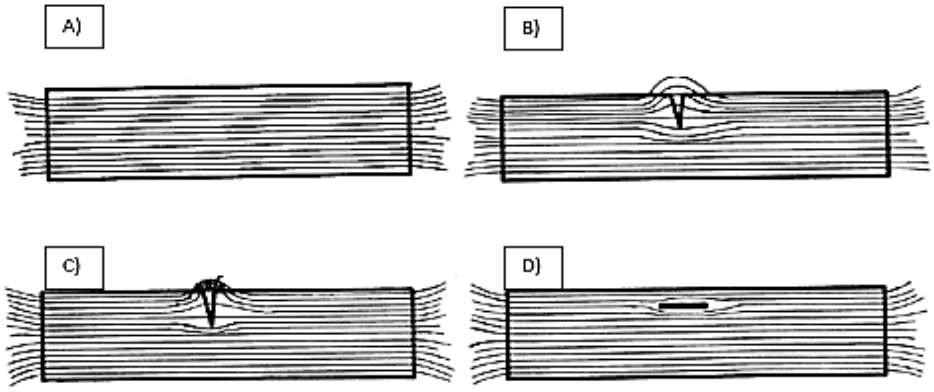


Fig. 1.8 A) Dominio magnético aplicado a una barra de metal ferroso. B) Distorsión del campo magnético aplicado por fractura presente en la superficie. C) Inspección y aplicación de limaduras de hierro en la superficie con campo magnético inducido, acumulación de partículas magnéticas produciendo una indicación relevante. D) Discontinuidad interna y paralela a las líneas de fuerza de campo inducidas en la placa de metal.

El procedimiento básico de la inspección por la técnica de partículas magnéticas con yugo electromagnético se presenta en la siguiente esquematización:

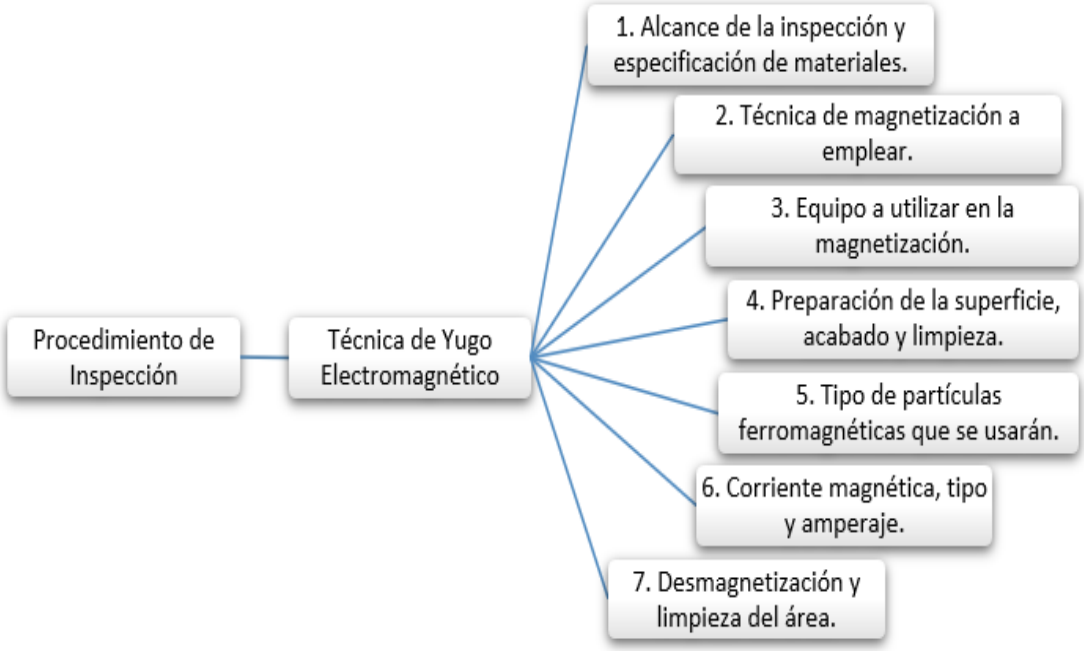


Fig. 1.9 Requerimientos generales del procedimiento de inspección por ensayos no destructivos mediante yugo electromagnético[17].

Áreas de Aplicación: Este tipo de ensayo se puede aplicar a toda la industria que presente el uso de metales ferrosos pues debido a sus propiedades tienen la capacidad de poder ser magnetizados. La técnica de inspección por ensayos no destructivos con implementación de yugo electromagnético es aplicada para detectar posibles fallas que se formen en el proceso de obtención de la materia prima en el alto horno, el refinado de mineral de hierro o el reciclaje de chatarra de acero producen un gran número de impurezas e imperfecciones en la microestructura y la superficie del metal a obtener, o bien, en el procesamiento de piezas mecánicas por las diferentes técnicas de conformado y maquinado como rolado, fresado, laminado, prensado y torneado ya que debido al esfuerzo y el desbaste al que son sometidas las piezas metálicas para el maquinado diseñado pueden desarrollar discontinuidades a lo largo y ancho de su superficie como:

- Traslapes
- Costuras
- Laminaciones
- Agrietamiento en frío o caliente
- Desgarres laminares
- Agrietamiento por fatiga, esmerilado o plaqueado

Ventajas y Desventajas del Método de Yugo Electromagnético: El costo de esta técnica de inspección resulta bastante accesible en comparación a la inspección por líquidos penetrantes, de esto se deriva la adquisición continua de los insumos empleados en cada una de estas técnicas, por ejemplo, en la inspección por yugo electromagnético el único insumo que se requiere son las partículas magnéticas o limaduras de hierro dependiendo el medio de aplicación (húmedas o secas), la calibración del equipo y tintas contrastantes. Por otro lado, la inspección por líquidos penetrantes en costos resulta bastante elevada debido al gran procedimiento de desarrollo de la técnica, los estándares de limpieza que se exigen y los insumos; podemos encontrar como insumos, cardas de diferentes materiales (acero al carbono y acero inoxidable), extensiones y progas contra explosión para distintos tipos de corriente, líquidos penetrantes, reveladores, papel sanitario para limpieza entre otros.

Como cada método de inspección existente dentro de los ensayos destructivos, no destructivos y caracterización de materiales, este ofrece una gran gama de ventajas y desventajas que resultan importantes para tomar en cuenta durante el desempeño de este trabajo de aplicación. A continuación, se enlistan las ventajas más sobresalientes de este método:

- Excelente en la detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales.
- Conveniente para la inspección de superficies rugosas e irregulares.
- El traslado del equipo es relativamente fácil y el costo de adquisición resulta bajo a comparación de otros métodos.
- Por la naturaleza de las partículas magnéticas a partir del hierro, presentan una alta resistencia a altas temperaturas las cuales pueden alcanzar un máximo de 315°C.
- La configuración geométrica del equipo no presenta impedimento para el desarrollo de la inspección.
- Si el equipo cuenta con un recubrimiento para prolongar la vida útil del equipo, no es necesaria la remoción de este.
- El costo de adquisición de la materia prima como las partículas magnéticas es bajo.
- La limpieza no es tan demandante a comparación de la inspección por líquidos penetrantes.

Por otro lado, existe una gama alta de desventajas a las que se enfrenta este método, a continuación, se enlistan las más destacadas:

- Solo es posible desarrollar este método en materiales ferromagnéticos, en materiales como el cobre o hasta el mismo acero inoxidable, se ve imposibilitado de ser desarrollado debido a la naturaleza del material y a los aleantes introducidos respectivamente.
- Un cambio abrupto de la superficie del material producirá indicaciones erróneas.
- Se ve imposibilitada de realizar detecciones a grandes profundidades.
- La rugosidad de la superficie de la pieza en inspección puede distorsionar el flujo de campo magnético lo que produciría indicaciones erróneas.
- Se debe de contar con una fuente de energía eléctrica cercana o bien, contar con extensiones de largo alcance[18].

1.16 Metodología de la Inspección Basada de Riesgos (RBI) API 581

La expectativa de vida de un equipo o componente depende del medio ambiente en el que se desempeñe, la calidad del mantenimiento aplicado y lo apropiado del diseño. Para lograr lo anterior

es necesario realizar inspecciones por ensayos no destructivos de acuerdo con un plan de mantenimiento que esté diseñado bajo la NOM-020-STPS-2011[3].

Por otra parte, es esencial conocer las condiciones de servicio de un componente con el objeto de realizar adecuadamente la inspección por la técnica de yugo electromagnético mediante la teoría de inspección basada en riesgos de procesos (IBR)[4]:

"la inspección basada en el riesgo es un proceso que sirve para identificar, evaluar y definir los riesgos industriales (debido a la corrosión y fracturas por exceso de tensión), que pudieran poner en peligro la integridad de los equipos, tanto presurizados como estructurales. La IBR aborda los riesgos que se pueden controlar mediante inspecciones y análisis adecuados. Durante el proceso de IBR, los ingenieros diseñan la estrategia a seguir en la inspección (qué, cuándo, cómo inspeccionar) que encaje mejor con los mecanismos de degradación que se hubieran previsto u observado".

La metodología API RBI 581 se puede utilizar para gestionar el riesgo general de una planta al concentrar los esfuerzos de inspección en el equipo de proceso que presente el mayor riesgo. Esta metodología proporciona las bases para el manejo de los riesgos mediante la toma de decisiones informando la frecuencia de las inspecciones, el nivel de detalle y los tipos de ensayos no destructivos realizados.

En la mayoría de las industrias, el gran porcentaje de la inspección basada en riesgos es únicamente enfocada a los componentes de los equipos que representan el mayor riesgo dentro de los procesos. Estos equipos de alto riesgo potencial pueden requerir una atención mayor, por ello se debe realizar un plan de inspección revisado y basado en sus operaciones[4].

A partir de los criterios de la metodología de la inspección basada en riesgos, es de suma importancia realizar la inspección en conjunto con las áreas de ingeniería de proyectos, producción, ecología higiene y seguridad, mantenimiento y el área de energía según sea el caso. A partir de esto, se derivan cuestionamientos para definir las prácticas a realizar antes del arranque de operación del equipo o del proceso. Se engloban criterios basados en, ¿Qué se realizará?, ¿Cómo se realizará?, ¿Dónde se realizará?, ¿Cuáles son los procedimientos, métodos y maniobras empleados para el desarrollo?, ¿Cuál es el alcance del desarrollo?, ¿Cómo se puede medir el proceso?, ¿Cuál es el riesgo para los empleados? y ¿Cuál es el riesgo para la comunidad?, solo por mencionar algunos aspectos sobresalientes.

La inspección basada en riesgos tiene la capacidad de:

- Evaluar los planes actuales de inspección para determinar las prioridades para las inspecciones.

- Evaluar los planes a futuro para la toma de decisiones.
- Evaluar los cambios a las operaciones básicas que afectan la integridad del equipo.
- Identificar variables críticas que contribuyan al riesgo que de otro modo puedan pasar por alto.
- Establecer niveles óptimos económicos de la inspección contra la reducción del riesgo.
- Incorporar los niveles de riesgo aceptable[4]

Así mismo, la inspección basada en riesgos se rige por la siguiente metodología:

- Recolección de datos e información
- Análisis de riesgos
- Evaluación de consecuencias
- Evaluación de la probabilidad de falla
- Evaluación del riesgo
- Clasificación de los riesgos
- Revisión del plan de inspección
- Reevaluación del plan de inspección

1.17 Metodologías de Retrofit

La aplicación de mejoras en los procesos de producción y mantenimiento comúnmente se realizan a través de la aplicación de las metodologías por retro-ingeniería (RETROFIT). De acuerdo con ANTONIO ROGRÍGUEZ, el retrofit es una metodología implementada para la mejora y cambio de un proceso existente en cualquier área determinada como pueden ser: ambiental, económica, seguridad, etc. Cuatro son los enfoques presentes según la problemática que se plantea como estudio:

1. Estudios para mejorar una unidad particular del proceso.
2. Integración de una nueva tecnología.
3. Estudios para eliminar “cuellos de botella”.
4. Estudios sistemáticos que analizan el proceso completo y sus interacciones para reducir costos y/o incrementar rendimientos.

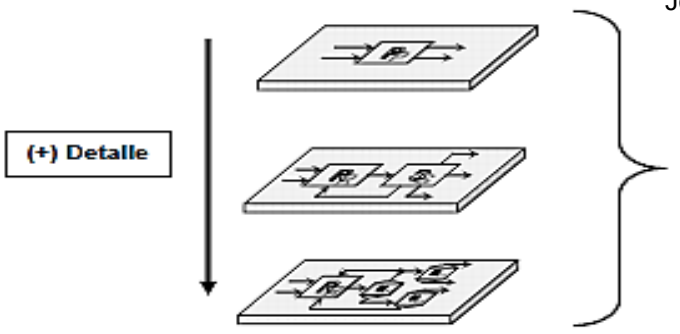
Actualmente según Gundersen[28], a través de la aplicación de los métodos sistemáticos en el retrofit de procesos, la mayoría de los proyectos en la industria de proceso, cerca del 70% eran proyectos retrofit y los métodos sistemáticos para el retrofit se basan en los mismos métodos que en el diseño de procesos original, la diferencia entre el diseño y el retrofit es que el diseño crea desde cero el proceso a desempeñar mientras que el segundo retoma el proceso para realizar mejoras e implementarlas dentro del mismo.

