



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA UN SISTEMA DE
TUBERÍAS DE UN EQUIPO DE REFRIGERACIÓN CON APLICACIÓN DE ENSAYOS NO
DESTRUCTIVOS, BAJO LA NORMA ASME B31.3 EN UNA PLANTA AVÍCOLA**

Julio César Gallina Burrión

Asesorado por el Ing. Walter Emilio Ramírez Córdova

Guatemala, octubre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA UN SISTEMA DE
TUBERÍAS DE UN EQUIPO DE REFRIGERACIÓN CON APLICACIÓN DE ENSAYOS NO
DESTRUCTIVOS, BAJO LA NORMA ASME B31.3 EN UNA PLANTA AVÍCOLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JULIO CÉSAR GALLINA BURRIÓN

ASESORADO POR EL ING. WALTER EMILIO RAMÍREZ CÓRDOVA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Fredy Mauricio Monroy Peralta
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. Randolpho Chang Granados
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA UN SISTEMA DE TUBERÍAS DE UN EQUIPO DE REFRIGERACIÓN CON APLICACIÓN DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS, BAJO LA NORMA ASME B31.3 EN UNA PLANTA AVÍCOLA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 31 de mayo de 2016.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke at the bottom.

Julio César Gallina Burrión

Guatemala, 06 de octubre de 2018.

Director
Julio César Campos Paiz
Escuela de **Ingeniería Mecánica**
Facultad de Ingeniería
Presente.

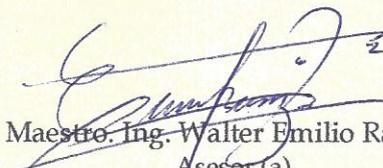
Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación de la estudiante **Julio César Gallina Burrión** con carné número **200217757**, quien opto la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Ingeniería en Mantenimiento**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

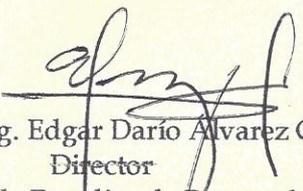
Sin otro particular, atentamente,

"Id y Enseñad a todos"


Maestro. Ing. Walter Emilio Ramirez C.
Asesor (a)

Ing. Walter E. Ramirez C.
INGENIERO INDUSTRIAL
COLEGIADO 10,049


Doctora. Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola
Coordinadora de Área
Gestión y Servicios


Maestro. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Cc archivo/LZ.L.A.

RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA: Proceso de Graduación aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.295.2018

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación de la Coordinadora del Área de Gestión y Servicios de la Escuela de Estudios de Postgrado, modalidad Pregrado-Postgrado de la Maestría de Ingeniería en Mantenimiento, del trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA UN SISTEMA DE TUBERÍAS DE UN EQUIPO DE REFRIGERACIÓN CON APLICACIÓN DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS BAJO LA NORMA ASME B31.3 EN UNA PLANTA AVÍCOLA** del estudiante **Julio César Gallina Burrión**, CUI **1628186530304** y Registro Académico No. **200217757** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Julio César Campos Paiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



MA Ing. Julio César Campos Paiz
Ingeniero Mecánico
Colegiado No. 2701

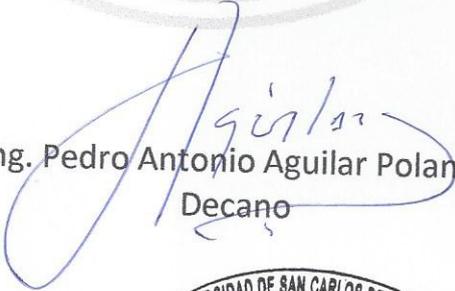
Guatemala, octubre de 2018
/aej



DTG. 421.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA UN SISTEMA DE TUBERÍAS DE UN EQUIPO DE REFRIGERACIÓN CON APLICACIÓN DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS, BAJO LA NORMA ASME B31.3 EN UNA PLANTA AVÍCOLA**, presentado por el estudiante universitario: **Julio César Gallina Burrión**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, octubre de 2018

/gdech



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
4. JUSTIFICACIÓN	13
5. OBJETIVOS	15
5.1. General.....	15
5.2. Específico	15
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	17
7. MARCO TEÓRICO.....	21
7.1. Mantenimiento	21
7.1.1. Mantenimiento correctivo.....	22
7.1.2. Mantenimiento preventivo.....	23
7.1.3. Mantenimiento predictivo	23
7.2. Gestión de mantenimiento.....	24
7.3. Procesos de soldadura	26

7.3.1.	Proceso de soldadura por arco eléctrico	27
7.3.1.1.	Proceso de soldadura por arco eléctrico y protección con gas inerte GTAW.....	28
7.4.	Discontinuidades presentes en soldaduras	30
7.4.1.	Discontinuidades en el paso de raíz.....	31
7.4.2.	Discontinuidades en el paso final	32
7.4.3.	Discontinuidades internas	33
7.4.4.	Discontinuidades por grietas	34
7.5.	Ensayos no destructivos	34
7.5.1.	Ensayos no destructivos superficiales.....	36
7.5.2.	Ensayos no destructivos volumétricos	36
7.5.3.	Ensayos no destructivos de hermeticidad	37
7.5.4.	Certificación de inspectores de ensayos no destructivos	37
7.5.5.	Norma ASME B 31.3	38
7.5.6.	Norma ISO 9712	38
7.6.	END aplicados a inspección de soldaduras	39
7.6.1.	Inspección visual	40
7.6.2.	Líquidos penetrantes.....	42
7.6.2.1.	Descripción general del método	45
7.6.3.	Ultrasonido industrial.....	48
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	51
9.	MARCO METODOLÓGICO	55
9.1.	Diseño	55
9.2.	Tipo de investigación.....	55
9.3.	Alcance	55

9.4.	Variables e indicadores	56
9.5.	Fases de investigación	56
9.5.1.	Primera fase	56
9.5.2.	Segunda fase.....	57
9.5.3.	Tercera fase.....	57
9.5.4.	Cuarta fase	57
9.5.5.	Quinta fase	57
9.5.6.	Sexta fase.....	58
9.5.7.	Séptima fase.....	58
9.6.	Plan de muestreo	58
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	59
10.1.	Estadística descriptiva	59
10.2.	Gráficos	59
10.3.	Esquema de contenido	59
10.4.	Mapas conceptuales.....	60
11.	RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	61
11.1.	Recursos materiales	61
11.2.	Recursos humanos.....	61
11.3.	Recursos financieros	61
12.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	63
13.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de solución	19
2.	Soldadura GTAW	29
3.	Esquema de equipo de soldadura GTAW	30
4.	Equipo básico para inspección visual.....	41
5.	Kit básico de líquidos penetrantes	43
6.	Proceso de aplicación de líquidos penetrantes	47
7.	Equipo de ultrasonido industrial	49
8.	Cronograma de actividades	63

TABLAS

I.	Clasificación de ensayos no destructivos superficiales	36
II.	Clasificación de ensayos no destructivos volumétricos.....	37
III.	Técnicas de líquidos penetrantes.....	44
IV.	Plan de muestreo	58
V.	Recursos necesarios.....	62
VI.	Matriz de coherencia	64

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
VT	Inspección visual
PT	Líquidos penetrantes
UT	Ultrasonido industrial
RT	Radiografía industrial
Ø	Diámetro

GLOSARIO

Acero al Carbono	Acero con concentraciones de 0.02 a 2% de carbono.
ANSI	Instituto Americano de Normalización.
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.
ASNT	Sociedad Americana de Ensayos no Destructivos.
Defecto	Tipo de discontinuidad inaceptable.
Discontinuidad	Perdida de homogeneidad en los materiales.
END	Ensayo no destructivo.
Fiabilidad	Probabilidad de que un sistema o dispositivo cumpla con una determinada función, bajo ciertas condiciones durante un tiempo determinado.
GTAW	Soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y protección gaseosa.
Homogeneidad	Uniformidad en la composición y la estructura de una sustancia o mezcla
ISO	Organización Internacional de Normalización

1. INTRODUCCIÓN

En Guatemala, la industria avícola es uno de los sectores más importantes de la actividad agropecuaria en el país. Con el transcurrir del tiempo se ha desarrollado, tecnificado y consolidado para la producción, distribución y venta de productos avícolas, laborando con altos estándares de calidad, desde la incubación del pollo hasta su distribución en los distintos sectores del mercado. De esta manera, el sector avícola provee alimentación nutritiva de calidad, tomando un papel importante en la dieta básica de los guatemaltecos.

En la industria avícola, se utilizan una variedad enorme de equipos, maquinaria e instalaciones. Con una diversidad de tecnologías que requieren de la aplicación del mantenimiento de acuerdo a las características y condiciones de operación de cada uno de ellos. Dentro de los equipos de la planta avícola, se encuentran los equipos de refrigeración utilizados para la conservación de productos alimenticios, algunos utilizan refrigerantes halogenados y otros utilizan amoníaco.

El amoníaco es altamente peligroso para la salud de las personas y una fuga puede ocasionar grandes pérdidas por paros totales en la planta de producción, por ello es necesario garantizar la hermeticidad y confiabilidad de los sistemas de tuberías en equipos de refrigeración. En los sistemas de tuberías solo consideran aspectos como pruebas de hermeticidad, aislamiento y pintura, entre otros. No existe un plan de mantenimiento para analizar las condiciones de las juntas soldadas y los factores de riesgo que puedan ocasionar una falla. Dado lo anterior, por los antecedentes, existe una alta vulnerabilidad a fugas de amoníaco.

Una gestión de mantenimiento que incluya la aplicación de ensayos no destructivos para la inspección de soldaduras, puede ser la solución para evitar incidentes y paros de producción por fugas de amoníaco. Con la presente investigación, se pretende validar que la aplicación de ensayos no destructivos (END) puede ser una solución, debido a que se puede determinar si la soldadura cumple con la calidad adecuada, detectar discontinuidades superficiales e internas y realizar las acciones correctivas para obtener una soldadura fiable. Dentro de la gestión de mantenimiento, será necesario incluir un programa de mantenimiento preventivo con rutinas de inspección en tuberías, soportes, aislamientos y aplicación de técnicas para evitar la corrosión.

La metodología utilizada en el presente estudio, se basa en la recopilación y análisis de datos de los materiales utilizados, análisis de gestión de mantenimiento y las diferentes técnicas de ensayos no destructivos, para la inspección de soldaduras disponibles en la industria, y los criterios de aceptación y rechazo. Se analizará la norma ASME B 31.3, que se utilizará como referencia para el proyecto. También se analizan los procesos de soldadura para determinar cuál es la mejor opción.

Se realizará la investigación sobre las características de los materiales en estudio, tanto de las tuberías de hierro al carbón utilizadas, como el material de aporte y el proceso de soldadura GTAW protegido con argón, y los procedimientos adecuados de preparación de superficies y biseles en los tubos para la aplicación de soldadura y garantizar que los cordones de soldadura sean confiables desde el inicio del proceso.

La implementación de un diseño de gestión de mantenimiento al sistema de tuberías del túnel de congelado y aplicación de ensayos no destructivos a las

soldaduras, puede brindar fiabilidad al sistema reduciendo los riesgos de fugas de amoníaco. El proyecto beneficiará al personal operativo de producción y mantenimiento, personas residentes a los alrededores de la planta y al funcionamiento óptimo del túnel de congelado.

La investigación está contemplada en los siguientes capítulos:

En el primer capítulo se describen las generalidades de la planta avícola, se presentan fundamentos de la gestión y tipos de mantenimiento, procesos de soldadura, técnicas de ensayos no destructivos para la inspección de soldaduras, criterios de aceptación y rechazo, propiedades y características del amoníaco, fichas técnicas, descripción de la norma B31.3 y normas internacionales involucradas al proceso.

El siguiente capítulo consta del marco metodológico, se definen los tipos de investigación utilizados en el estudio, técnicas, herramientas y métodos empleados. Se realizará la recopilación de datos, condiciones de operación del sistema, y encuestas para la identificación de fallas generadas por la falta de procedimientos. Se realizará un registro de los procedimientos actuales de instalaciones y mantenimiento a soldaduras y tuberías.

Acorde a lo planteado, en el capítulo 3 se presentan y analizan los resultados por medio de tablas y gráficos, análisis de modo y consecuencia de fallas en soldaduras, inspecciones por medio de END, juntas rechazadas y aceptadas, acciones correctivas y ensayos de las reparaciones. Se presenta un análisis de los procedimientos utilizados desde la preparación de las superficies a soldar, procedimientos de aplicación de los END, y criterios para la aplicación de aislamientos, anclaje, tornillería y pintura.

En el último capítulo, se presentan las conclusiones y recomendaciones que dan respuesta a los objetivos planteados. En este capítulo se presenta el plan de mantenimiento para sistemas de tuberías que permitirá anticiparse a fallas potenciales, procedimientos para aplicación de END, procedimientos para el aislamiento de tuberías, aplicación de pintura para evitar la corrosión y rutinas de mantenimiento por medio de ordenes preventivas, que permita obtener una solución técnico económica para la empresa.

2. ANTECEDENTES

Debido a la evolución del mantenimiento, los ensayos no destructivos, han tomado gran influencia en la inspección de materiales. Ospina (2011), menciona que han llegado a ser una herramienta indispensable en el mantenimiento en las industrias, siendo el medio primordial para medir el nivel de calidad alcanzado por los diferentes productos. Esto se ha logrado a través de la aplicación de estándares internacionales para la creación de procedimientos y el uso de nuevas tecnologías que permitan la reducción de factores de riesgos de accidentes.

Carbajal (2017), menciona que los END se han utilizado por mucho tiempo. Existen registros desde 1868 utilizando campos magnéticos para inspecciones. El método antiguamente utilizado era el de petróleo y cal para inspecciones en ejes y ruedas de ferrocarril, con éste método se podían detectar defectos superficiales. El método consistía en introducir las piezas en una mezcla de aceite y keroseno, se realizaba una limpieza superficial y posteriormente se esparcían con un polvo. El defecto se encontraba cuando el aceite mojaba el polvo.

Con la evolución del mantenimiento y procesos productivos, ya no fue suficiente la detección de discontinuidades y se presenta la necesidad de caracterizar las discontinuidades en cuanto a forma, tamaño y ubicación para tener referencias de la vida útil de las piezas evaluadas. Con éste desarrollo se contribuyó a que los END fueran reconocidos como una disciplina, propiciando a que se fundara la Sociedad Americana para ensayos no Destructivos en 1941.

Los END han evolucionado debido a las necesidades de la industria, según Villacrés (2009), después de la Segunda Guerra Mundial se dieron cambios significativos estimulados por los avances tecnológicos de la época. A consecuencia de esta necesidad, se desarrollaron técnicas de END más sofisticadas para cubrir las necesidades de inspección de los distintos materiales utilizados en la industria.

En su tesis Camacho (2008), presenta la aplicación de END en una planta de la industria metalúrgica en Venezuela. Se analizaron historiales de ensayos realizados a recipientes a presión en los años 2002, 2005 y 2007, concluyendo que dentro de los defectos observados, el mayor porcentaje de defectos se debía a inclusión de escoria en la soldadura, obteniendo resultados 26,9%, 59,7% y 54,2% respectivamente. Los resultados fueron analizados y se encontró que el 70% de las pinzas porta electrodo no sujetaban de forma adecuada el electrodo y provocaba la inclusión de escoria en las soldaduras.

Flores (2009, p.146), describe los beneficios obtenidos en los reactores nucleares, en la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde en México, por la aplicación de END. Lograron una alta confiabilidad en la operación segura de la planta, y por lo tanto, garantizaron la seguridad de los habitantes de las poblaciones cercanas a la planta. Otro de los beneficios es la disminución de paros no programados, evitando pérdidas millonarias que afectan a la Comisión Federal de Electricidad y a los usuarios del servicio.

En su tesis Soria (2004), indica que en Guatemala, se empezaron a utilizar los END, aproximadamente en la década de 1960, utilizando el método radiográfico en varios proyectos de la empresa TIPIC, S.A., con un tubo de rayos "X". Posteriormente, la Facultad de Ingeniería por medio del

departamento de materiales, hace uso de una fuente de Cesio 137 para toma radiográfica por gammagrafía a principios de la década de 1970.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas de refrigeración por medio de amoníaco cuentan con un sistema de mantenimiento preventivo para cada uno de sus componentes mecánicos y eléctricos. El plan de mantenimiento preventivo no incluye a sistemas de tuberías, que si bien es cierto que la probabilidad de falla es mucho menor en comparación al resto de componentes, las consecuencias de una falla en el sistema de tuberías podría ser catastrófico para la empresa.

Al no existir un plan de mantenimiento a sistemas de tuberías para equipos de refrigeración, se disminuye la vida útil del sistema y aumenta la vulnerabilidad a fugas de amoníaco. Debido a deficiencias en el aislamiento, soportes de la tubería, empaquetaduras, tornillería y ataques por pitting o corrosión por picadora, debido a la humedad, se hace necesaria la intervención del mantenimiento correctivo para la sustitución de tuberías.

Una falla en el sistema de tuberías, trae como consecuencia una fuga de amoníaco, provocando serios daños en las vías respiratorias, ojos y piel de las personas y la evacuación inmediata del personal operativo y en algunos casos los habitantes de las residencias aledañas. Consecuentemente se incurre en pérdidas de más de Q. 300,000.00 por paros en producción y suspensiones laborales. Se debe sumar el costo de reparaciones que varía de acuerdo a la gravedad del daño.

Debido a la carencia de estándares y procedimientos para aplicación de END en inspección de soldaduras, se toman decisiones precipitadas, basadas en criterios personales por parte de supervisores o jefes de área. Las

decisiones tomadas, pueden afectar el objetivo principal de garantizar que los cordones de soldadura sean seguros para la operación.

A consecuencia de los problemas suscitados surgen las siguientes preguntas:

- Pregunta general

¿Cómo los ensayos no destructivos a través de un sistema de gestión de mantenimiento pueden ayudar a la operación segura del sistema de tuberías en un equipo de refrigeración en una planta avícola?

Adicionalmente, se complementa la investigación con las siguientes preguntas auxiliares

- Pregunta específica 1

¿Qué técnicas de ensayos no destructivos son las más recomendadas en la inspección de soldaduras en tuberías en un sistema de refrigeración?

- Pregunta específica 2

¿Qué norma es la recomendada para la aplicación de ensayos no destructivos en soldaduras en sistemas de tuberías?

- Pregunta específica 3

¿Cuál es el procedimiento adecuado para la aplicación de ensayos no destructivos y criterios de aceptación y rechazo en la inspección de soldaduras?

- Delimitación

El trabajo de investigación se realizará en las juntas soldadas en el proyecto de remodelación del sistema de tuberías de acero al carbón, en líneas de succión y líquido del equipo de refrigeración IQF (*Individual Quick Freezing*) para congelamiento de producto en la planta avícola.

4. JUSTIFICACIÓN

El proyecto va orientado a la línea de investigación de aplicación de procedimientos para evitar la corrosión, oxidación, fricción y desgaste, a través de técnicas de ensayos no destructivos de la maestría en Ingeniería de mantenimiento.

Debido a la alta demanda en la producción en la planta avícola y los enfoques de las industrias en la seguridad industrial, se hace necesario realizar todas las acciones de mantenimiento que garantice la disponibilidad y la confiabilidad de la maquinaria. Es por ello que desde el departamento de mantenimiento se están realizando nuevas técnicas o métodos de mantenimiento, con el fin de mejorar la gestión global de los activos físicos.