La aplicación de las metodologías de retrofit presuponen un estudio exhaustivo del procedimiento existente para la proposición de las mejoras técnicas como económicas pues gracias a las mismas metodologías se reducen costos en investigación y desarrollo de nuevos procedimientos.

La aplicación de la metodología del retrofit se basa principalmente en 3 mecanismos importantes como son: la metodología de diseño de Douglas[29], la generación y evaluación de alternativas de solución mediante el sistema basado en conocimiento y la aplicación del enfoque de modelos múltiples y razonamiento basado en casos[13].

- Mecanismo de Diseño de Procesos de Douglas.

La metodología de Douglas es un procedimiento jerárquico “top down” para el diseño conceptual de proceso químicos. Sus objetivos son: encontrar un diagrama correcto de flujo de proceso y estimar las condiciones de diseño óptimas. El análisis y síntesis del proceso se realizan con base en el planteamiento jerárquico de decisiones de diseño. La idea de plantear jerarquías de diseño es debido a que se desea dividir un problema en partes más simples y de fácil manejo. La metodología está dividida en 5 niveles de decisión como se muestra en la Fig. 1.10[13].



Jerarquía de decisiones:

0. Información de entrada
1. Proceso batch vs continuo
2. Estructura de entras/salidas
3. Estructuras de reciclo
4. Sistemas de separación
5. Integración de energía

Fig. 1.10 Jerarquías de decisión de Douglas

- Sistemas Basados en Conocimiento

Un sistema basado en conocimientos es un programa computacional que tiene conocimiento especializado sobre un área y resuelve una clase específica de problemas utilizando dicho conocimiento. Las ventajas de utilizar este método son:

- Representar y almacenar conocimiento.
- Reproducir el conocimiento una vez que se haya representado.
- Refinar el conocimiento identificando inconsistencias y conflictos durante la construcción y prueba de la representación del conocimiento.
- Centralizar el conocimiento mediante la incorporación de varias formas de conocimiento en un solo sistema basado en el conocimiento KBS por sus siglas en inglés (knowledge based system).
- Transferir el conocimiento de un KBS a otros sistemas[13].

- Modelos Múltiples

Mediante el empleo y desarrollo de modelos podemos representar y obtener un conocimiento de un determinado sistema (el sistema puede estar formado por objetos, procesos o artefactos). Los modelos pueden ser físicos o abstractos. El enfoque de modelos múltiples consiste en el uso de diversos modelos (estructural, de comportamiento, funcional y teleológico) de un sistema para facilitar tareas complejas, tales como la representación, interpretación, análisis, diseño, simulación, etc[13].

- Razonamiento Basado en Casos

El razonamiento basado en casos (CBR) es un paradigma computacional basado en la idea de resolver problemas mediante experiencias pasadas. Un sistema CBR requiere de una base de casos lo suficientemente poblada y que cada caso describa una situación y una solución a un problema en particular[13].

De acuerdo con Martínez[13], cuando se tiene un problema de diseño, se inicia con el objetivo de obtener un proceso que transforme las materias primas en determinados productos, en el problema de retrofit se inicia con la descripción de un diseño existente para satisfacer nuevos requerimientos. En el retrofit de procesos debe considerarse la modificación y adaptación del diseño existente teniendo como objetivo la satisfacción de los nuevos requerimientos, minimizando los cambios en el diseño original y maximizando la utilización de los equipos y dispositivos existentes.

Cada uno de los enfoques mencionados anteriormente tiene una forma muy específica de resolver el problema de diseño/retrofit dependiendo de las situaciones a las que se enfrentan. De acuerdo con este trabajo, se propone que un enfoque genérico de retrofit debería componerse de las siguientes etapas[13]:

- Adquisición de la información, se debe adquirir y/o inferir la descripción del diseño original o la del proceso de operación.
- Representación de la información, la información del proceso se debe procesar para tener una representación que sea entendible por el usuario y por algún sistema computacional.
- Análisis, con las etapas anteriores y las nuevas especificaciones definidas por el usuario se identifican las partes o secciones del proceso susceptibles de modificación o sustitución.
- Generación de alternativas, con las partes o secciones de la etapa anterior se generan alternativas que satisfagan las nuevas especificaciones.
- Modificación, cada una de las alternativas de la etapa anterior se adaptan en la representación de la etapa 2.
- Evaluación, cada modificación hecha se evalúa para determinar si su desempeño es el adecuado. Esta etapa es iterativa y se repite hasta encontrar la opción más adecuada. En esta etapa es necesario la ayuda de un simulador de procesos para facilitar y disminuir el tiempo de evaluación.
- Implementación, una vez evaluada las alternativas y definida la mejor, se implementa con ayuda de expertos en el proceso real[13].

CAPÍTULO 2: Metodología para la Inspección por Yugo Electromagnético

Para la aplicación de este método se debe tomar en cuenta la configuración geométrica del equipo, tipo de tratamiento térmico, trabajo en frío o caliente, tener en consideración si los elementos son nuevos o usados, conocer el medio de obtención de las piezas si es que hay información disponible, materiales o equipos a inspeccionar, pues conocer a detalle los procesos por los cuales se obtuvo dicha pieza facilita la determinación de las indicaciones y discontinuidades que se pueden obtener mediante este método.

Por otro lado, las consideraciones generales a tomar en cuenta para el desarrollo de este método de inspección son las siguientes: es un método con detección superficial y subsuperficial, es un ensayo no destructivo, no daña ni altera la superficie, composición química, propiedades físicas y mecánicas del equipo a inspeccionar, la detección de las discontinuidades depende de la penetración del campo magnético en la pieza; es preferible trabajar con bajo número de ciclos para conseguir una detección de discontinuidades apropiada y a la postre, facilitar el proceso de desmagnetización de la pieza; un correcto uso de corriente normal se encuentra en un rango de 50 a 60 Hz para obtener resultados aceptables.

La aplicación de este método solamente es aplicable a materiales con propiedades ferromagnéticas, se pueden utilizar diferentes tipos de corriente en la generación del flujo eléctrico para la inducción del campo magnético en la pieza de inspección, este tipo de corriente puede ser corriente alterna, corriente directa, corriente directa rectificada de media onda, corriente directa rectificada de onda completa entre otras, en el presente trabajo y debido al equipo empleado solo se mencionará la corriente alterna y la corriente directa.

2.1 Equipo de Inspección

Los equipos empleados para la inspección de partículas magnéticas varían en tamaño, propiedades, y características de acuerdo con el alcance del estudio que se desee obtener. Este tipo de equipos puede ser desde un *yugo electromagnético* hasta un equipo de *billets* los cuales se emplean en industrias de fundición del acero.

La reproductibilidad de este tipo de ensayos es fundamental, una inspección correcta se basa en la certeza de la recolección de datos, resultados convincentes y reproductibles bajo diferentes condiciones en distinto tipos de inspecciones de muestras sin importar que el equipo de inspección sea utilizado por diferentes técnicos siempre y cuando estén capacitados para el desarrollo de esta técnica, pues la sensibilidad del método debe de ser la misma para diferentes casos.

Las condiciones que determinan la configuración del sistema de inspección por partículas magnéticas son las siguientes:

- Tipo de partículas.
- Requisitos de magnetización del objeto.
- Grado de automatización requerido.
- Requisitos de desmagnetización.
- Requisitos de corriente.
- Tamaño y geometría del objeto para inspección.
- Suministro de corriente eléctrica disponible.
- Medio de aplicación (aire o solución acuosa).
- Accesorios necesarios (limpieza, calibradores, etc.).
- Especificaciones de la inspección que requieren verificación[18].

2.2 Técnica de Inspección por Yugo Electromagnético

El tipo de corriente alterna que se utiliza en esta técnica, presenta poca capacidad de penetración en el material, gracias a esto, el campo magnético inducido se encuentra solamente en la superficie del material, esto produce un efecto llamado “efecto de piel” que enuncia lo siguiente “se confina el campo magnético sobre la superficie de la pieza y al invertir alternamente su polaridad, produce un efecto pulsante en el flujo magnético, esto agita a las partículas magnéticas facilitando su movilidad hacia las fugas de campo magnético producidas por las discontinuidades”, pues la penetración no es la más adecuada para la detección de discontinuidades profundas, pero si es la mejor para la detección de discontinuidades superficiales. Es por lo que, la corriente alterna es considerada la mejor corriente para realizar la inspección por partículas magnéticas. Por otro lado, la frecuencia de 60 ciclos por segundos propicia la movilidad del flujo de campo magnético sobre el material, el método se ve beneficiado ya que el continuo cambio de dirección de la corriente produce una movilidad de partículas sobre la superficie y estas puedan ser atraídas a las fugas de campo magnético.

Ahora bien, en la magnetización indirecta podemos hallar la magnetización por conductor central, bobina y yugo electromagnético, en este tipo de técnica la corriente magnetizadora fluye por el conductor y el campo magnético es inducido a la pieza, esto nos ayuda a evitar las quemaduras por

arco eléctrico como es el caso contrario en magnetizaciones directas. De acuerdo con ASNT, se pueden detectar discontinuidades hasta 3 mm de profundidad (teóricamente), es de suma importancia conocer datos como la longitud de la pieza y la intensidad del campo inducido para conocer la penetración. Con corriente alterna (CA) se estima que a 60 Hz se pueden alcanzar 3 mm de profundidad.

Una vez dicho esto, se describe una bobina longitudinal con un número de n espiras transversales y se induce corriente eléctrica a través de ella, esta producirá un campo magnético H que se describe como $H = {}^{nI}/_{l}$ donde *n* es el número de vueltas de las espiras, *l* la longitud de la bobina (m) e *I* es la corriente (A), las unidades del campo magnético son Ampere vuelta por metro o A/m. Cuando se aplica un campo magnético en un vacío, se inducen líneas de flujo magnético, la densidad de flujo o inductancia B se relaciona con el campo aplicado por medio de $B = \mu_0 H$, donde B es la inductancia, H el campo magnético y μ_0 la permeabilidad magnética del vacío. Cuando se coloca un material dentro del campo magnético, la densidad del flujo magnético queda determinada por la forma en la que los dipolos magnéticos, inducidos permanentes interaccionan con el campo. La densidad de flujo ahora es la permeabilidad del material dentro del campo inducido. Si los momentos magnéticos refuerzan el campo aplicado, entonces la permeabilidad del material dentro del campo es mayor a la permeabilidad magnética del vacío, se crea un número mayor de líneas de flujo que pueden realizar trabajo y el campo magnético se amplifica[7].

Se puede describir la influencia del material magnético mediante la permeabilidad relativa, esto quiere decir, que el material es capaz de amplificar el campo magnético inducido. Por lo tanto, la permeabilidad relativa tiene misma importancia que la conductividad en los materiales dieléctricos. Un material con una permeabilidad más alta propicia el flujo magnético más fácilmente. Cabe destacar que la permeabilidad en los materiales ferromagnéticos no es constante y no se puede conservar debido al término de la retentividad magnética. En muchas ocasiones se encuentran materiales con retentividad baja; por otro lado, si presentara una retentividad alta, es necesario aplicar métodos para desmagnetización de materiales[7] (Ver Apéndice A).

Permeabilidad Magnética: Facilidad con la que un material puede ser magnetizado de acuerdo con su estructura química.

Retentividad Magnética: Propiedad del material para retener magnetismo residual después de la inducción de un campo magnético.

Fuerza Coercitiva: Fuerza magnetizadora requerida para invertir y eliminar la polaridad del magnetismo residual presente en el material.

Magnetismo Residual: Magnetismo existente en una pieza después de haber inducido un campo magnético sobre la superficie de esta.

Reluctancia: Resistencia que presenta un material a la inducción de un campo magnético.

Magnetización: Representa el incremento de la inductancia debido al material del núcleo, en forma de ecuación: $B = \mu_0 H + \mu_0 M$, lo que describe el efecto del campo magnético aplicado y el efecto del material magnético presente; realizando una analogía, el análisis es similar a materiales que presentan polarización dieléctrica y el comportamiento mecánico de los materiales[7].

La configuración del yugo electromagnético consiste en un cable enrollado alrededor de un núcleo en forma de "C" fabricado de hierro dulce (blando), los yugos inducen un flujo magnético lineal o longitudinal local entre sus polos, son dispositivos portátiles para la inspección local de piezas de tamaño grande y mediano[19].

Este equipo de inspección regularmente se emplea en inspección de soldaduras, pues la magnetización que se genera es localizada en la pieza, el diseño de este presenta un par de piernas articuladas el cual propicia el óptimo acceso en áreas donde las magnetizaciones no son las más convenientes de acuerdo con la configuración de las piezas de prueba. El yugo electromagnético es capaz de generar un campo magnético longitudinal entre los polos, pues las líneas de campo viajan de positivo a negativo en el campo como se observa en la Figura 2.1.