Una fuga de amoníaco puede ocasionar un paro total en el proceso productivo por la evacuación del personal y causar pérdidas de más de Q. 300,000.00 en un turno de 8 horas. Es por ello que se busca implementar una gestión de mantenimiento que permita obtener un sistema fiable. Se busca diseñar un plan de mantenimiento que contemple procedimientos para aplicación de soldaduras, y la inspección por medio de ensayos no destructivos que podría tener un costo de Q. 20,000.00. Con él se evitaría incurrir en costos mayores por paros en producción y riesgos a la salud de los empleados y las personas residentes a los alrededores.

En el siguiente trabajo investigativo, se busca definir los procedimientos para aplicación de soldadura por el proceso GTAW y la selección y aplicación de ensayos no destructivos, conforme a normas internacionales que puedan

brindar los lineamientos, con el objetivo de obtener los mejores resultados, sin afectar la funcionalidad del sistema, considerando factores de seguridad industrial.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Diseñar un modelo de gestión de mantenimiento y aplicación de ensayos no destructivos para una operación segura en el sistema de tuberías de un equipo de refrigeración en una planta avícola.

5.2. Específico

- Identificar los ensayos no destructivos recomendables en la inspección de soldaduras en el sistema de tuberías para un equipo de refrigeración.
- Analizar la norma ASTM B 31.3 como base para la aplicación de ensayos no destructivos
- Definir un procedimiento para la aplicación de ensayos no destructivos en la inspección de soldaduras en tuberías en sistemas de refrigeración por amoníaco.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

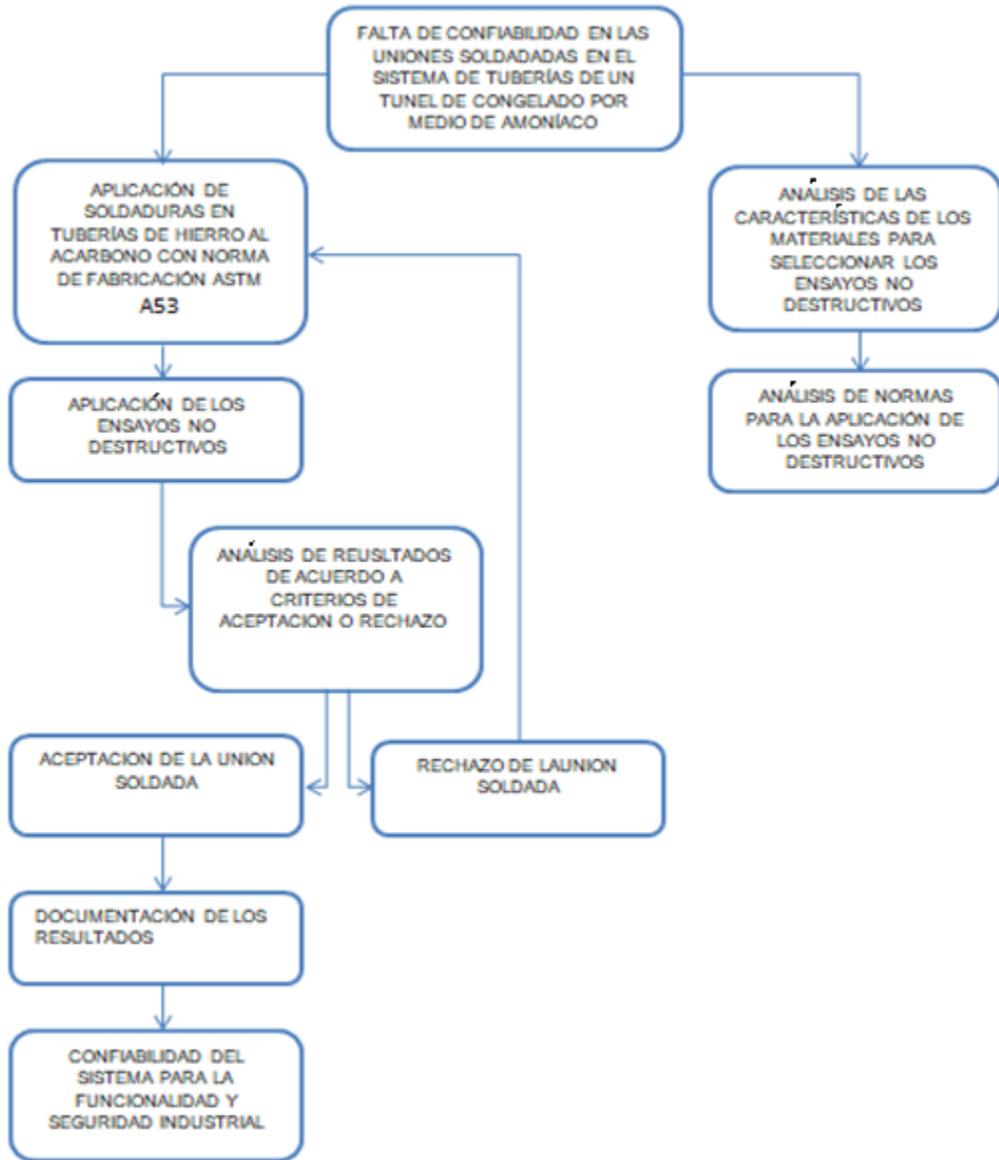
A continuación se describen una secuencia de pasos que darán soporte a la investigación:

- Se recopilarán y analizarán datos técnicos de las tuberías de hierro al carbón con normas de fabricación ASTM A53, y el material de aporte utilizado en el proceso de fabricación de soldaduras.
- Se realizará un procedimiento para la aplicación de cordones de soldadura por medio del proceso GTAW protegido con Argón, que dé los lineamientos generales para obtener soldaduras confiables.
- Se analizarán las discontinuidades que se pueden presentar en los cordones de soldadura para mejorar los procedimientos de aplicación de soldaduras.
- Se investigarán las normas que rigen la aplicación de ensayos no destructivos de acuerdo a cada técnica aplicada.
- Se analizarán las características de los materiales que intervienen en las juntas soldadas, y las características del área en donde se aplicarán para determinar los ensayos no destructivos que mejor se adapten a las necesidades.
- Se procederá a la ejecución de la instalación de tuberías en el sistema de refrigeración para el túnel de congelado por medio de amoníaco.

- Se aplicarán los ensayos no destructivos a todos los cordones de soldadura de acuerdo al análisis realizado sobre la caracterización de los materiales, tanto base como aporte.
- Se analizarán los resultados de los ensayos no destructivos y se realizarán las acciones correctivas en el caso de encontrar imperfecciones en las soldaduras.

Se definirá un procedimiento para la aplicación de ensayos no destructivos en sistemas de refrigeración por amoníaco.

Figura 1. Esquema de solución



Fuente: elaboración propia.

7. MARCO TEÓRICO

Con el objetivo de dar forma y estructura al desarrollo de la investigación, se presentan los fundamentos teóricos de los temas relacionados, empezando desde el mantenimiento y su clasificación, hasta temas específicos como procesos de soldadura, discontinuidades, y fundamentos de ensayos no destructivos, entre otros.

7.1. Mantenimiento

Existe una variedad de definiciones de mantenimiento y todas se enfocan a las acciones realizadas en un activo físico, para controlar el estado de los mismos.

Garrido (2003) menciona que la definición de mantenimiento ha evolucionado desde finales del siglo XIX y los operarios eran los encargados de la reparación de las fallas como función simple para asegurar la producción en esa época. Esta definición pasó por distintas etapas, hasta la actualidad con nuevas perspectivas del mantenimiento. En la actualidad, el mantenimiento busca corregir, prevenir, predecir, monitorear, identificar efectos, causas y consecuencias de fallas y otras funciones que buscan optimizar el costo global de mantenimiento en las industrias.

Navarro (2004), describe al mantenimiento como un conjunto de acciones que se necesitan para restablecer o conservar el funcionamiento de un sistema a un coste mínimo. Las acciones pueden estar enfocadas a corregir, prevenir, determinar el estado de los componentes, ó aspectos económicos y de control de calidad.

En muchas ocasiones y por distintas razones los administradores de mantenimiento pierden el objetivo de optimización de recursos. Buscan restablecer o mantener las funciones de un sistema, sin importar el costo de mantenimiento. Existen distintas estrategias de mantenimiento que buscan el mismo objetivo, pero es función del gestor, implantar un sistema de gestión de mantenimiento acorde a los requerimientos, condiciones y características de cada planta, y sobre todo buscar el coste mínimo.

Con el objetivo de optimizar los recursos, los gestores de mantenimiento se han ido adaptando de acuerdo al tipo de industria, tipo de máquina y condiciones de operación, para aplicar las distintas estrategias de mantenimiento. Es válido aplicar varios tipos de mantenimiento para los distintos equipos dentro de una planta, de acuerdo a la criticidad y el impacto que pueda tener en la producción. En algunos casos es más económico aplicar un programa de mantenimiento correctivo que la implementación de un programa preventivo.

7.1.1. Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo se enfoca en la corrección de fallas y las consecuencias después que estas ocurren. Es un conjunto de acciones realizadas en los activos, con la finalidad de restablecer las funciones originales que se pierden como consecuencia de las fallas. Regularmente no está enfocado a la optimización de costos.

Navarro (2009), enmarca que en el mantenimiento correctivo se aprovecha al máximo la vida útil de los componentes, no requiere de grandes instalaciones, pero sí necesita una alta capacidad de análisis del personal de mantenimiento. El mantenimiento correctivo tiene un alto costo, debido a que

las fallas se presentan de forma imprevista distorsionando o causando paros en producción, se necesita alto *stock* de repuestos, y se obtiene una baja calidad del mantenimiento por aspectos de tiempo.

7.1.2. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo, tiene como objetivo evitar las fallas, anticipándose con tareas previamente estructuradas aplicadas a los activos, “Consiste en realizar ciertas reparaciones o cambios de piezas, al vencer un período de tiempo prefijado, con la finalidad de disminuir la probabilidad de daños y pérdidas de producción (Gardella, M., 2015, pág.49).

El mantenimiento preventivo, se basa en las inspecciones secuenciales realizadas en intervalos definidos de tiempo, se realiza con el objetivo de mantener los activos en sus condiciones de diseño evitando su deterioro. El mantenimiento preventivo contempla tareas de inspección rutinarias para la detección de anomalías por medio de técnicas VOSO, tareas periódicas y programadas de cambio de piezas o componentes de los activos sin considerar las condiciones de los activos, es por ello que en algunos casos, el mantenimiento preventivo es de mayor costo en comparación del mantenimiento correctivo.

7.1.3. Mantenimiento predictivo

Se define como el conjunto de técnicas o métodos aplicadas a los activos físicos, basándose en la condición de la maquinaria, a través de la medición de parámetros definidos para detectar síntomas, y formar tendencias que posteriormente sirve como soporte para la planificación óptima, del mantenimiento preventivo. Tiene el objetivo de detectar síntomas antes que

ocurran las fallas, detecta fallas prematuras antes de la pérdida del servicio de la máquina, para garantizar la funcionalidad de la maquinaria o equipos.

Por la necesidad de optimizar y reducir costos, surge el mantenimiento predictivo, Saldivia (2013) hace mención que el alto costo en los métodos tradicionales de mantenimiento preventivo y correctivo y la necesidad de monitorear el estado de los equipos, hizo que se desarrollarán las nuevas técnicas predictivas. La reducción de costos en el mantenimiento predictivo como estrategia, es a largo plazo, debido a que requiere de equipo de alto costo y personal altamente capacitado y calificado, por lo que el costo inicial se eleva considerablemente.

Clasificación de técnicas de mantenimiento predictivo:

- Análisis de vibraciones
- Termografía infrarroja
- Análisis de aceite
- Ultrasonido industrial

7.2. Gestión de mantenimiento

Márquez y Crespo (2016) mencionan que la gestión de mantenimiento va orientada a la utilización eficiente de los medios y recursos, y es parte fundamental en la Dirección moderna de operaciones de las industrias. El principal objetivo de una gestión de mantenimiento es conservar y/o restituir el funcionamiento de los equipos para los cuales fueron diseñados, en un período de tiempo determinado a un costo óptimo.

La optimización de recursos, es el objetivo de la gestión de mantenimiento. Para cumplir el objetivo, se necesita realizar un estudio de los

equipos, maquinaria o instalaciones, detectar los modos de falla, los efectos y la consecuencia de estas fallas, y con este análisis, se podrá decidir qué técnica de mantenimiento aplicar. Será necesario un análisis costo-beneficio para la toma de decisiones, pero en algunos casos la seguridad industrial o consecuencia de las fallas puede ser el factor determinante.

Garrido (2003, Pág. 4) se hace la pregunta, ¿Porque se debe de gestionar el mantenimiento?, hay varias formas de gestionar el mantenimiento y depende de las condiciones y características de los activos en las distintas industrias, pero las razones específicas se enumeran a continuación:

- Minimizar costos. Debido a la competencia, las empresas buscan mejorar su rentabilidad, optimizando el consumo de materiales y haciendo buen uso de la mano de obra. Es necesario realizar un análisis de criticidad de equipos, para el enfoque del mantenimiento y mejorar el inventario de repuestos en bodega.
- Por la aparición de una diversidad de técnicas de mantenimiento. Debido a la evolución de mantenimiento ha surgido nuevas técnicas, como TPM (mantenimiento productivo total), RCM (mantenimiento centrado en confiabilidad), GMAO (gestión de mantenimiento asistido por ordenador) y varias técnicas predictivas que es necesario estudiarlas para determinar cuál es la que mejor se adapta a cada planta industrial.
- Por la necesidad de directrices. Son los lineamientos acordes a los objetivos planteados por la dirección de mantenimiento y que marcan el rumbo a seguir.

- Por la calidad. El departamento de mantenimiento debe enfocar su gestión hacia los requerimientos de los clientes, estos requerimientos, están plasmados en estándares de calidad ya sea nacionales o internacionales.
- Por el medio ambiente. Uno de los aspectos que está tomando gran importancia a nivel mundial, y por lo tanto, desde el departamento de mantenimiento se debe garantizar la operación amigable con el medio ambiente y minimizar al máximo la emisión de contaminantes de todo tipo al medio ambiente.
- Por la seguridad industrial entre otros. Las máquinas, equipos o instalaciones, deben de proporcionar condiciones seguras para el personal operativo.

7.3. Procesos de soldadura

En su tesis, Camacho (2008), describe al proceso de soldadura, como la unión de los materiales logrado por la coalescencia por medio de la aplicación de calor o presión, logrando la fundición de las superficies de los materiales en contacto. A esta fundición de los materiales se les conoce como junta soldada, y puede utilizarse un material de aporte para facilitar la unión.

La importancia de los procesos de soldaduras en la industria, radica en que es un método de mucha fiabilidad para ensamblaje de piezas, componentes, herramientas y equipos industriales. Una alta calidad en las soldaduras es lo que se busca, debido a que las juntas soldadas se encuentran en áreas de trabajo de las personas y en muchas ocasiones contienen sustancias peligrosas que pueden poner en riesgo la salud de las personas.

Existe una diversidad de técnicas y procesos de soldadura para distintas aplicaciones y requerimientos. Para seleccionar un proceso de soldadura, se debe realizar una evaluación de características de los materiales, características de áreas de trabajo y condiciones de operación, la clasificación es la siguiente:

- Soldadura por arco eléctrico
- Soldadura fuerte (brazing)
- Soldadura de estado sólido
- Soldadura por resistencia
- Procesos de corte
- Otras soldaduras

Para la aplicación de soldaduras en tuberías de hierro al carbón, los procesos comúnmente utilizados son las soldaduras por arco eléctrico, que es el enfoque del presente estudio.

7.3.1. Proceso de soldadura por arco eléctrico

Es el proceso por el cual se logra la unión de metales, por la aplicación controlada de calor, con o sin la utilización de material de aporte y presión. El calor es generado por una corriente eléctrica causada por una diferencia de potencial eléctrica, entre ellos.

Clasificación:

- Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW)
- Soldadura por arco eléctrico y protección gaseosa (GMAW)
- Soldadura por arco con fundente en el núcleo (FCAW)

- Soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y protección gaseosa (GTAW) o conocida como TIG
- Soldadura por arco sumergido (SAW)

Ospina, Trujillo y Parra (2011) hacen las recomendaciones para la elección del proceso de soldadura, que deberá ser el más idóneo para los fines perseguidos, considerando las condiciones de operación, características del material y características del área. Una buena elección se traduce en una unión que reúne las condiciones exigidas por los códigos, las normas y las especificaciones correspondientes.

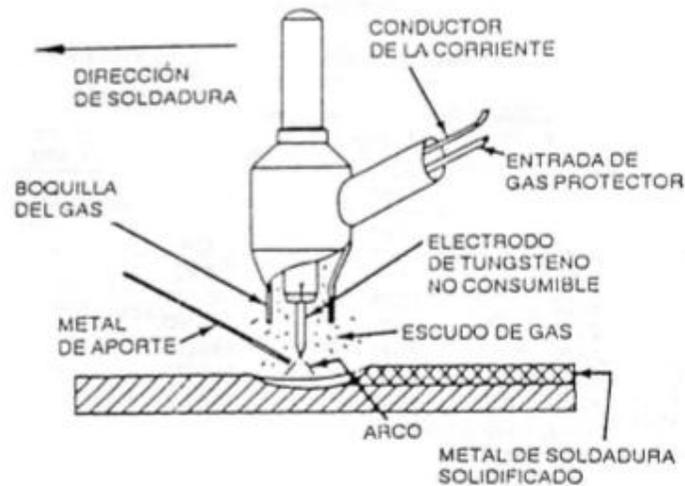
7.3.1.1. Proceso de soldadura por arco eléctrico y protección con gas inerte GTAW

Este proceso utiliza un electrodo no consumible de tungsteno para provocar el arco eléctrico y un gas inerte para proteger la soldadura. Se puede aplicar prácticamente en la soldadura de cualquier metal, se recomienda aplicarlo en lugares en donde no haya corrientes de aire.

Se puede aplicar en una amplia variedad de espesores, y en diferentes posiciones, con este proceso se pueden obtener soldaduras muy limpias de escoria. Es ampliamente utilizado, desde submarinos nucleares, naves espaciales, hasta equipos de minería y aviones, es un proceso muy versátil.

El tungsteno es utilizado en este proceso debido a su alta temperatura de fusión y sus buenas características eléctricas. El gas argón es el que se utiliza comúnmente para la protección del arco, pero en otros casos se puede utilizar helio que tiene costo mayor. En la figura 2, se muestra un esquema de soldadura GTAW.