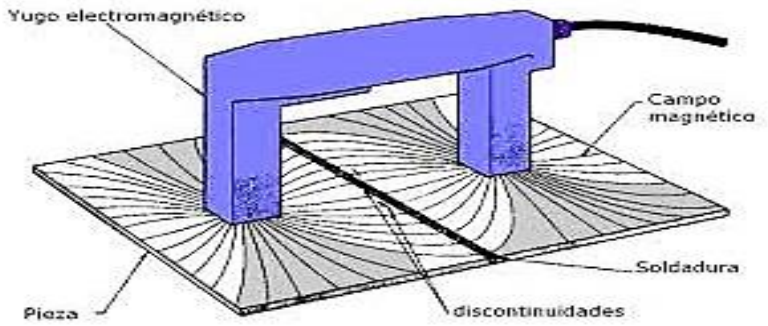


Fig. 2.1 Inspección de soldadura en placa de metal por yugo electromagnético.

Como se comentaba previamente, si se realiza la inspección de una soldadura donde el ángulo es menor a 90°, se puede hacer el ajuste de los polos a manera que ambas piernas se posicionen sobre la superficie del material como se observa en la Figura 2.2 o bien por otro lado, se puede realizar la inspección con un solo polo, pues es capaz de presentar una magnetización lineal sobre la superficie.

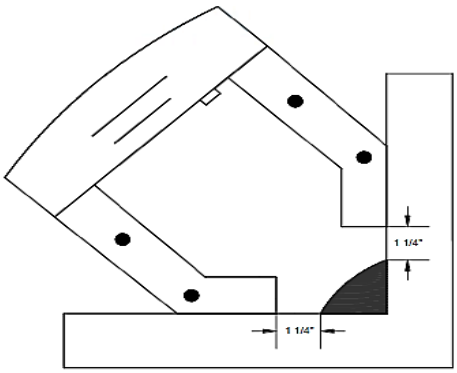


Fig. 2.2 Magnetización con yugo electromagnético para ángulos de 90° o menores con ambos polos[19].

De acuerdo con la magnetización que se logra con el uso de corriente alterna (generación de 30 G para un campo magnético adecuado) se genera el llamado “efecto piel” y debido a la regulación del amperaje por la bobina que se utiliza en un yugo electromagnético, no se pueden generar quemaduras por arco eléctrico[19].

De acuerdo con API RP 2X 2004, para una magnetización correcta de la pieza, las piernas del yugo electromagnético deben estar posicionadas con una longitud de separación de entre 2” como distancia mínima entre los polos (Ver Fig. 2.3 A) hasta 6” como máximo que es cuando las piernas del yugo se encuentran perpendicularmente a la bobina (Ver Fig. 2.3 B)[20].

Fig. 2.3 A) Magnetización por yugo electromagnético con separación mínima de 2”, B) Magnetización por yugo electromagnético con separación máxima de 6”.

Se debe de hacer mención sobre la magnetización que erróneamente se realiza con mucha frecuencia en la inspección de piezas. Aunque la articulación de las piernas de un yugo electromagnético puede abrirse a más de 6” y se induce el campo magnético a la pieza, este campo

es de menor intensidad, pues la penetración no es la mejor y la longitud de separación que existe entre ambas piernas genera que la intensidad de las líneas de campo magnético sea débil por lo que no se recomienda realizar dicha práctica (Ver Fig. 2.4).

Fig. 2.4 Magnetización incorrecta por yugo electromagnético con separación de polos que excede las 6” de separación recomendadas.

Aunado a ello, la superficie del equipo en inspección debe encontrarse limpia, seca, libre de aceite, oxido, y cualquier interferencia; si bien, este método no demanda limpieza exhaustiva a comparación del método de líquidos penetrantes, es necesario realizar una limpieza previa para facilitar la libre movilidad de las partículas en la superficie y evitar falsas indicaciones; por otra parte, si el equipo cuenta con un recubrimiento que protege la sanidad de la superficie contra la oxidación, no es necesario retirar dicho recubrimiento ya que, al ser un campo magnético, este es capaz de penetrar hasta cierto rango de espesores[18].

De acuerdo con el código ASME Sección V, SE-165 y ASTM E 165-95, los métodos de limpieza más comunes son: limpieza química con el uso de sustancias alcalinas, ácidas y fundidas, limpieza mecánica como el pulido abrasivo, área a presión, agua y vapor a presión o la limpieza ultrasónica y por último la limpieza por solventes como el desengrasado por vapor y enjuague con solvente. Estos métodos de limpieza deben cumplir con las condiciones de no modificar ni alterar la composición química y la superficie del material, no debe dejar residuos ya que puede cerrar discontinuidades y ocasionaría un daño al material produciendo ataques severos a la superficie[21].

2.3 Selección del Tipo de Partículas Magnéticas

Las partículas magnéticas son el medio de inspección por el cual se generan las indicaciones en la superficie de la pieza, existen dos tipos, secas y en suspensión, a su vez pueden ser visibles o fluorescentes[19]. Existen diferentes medios por los que pueden ser aplicadas las partículas como:

- Secas
- Húmedas
- Fluorescentes
- Visibles

Cabe mencionar que las partículas en suspensión o húmedas y fluorescentes quedan fuera del alcance de este trabajo. Este tipo de partículas son específicamente, limadura de hierro finamente fragmentada a nivel de polvo, aunque microscópicamente poseen morfología granular o en forma de agujas según las especificaciones del fabricante (Ver Fig. 2.5), el uso y empleo de estas partículas debe de definirse en el alcance de la inspección para emplear las partículas requeridas y obtener el grado de sensibilidad que el usuario solicite.

Las características primordiales que las partículas deben poseer son las siguientes

- Alta permeabilidad, esta propiedad permite que las partículas magnéticas puedan ser rápidamente magnetizadas para que sean fácilmente atraídas y retenidas por campos de fuga débiles.
- Baja retentividad, esta propiedad requiere que las partículas sean incapaces de retener magnetismo residual para evitar su permanencia e interferencia en la superficie de las indicaciones del equipo pues lo que se busca es que sean fácilmente removidas.
- Tamaño y forma para resultados confiables y reproducibles
- No ser tóxicas.
- Libres de suciedad, pintura, grasa o cualquier otro tipo de contaminante.
- Coloración adecuada para la detección rápida de discontinuidades en las regiones a inspeccionar.

A partir de las propiedades específicas de las partículas se necesitará aplicar un fondo contrastante si es que el equipo se encontrara con un color similar al de las partículas, de lo contrario si el equipo es de un color distinto al de la limadura de hierro, no es necesario la aplicación del fondo contrastante. Regularmente se emplea como fondo contrastante revelador de color blanco.

Así mismo, las partículas magnéticas presentan desventajas como:

- Menor probabilidad de detección de discontinuidades muy finas.

- Difícil de aplicar sobre cabeza o vertical.
- No se tiene cobertura visual perfecta sobre la pieza de prueba.
- La inspección, aunque es rápida, no se pueden inspeccionar piezas a grandes escalas.
- Se debe utilizar protección respiratoria debido al riesgo presente de inhalación de partículas.

Fig. 2.5 Diferentes presentaciones de partículas magnéticas de acuerdo con especificaciones del fabricante Magnaflux®.

Para la aplicación de las partículas magnéticas se emplea una perilla tipo salero; estas son espolvoreadas a una cierta distancia de la superficie del equipo a inspeccionar con el fin de utilizar el aire del entorno como medio de libre propagación en toda la superficie (Ver Fig. 2.6). La evaluación de las indicaciones encontradas se basa en diferentes criterios de fabricación y/o modificaciones a lo largo de la vida del equipo.

Fig. 2.6 Kit para inspección por el método de yugo electromagnético, constituido por yugo electromagnético portátil, partículas magnéticas (limaduras de hierro blancas y rojas), perillas de aplicación tipo salero.

Si bien son partículas magnéticas visibles, la iluminación juega un papel importante para la detección de las discontinuidades presentes en el equipo de inspección y de acuerdo con ASME E 709-21 apartado 7 punto 7.1.1, *la intensidad de la luz visible en la superficie de la pieza de trabajo para la examinación de partículas magnéticas visibles se recomienda tener una iluminación de al menos 100 candelas pie (1076 lux).* Para inspección en campo, se podrá aplicar bajo luz visible de 50 candelas pie (538 lux) siempre y cuando se haga del conocimiento del usuario.

Si se utiliza una tinta como fondo de contraste para una detección más profunda, se debe aplicar una película fina y uniforme sobre la superficie, el espesor de la película no debe exceder las 0.002".

La secuencia de operación para la inspección se define como la relación existente entre la aplicación de las partículas magnéticas y la inducción del flujo del campo magnético sobre la pieza de prueba. Existen dos tipos de secuencia de operación para la inspección, estas son: *secuencia de operación continua y secuencia de operación residual.* Debido al tipo de magnetización que presenta el yugo electromagnético, se ve imposibilitado propiciar un campo magnético residual, pues la regulación del amperaje de la corriente eléctrica y el uso de corriente alterna para indicaciones superficiales, reduce la intensidad del campo magnético y por consiguiente la magnetización residual es nula por este método.

2.3.1 Metodología de Secuencia de Operación Continua para Inspección de Yugo Electromagnético

Ya que este tipo de partículas pierde movilidad cuando entra en contacto con la superficie del material, se debe iniciar la inducción del flujo magnético antes de la aplicación de las partículas pues una vez aplicadas, la formación de indicaciones es inmediata, posterior a ello la magnetización debe de finalizarse cuando las partículas hayan formado indicaciones y el exceso de partículas haya sido removido.

Se recomienda realizar dos magnetizaciones a cada paso de inspección sobre la pieza o equipo en inspección, la primera a 90 grados del cordón de soldadura y la segunda a 90° de la primera ya que las líneas de flujo de magnético son longitudinales, las discontinuidades pueden ser identificadas en una segunda magnetización de acuerdo con la orientación de la discontinuidad y de las líneas de campo; entre uno y otro paso de inspección se debe de hacer magnetización al menos en un 50% de la medición anterior para así asegurar el 100% de la superficie de inspección (Ver Fig. 2.7).

Regularmente la secuencia de operación continua es utilizada con frecuencia pues la magnetización se encuentra presente durante la aplicación de las partículas magnéticas lo que facilita una detección

más detallada de las discontinuidades de las piezas de prueba. La mayor cantidad de normas pide la inspección por partículas magnéticas con secuencia de operación continua.

Fig. 2.7 Inspección por secuencia de operación continua con fondo de tinta contrastante con mediciones de 90° entre uno y otro paso de prueba.

Una vez determinada la secuencia de operación de trabajo, es preciso mencionar el uso de los medidores de campos magnéticos inducidos en la superficie de los materiales a fin de realizar la verificación de los dominios de las líneas de campo, ya que esto propiciará la identificación de discontinuidades presentes, como se menciona en las siguientes secciones.

2.3.2 Indicadores de Flujo de Campo Magnético

Con base en ASTM E-709-21 Apéndice X1, se recomienda utilizar indicadores de campo magnético, típicamente laminillas flexibles ranuradas que son los artefactos empleados en la detección de discontinuidades por partículas magnéticas. Los ejes longitudinales de las ranuras de la laminilla deben de ser colocados perpendicularmente a la dirección del campo magnético de interés en orden para generar indicaciones fuertes de partículas sobre las ranuras de la laminilla o lainas Tipo G. Las ranuras que presenta la placa son de acero al bajo carbono en forma de capaz de sándwich y se encuentran entre dos placas de latón que tienen un grosor de 0.0002” o .0508mm. El latón es no magnético y su función solamente es proveer un fácil levantamiento de la pieza de inspección y proteger las ranuras de acero al carbono[8].

La dimensión longitudinal de las ranuras de las lainas es de 1.95 pulgadas (50mm) y el ancho es de 0.47 pulgadas (12mm) como se muestra en la Figura 2.8.

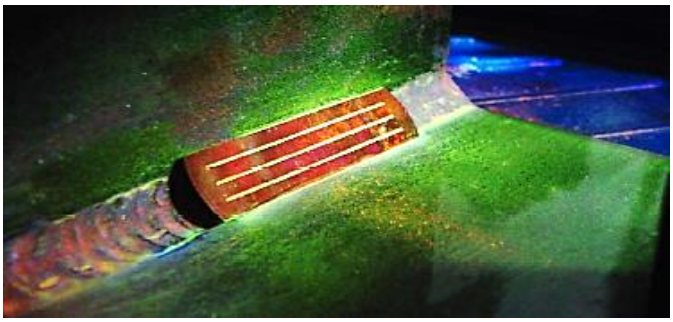


Fig. 2.8 Detector de campo magnético tipo laina[19].

- Indicador de Campo Magnético Tipo Pastel

Presenta el mismo principio básico de las lainas. Este tipo de indicador de campo presenta ranuras transversales dentro del área interna de la placa las cuales presentan una aproximación a la dirección del campo magnético externo. Debido a que este tipo de artefactos son fabricados de materiales con una permeabilidad alta del 100% a través de las ranuras, las indicaciones no significan que exista una intensidad de campo adecuada para la ubicación de las indicaciones relevantes en la parte baja de la inspección (Ver Fig. 2.9)[8].