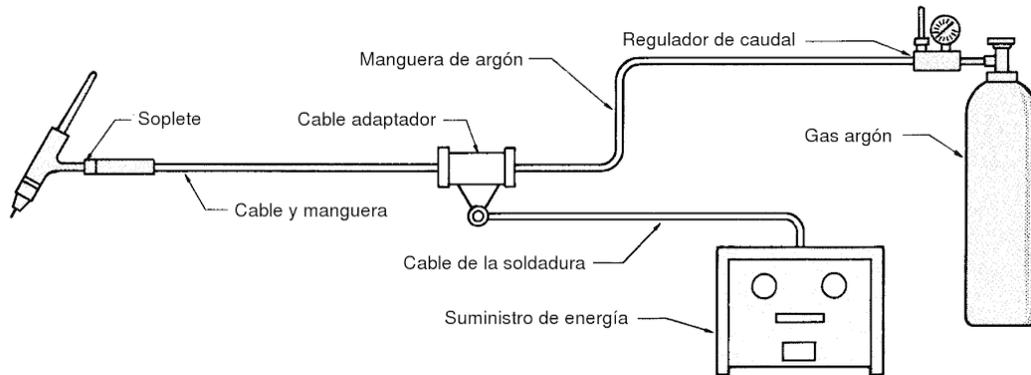
Figura 2. **Soldadura GTAW**



Fuente. Santos (2009, P.25)

Con este proceso de soldadura se consiguen soldaduras de calidad alta, no se generan salpicaduras, se tiene muy buena penetración en pases de raíz. El proceso de soldadura GTAW no es muy práctico para soldaduras de espesores mayores a 10 mm y presenta complicaciones en áreas externas, debido a las corrientes de aire que desplazan la protección del gas inerte y se pone en peligro la sanidad de la soldadura, debido al oxígeno, esto se puede mitigar con la utilización de mamparas. En la figura 3, se muestra los componentes de un equipo de soldadura GTAW

Figura 3. **Esquema de equipo de soldadura GTAW**



Fuente: Jeffus, L. (2010 P. 34)

7.4. **Discontinuidades presentes en soldaduras**

En las uniones soldadas, generalmente se encuentran presentes, imperfecciones que varías de acuerdo a su naturaleza, en tamaño, distribución, localización y distribución, estas imperfecciones pueden representar un peligro a la integridad y seguridad del equipo o estructura que lo contiene.

Camacho (2008), describe a una discontinuidad como la falta de homogeneidad de características mecánicas, físicas y metalúrgicas o la interrupción en la estructura típica del material. Las discontinuidades que no cumplan con especificaciones técnicas, normas o códigos, se conocen como defectos. pág. 97.

Las discontinuidades se pueden caracterizar con los instrumentos adecuados, pero existen distintas normas internacionales que establecen criterios de aceptación y rechazo de las diferentes discontinuidades, que el inspector de soldadura tenga un respaldo en los informes que realiza de las

inspecciones con END. Las normas establecen tipo, tamaño, cantidad y distribución tolerados.

Las discontinuidades presentes en la soldadura, se clasifican como discontinuidades de proceso y se clasifican en:

- En el paso de raíz
- En el paso final
- Internas
- Porosidad
- Grietas

7.4.1. Discontinuidades en el paso de raíz

- Falta de penetración. Esta discontinuidad ocurre por baja temperatura, no logrando la fusión de los materiales y se presenta comúnmente en los extremos de la cara de raíz, porque el material de soldadura no logra extenderse en todo el espesor del material base. Este tipo de discontinuidades afectan especialmente a las soldaduras aplicadas a tuberías, debido a la falta de accesibilidad en el interior del tubo.
- Falta de penetración por desalineación. La falta de alineamiento entre las caras de raíz, provoca la falta de fundición del material de soldadura en las caras de raíz. Este defecto es indeseable especialmente cuando la pieza soldada va estar sometido a esfuerzos, debido a que existe una concentración de tensiones y podrían provocar una falla sin alguna deformación apreciable.

- Concavidad en la raíz. Durante el proceso de solidificación se forman depresiones o rechupes, que puede formar una cavidad por la contracción del material de soldadura. Es un defecto perpendicular a la superficie que puede generar concentración de tensiones.
- Quemada. Ocurre cuando existe desprendimiento de material generado por una penetración excesiva, provocando una depresión grave en la raíz. Generalmente no alargada.
- Socavado. Es una erosión, muesca o hendidura en el metal base junto a la raíz, ocasionadas por técnicas inadecuadas o corrientes excesivas que provocan una disminución de espesor del material a soldar y una concentración de tensiones que puede provocar fallas.
- Desalineación. Cuando existe un desfase en la alineación de los elementos soldados.
- Penetración excesiva. Es cuando en la raíz existe exceso de material de aporte.

7.4.2. Discontinuidades en el paso final

- Llenado incompleto. Es una disminución en el espesor debido a que el cordón de soldadura queda por debajo del material base. Se presenta por la falta de material de aporte, generalmente es ocasionado por malas técnicas del soldador.
- Falta de fusión en el paso final. Es cuando en el paso final no existe unión de las caras de los metales base con el de aporte.

- Socavado externo. Una ranura o hendidura en el metal base a lo largo del borde del paso final, ocasionado por alto amperaje en el proceso o baja velocidad en la aplicación de soldadura.
- Refuerzo inadecuado. Es una disminución en el espesor de la soldadura con respecto al metal base, ocasionado por una depresión o rechupe en el paso final.
- Refuerzo excesivo. Exceso o sobre espesor de material de aporte.

7.4.3. Discontinuidades internas

- Inclusiones alargadas (Líneas). Materiales sólidos no metálicos, que quedan atrapados en la fundición, cuya orientación es paralela al eje del cordón de soldadura. Se presentan en líneas intermitentes o continuas, paralelas o sencillas.
- Inclusiones aisladas (Inclusiones). Material no metálico, atrapado en el cordón de soldadura. Tienen forma irregular ligeramente alargadas, aisladas o agrupadas y con distribución al azar.
- Falta de fusión o fusión incompleta. Es una condición cuando no existe unión entre el metal de base y el material de aporte. Se puede presentar por bajo amperaje en el arco eléctrico, altas velocidades en la aplicación de soldadura o impurezas en la superficie del material base.
- Inclusiones de tungsteno. Se da específicamente en cordones de soldadura realizados con el proceso GTAW, se produce cuando el

electrodo de tungsteno logra su temperatura de fusión y se deposita entre el cordón de soldadura.

- Porosidades. Son cavidades redondeadas o ligeramente alargadas y se producen por el atrapamiento de gas durante la solidificación del metal de soldadura. Se clasifican en: individual, aislada o al azar, agrupada, túnel de gusano, en el cordón de raíz.

7.4.4. Discontinuidades por grietas

- Son fracturas o roturas del metal, se pueden producir en las caras del metal base o en el material de aporte, caracterizados por tener alta relación de la longitud con respecto al grosor y tienen puntas agudas. Se producen cuando los esfuerzos localizados sobrepasan la resistencia última del material. Se producen regularmente por cambios drásticos en el proceso de enfriamiento. Existen dos factores principales que favorecen la aparición de esta discontinuidad una es la aparición de altos esfuerzos residuales y la fragilización debida al hidrógeno. Se clasifican en: Longitudinales, transversales, cráter o estrella

7.5. Ensayos no destructivos

Gonzalo (2009), describe a los ensayos no destructivos conocidos como END, a todo tipo de inspección o prueba que se practica en un material y que no cause alteraciones permanentes a sus propiedades químicas, físicas, mecánicas.

Los END son técnicas fundamentales y necesarias que han tomado gran importancia en las industrias para la inspección y control de calidad de

materiales utilizados en ingeniería, confiabilidad de activos físicos en operación y el mantenimiento de sistemas en el que una falla prematura, podría tener efectos desastrosos y de alto costo.

Las distintas técnicas de END que existen, se basan en principios y fundamentos físicos como electromagnetismo, ondas acústicas, ondas elásticas, emisión de partículas subatómicas, principios de capilaridad, absorción y pruebas en el que no exista daño considerable a la pieza examinada.

La aplicación de END desempeñan un papel muy importante al reducir al mínimo las posibilidades de fallas, generando información del estado de los materiales que se inspecciona, para realizar acciones correctivas y eliminar inconformidades que puedan generar fallas a corto, mediano y largo plazo.

La inspección visual como técnica de END es la más antigua, que con el tiempo se ha desarrollado, utilizando distintas herramientas como respaldo en las inspecciones, y ha marcado la pauta para el desarrollo de líquidos penetrantes.

Clasificación de END:

- Ensayos no destructivos superficiales
- Ensayos no destructivos volumétricos
- Ensayos no destructivos de hermeticidad

7.5.1. Ensayos no destructivos superficiales

Son técnicas utilizadas para obtener información acerca del estado y la integridad superficial de los materiales. La aplicación de esta técnica es conveniente cuando se desea inspeccionar materiales para detectar discontinuidades superficiales o en profundidades no mayores a 3 milímetros.

La clasificación se describe en tabla I:

Tabla I. **Clasificación de ensayos no destructivos superficiales**

Técnicas END superficiales	Siglas en ingles
Inspección visual	VT
Líquidos penetrantes	PT
Partículas magnéticas	MT
Electromagnetismo	ET

Fuente: elaboración propia.

7.5.2. Ensayos no destructivos volumétricos

Por medio de esta técnica se obtiene información sobre la integridad de los materiales en su espesor, y poder detectar discontinuidades o fallas internas y sub superficiales que no son visibles al ojo humano.

La clasificación se describe en tabla II:

Tabla II. **Clasificación de ensayos no destructivos volumétricos**

Técnicas END volumétricas	Siglas en ingles
Ultrasonido industrial	UT
Radiografía industrial	RT
Radiografía neutrónica	NT
Emisión acústica	AET

Fuente: elaboración propia.

7.5.3. Ensayos no destructivos de hermeticidad

Son ensayos realizados para la inspección de recipientes a presión, con el objetivo de determinar el grado en que pueden contenerse los fluidos en los recipientes, sin que exista escape de fluidos al ambiente y queden fuera de control. Los END de hermeticidad son:

- Pruebas de fuga
- Pruebas de cambio de presión(neumática o hidrostática)
- Pruebas de burbuja
- Pruebas por espectrómetro de masas
- Pruebas de fugas con rastreadores de halógeno

7.5.4. Certificación de inspectores de ensayos no destructivos

Es necesario garantizar que el personal que realice la inspección por ensayos no destructivos esté debidamente calificado, para ello se requiere una calificación nivel 1 o nivel 2 de la sociedad americana de ensayos no

destruictivos (ASTN) o la equivalencia de la Organización Internacional de Normalización (ISO). Existen requerimientos específicos para la aplicación de cada técnica de END, y están basados en la experiencia y aprobación de acuerdo al nivel de certificación definidos por normas ISO 9712 y ASNT SNT-TC-1^a.

7.5.5. Norma ASME B 31.3

Es un código o estándar internacional creada por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos y está recomendada para compañías encargadas de la fabricación, uso, mantenimiento y operación de sistemas de tuberías o recipientes a presión. Es una herramienta esencial para ingenieros, técnicos, personal de diseño, montaje, inspección, ensayos, control de calidad y todo profesional que de alguna manera esté involucrado y que necesite los lineamientos para obtener sistemas fiables.

La norma “establece los requisitos para el uso de materiales y componentes, para el diseño, la fabricación, el ensamblaje, la instalación, la inspección y pruebas de tubería para procesar todo tipo de fluido incluyendo productos químicos puros, productos derivados del petróleo, del gas, vapor, aire, agua refrigerantes y fluidos criogénicos”. (ASME *Code for pressure piping*, B31, ASME B31.3-2002)

7.5.6. Norma ISO 9712

Esta Norma Internacional, da las especificaciones y requisitos al personal que realiza ensayos no destructivos (END), para su certificación y calificación.

El sistema especificado en esta Norma Internacional también puede aplicarse a otros métodos *END* o nuevas técnicas dentro de un método *END* establecido, siempre que exista un esquema integral de certificación y el método o técnica esté cubierto por normas internacionales, regionales o nacionales o el nuevo método *END* o la técnica ha demostrado ser eficaz a satisfacción del organismo de certificación.

La certificación cubre el dominio de los siguientes métodos:

1. Prueba de emisión acústica;
2. Prueba de corrientes parásitas;
3. Prueba termografía infrarroja;
4. Prueba de fugas (pruebas de presión hidráulica excluidas);
5. Prueba magnética;
6. Pruebas de penetración;
7. Pruebas radiográficas;
8. Prueba del medidor de tensión;
9. Prueba ultrasónica;
10. Pruebas visuales

7.6. *END* aplicados a inspección de soldaduras

- Inspección visual
- Líquidos penetrantes
- Partículas magnéticas
- Radiografía
- Ultrasonido

7.6.1. Inspección visual

La técnica no destructiva de inspección visual proporciona un medio de detección y la evaluación de una diversidad de defectos superficiales, tales como la corrosión, acabado de la superficie, contaminación y discontinuidades superficiales.

La técnica de inspección visual es la más utilizada para detectar fisuras o discontinuidades superficiales. Aun utilizando otras técnicas de END, la técnica visual, proporciona información complementaria útil. Las técnicas de inspección visual incluyen una diversidad de equipos, valiéndose de herramientas tecnológicas como microscopios, boroscopios y herramientas de medición para la caracterización de los defectos.

La técnica de inspección visual fue la primera técnica de END utilizada en la industria, pero la última en ser reconocido formalmente. Tanto el Instituto Americano de Normalización (ANSI), como la sociedad americana de ingenieros mecánicos (ASME) realizaron esfuerzos para reconocer la técnica de END por inspección visual. En el código ASME de calderos y recipientes sometidos a presión, en la sección 5 clasifica la inspección visual como directa y remota o indirecta.

Técnicas de inspección visual:

- Inspección visual directa sin ayuda. Puede realizarse usualmente cuando el acceso es permite la colocación de la vista dentro de 24" (610 mm) de la superficie que se va a evaluar y a un ángulo como mínimo de 30 grados. Pueden ser usados espejos para mejorar el ángulo de visión.

- Inspección visual directa con ayuda. En esta técnica se pueden utilizar herramientas auxiliares que mejoren la visibilidad tales como: Telescopios, espejos, boroscopios, fibra óptica, cámaras u otras herramientas adecuadas.

Figura 4. **Equipo básico para inspección visual**



Fuente: Santos (2012, P. 61).

Aplicaciones de *END* de inspección visual

- Superficies externas
- Componentes de máquinas
- Todos los materiales
- Superficies internas de elementos

Ventajas:

- Se puede inspeccionar casi todos los elementos existentes ya sea directa o indirectamente
- Bajo costo.
- Equipos relativamente simples
- Entrenamiento relativamente mínimo

Limitaciones:

- Solo para evaluaciones superficiales
- Necesita una fuente de iluminación efectiva
- Se requiere acceso a la superficie para la inspección

7.6.2. Líquidos penetrantes

La prueba por líquidos penetrantes (PT), según Santos (2012), es uno de los métodos *END* más utilizados en la detección de defectos o discontinuidades superficiales en materiales sólidos no porosos.

El método más utilizado juntamente con la inspección visual, son los líquidos penetrantes. Su diversidad de aplicaciones en materiales magnéticos y no magnéticos, el ensayo de líquidos penetrantes proporciona a la industria una amplia gama de sensibilidades y técnicas que lo hacen adaptable a una diversidad de formas y tamaños.

Tiene mucha utilidad en los exámenes que se realizan en el campo, debido a lo portátil son, también apropiado en procesos de fabricación en serie,

en donde se requiere la inspección de una cantidad considerable de pequeñas piezas, debido a tiempo relativamente corto que necesita la inspección.

Figura 5. **Kit básico de líquidos penetrantes**



Fuente: <http://prueba-de-tintas-magnaflux.blogspot.com/p/magnaflux.html>

Aplicaciones:

El END de líquidos penetrantes, es ampliamente usado en la industria en sus especificaciones siguientes,

- Inspección de producto terminado
- Inspección de materia prima
- Inspecciones en proceso
- Mantenimiento de equipo y maquinaria

La clasificación de las técnicas de líquidos penetrantes se muestra en la tabla III:

Tabla III. **Técnicas de líquidos penetrantes**

Tipo I Fluorescente	
Método A	Lavable con agua (ASTM E-1200)
“ B	Postemulsificable lipofílico (ASTM E-1208)
“ C	Removible con solvente (ASTM E-1219)
“ D	Postemulsificable hidrofílico (ASTM E-1210)
TIPO II Coloreados	
Método A	Lavables con agua (ASTM E-1418)
“ C	Removibles con solvente (ASTM E-1220)

Fuente. Norma ASTM: E 165-94.

Removedores: los tipos de removedores se clasifican en tres.

- Agua
- Emulsionantes
 - De base oleosa
 - De base acuosa
- Disolventes

Reveladores: los tipos de reveladores pueden ser:

- Polvos secos.
- Soluciones y dispersiones acuosas:
 - Dispersión de polvo en agua
 - Solución de polvo en agua
- Suspensión de polvo en disolventes volátiles no acuoso.
 - No inflamable
 - Inflamable

7.6.2.1. Descripción general del método

La aplicación de la técnica la técnica de LP, se puede resumir en las etapas siguientes:

- Limpieza y secado inicial: consiste en eliminar los materiales extraños y suciedad de las superficie, logrando que las discontinuidades que se puedan presentar, queden expuestas y luego se procede a secar la superficie
- Aplicación de líquido penetrante y tiempo de penetración: Consiste en cubrir la superficie de interés con líquido penetrante, y esperar un tiempo prudencial para que el líquido penetrante pueda introducirse por acción capilar en las discontinuidades.

- Limpieza intermedia: Consiste en remover el exceso del líquido penetrante de la superficie, con el debido cuidado de no extraer el líquido que se encuentra en las aberturas de las discontinuidades. La remoción se puede realizar con las siguientes técnicas
 - Lavado con agua
 - Aplicación de emulsificante y posterior lavado con agua
 - Aplicación de solventes

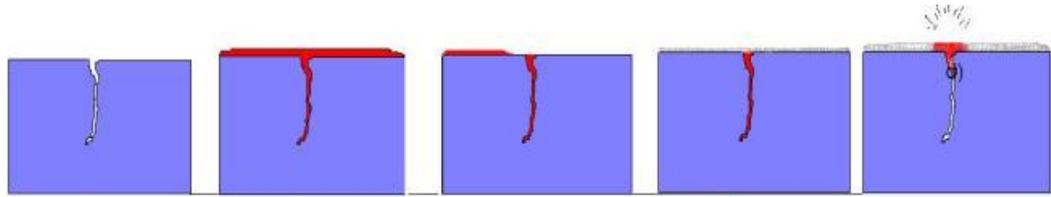
- Secado: es la eliminación del agente limpiador

- Aplicación de revelador: Una vez la superficie esté seca, se aplicará el revelador y cuando éste se evapore, deja una capa fina de polvo que absorberá el líquido penetrante.

- Inspección y evaluación: el polvo del revelador, hace que el LP contenido en las cavidades de las discontinuidades, puedan absorberse y salir a la superficie para hacerlos visibles, ya sea por contraste o por fluorescencia. Las indicaciones se pueden caracterizar con instrumentos de medida para la posterior evaluación y documentación.

- Limpieza final. Normalmente el kit de líquidos penetrantes no es corrosivo, pero se debe realizar una limpieza de la superficie, para evitar cualquier ataque al material.

Figura 6. **Proceso de aplicación de líquidos penetrantes**



Fuente. Gonzalo (2009, P. 8).

Ventajas

- Relativamente simples de aplicar.
- Aplicable a materiales metálicos y no metálicos.
- Equipos de bajo costo.

Limitaciones

- Solo detecta discontinuidades superficiales.
- No aplica a materiales porosos.
- Difícil en superficies muy rugosas

Normas de referencia

Existen normas y códigos que rigen el procedimiento en la aplicación de ensayos, la cual se menciona a continuación:

- Código ASME sección V, Artículos 6 y 24
- ANSI/ ASTM E-165 practicas recomendadas para el examen por líquidos penetrantes.