Fig. 2.9 Detector de campo magnético tipo pastel.

2.3.3 Evaluación de Discontinuidades en los Materiales

La distorsión de un campo de fuga producido por una discontinuidad presente depende del número de líneas de fuerza, es decir, el ancho, longitud, profundidad, forma, orientación, condición de la superficie, y la fuerza del flujo del campo magnético generado por el amperaje de la corriente eléctrica utilizado para generarlo (Ver Fig. 2.10)[18].

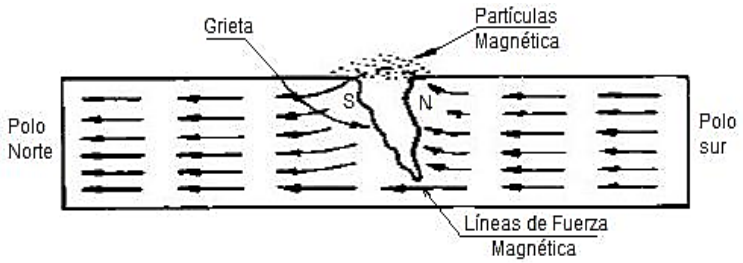


Fig. 2.10. Representación de la indicación formada a partir de la distorsión de las líneas de flujo del campo magnético inducido.

Es determinar si una indicación relevante cumple o no el criterio de aceptación especificado. Comparar dimensiones o características de una indicación contra un estándar de aceptación que impone el documento aplicable, se lleva a cabo después que la indicación ha sido interpretada.

Las discontinuidades en los materiales se clasifican por su origen: inherentes, de proceso primario y secundario, de servicio y de soldadura. A continuación, se esquematizan los tipos de discontinuidades, su localización, las características y las causas que propician la creación y crecimiento de estas[21].

2.3.4 Tipos de Discontinuidades Para Detectar

Para determinar el tipo de discontinuidades a encontrar en una inspección por cualquier técnica de magnetización en equipos que ya presentan trabajo y componentes en servicio u operación de producción como recipientes a sujetos a presión, equipos estructurales, piezas de suspensión de carga, se debe de conocer las características del trabajo que desarrollan como, presión y temperatura máximas y mínimas de trabajo, proceso de producción desarrollado continuo o por lotes, tipo de materia recibida o emitida, condiciones de medio ambiente, para piezas mecánicas determinar si el trabajo desarrollado es cíclico o estático para determinar el tipo de discontinuidades por fatiga que pueden ser hallados, tipo de carga y ángulos de soldaduras para estructuras solo por mencionar algunas características importantes.

2.3.5 Evaluación de Resultados Obtenidos por la Técnica de Inspección de Yugo Electromagnético

De acuerdo con la técnica de magnetización empleada para la inspección, son los resultados que se obtendrán, pues desde el principio se debe de establecer la sensibilidad requerida para la detección de discontinuidades pues en base a esto se interpretarán las indicaciones obtenidas como relevantes con respecto a los criterios de evaluación que aplique cada procedimiento o código que sea citado mediante el acuerdo contractual entre la unidad de inspección y el cliente del servicio solicitado.

Se debe entender que la evaluación de los resultados obtenidos se debe calificar con base en los procedimientos aplicables, en otras palabras, no se debe de realizar una calificación de una inspección a recipientes sujetos a presión con criterios de aprobación para materiales estructurales o piezas mecánicas con trabajos cíclicos o estáticos. Gracias a esto se menciona lo siguiente: *no existen criterios de aceptación de aplicación general, cada pieza o componente es inspeccionado, se diseña y fabrica bajo un determinado código, norma o especificación en el que se detallan de forma precisa los criterios de aceptación y rechazo aplicables*[19].

Discontinuidades Inherentes: Son formadas a partir de la fundición del acero para la obtención de piezas metálicas, este solidifica en forma de lingotes formando este tipo de discontinuidades, muchas de ellas son removidas, pero otras más permanecen en el interior del material. De acuerdo con los procesos de conformado de piezas metálicas, estas discontinuidades son roladas, forjadas o seccionadas. A continuación, se describen las discontinuidades que pueden ser halladas[18].

Discontinuidad	Localización	Causa
Traslape en Frío	Superficial o Subsuperficial	La convergencia de dos superficies de metal fundido produce grietas o costuras con bordes tersos o redondeados.
Contracción, rechupe, tubería	Subsuperficial	Insuficiencia y contracción del metal fundido en el molde de vaciado provoca la formación de un cono invertido o un cilindro, producen indicaciones alargadas.
Desgarre en caliente	Superficial	Segregación de impurezas con bajo punto de fusión, enfriamiento desequilibrado en el material, producen líneas dentadas de ancho variable.
Porosidad	Superficial o Subsuperficial	Acumulación de burbujas de gas o aire en el metal fundido durante la solidificación, se producen costuras alargadas en el proceso de rolado.
Inclusiones no metálicas	Superficial o Subsuperficial	Contaminantes presentes durante el proceso de fundición del metal producen baja resistencia, esfuerzos estáticos o fatiga.
Segregación	Superficial o Subsuperficial	Diferencia de composición química en el material, la segregación en ocasiones se presenta en el proceso de extrusión.

Tabla 5. Discontinuidades inherentes a partir de la obtención de lingotes de acero.

Discontinuidades de Proceso Primario: Este tipo de discontinuidades se originan durante los procesos de conformado en frio o en caliente, en la extrusión de las piezas como el rolado, forjado, fundido o estirado[18]. En la siguiente Tabla se enlistan los tipos de discontinuidades presentes y sus características.

Discontinuidad	Localización	Causa
Costuras	Superficial	Falta de llenado del material durante el rolado, normalmente son grietas rectas que varían en profundidad desde la superficie.
Laminaciones	Subsuperficial	Alineadas a la superficie del material, alargamiento y aplanamiento de discontinuidades, extremadamente delgadas, producidas a partir del rolado.
Encordados	Subsuperficial	Originadas por el aplanado y alargado de inclusiones no metálicas en el rolado, líneas rectas semicontinuas y paralelas a la longitud de la barra.
Cupping	Subsuperficial	Los esfuerzos internos forman discontinuidades a partir del estirado brusco en frío, formación de grietas transversales.
Grietas en Frío	Superficial	Enfriamiento no uniforme en rolado de barras, longitudinales, variación en profundidad, no presentan oxidación en la superficie.
Traslapes	Superficial	Metal doblado o plegado, causan sobrellenado, normalmente abiertas a la superficie, paralelas o inclinadas con respecto a la normal.
Estallidos	Superficial o Subsuperficial	Temperaturas excesivas de conformado y tiempo de enfriado relativamente corto.
Hojuelas por Hidrógeno	Subsuperficial	Nucleación y crecimiento elevado de hidrógeno en transformaciones metalúrgicas.

Tabla 6. Discontinuidades de proceso primado por conformado.

Discontinuidades de Proceso Secundario: Estas discontinuidades son formadas a partir de procesos como el rectificado, esmerilado, tratamientos térmicos, plaqueados y operaciones relacionadas con el acabo final de las piezas[18]. Este tipo de discontinuidades suelen ser las más costosas debido al impacto que se genera en un producto terminado, pues en muchas ocasiones, la repetición de tareas o reprocesado de piezas no se considera viable debido a los procesos de fundición que fueron

empleados para la obtención de estas y la reparación de ellas no se considera como una solución pues el material base se encuentra dañado y por estándares de calidad y aseguramiento no se debe ofrecer materia fuera de los límites de aceptación establecidos en códigos de fabricación o construcción. En la Tabla 6 se enlista los diferentes tipos de discontinuidades que se pueden presentar.

Discontinuidad	Localización	Causa
Grietas por Esmerilado	Superficial	Enfriamiento inadecuado, velocidad excesiva de desbaste, sobrecalentamiento localizado. Localizadas en áreas de altos esfuerzos. Se forman ángulos rectos con la dirección del esmerilado.
Grietas por Tratamiento Térmico y Templado	Superficial	Producción de esfuerzos que exceden la resistencia a la tensión del material. Templado del metal no uniforme en el interior y la superficie de la pieza, indicaciones bifurcadas, localización aleatoria y en con sentidos arbitrarios en la superficie.
Grietas de Desgarres de Maquinado	Superficial	Cortes profundos y marcas residuales de herramienta incorrecta actúan como elevadores de esfuerzos y contribuyen a fallas prematuras.
Grietas de Plaqueado	Superficial	Esfuerzos residuales producen tensión o compresión, reducen la resistencia a la fatiga de un componente, las grietas se pueden desarrollar por la penetración del hidrógeno en la pieza.

Tabla 7. Discontinuidades de proceso secundario en piezas o productos terminados.

Discontinuidades de Servicio: Este tipo de discontinuidades es generado a partir del uso destinado de los equipos o materiales en inspección, por ello se debe conocer el medio ambiente en el que desarrollan tareas prediseñadas en su fabricación, mantenimientos preventivos o correctivos aplicados, así como modificaciones o alteraciones de su estructura con el fin de determinar qué tipo de indicaciones pueden encontrarse[18]. Este tipo de indicaciones comúnmente se presentan por la aplicación de trabajos estáticos y cíclicos, ambientes corrosivos en la atmosfera periférica del equipo, así como ataques por hidrógeno u oxigeno que propicia el desgaste en la superficie del material. A continuación, se enlista el tipo de discontinuidades presentes y sus características más relevantes.

Discontinuidades de Servicio		
Discontinuidad	Localización	Causa
Fatiga	Superficial	Esfuerzos cíclicos bajo la resistencia a la tensión, se originan sobre la superficie, pero pueden iniciar por debajo si los esfuerzos residuales exceden la resistencia a la fatiga subsuperficial.
Deformación	Superficial	A temperaturas mayores que la mitad del punto de fusión y esfuerzos por debajo de la resistencia a la cedencia del material. Ocurre la deformación por la acción de la separación gradual de granos durante un periodo de tiempo.
Agrietamiento por Esfuerzos de Corrosión	Superficial	Discontinuidad existente, picadura pequeña producida por ataque de corrosión superficial. El agrietamiento produce falla por fragilización intergranular o transgranular dependiendo el tipo de aleación.
Agrietamiento por Hidrógeno	Superficial	Medios enriquecidos de hidrógeno como sulfuros, gas de hidrógeno, agua, metano, amoníaco. El agrietamiento por hidrógeno se presenta en las fronteras de grano y raramente muestra señales de ramificaciones.

Tabla 8. Discontinuidades de servicio para piezas de trabajo.

Discontinuidades de Soldadura: Este tipo de discontinuidades se generan a partir de los procesos de soldadura aplicadas a procesos de uniones o reparaciones de cordones de soldadura[18]. Dentro de este tipo de discontinuidades, es importante conocer el tipo de amperaje empleado, la técnica de soldadura aplicada y bajo que procedimiento se realiza, el material de aporte, las condiciones presentes en la superficie como limpieza, contaminación, propiedades del material base, si es nuevo o ya presenta desgaste, tipos de trabajo a los que ha sido sometido en caso de ser piezas en servicio. En las siguientes Tablas se mencionan las discontinuidades que se pueden generar a partir de esta técnica.

Discontinuidades de Soldadura		
Discontinuidad	Localización	Causa
Grietas Frías	Superficial o Subsuperficial	Humedad, disociación de vapor de agua o hidrocarburos, contaminación de aporte, velocidad de enfriamiento alta que propicia la colección de átomos de hidrógeno, esfuerzos residuales por la contracción de soldadura y tensión aplicados. Grietas agudas y bien definidas.
Grietas Calientes	Superficial o Subsuperficial	Temperatura elevada, constituyentes con bajo punto de fusión, esfuerzos de contracción por enfriamiento producen dendritas superficiales, profundidad y ancho de cordón, terminación incorrecta del paso de soldadura, terminación repentina de soldadura, formación de cráteres. Alto contenido de azufre, incremento de contenido de carbono.
Licuación	Superficial o Subsuperficial	Bajo punto de fusión, inclusiones o elementos segregados de la aleación, borde de grano líquido débil para esfuerzos de contracción, entrelazamiento de grietas microscópicas, formación de grietas continuas.
Traslape	Superficial	Soldadura que sobresale del cordón de soldadura, fusión incompleta, amperaje y velocidad de viajes insuficientes. Produce indicaciones en relieve sobre el cordón de soldadura y el metal base.
Desgarre Laminar	Superficial	Presentes en placas y formas de acero rolado con alto contenido de inclusiones no metálicas, separación de las inclusiones con el metal base. Reducción de ductilidad y resistencia en dirección transversal al espeso, indicaciones adyacentes al cordón de soldadura depositado.

Tabla 9 A): Discontinuidades de soldadura

Discontinuidades de Soldadura		
Discontinuidad	Localización	Causa
Fusión Incompleta	Subsuperficial	Coalescencia incompleta entre metal base y aporte. Incompatibilidad de conductividad térmica, primer paso de aplicación de soldadura incorrecto. Indicaciones orientadas en dirección a la soldadura, aparecen cerca del inicio de la soldadura.
Penetración Incompleta	Superficial o Subsuperficial	Bajo amperaje, tamaño incorrecto de los electrodos, velocidad excesiva de viajes de soldadura, ángulo inadecuado del electrodo, manipulación incorrecta del electrodo, limpieza previa inadecuada. Indicaciones longitudinales subsuperficiales que siguen la línea central de la soldadura.
Porosidad	Superficial o Subsuperficial	Evaporación de constituyentes en el material base y formación de cámaras de gas, porosidad agrupada, alineada o al azar. Polvo, suciedad, humedad, alto contenido de azufre. Indicaciones subsuperficiales típicamente difusas, aparecen como un aglomeramiento de partículas.
Inclusiones de Escoria	Superficial o Subsuperficial	Confinamiento de escoria en el interior del metal base, alta velocidad de solidificación, alta viscosidad de metal líquido, geometría inadecuada de la junta. Indicaciones difusas y poco definidas.
Socavado	Superficial	Concentración de esfuerzos, tamaño excesivo del charco de soldadura, amperaje y velocidad de viajes excesivos. Indicaciones menos pronunciadas que en fusión incompleta.

Tabla 9 B) Discontinuidades de soldadura

Como se refiere ASME Sección VII División 1 criterios para soldaduras de recipientes sujetos a presión: una indicación de una imperfección puede ser más grande que la imperfección que la casusa, sin embargo, el tamaño de la indicación es la base para la evaluación. Solo se considerarán relevantes las indicaciones que tengan cualquier dimensión mayor a 1.5mm.

A continuación, se definen los conceptos necesarios para entender la metodología que da origen a los resultados obtenidos.

Indicaciones: Una indicación lineal es una que tenga una longitud mayor a 3 veces su ancho, o bien, una indicación redondeada es de forma circular o elíptica con una longitud igual o menor que 3 veces su ancho[19].

Examinación: Todas las superficies examinadas deben estar libres de[19]:

- Indicaciones lineales relevantes mayores a 1.5mm.
- Indicaciones redondeadas relevantes mayores a 5.0mm.
- 4 o más indicaciones redondeadas relevantes mayores a 1.5mm en línea y separadas por 1.5mm o menos de borde a borde.

Principio de Desmagnetización: Debido a la aplicación de un campo magnético sobre una pieza de inspección, existe algo que se conoce como campos de dominio magnético. La magnetización de las piezas ocurre cuando los dominios magnéticos son alineados en una misma dirección mediante la inducción de un campo magnético. Estos dominios, pueden ser orientados de forma parcial o total dependiendo de la intensidad y la magnitud del campo aplicado análogo a la polarización de la luz en materiales dieléctricos.

Una vez que se realiza la magnetización de la pieza, los dominios se encuentran orientados y se alcanza una magnetización total lo que se traduce como una saturación de magnetismo en la pieza de prueba. Una vez que se alcanza este punto de saturación, aunque se genere una mayor cantidad de energía de campo eléctrico para generar una densidad de flujo magnético mayor, las piezas no son capaces de ser sobresaturadas magnéticamente como si puede ocurrir en casos de concentraciones en soluciones químicas.

A partir de lo anteriormente descrito, se vislumbra el término de curva de histéresis para desmagnetización de piezas en inspección (Ver Apéndice A).

2.4 Metodología de Retroingeniería para la Inspección por Yugo Electromagnético

A continuación, se presenta el esquema final de la metodología de retroingeniería empleado como aplicación al método de la técnica de inspección (Ver Fig. 2.11). La metodología de retroingeniería está basada en el planteamiento jerárquico de tareas o pasos específicos, conocimientos especializados, reglas heurísticas, conocimiento interpretativo, situaciones y soluciones particulares. La aplicación de esta metodología deberá ser desarrollada en modo de iteración a razón de realizar evaluaciones continuas de los nuevos modelos obtenidos con la técnica de inspección ya existente

para determinar cuáles son las mejoras en cada uno de los pasos que constituyen al procedimiento original, pues la identificación de las partes susceptibles a modificaciones, serán más simples de identificar. Una vez desarrollados los modelos abstractos, se determina la estructuración de un diagrama de flujo eficaz para el desarrollo de la técnica de inspección.

Dado el enfoque abordado en este trabajo, a continuación, se presenta de manera detalla las especificaciones de los pasos a seguir en la metodología de retroingeniería para el desarrollo y establecimiento de nuevos modelos abstractos para un nuevo modelo de diagrama de flujo (Ver Fig. 2.11).

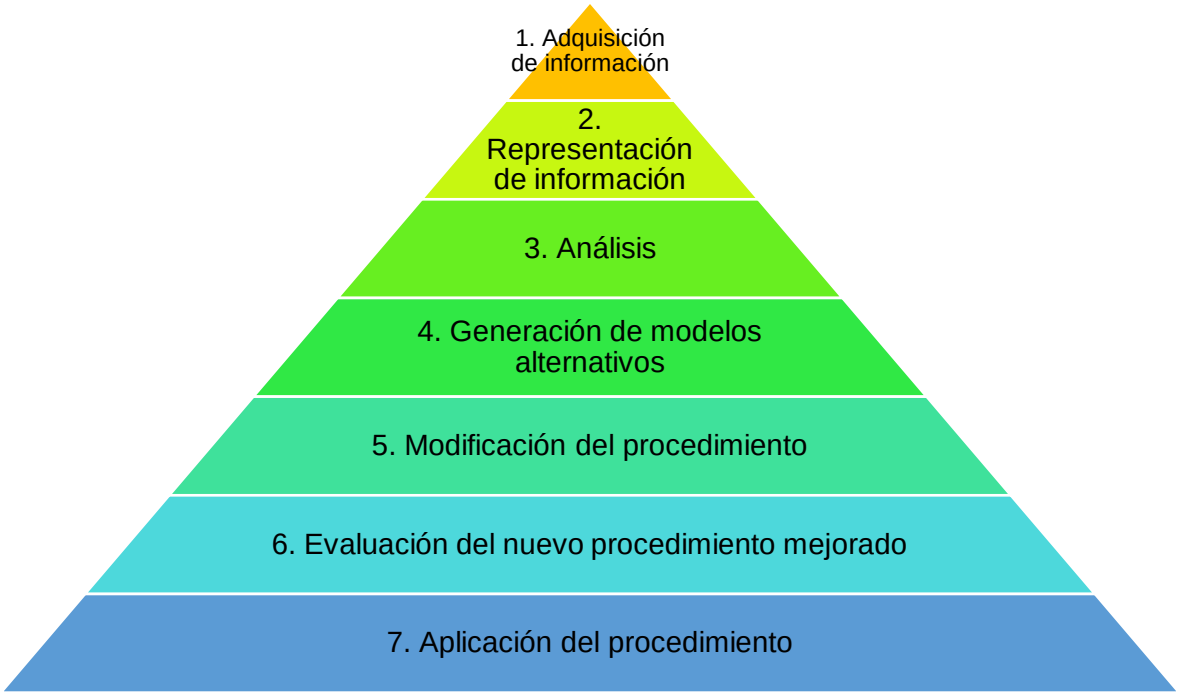


Fig. 2.11 Metodología genérica de Retrofit para el procedimiento de inspección mediante modelos abstractos.

1. La información se adquiere a partir de la determinación de las condiciones generales y específicas de seguridad, el estudio del procedimiento original de inspección, la recolección de datos e identificación de condiciones presentes para el trabajador y el centro de trabajo.
2. La información adquirida se representará al usuario de forma entendible a partir de la identificación de las condiciones presentes en el área de trabajo, las condiciones solicitadas por el mismo y se determinará la mejor técnica de inspección.

3. Una vez representada la información de manera fácil y concisa al usuario, se identificarán las partes susceptibles de modificación o cambio en el procedimiento de identificación de riesgos e inspección.
4. Los modelos alternativos serán construidos con base en las nuevas modificaciones realizadas al procedimiento de identificación e inspección para satisfacer las nuevas especificaciones.
5. Las modificaciones realizadas en los modelos alternativos deberán adaptarse para la representación de acuerdo con el paso n°2, esto es, cumplir con las condiciones solicitadas por el usuario para el desarrollo del trabajo y el aseguramiento del equipo y el área de trabajo, en caso de no cumplir, reformular la técnica de inspección a razón se satisfacer lo solicitado.
6. Las modificaciones hechas al nuevo modelo se evaluarán y se determinará el desempeño del mismo, se realizarán de forma iterativa a partir del paso n°4 hasta encontrar el modelo que mejor se adapte a las condiciones presentes y solicitadas, se propiciará una reducción de tiempo en el desarrollo de la inspección.
7. Una vez determinada la técnica que mejor se ajuste a los requerimientos, se aplicará y se evaluará con ayuda de los técnicos especialistas en ensayos no destructivos (END), el usuario especialista en mantenimiento y el usuario especialista en producción para determinar en tiempo real de la efectividad y el cumplimiento del nuevo modelo.

CAPÍTULO 3: Resultados de la Metodología de Retroingeniería para Inspección por Partículas Magnéticas

La metodología de retroingeniería planteada dentro del presente trabajo integra las 4 metodologías básicas dentro del retrofit para desarrollar un enfoque en la modificación y mejora del procedimiento de identificación e inspección por END a un tanque de almacenamiento de acuerdo con las condiciones solicitadas por el usuario y las presentes en el área de trabajo. La metodología aplicada, engloba conocimiento especializado en seguridad para los centros de trabajo, como trabajos con fuentes de ignición, trabajos con sustancias químicas peligrosas a la salud y el medio ambiente y los requerimientos necesarios para el desarrollo de inspección por END a recipientes sujetos a presión. Además, los conocimientos especializados de la *inspección basada en riesgos (RBI)*, se incorpora como una herramienta importante para el reconocimiento de las condiciones presentes en el área de trabajo y se verifican los tipos de trabajos que se pueden desarrollar.

De acuerdo con lo anterior, el presente capítulo se divide en cinco secciones. En la primera sección se realiza el análisis y la adquisición de la información del procedimiento de inspección por yugo electromagnético (PRC-I-010) para identificar los puntos básicos de la técnica. En la segunda sección, se presenta la adquisición de datos por la técnica de inspección de yugo electromagnético en la que se menciona la preparación de la superficie y las herramientas para realizar la inspección. En la tercera sección, se presenta el procedimiento de inspección necesario para el desarrollo de la técnica y se enuncian específicamente los pasos a seguir. En la cuarta sección, se hace mención de los ejemplos de los modelos abstractos generados por retroingeniería para la inspección por yugo electromagnético y por último, la quinta sección expone el resultado de la metodología aplicada en forma de modelo de diagrama de flujo, así como la evaluación contra otro método de inspección y se verifica que el método propuesto es una alternativa tanto en reducción de tiempo como en eliminación de trabajos con fuentes de ignición.

3.1 Análisis y Adquisición de Información para el Procedimiento PRC-I-010

A continuación, se pueden proponer mejoras al procedimiento de inspección, realizar mejoras en la calidad de la inspección, reduciendo el tiempo de inspección a un recipiente sujeto a presión, implementación de pruebas preliminares con piezas patrón para asegurar que el flujo de campo magnético inducido es el correcto antes de la inspección en campo a los RSP o soldaduras de uniones. Establecer los tipos de corrientes a utilizar, entre otros aspectos bajo términos convenidos según las normas de seguridad aplicables como las abordadas en el capítulo 1 (NOM-002-STPS-2010, NOM-018-STPS-2015 y NOM-020-STPS-2011).

Capacitación del Personal:

- El personal calificado para realizar el desarrollo de la inspección a RSP por partículas magnéticas, debe ser cuando menos Nivel I y deberá contar con las horas recomendadas de entrenamiento inicial para niveles I y II de acuerdo con la practica recomendada ASNT SNT-TC-1A, la cual enuncia que, para Nivel I se deberá contar con 130 horas de experiencia totales y para Nivel II, se deberá contar con 400 horas de experiencia totales[24].

- El personal deberá comprobar mediante exámenes de agudeza visual por lo menos cada 12 meses la detección de discontinuidades, determinar si las indicaciones son relevantes, no relevantes o falsas.

Información Documental: Con base en el procedimiento PRC-I-010, es preciso solicitar al cliente información del equipo o pieza a inspeccionar como: espesores nominales, dibujo o plano mecánico, dibujo o plano isométrico y memoria de cálculo según aplique, todo esto con el fin de determinar con mayor precisión las indicaciones obtenidas.

Condiciones de Aplicación para Inspección por Yugo Electromagnético: Para la inspección por partículas magnéticas secas, se emplea un yugo electromagnético marca Magnaflux® con un consumo de 4 amperes. Gracias a la versatilidad de este equipo, el tipo de magnetización será por corriente alterna lo cual facilita el método de desmagnetización a la postre.

El método para utilizar en el desarrollo de este tipo de inspección será el de secuencia de operación continua con partículas magnéticas secas descrito en el capítulo anterior.

Equipo de Inspección

- Equipo de limpieza.
- Yugo electromagnético de corriente alterna con certificado de calibración.
- Indicador de campo tipo pastel o Laina.
- Partículas magnéticas secas con bulbo de aspersión.
- Medidor de iluminación.
- Fuentes de iluminación (según apliquen las condiciones presentes).
- Fondo contrastante para diferenciar las partículas del material base (pintura o revelador).
- Flexómetro o vernier para la medición de las discontinuidades.
- Dispositivo digital para la toma de evidencia fotográfica.

3.2 Adquisición de Datos Mediante la Técnica de Inspección por Yugo Electromagnético

La técnica de inspección por yugo electromagnético por partículas secas se describe a través del procedimiento PRC-I-010, a continuación, se detallan los conceptos básicos de los pasos necesarios para realizar la inspección al RSP:

a) Limpieza

Si bien, como se menciona en el capítulo anterior, la limpieza no es tan exhaustiva en comparación a líquidos penetrantes, se debe realizar una limpieza previa, esto con el fin de favorecer la movilidad adecuada de las partículas magnéticas.

Se deberá emplear desde detergentes comunes, limpieza mecánica con cardas hasta agentes químicos o desengrasantes con el fin de tener una superficie adecuada, todo ello con el debido cuidado de no cerrar las discontinuidades que puedan ser detectadas y reportadas. La superficie debe estar seca al menos con 5 minutos de anticipación a la aplicación de las partículas magnéticas para no crear aglomeraciones de estas.

b) Aplicación de Fondo Contrastante

Después de realizar la limpieza en la superficie del material o equipo, se debe visualizar el color del material base y el color de las partículas a aplicar. Si el color del material es similar al que poseen las partículas, es necesario la aplicación de un fondo contrastante empleando pintura o revelador para hacer notar la diferencia, aunado a esto, si el material base ya presenta una capa de pintura o agente protector contra corrosión este no deberá ser removido o si se aplica un fondo contrastante como revelador, se debe de verificar que el grosor de la capa no exceda las 0.02 pulgadas.

La medición del espesor se puede realizar por la técnica de medición de puntos en los cruces de una malla con ejes separados de 2” entre sí mediante el uso de equipos magnéticos o electrónicos conforme a las especificaciones del fabricante.

c) Fuentes de Iluminación

El empleo de fuentes de iluminación para la inspección por partículas magnéticas es necesario para mitigar la posibilidad de la exclusión de indicaciones relevantes que deban ser reportadas. Como se comentó en el capítulo anterior, para partículas magnéticas secas visibles, el índice de iluminación debe ser de 100 candelas pie o 1076 lux y en inspección de campo 50 candelas pie.

d) Yugo Electromagnético de Corriente Alterna

El yugo electromagnético deberá contar con el certificado de calibración de 6 meses cuando menos emitido por la unidad de calibración en términos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

Para la certificación del yugo electromagnético, se deberán emplear piezas patrón para la prueba, este debe cumplir el poder de levantamiento de 10 libras con el espaciamiento máximo de los polos (6”). Para asegurar el peso de la pieza patrón, la verificación del peso debe de ser no menor a 3 años.

Para el desarrollo de la inspección, el espaciamiento entre los polos para lecturas adecuadas deberá ser de 2” hasta 6” de longitud sin exceder este valores mínimos y máximos, de lo contrario, el poder de penetración de las líneas de campo y la intensidad disminuye.

e) Uso de Indicadores de Campo

El uso de los indicadores de campo magnético tiene como fin la verificación de la intensidad de campo, la dirección y la sensibilidad de la pieza en inspección. La verificación del campo magnético se debe realizar cuando:

- Se inicie la inspección.
- Se finalice la inspección.
- Se realice un cambio de técnico en la inspección.
- Cuando el tiempo transcurrido entre la última aplicación de campo magnético y la siguiente exceda un máximo de 8 horas.
- Cuando exista incertidumbre en el mal funcionamiento del yugo.

f) Inducción de Campo Magnético

Para la adquisición de datos en soldaduras en Recipientes Sujetos a Presión, se debe de realizar magnetizaciones a 90° del cordón de soldadura y la siguiente a 90° en dirección de la primera inducción. La inspección deberá ser progresiva haciendo un enlace de la posición de magnetización inicial a la siguiente inducción del campo de los polos del yugo electromagnético. Al propiciar este tipo de magnetización continua y progresiva asegura una inspección del 100% de la superficie accesible determinada de común acuerdo con el cliente antes de iniciar la inspección o prevista en el alcance del contrato. Para uniones soldadas, se deberá incluir las áreas adyacentes del cordón de 1” de longitud o 25mm.

g) Secuencia de Operación Continua

Para la adquisición de datos por la técnica de inspección por yugo electromagnético, debe emplearse la secuencia de operación continua de la siguiente manera:

- Determinar el grado de temperatura en el que se encuentra el equipo para poder llevar a cabo la inspección, la temperatura de aplicación para las partículas varía

según las recomendaciones del fabricante, algunos fabricantes recomiendan como límite la temperatura de 315°C

- Colocar el yugo sobre la superficie del material o equipo en inspección
- Aplicar la corriente eléctrica para inducir el campo magnético sobre la superficie de la pieza
- Aplicación de las partículas magnéticas con el uso del bulbo aspersor con el uso del aire como medio de distribución. Evitar la aplicación de las partículas mediante el espolvoreado con la mano
- Remoción del excedente de las partículas con soplos bucales o con el uso de un bulbo vacío
- Eliminar la corriente magnetizadora
- Realizar la inspección

h) Detección de Indicaciones

Para la detección de indicaciones donde se presente incertidumbre de interpretación, será necesario realizar una repetición de la magnetización en la zona prevista.

Durante el desarrollo de la inspección, el técnico no deberá poseer lentes fotocromáticos que propicien lecturas erróneas e inconsistentes, la inspección debe ser realizada sin interferencias visuales.

3.3 Procedimiento de Inspección

1. Ajuste de los polos a la geometría del equipo o pieza en inspección, 3” como espaciamiento mínimo y 6” como espaciamiento máximo entre las piernas.
2. Examinación de la unión de soldadura con 1” adyacente de material base.
3. Inducción de campo longitudinal y transversal al cordón de soldadura, la primera magnetización deberá ser a 90° del cordón y la siguiente a 90° de la primera en forma de cruz.
4. La aplicación de las partículas se deberá realizar cuando el campo magnético esté activo, se utiliza el aire como medio de difusión de las partículas el cual propicia la movilidad de estas sobre la superficie del material. El tiempo de la inducción del campo magnético debe ser aproximadamente de 3 segundos para permitir la formación de las indicaciones.

5. Remover el exceso de partículas magnéticas mediante soplos bucales o manuales con bulbos vacíos.
6. Inspeccionar la superficie con el apoyo de la iluminación recomendada.
7. Realizar magnetizaciones entrelazadas una detrás de otra, abarcando al menos el 50% de la magnetización anterior para cubrir el 100% de la superficie del material de inspección.
8. Interpretación de las indicaciones obtenidas inmediatamente después de la remoción del excedente de partículas.
9. Evaluación de las indicaciones obtenidas de acuerdo con los criterios aplicables a recipientes sujetos a presión mediante ASME Sección VIII División 1 “criterios para soldaduras de recipientes sujetos a presión”.
10. Desmagnetizar la superficie del material. En estos casos de magnetización por yugo electromagnético con corriente alterna, gracias a que la polaridad de la corriente está cambiando continuamente, el campo magnético residual es prácticamente nulo y no se requiere el empleo del procedimiento de desmagnetización a diferencia de las técnicas abordadas previamente.
11. Limpieza y remoción de las partículas magnéticas para evitar la contaminación de la superficie y nulificar la interferencia con operaciones subsecuentes e instrumentos de medición.
12. Registro, toma de evidencia fotográfica y reporte de las indicaciones relevantes obtenidas.
13. Elaboración de informe de resultados de acuerdo con lo citado en el procedimiento FOR-I-009 incluyendo los siguientes puntos[23]:
    a. Presentación, portada y tabla de contenido.
    b. Objetivos y alcance de la inspección.
    c. Inspección, definiciones, técnica y método de inspección, referencias, etc.
    d. Reporte de campo con las lecturas obtenidas.
    e. Croquis de ubicación de las superficies examinadas.
    f. Reporte fotográfico de la inspección.
    g. Observaciones y conclusiones.
    h. Firma del técnico responsable de la inspección.

3.4 Ejemplos de Modelos Abstractos por Retroingeniería para la Inspección por Yugo Electromagnético

Los modelos de abstracción surgen a partir del conocimiento adquirido del procedimiento de estudio, en este caso, el procedimiento de inspección a un RSP. Los modelos de abstracción se generan a partir de la información teórica/práctica proporcionada por el usuario, la descripción de tareas específicas en el procedimiento y los objetivos fundamentales del estudio. Por consecuencia, las reglas de agrupamiento y las reglas heurísticas conducen a definir y delimitar los alcances requeridos dentro del procedimiento para cada paso a realizar. Si bien, se precisa el uso de las reglas de agrupamiento y heurísticas, la jerarquización de los pasos dentro del procedimiento es fundamental para definir la importancia de cada uno de ellos y así evitar la eliminación o modificación arbitraria de alguno, ya que puede generar problemas en el desarrollo de la técnica de inspección (Ver Figura 3.1).

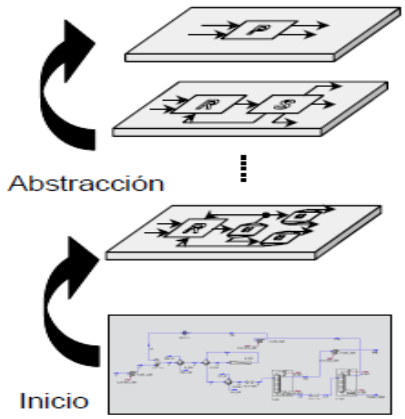


Fig. 3.1 Modelos de abstracción para RETROFIT.

Con base en el estudio de las secciones 1.13, 1.14, 1.16 y 1.17 se desarrollaron los siguientes modelos abstractos en función de la recopilación de información adquirida del procedimiento original y de la identificación de las condiciones presentes en el área de trabajo. Una vez comprendido el concepto de modelos de abstracción; con el apoyo de técnicos especialistas en el desarrollo de la inspección de yugo electromagnético por partículas magnéticas secas a RSP, se obtuvieron los siguientes modelos de manera reducida para el desarrollo en campo. Sin embargo, en el desarrollo de estos modelos, se sabe que la especialización de los técnicos en END a RSP es alta lo que conlleva a diseñar modelos abstractos rápidos y sencillos ya que el dominio que presentan en seguridad es alto y aplicarlos sin un análisis detallado de las condiciones de seguridad presentes afectaría el desempeño de estos modelos. Es preciso aplicar un diagrama de flujo de acuerdo con la metodología de retroingeniería a fin de incentivar la mejora continua en la aplicación de técnicas de inspección (Ver Figura 3.2).

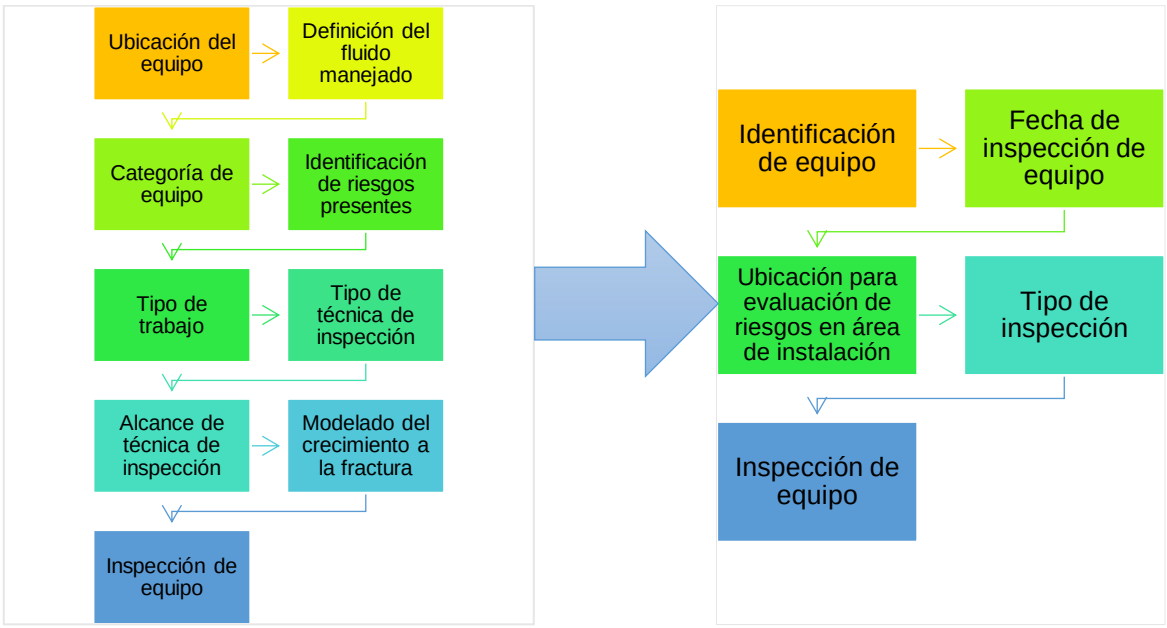


Fig. 3.2: Modelos de abstracción acoplados de retrofit a procedimiento de inspección a tanque de almacenamiento.

El desarrollo de un diagrama de flujo como modelo que englobe las condiciones de seguridad a partir de las normas abordadas en la sección 1.14 servirá como base para el entrenamiento y capacitación de nuevos técnicos en END, así mismo beneficiará una mejora en el desarrollo de trabajos de inspección con fundamentos establecidos con base en normas oficiales de seguridad, la calidad en la recopilación de datos aumentará y la integridad del trabajador y el centro de trabajo no se verán afectadas.

3.5 Resultados de la Metodología de Retroingeniería para Inspección por Yugo Electromagnético

A través del análisis del presente trabajo se hace el acoplamiento de las siguientes metodologías de retroingeniería como: la metodología basada en conocimientos, el razonamiento basado en casos, el sistema de modelos multiples, el procedimiento “top down” de Douglas, así como la metodología de inspección basada en riesgos (RBI) y el uso de las normas de condiciones de seguridad NOM-002-STPS-2010 e identificación de riesgos para sustancias químicas peligrosas NOM-018-STPS-2015, para que el procedimiento de inspección por partículas magnéticas secas con yugo electromagnético PRC-I-010 se complemente y sea un modelo de inspección más robusto por lo que a continuación se presenta la esquematización que se realizó para la reducción del tiempo efectivo

en levantamiento de condiciones de seguridad y condiciones del medio en el que se encuentra el tanque y el desarrollo de la técnica de inspección (Ver Figura 3.3).

Es importante hacer la aclaración que la reducción del tiempo efectivo en el desarrollo del trabajo se enfoca específicamente en evitar el trabajo repetitivo de tareas específicas durante la inspección del tanque de almacenamiento pues los tiempos muertos durante la repetición de tareas propicia una inspección tardada y poco eficaz, en casos singulares las medidas de seguridad no serán cumplidas y la probabilidad de generar un accidente aumentará al no tener un conocimiento detallado de las condciones a las que se enfrenta una inspección en campo.

Una vez establecido el nuevo modelo para el desarrollo de la técnica de inspección, se divide en 4 partes de acuerdo a los siguientes puntos (Ver Fig. 3.3):

1. La primera sección constituida del paso n°1 al paso n°9, se presentan los puntos basados para la identificación de riesgos presentes en el área de trabajo, el uso de equipo de protección personal (EPP) y la determinación del tipo de trabajo a desarrollar con respecto a los parámetros atmosféricos presentes en el área de trabajo (recuadro azul).
2. La segunda sección se encuentra detallada desde el paso n°10 al paso n°14, en el que se menciona la identificación de riesgos por sustancias químicas peligrosas en el área de trabajo (recuadro rosa).
3. La tercera sección está presentada por los puntos n°15 al punto n°21, en el que se desarrolla la técnica de inspección por secuencia continua de acuerdo con el procedimiento de inspección PRC-I-010 con la vertiente de desarrollo de modelos basados en elementos finitos para fracturas para la vida remanente en las uniones del tanque de almacenamiento (recuadro amarillo).
4. La última sección se constituye por los puntos n°22 al punto n°26, los cuales son dedicados para el análisis y desarrollo de datos, así como, para la entrega de resultados y la generación del reporte de entrega al usuario (recuadro verde).

Es de suma importancia mencionar que, en cada una de las secciones establecidas, se encuentran puntos marcados en rojo. Esto hace referencia a que los roles establecidos para estos pasos son fundamentales pues la inatención de estos, contribuye a una errónea identificación de riesgos y desemboca en una amenaza potencial al trabajador y al centro de trabajo.

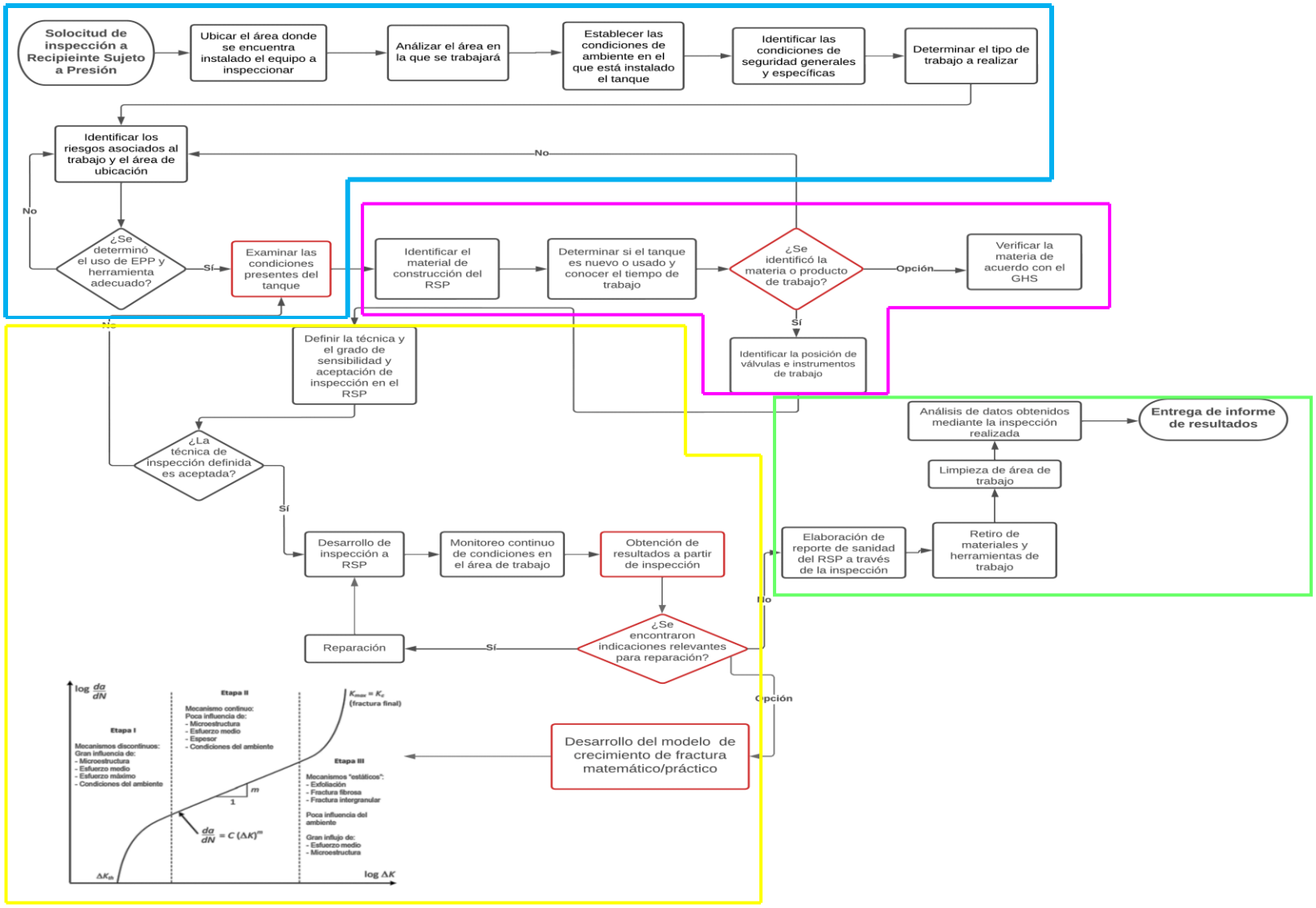


Fig. 3.3 Diagrama de flujo del acoplamiento de las metodologías de Retrofit al procedimiento PRC-I-010.

Una vez desarrollada la integración del retrofit al método de inspección, se realizó el análisis de la reducción de tiempo. En este se compara la técnica de inspección por yugo electromagnético con partículas magnéticas externo contra el método de inspección por líquidos penetrantes interno y externo en el tanque de almacenamiento.

Para el desarrollo de inspección por líquidos penetrantes interno y externo, el área de mantenimiento, que es la encargada de realizar las inspecciones; solicita al usuario una libranza para el desarrollo de inspección. En esta libranza se deben de considerar las siguientes tareas o pasos para la entrega del tanque de almacenamiento y posterior inspección:

- Vaciado de materia almacenada en el tanque, para ello, se deberá de contar con una pipa para la disposición del fluido almacenado.
- Limpieza interna del tanque de almacenamiento a base de ácidos, bases y limpieza hidrostática para mitigar las atmósferas tóxicas o explosivas existentes dentro del tanque.
- Bloqueo y etiquetado de tuberías de suministro y retorno de energías presentes en el tanque de almacenamiento.
- Desarrollo de la técnica de inspección por líquidos penetrantes en superficies internas y externas en el tanque de almacenamiento.
- Reparación de indicaciones relevantes encontradas en la inspección realizada al tanque de almacenamiento.
- Desarrollo de segunda inspección en las identificaciones encontradas en la primera inspección realizada.
- Entrega de tanque de almacenamiento a producción para su puesta en trabajo.
- Desbloqueo y retiro de etiquetas en tuberías de suministro y retorno de energías en el tanque de almacenamiento.
- Trasvasado de fluido para su puesta en marcha.

Si bien el desarrollo de la técnica de inspección por líquidos penetrantes se menciona de manera resumida, la liberación del tanque de almacenamiento es de al menos 5 veces más en comparación a la técnica de yugo electromagnético, por lo que la propuesta del uso de esta técnica de inspección resulta eficiente, ya que esta técnica únicamente demanda la liberación del tanque por 1 día hábil de trabajo, con la distinción de que el tanque podrá seguir en trabajo continuo y la producción no será afectada en ningún sentido.

Por consiguiente, la reducción del tiempo empleada para la inspección del tanque de almacenamiento es de un 80% con respecto a la técnica de inspección de líquidos penetrantes, mencionando que para el desarrollo de la técnica de inspección por yugo electromagnético se

descartan trabajos por aperturas de líneas, trabajos con espacios confinados y trabajos con fuentes de ignición, lo que coadyuva a una inspección más rápida y sencilla.

Conclusiones

La generación de la metodología genérica por RETROFIT a partir de las metodologías de inspección, proporciona un estudio detallado de todas las partes de un procedimiento a razón de considerar modelos abstractos y sencillos, pues comúnmente en la industria representa un menor costo ajustar un procedimiento que la creación de uno nuevo.

Sobre todo, la aplicación de la metodología de retroingeniería garantiza un índice de seguridad bastante alto con el fin de mitigar los riesgos presentes en las áreas de trabajo, ya que con el estudio de todas las condiciones presentes se tiene un plan de trabajo conciso y certero. En consecuencia, la reducción del tiempo a través de la metodología ofreció una mejora en los resultados, en la integridad de los trabajadores y el centro de trabajo.

Respecto al análisis a través del presente trabajo, se aumentó la calidad de la inspección respecto a la adquisición de datos y la caracterización de los materiales para brindar un panorama más amplio sobre el uso correcto de sus equipos y el desempeño adecuado a los cuales pueden ser sometidos. Por ejemplo, la cantidad de adquisición de datos respecto a la técnica de medición. Definir el alcance de la inspección y la sensibilidad de la técnica es de suma importancia, ya que, a partir de esto, se puede desencadenar un sinfín de características y propiedades pues la mayor sensibilidad no es la mejor, el estudio y desarrollo de todas estas técnicas depende del alcance que se quiera obtener.

La aplicación de cada método dependerá específicamente de la configuración de las piezas, equipos o materiales a inspeccionar, el medio ambiente, el tipo de trabajo que desarrollan, las especificaciones del fabricante y las necesidades de uso.

Es de primera necesidad hacer el reconocimiento de los criterios de evaluación y aceptación para cada equipo, pieza o material, pues no se puede evaluar un recipiente sujeto a presión con criterios de aceptación para materiales estructurales. La evaluación de un recipiente sujeto a presión debe definirse a partir de la fabricación y obtención de este, si es nuevo o presenta algún trabajo, reparación o modificación.

La existencia sobre un procedimiento, práctica recomendada, criterios de aceptación o códigos de fabricación generales es totalmente nula, pues como se mencionó previamente. La evaluación arbitraria de los equipos es totalmente falsa. Por ello se recomienda un estudio exhaustivo y detallado del desarrollo de la técnica de inspección de acuerdo con el alcance previsto y definido.

Es preciso realizar un convenio contractual donde se detallen todos los puntos anteriormente comentados, pues esto servirá al usuario como amparo para realizar la demanda de las actividades que el considere incompletas, y a su vez el técnico o unidad de inspección protegerse sobre la demanda de actividades no establecidas en los alcances de las inspecciones.

En resumen, el estudio del procedimiento PRC-I-010 arrojó como resultados una mejora en la esquematización y detallado de cada actividad con la implementación del diagrama de flujo *Retrofit al procedimiento PRC-I-010* de acuerdo con la práctica recomendada por ASNT, el estudio de ASME Sección VIII, recomendaciones de API 510 y desarrollo de NOM-020-STPS-2011.

El método de inspección por yugo electromagnético con partículas magnéticas secas se adapta de acuerdo con la necesidad demandada por el usuario dentro de la industria química, lo que favorece el uso continuo y repetitivo de esta técnica sin la preocupación de generar algún accidente o incidente que se traduzca en fatalidades, pues el desarrollo de la técnica puede aplicarse en condiciones diferentes o superiores a las solicitadas por líquidos penetrantes como atmosferas explosivas, recubrimientos en superficie, temperaturas de aplicación de inspección y limpieza del material base entre otras.

El diagrama de flujo diseñado presentó resultados efectivos en la capacitación de nuevos técnicos y a su vez, fue evaluado en campo y tiempo real al momento del desarrollo de una técnica de inspección. Debido al alcance del diagrama de flujo se englobaron puntos fundamentales en la elección de técnicas de inspección, identificación de riesgos, examinación de condiciones reales presentes en el área de trabajo, evaluación correcta de indicaciones presentes en las uniones (en caso de aplicar) y da una vertiente hacia el desarrollo del modelado de crecimiento de fractura por fatiga a través de modelos basados en elementos finitos. Al realizar la evaluación completa del diagrama de flujo se constató una reducción de tiempo en el desarrollo de trabajo, aumento en índices de seguridad e incremento en la obtención de resultados en la inspección del tanque de almacenamiento.

Apéndice A.

Es una curva generada a partir de la densidad de flujo magnético *B* presente en un material en relación con la fuerza magnetizadora *H* empleada para inducir dicha densidad de flujo magnético[19].

El uso de la curva de histéresis nos provee de información de estudio como la densidad de flujo magnético asociado a la corriente eléctrica que es la fuerza que genera el campo magnético y para determinar las propiedades magnéticas de los materiales.

En base a la Fig. A1. se describe de la siguiente manera:

- En el punto 0, el material se encuentra libre de la inducción de un campo magnético.
- En el punto a, la pieza de inspección se encuentra saturada y totalmente magnetizada.
- Del punto a al punto b, se realiza una disminución de corriente eléctrica o fuerza magnetizadora, disminuye la densidad de flujo magnético en el punto b y el magnetismo es residual (del punto 0 a B_r).
- Para invertir la magnetización y eliminar el magnetismo residual aun presente, un incremento de la fuerza magnetizadora H disminuye la intensidad del flujo magnético al punto C. Donde la distancia de 0 a C se conoce como fuerza coercitiva.
- En el aumento de la fuerza magnetizadora de la corriente eléctrica, la dirección del campo magnético ahora es inverso, lo cual ahora propicia una saturación magnética negativa en el punto D.
- Al disminuir la fuerza magnetizadora, se disminuye el magnetismo residual y ahora se obtiene la inversión de la polaridad en la pieza.
- Para terminar de remover el magnetismo residual, se requiere aplicar una fuerza magnetizadora positiva en dirección original a la primera. El flujo de corriente magnetizadora, disminuye a 0 y la curva de histéresis se completa.

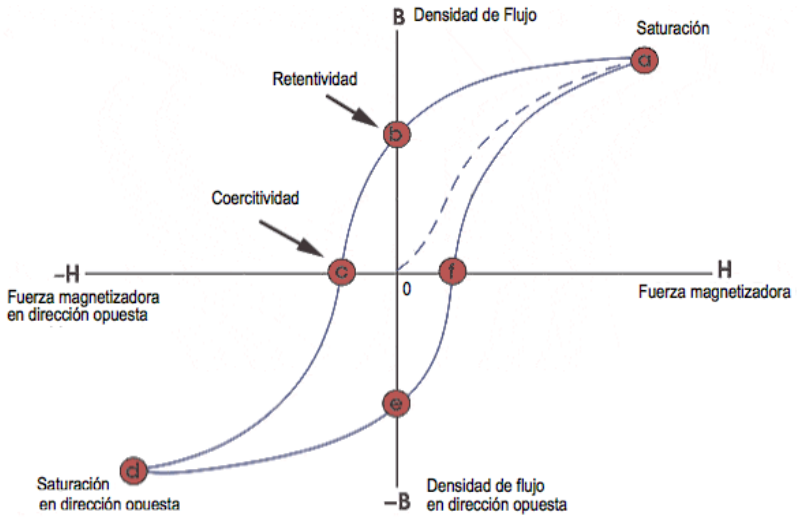


Fig. A1. Curva de histéresis para magnetización y desmagnetización de materiales ferromagnéticos.

De acuerdo con el comportamiento magnético de los materiales anteriormente descrito y con base en la curva de histéresis magnética, pueden describirse los tipos de materiales que se encuentran para las 2 curvas de histéresis características. Los 2 ejemplos comunes de curvas de histéresis son, curvas anchas y curvas angostas.

Para los materiales como los aceros duros, se obtiene curvas anchas, las cuales presentan una baja permeabilidad, alto magnetismo residual, alta reluctancia, alta fuerza coercitiva y una alta retentividad (Ver Fig. A2). Este tipo de curva ancha es característica de imanes permanentes, neodimio y equipos de memoria magnética.

Para materiales como los aceros blandos o aceros con bajo porcentaje de carbono, sus características son totalmente contrarias a las curvas anchas; en curvas angostas se puede encontrar, alta permeabilidad, bajo magnetismo residual, baja reluctancia, baja fuerza coercitiva y baja retentividad por lo que comúnmente, no es necesario aplicar algún método de desmagnetización (Ver Fig. A2).

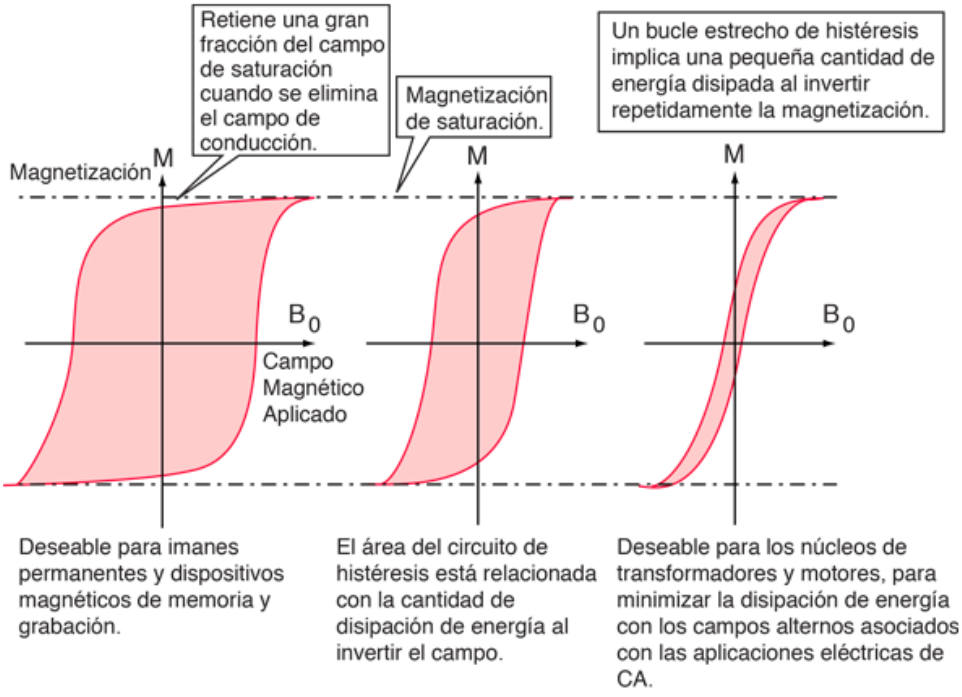


Fig. A2. Tipos de curvas de histéresis presente en materiales ferromagnéticos[22].

El requerimiento de aplicar una desmagnetización a la pieza o equipo en inspección se basa en el fin de eliminar cualquier tipo de interferencia que el magnetismo residual pueda provocar en operaciones subsecuentes al proceso de inspección. Entre ellas se puede mencionar las siguientes:

- Evitar el contacto de partículas magnéticas con operaciones de trabajo cíclico o estático, esto para evitar la producción de esfuerzos que se traduzcan como rayaduras en la superficie de los materiales.
- Eliminar la interferencia del campo magnético residual con equipo electrónico o analógico de medición en procesos y esto produzca lecturas erróneas o fallas en los sistemas automatizados.
- Descartar la acumulación de partículas magnéticas e impurezas que se encuentren en la periferia de la inspección y mitigar cualquier posibilidad de generar contaminación por suciedad en los materiales.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Macías Medina, A. C. (2013). Evaluación del cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-020-STPS.2002, Recipientes sujetos a presión y calderas, funcionamiento-condiciones de seguridad, aplicable al generador de vapor de la FES-ZARAGOZA" [Tesis de licenciatura], Universidad Nacional Autónoma de México.

[2] Unidad 3 Tratamientos Térmicos - PDF Descargar libre (docplayer.es)

[3] (2011). Norma Oficial Mexicana NOM-020-STPS-2011, Recipientes sujetos a presión, recipientes criogénicos y generadores de vapor o calderas.

[4] American Petroleum Institute (2008), API RP 581, Risk-Based Inspection Technology, Second Edition.

[5] Twenty-third annual report of the national advisory committee for aeronautics 1937 including technical reports Nos. 577 to 611.

[6] Barroso Herrero, S., & Carsi Cebrián, M. (2013). Procesado y puesta en servicio de materiales (Edición Digital octubre 2013), Madrid, España. UNED Cuadernos.

[7] Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2017). Ciencia e ingeniería de materiales (7ª ed.) México D.F.: Cengage Learning.

[8] ASTM-1316-20 11 Standard Terminology for Nondestructive Examinations

[9] Pérez Patiño, J. A. (1996). Tratamientos térmicos de los aceros. [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de Nuevo León.

[10] Hecht, E. (2000). Óptica. (3ª Edición), Madrid, España. Addison Wesley Iberoamericana

[11] Aguilar Gómez, E.H. (2014). Estudio de la reflectancia y transmitancia en sistemas unidimensionales periódicos con inclusiones de bismuto: en busca de un sistema metamaterial [Tesis de licenciatura] Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

[12] Distribuidora Industrial Termoacustic. (2020).

[13] A. RODRIGUEZ, (2005). METODOLOGÍA PARA EL RETROFIT DE PROCESOS QUÍMICOS BASADA EN UNA REPRESENTACIÓN JERÁRQUICA (Tesis Doctoral), Universitat Rovira I Virgili, España.

[14] Zacarias Ortiz, F. J. (2013). Cálculo del espesor mínimo requerido en equipos sujetos a presión en una planta de cracking catalítico fluidizado (FCC-1). [Tesis de licenciatura], Universidad Nacional Autónoma de México.

[15] López Lina, G. P. (2009). La inspección y evaluación no destructiva por el método de ultrasonido, en materiales y componentes, para el mantenimiento, la seguridad y la sustentabilidad de la infraestructura industrial. [Tesis de licenciatura], Instituto Politécnico Nacional.

[16] American Society of Mechanical Engineers - ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII Div.1 e 2 Ed. 2010 Ad. 2011

[17] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V, Nondestructive Examination, Article 7; Magnetic Particle Examination. 2010.

[18] Curso Partículas Magnéticas, El primer nombre en pruebas no destructivas, ILOG S.A. de C.V. Ciudad de México, México, (2013).

[19] Rangel Rodríguez, J. M. (2021). Partículas Magnéticas Nivel I y II. Capacitación y Consultoría en Tecnologías de Inspección. México.

[20] API 2X 04 API RP 2X - Recommended Practice for Ultrasonic and Magnetic Examination of Offshore Structural Fabrication and Guidelines for Qualification of Technicians (2015)

[21] Alanís Toledo, B. Nivel III ASNT, Reg. 63586. Métodos: RT, UT, MT y PT. "Partículas Magnéticas Niveles I y II". Capacitación y pruebas no destructivas de México, S.C. Requisitos para la capacitación, calificación y certificación de personal en ensayos no destructivos. (2013).

[22] Hysteresis in magnetic materials (gsu.edu)
[23] FOR-I-009, Informe de Resultados por Inspección de Partículas Magnéticas.
[24] Recommended Practice ASNT-SNT-TC-1A: Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing, 2001 version, by the American Society For Nondestructive Testing, Inc.
[25] American Petroleum Institute (API 510), (2014). “Pressure vessel inspection code: in service inspection, rating, repair, and alteration”
[26] (2010). Norma oficial mexicana NOM-002-STPS-2010, condiciones de seguridad-prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo.
[27] (2018). Norma oficial mexicana NOM-018-STPS-2015 Sistema armonizado para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo
[28] Gundersen, T. (1990). Retrofit process design - Research and applications of systematics methods. Proceedings of Foundations of Computers-Aided Process Design, CACHE, (J. J. Siirola, I. E. Grossmann, and G. Stephanopoulos, edit.), Elsevier, pp. 213-240.
[29] Douglas, J.M. (1988). Conceptual design of chemical process. Mc Graw Hill, New York.
[30] A.A. Andrade Et all. (2015) Modelos de crecimiento de grietas por fatiga.
[31] N. Ranganathan, F. Chalon y S. Meo, “Some aspects of the energy-based approach to fatigue crack propagation,” Int. J. Fatigue, vol. 30, 2008, pp. 1921-1929
[32] V. B. Watwood Jr., “The finite method for prediction of crack behavior,” Nuclear Eng. Design, vol. 11 (2), 1970, pp. 323-332.