- ASNT SNT-TC-1A Recommended practice for personal qualification and certification in nondestructive testing.

7.6.3. Ultrasonido industrial

Camacho (2008) enmarca que las inspecciones no destructivas por ultrasonido, son los más utilizados cuando se requiere información de la localización, tamaño y forma de las discontinuidades, es uno de los ensayos más versátiles. Se basa en la propagación una onda acústica de alta frecuencia, que viaja a través del material inspeccionado, hasta que se refleja y regresa a un receptor. Con el recorrido de la onda ultrasónica se puede generar información, a través de la energía que es reflejada y la distancia recorrida en la pieza.

Santos, (2012, p. 78), menciona que los primeros experimentos se realizaron en 1924 por el Dr. Sokolov y se basaron en la medición de la pérdida de intensidad de energía acústica al viajar en un material, en esa época se utilizaba la técnica utilizando un emisor y un receptor de onda ultrasónica. Los primeros experimentos los realizaron en metales de hierro fundido y acero.

Se puede obtener información de la distancia y ubicación del defecto por medio del tiempo que transcurre entre la emisión de una señal y la recepción de su eco, debido a que la velocidad de propagación de la señal de ultrasonido es conocido. Tiene ventajas adicionales al obtener información o estimar el tamaño de las discontinuidades presentes en los materiales que se ensaya, lo que permite dar seguimiento al estado del defecto.

La técnica de ultrasonido industrial (UT), también se utiliza para identificar fugas localizadas en distintos procesos como sistemas de aire comprimido,

sistemas de vapor o sistemas de gas entre otros, se basa en la detección de los componentes ultrasónicos que se presentan en flujos altamente turbulentos generadas en las fugas, con esta técnica se detectan fugas en válvulas de cierre o de seguridad, trampas de vapor, entre otros. En la figura número 7, se presenta el equipo de ultrasonido industrial.

Figura 7. **Equipo de ultrasonido industrial**



Fuente, León y Russo ingenieros S.A.C.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTADO DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Mantenimiento

1.1.1. Mantenimiento correctivo

1.1.2. Mantenimiento preventivo

1.1.3. Mantenimiento predictivo

1.2. Gestión de mantenimiento

1.3. Procesos de soldadura

1.3.1. Proceso de soldadura por arco eléctrico

1.3.1.1. Proceso de soldadura por arco eléctrico y protección gaseosa GTAW

1.4. Discontinuidades presentes en soldaduras

7.4.1. Discontinuidades en el paso de raíz

7.4.2. Discontinuidades en el paso final

7.4.3. Discontinuidades internas

7.4.4. Discontinuidades por grietas

- 1.5. Ensayos no destructivos
 - 7.5.1. Ensayos no destructivos superficiales
 - 7.5.2. Ensayos no destructivos volumétricos
 - 1.5.3. Ensayos no destructivos de hermeticidad
 - 1.5.4. Certificación de inspectores de ensayos no destructivos
 - 1.5.5. Norma ISO 9712
- 1.6. END aplicados a inspección de soldaduras
 - 1.6.1. Inspección visual
 - 1.6.2. Líquidos penetrantes
 - 7.6.2.1. Descripción general del método
 - 1.6.3. Ultrasonido industrial
- 2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
 - 2.1 Identificación de fallas y discontinuidades en soldaduras
 - 2.2 Caracterización de materiales
 - 2.3 Selección y aplicación de ensayos no destructivos
 - 2.4 Registro y documentación de procedimientos actuales
- 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS
 - 3.1 Presentación de resultados
 - 3.2 Plan de acción
- 4. PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO
 - 4.1 Procedimiento para aplicación de soldaduras
 - 4.2 Procedimiento para aplicación de END
 - 4.3 Programa de mantenimiento preventivo

CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES
BIBLIOGRAFÍA
APÉNDICE

9. MARCO METODOLÓGICO

9.1. Diseño

La presente investigación está catalogada como no experimental que tiene como objetivo indagar sobre los métodos y técnicas de gestión de mantenimiento y ensayos no destructivos para la implementación de un modelo de mantenimiento en el sistema de tuberías de un equipo de refrigeración que utiliza amoníaco, analizando variables cualitativas y cuantitativas.

9.2. Tipo de investigación

El tipo de investigación es descriptiva e inductiva, debido a que se realizará un análisis de los fundamentos de mantenimiento y ensayos no destructivos existentes y la observación de las técnicas empleadas en la planta avícola. Se supervisarán los procedimientos empleados en la aplicación de soldaduras y aplicación de los END, se procederá a analizar y registrar los procedimientos para obtener conclusiones y determinar las posibles causas de fallas en el sistema. Se realizará un diseño de mantenimiento que pueda ser aplicado a otros sistemas con características similares.

9.3. Alcance

El alcance de la investigación, está delimitado al conjunto de tuberías, de succión y líquido del sistema de refrigeración del túnel de congelado 1, desde la caracterización de materiales de acuerdo a normas de fabricación, procedimientos y procesos de soldaduras, aplicación de ensayos no

destructivos y la creación de un procedimiento para la inspección que garantice la confiabilidad del sistema.

9.4. Variables e indicadores

En la investigación se realizará el estudio de las variables cualitativas de;

- Tipos de ensayos recomendados para cada aplicación.
- Tipos de discontinuidades que se pueden encontrar.

Las variables cuantitativas a estudiar son las siguientes;

- Porcentaje de aceptación y rechazo de los ensayos no destructivos.

9.5. Fases de investigación

La investigación se realizará de acuerdo a una secuencia estructurada de fases, desde la recopilación de datos, análisis de información, creación de procedimientos y análisis de resultados, entre otros.

9.5.1. Primera fase

Consiste en la recopilación de información de campo, que busca definir las condiciones de operación del sistema de tuberías, identificación de fallas que se pueden presentar en uniones soldadas y superficies generales, existentes en otros sistemas similares. Se realizará un registro y caracterización de todos los materiales relacionados al sistema de tuberías.

9.5.2. Segunda fase

Análisis de Información, tipos de mantenimiento, fichas técnicas y normas de fabricación de tuberías, materiales de aporte, procesos de soldaduras, técnicas de ensayos no destructivos, normas internacionales de soldadura y de ensayos no destructivos.

9.5.3. Tercera fase

Se realizarán las revisiones documentales y antecedentes de las distintas tecnologías en ensayos no destructivos y su aplicación en juntas soldadas de sistemas de tuberías, y sistemas a presión de acuerdo a normas.

9.5.4. Cuarta fase

Trabajo de campo, consistirá en la observación y documentación de preparación de superficies, aplicación de soldaduras a juntas de tuberías y aplicación de ensayos no destructivos por parte de personal de servicios contratados utilizando normas de referencia.

9.5.5. Quinta fase

Análisis de los resultados obtenidos de los ensayos no destructivos, y caracterización de discontinuidades encontradas, aplicación de criterios de aceptación y rechazo de los resultados.

9.5.6. Sexta fase

Se realizará el plan de acción a juntas rechazadas, inspección de ensayos no destructivos en las reparaciones, y se realizará el registro de las fallas y posibles causas basadas en criterios de aceptación y rechazo y estándares internacionales.

9.5.7. Séptima fase

Diseño de un modelo de mantenimiento que incluya ensayos no destructivos para inspección de tuberías. Se analizarán los procedimientos realizados desde la preparación de superficies de las juntas, procedimientos utilizados en la aplicación de soldadura, procesos de selección de ensayos no destructivos, y criterios de aceptación y rechazo.

9.6. Plan de muestreo

El plan de muestreo va enfocado a las inspecciones de ensayos no destructivos en las juntas soldadas en línea de succión, línea de líquido y niples de acuerdo a la tabla que se presenta.

Tabla IV. **Plan de muestreo**

Descripción	Diámetro de tubería	Número de juntas a evaluar
Línea de succión	6"	15
Línea de líquido	2"	15
Niples	1/2"	4

Fuente: elaboración propia.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Se utilizarán distintas técnicas para el análisis de información obtenida por medio de la metodología de la investigación, analizando información documental, información de campo, información obtenida a través de experiencia del personal técnico de planta, personal de aplicación de soldaduras y personal de ensayos no destructivos.

10.1. Estadística descriptiva

Se aplicará estadística descriptiva para la caracterización de END, caracterización de procesos de soldadura y discontinuidades que pueden encontrarse en las juntas soldadas y los resultados que se obtienen.

10.2. Gráficos

Se utilizarán gráficos de barras para la evaluación estadística descriptiva que permita la obtención del valor porcentual de inspecciones rechazadas y aceptadas y tipos de discontinuidades de acuerdo a cada ensayo no destructivo aplicado.

10.3. Esquema de contenido

Se utilizarán esquemas de contenido para la facilidad de interpretación de la información de los distintos métodos utilizados, sus ventajas, desventajas, y otras características que se pueden resumir en tablas de contenido.

10.4. Mapas conceptuales

Se utilizarán mapas conceptuales para visualizar las ideas y conceptos de los procesos que se desarrollarán durante la investigación, procesos como la aplicación de soldadura, procesos de aplicación de ensayos no destructivos entre otros. Se definirá la jerarquía de cada una de las etapas en cada proceso y la relación, entre ellos.

11. RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

11.1. Recursos materiales

Para la investigación se utilizarán equipo de computación, instrumentos de medición, accesorios para inspecciones, herramientas de trabajo, equipos de soldadura, tuberías de acero al carbono, materiales de aporte, equipo de END, material aislante, pinturas anticorrosivas y las instalaciones de la planta avícola.

11.2. Recursos humanos

Los recursos humanos utilizados para la investigación, consiste en asesor de tesis, personal de ingeniería para la supervisión del proyecto, personal técnico de planta para ejecución de actividades de mantenimiento, personal tercerizado para la aplicación de soldaduras y personal tercerizado y calificado para la aplicación de ensayos no destructivos.

11.3. Recursos financieros

Los recursos financieros utilizados para la elaboración del proyecto de gestión de mantenimiento aplicando ensayos no destructivos a un sistema de tuberías para un equipo de refrigeración por medio de amoníaco, se desglosa en la siguiente tabla

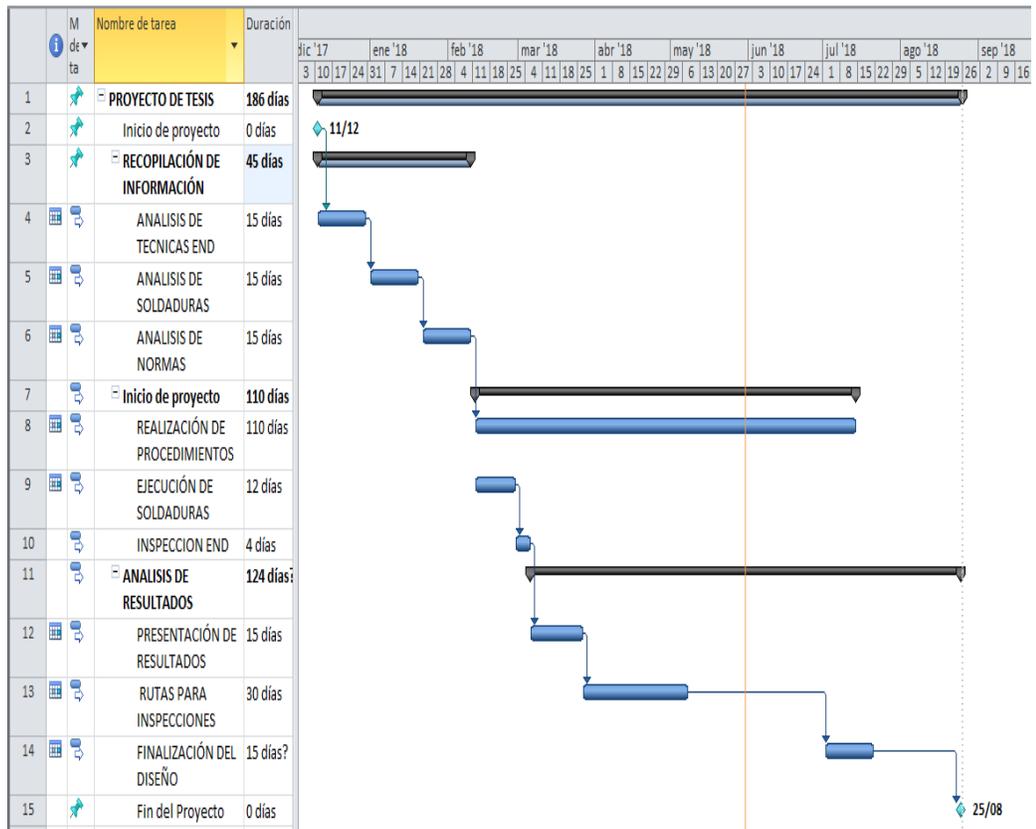
Tabla V. **Recursos necesarios**

Descripción	Subtotal en Q.
Pago del profesional asesor de tesis	Q. 2500.00
Enseres para recopilación de datos, uso de computadora, internet, investigaciones de normas y procedimientos, impresiones	Q. 2500.00
Servicios contratados, suministro de tuberías con normas ASTM A53 de Ø 6" y 2" de diámetro, material de aporte, uso de equipo de soldadura mano de obra de soldadores, armadores y ayudantes	95,000.00
Aplicación de ensayos no destructivos por inspección visual, en el proceso de soldadura	Q. 2,750.00
Aplicación de ensayos no destructivos por líquidos penetrantes	Q.8,400.00
Aplicación de ensayos no destructivos por ultrasonido industrial	Q. 10,500.00
Total	Q. 121,150.00

Fuente: elaboración propia.

12. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Figura 8. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. Matriz de coherencia

MATRIZ DE COHERENCIA					
PROBLEMA	OBJETIVOS	VARIABLES	METODOLOGÍA	INDICADORES	TECNICAS DE INVESTIGACIÓN
Vulnerabilidad a fugas de amoníaco, al no contar con un modelo de gestión de mantenimiento adecuado en la planta, para garantizar una operación segura y controlar la vida útil, en el sistema de tuberías de un equipo de refrigeración que utiliza amoníaco.	identificar las técnicas de mantenimiento, y sus aplicaciones en la industria Diseñar la gestión de mantenimiento para el sistema de tuberías del equipo de refrigeración que utiliza amoníaco, utilizando ensayos no destructivos, para garantizar una operación segura.	Tipos de mantenimiento, Características y condiciones del sistema de tuberías,	Técnicas de recolección de información de campo, revisión y análisis de información documental, plan de muestreo, creación de procedimiento para aplicación de ensayos no destructivos, análisis de resultados	frecuencia y ejecución de mantenimiento preventivo	El diseño de la investigación es no experimental, debido a que está enfocada a indagar sobre tipos de mantenimiento, procesos de soldadura y aplicación de ensayos no destructivos para la implementación de gestión de mantenimiento en el sistema de tuberías de un equipo de refrigeración. El tipo de investigación es descriptiva, por que se presenta temas existentes, e inductiva por que se observan los resultados de los ensayos para tomar criterios de aceptación y rechazo.
No existe la certeza sobre que técnica de ensayo no destructivo es la más adecuada en la inspección de soldaduras en tuberías de hierro al carbón.	investigar sobre ensayos no destructivos utilizados en la inspección de soldaduras seleccionar los ensayos no destructivos aplicables al sistema de tuberías, considerando las características y condiciones de los materiales	tipos de ensayos no destructivos, espesor de tuberías, diámetro, proceso de soldadura empleado en cordones de soldadura, tipos de discontinuidades con base al proceso de soldadura,		tipos de ensayos aplicados, porcentaje de ensayos aceptados y rechazados, costos de mantenimiento, cantidad de fugas encontradas en las pruebas hidrostáticas.	
no existe un procedimiento para selección y aplicación de ensayos no destructivos en el sistema de tuberías de los equipos de refrigeración que utilizan amoníaco	Definir un procedimiento para la aplicación de ensayos no destructivos en la inspección de soldaduras en sistemas de refrigeración por amoníaco.				

Fuente: elaboración propia.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASME Code for pressure piping, B31, ASME B31.3-2010
2. Calderón G., J. Z. (2013) Prueba de ensayo no destructivo en un Tubo de llama de la cámara de combustión de un motor de reacción mediante la norma ISO17025, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz-Bolivia. Tesis de Grado
3. Camacho R., A. E., (2008) Detección de defectos en soldadura para recipientes a presión mediante ensayos no destructivos, Universidad Simón Bolívar, Venezuela. , Tesis de Grado
4. Carbajal O., C. H. (2017) Metodología para inspección visual remota en juntas soldadas de tuberías de acero inoxidable mayores a 4" de diámetro, con espesores hasta 3 mm empleando el videoscopio lenox modelo pvs. Universidad católica del Perú, Tesis de Grado.
5. Flores B., L. G. (Junio de 2009) Medición de espesores por ultrasonido y requisitos necesarios para el personal que lleva a cabo ensayos no destructivos en la central nucleoelectrica Laguna Verde. Instituto Politécnico Nacional, México. Tesis de Licenciatura
6. Gardella, G., (Enero de 2015) Mejora de la Metodología RCM a partir del AMFEC e implantación del mantenimiento preventivo y predictivo en plantas de procesos. Tesis doctoral

7. Garrido G., (2003) Organización y gestión integral del mantenimiento, Ediciones Díaz de Santos S.S. Madrid Gonzalo F. Recalde, (2009) Ensayos no destructivos.
8. Hung, J., (2009) Mantenimiento Centrado en Confiabilidad como estrategia para apoyar los indicadores de disponibilidad y paradas forzadas en planta Oscar A. Machado EDC, la Habana, Cuba.
9. Jeffus, L. (2010) Manual de Soldadura GTAW (TIG). Primera Edición
10. León y Russo ingenieros S.A.C. Curso nivel I y II Ultrasonido
11. Navarro, Díaz, (2004) Técnicas de Mantenimiento Industrial, Escuela Politécnica Superior-Algeciras Universidad de Cádiz.
12. Ospina L., Trujillo, H., Parra L., Hernando (2011) “Aplicación y selección de ensayos no destructivos para evaluación de uniones soldadas”. Universidad Tecnología de Pereira.
13. Parra M., A., Crespo, A., (2016) Desarrollo y aplicación práctica de un Modelo de Gestión del Mantenimiento (MGM) Segunda edición.
14. Sánchez G., Domingo E.,(2012) Caracterización de la Soldadura Aplicada a una junta de Tubería de Acero API X52, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Azcapotzalco México,
15. Santos V., Francisco A., (2012) Desarrollo e implementación de un sistema de control de calidad en soldadura con el uso de ensayos

no destructivos en puentes metálicos utilizando la norma ADW D1.5. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería, Quito, Ecuador

16. Saldivia, F., (Agosto de 2013) Aplicación de Mantenimiento Predictivo; caso de estudio, Análisis de Aceite usado en un motor de combustión Interna.
17. Soria L., E. H., (2004) Laboratorio de Ensayos no Destructivos de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería, USAC. Guatemala. Tesis de Grado
18. Villacrés G., Cristian M., (2009) Implementación de un sistema de inspección para el control de calidad de soldadura en estructura metálica con el uso de ensayos no destructivos para la empresa INENDEC. Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador. Tesis de Grado.
19. Villavicencio P., Gonzalo A., (2015) Estudio de los métodos de ensayos no destructivos bajo la norma API 650 y su incidencia en la evaluación de juntas soldadas en tanques de almacenamiento. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador

