



Uptc[®]

Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia

INSPECCIÓN DE INTEGRIDAD MECÁNICA MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA CALDERA PIROTUBULAR



**MONOGRAFÍA PARA OBTENER EL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN GESTIÓN
DE LA INTEGRIDAD Y CORROSIÓN**

PRESENTA:

ING. JULIÁN ANDRÉS BASTOS CLAROS

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

TUNJA

2022



Escuela de Posgrados
facultad de ingeniería

**INSPECCIÓN DE INTEGRIDAD MECÁNICA MEDIANTE ENSAYOS NO
DESTRUCTIVOS PARA CALDERA PIROTUBULAR**

ING. JULIÁN ANDRÉS BASTOS CLAROS

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

TUNJA

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 22 Septiembre de 2022

La autoridad científica de la Facultad de Ingeniería, reside en ella misma, por lo tanto, no responde por las opiniones expresadas en este trabajo de grado.

DEDICATORIA

A mi esposa que en todo momento me da su apoyo y amor para alcanzar los objetivos trazados en mi vida.

A mis hermosos hijos que me dan todo el amor que un padre puede recibir.

AGRADECIMIENTOS

Un gran agradecimiento a las personas que han contribuido con el objetivo de este trabajo.

A la UPTC, en especial a los docentes del programa de la especialización en gestión de integridad y corrosión.

A los ingenieros de integridad de campo Rubiales por el aporte y apoyo recibido.

Gracias a todos mis colegas y compañeros de la especialización.

¡A todos, gracias!

CONTENIDO

GLOSARIO	13
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	17
OBJETIVOS GENERALES	17
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
CAPITULO I: MARCO TEÓRICO / ESTADO DEL ARTE	18
1. CALDERA DE VAPOR PIROTUBULAR	18
1.1. FUNCIONAMIENTO DE UNA CALDERA DE VAPOR PIROTUBULAR .	19
1.2. PRINCIPALES APLICACIONES DE CALDERA PIROTUBULARES	20
1.3. PARTES DE UNA CALDERA PIROTUBULAR	21
2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	22
2.1. PARA QUE SE USAN LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	22
2.2. TIPOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	23
2.2.1. INSPECCIÓN VISUAL	23
2.2.2. TINTAS PENETRANTES	24
2.2.3. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	25
3. DOCUMENTOS Y NORMAS TÉCNICAS APLICADAS	27
3.1. API (American Petroleum Institute)	27
3.2. ASME (The American Society of Mechanical Engineers)	27
3.3. ASTM (American Society for testing and materials)	27
3.4. ASM (American Society for Metals)	27
3.5. ISO (International Organization for Standardization)	27
4. EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA INSPECCIÓN DE INTEGRIDAD	28

4.1.	INSPECCIÓN VISUAL.....	28
4.2.	INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO.....	28
4.3.	INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	28
4.4.	INSPECCIÓN POR TINTAS PENETRANTES	29
4.5.	LIMPIEZA Y PREPARACIÓN DE SUPERFICIE	29
4.6.	ANÁLISIS METALOGRÁFICO	29
4.7.	PRUEBA DE DUREZA.....	29
5.	CARACTERÍSTICAS DE LA CALDERA A INSPECCIONAR.....	30
5.1.	DATOS DE EQUIPO.....	30
CAPITULO II: MARCO METODOLÓGICO		31
6.	METODOLOGÍA.....	31
6.1.	INSPECCIÓN VISUAL.....	31
6.2.	TINTAS PENETRANTES (PT)	33
6.3.	PARTÍCULAS MAGNÉTICAS (MT).....	34
6.4.	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	36
6.4.1.	TRAMOS DE EVALUACIÓN.....	36
6.4.2.	ACTIVIDADES REALIZADAS	37
6.4.2.1.	Preparación de superficie.....	37
6.4.2.2.	Metalografía.....	38
6.4.2.3.	Ensayo de dureza	39
6.5.	MEDICIÓN DE ESPESORES POR ULTRASONIDO.....	40
6.6.	CÁLCULOS DEL ESPESOR MÍNIMO REQUERIDO PARA EL CUERPO DE LA CALDERA.....	42
7.	CONCLUSIONES.....	44
8.	RECOMENDACIONES.....	45
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	46
10.	ANEXOS	48

Anexo 1. Inspección por Ultrasonido	48
Registros de inspección cuerpo de la caldera	48
Anexo 2. Inspección por Ultrasonido	52
Registros de inspección tubo hogar de la caldera	52
Anexo 3. Inspección por Partículas Magnéticas.....	54
Registros de inspección tubo hogar, cámara trasera y daño mecánico - abolladura cuerpo de la caldera	54
Anexo 4. Inspección por Tintas Penetrantes.....	56
Registros de inspección cuerpo de la caldera.....	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de la caldera a inspeccionar	30
Tabla 2. Análisis Metalográfico realizado en los Puntos #1 y #2.	38
Tabla 3. Datos de dureza Brinell obtenidos.....	39
Tabla 4. Especificación de materiales evaluados.....	39
Tabla 5. Medición de espesores por ultrasonido (in) – Espesores Bajos	41

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema caldera pirotubular	19
Ilustración 2. Diagrama de flujo de funcionamiento de una caldera pirotubular....	20
Ilustración 3. Inspección visual, la técnica más versátil entre los END	24
Ilustración 4. Inspección por tintas penetrantes.	25
Ilustración 5. Inspección por partículas magnéticas.	26
Ilustración 6. Caldera de vapor pirotubular PEI El Alcaraván	30
Ilustración 7. Condición de la superficie externa del cuerpo de la caldera por CUI	31
Ilustración 8. Sector con daño mecánico severo tipo abolladura combinado con CUI en el cuerpo de la caldera.	32
Ilustración 9. Pruebas de PT realizadas a soldaduras del cuerpo de la caldera de vapor.....	33
Ilustración 10. Sector con daño mecánico severo tipo abolladura en el cuerpo de la caldera en donde se realizó MT	34
Ilustración 11. Pruebas de MT fluorescentes en parte inferior extremo del tubo hogar.	35
Ilustración 12. Pruebas de MT fluorescentes en soldadura a filete entre batea y extremo tubo hogar	35
Ilustración 13. Ubicación #1 metalografía In Situ en cuerpo de la caldera	36
Ilustración 14. Ubicación #2 metalografía In Situ en cuerpo de la caldera	37
Ilustración 15. Medición de espesor UT Scan A con palpador tipo lápiz en daño mecánico	40
Ilustración 16. Sector inspeccionado mediante mapeo de corrosión - UT Scan C	41
Ilustración 17. Ubicación sectores inspeccionados por UT en el cuerpo de la caldera de vapor	48
Ilustración 18. Ubicación sectores inspeccionados por UT en el cuerpo de la caldera de vapor	52
Ilustración 19. Ubicación sectores inspeccionados por MT en el Tubo Hogar, cámara Trasera y sector con daño mecánico tipo "abolladura" en el cuerpo de la caldera de vapor	54

Ilustración 20. Ubicación sectores inspeccionados por PT en soldaduras a filete de Niples y soldaduras a tope del cuerpo de la caldera de vapor..... 56

GLOSARIO

API: Siglas en ingles del instituto americano del petróleo.

ASME: Siglas en ingles de la sociedad americana de ingenieros mecánicos.

ASNT: Siglas en ingles de la sociedad americana de ensayos no destructivos.

ASTM: Siglas en ingles de la sociedad americana de pruebas y materiales.

NACE: Siglas en ingles de la asociación nacional de ingenieros de corrosión.

ISO: Siglas en ingles de la organización internacional de normalización.

RBI: siglas en ingles inspección basada en riesgos.

CALDERA: Es un recipiente metálico cerrado que aplicando el calor de algún combustible, produce vapor a una temperatura superior a la del ambiente.

CALDERA PIROTUBULAR: Es una caldera en la que los gases calientes de la combustión pasan a través de los tubos de la caldera y el agua rodea estos tubos para absorber el calor.

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS: Tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas o mecánicas.

METALOGRAFÍA: Ciencia que estudia las características micro estructurales de un metal o aleación relacionándolas con las propiedades físicas, químicas y mecánicas.

INSPECCIÓN: Es un tipo de verificación con el fin de identificar si se cumplen las condiciones requeridas para una tarea determinada.

INTEGRIDAD MECÁNICA: Gestión de activos de procesos críticos para garantizar que estén diseñados, operados e instalados correctamente.

TINTAS PENETRANTES: Es un tipo de ensayo no destructivo que sirve para detectar discontinuidades presentes en la superficie de los materiales.

CORROSIÓN: Deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno.

ULTRASONIDO: Es un tipo de ensayo no destructivo que se basa en la impedancia acústica, se aplica para conocer la densidad del material.

PARTÍCULAS MAGNÉTICAS: Es un tipo de ensayo no destructivo que permite detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos.

FACILIDAD: Locación que contiene equipos o componentes para ser abordado en virtud de este.

ABOLLADURA: Inestabilidad elástica que afecta a elementos estructurales cuando estos se someten a tensiones.

DETERIORO: Proceso que induce cambios perjudiciales en el tiempo y que afectan las condiciones o propiedades mecánicas de los materiales

RESUMEN

La presente inspección de integridad se realiza con el objetivo de determinar la condición general de la caldera pirotubular de tres pasos ubicada en la planta PEI El Alcaraván, en el municipio de Puerto Gaitán – Meta.

Para el desarrollo de este trabajo se realizarán actividades de inspección del cuerpo de la caldera, con alcance en la realización de inspección visual, ensayos no destructivos (medición de espesores por ultrasonido, tintas penetrantes, partículas magnéticas y pruebas de caracterización mediante metalografía In Situ y dureza (NHB) para determinar el tipo y estado del material de la caldera).

INTRODUCCIÓN

Esta monografía está enfocada a la realización de una inspección de integridad por medio de ensayos no destructivos donde se evaluarán las condiciones generales del cuerpo de una caldera pirotubular ubicada en el municipio de Puerto Gaitán, departamento del Meta, con alcance en la realización de inspección visual, medición de espesores por ultrasonido, tintas penetrantes, partículas magnéticas y pruebas de caracterización mediante metalografía in situ y dureza (NHB) para determinar el tipo del material de la caldera.

El desarrollo de esta inspección y su planteamiento se realizarán con una metodología acorde a los resultados encontrados en la caldera, esto con el propósito de determinar la integridad mecánica por medio de los ensayos no destructivos de acuerdo a la metodología de la norma API RP 580.

En la actualidad las calderas de vapor pirotubular es la tecnología más común de suministrar energía de manera eficiente en forma de vapor saturado o agua caliente a alta presión, pero debido a sus operaciones a altas temperaturas pueden presentar fugas ya sean por corrosión, reparaciones inadecuadas, facilidades en mal estado, mala operación por parte de los operadores, entre otras, esto ocasiona que la caldera opere incorrectamente, presentando irregularidad de presión, alto consumo de combustible, baja eficiencia, los humos de la chimenea aumentan, entre otros.

OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERALES

Realizar inspección de integridad mecánica por ensayos no destructivos en las superficies preparadas y pulidas para evaluar y conocer la condición actual de la caldera de vapor pirotubular ubicada en la planta PEI El Alcaraván, en el municipio de Puerto Gaitán – Meta.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar inspección visual del cuerpo de la caldera de vapor.
- Realizar inspección por tintas penetrantes a algunas de las soldaduras de los niples soldados y a algunas de las soldaduras circunferenciales y longitudinales del cuerpo.
- Realizar partículas magnéticas en sectores donde se presenten alteraciones mecánicas.
- Determinar los espesores de metal en los sectores más críticos.
- Determinar la microestructura de los materiales mediante metalografía In Situ.
- Tomar datos de dureza Brinell (HB).

CAPITULO I: MARCO TEÓRICO / ESTADO DEL ARTE

1. CALDERA DE VAPOR PIROTUBULAR

Las calderas pirotubulares son un tipo de caldera muy usado en la industria, donde los vapores de la combustión pasan por el interior de tubos normalmente rodeados por agua. Aquí el agua absorbe el calor de los gases de combustión y se calienta para así mismo obtener vapor que sale por un tubo de descarga; este vapor es utilizado en la planta para algún proceso industrial.¹

En las calderas de vapor pirotubular, los gases de combustión pasan por el interior de los tubos que se encuentran en contacto con el agua, aumentando la temperatura de esta hasta lograr el punto de ebullición y la evaporación del agua, para lograr la obtención del vapor.

Las calderas de vapor pirotubular son un tipo de caldera industrial (ilustración 1), y tienden a ser robustas, resistentes y económicas, adicional gracias a su gran eficiencia a la hora de producir vapor pueden generar hasta 55 t/h (toneladas por hora) de vapor para diversos procesos industriales.²

¹ NOGUERA BULMARO. CALDERA PIROTUBULAR CON POTENCIA DE 500 BHP. PERÚ. UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA. 2006.

² NOGUERA BULMARO. CALDERA PIROTUBULAR CON POTENCIA DE 500 BHP. PERÚ. UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA. 2006.

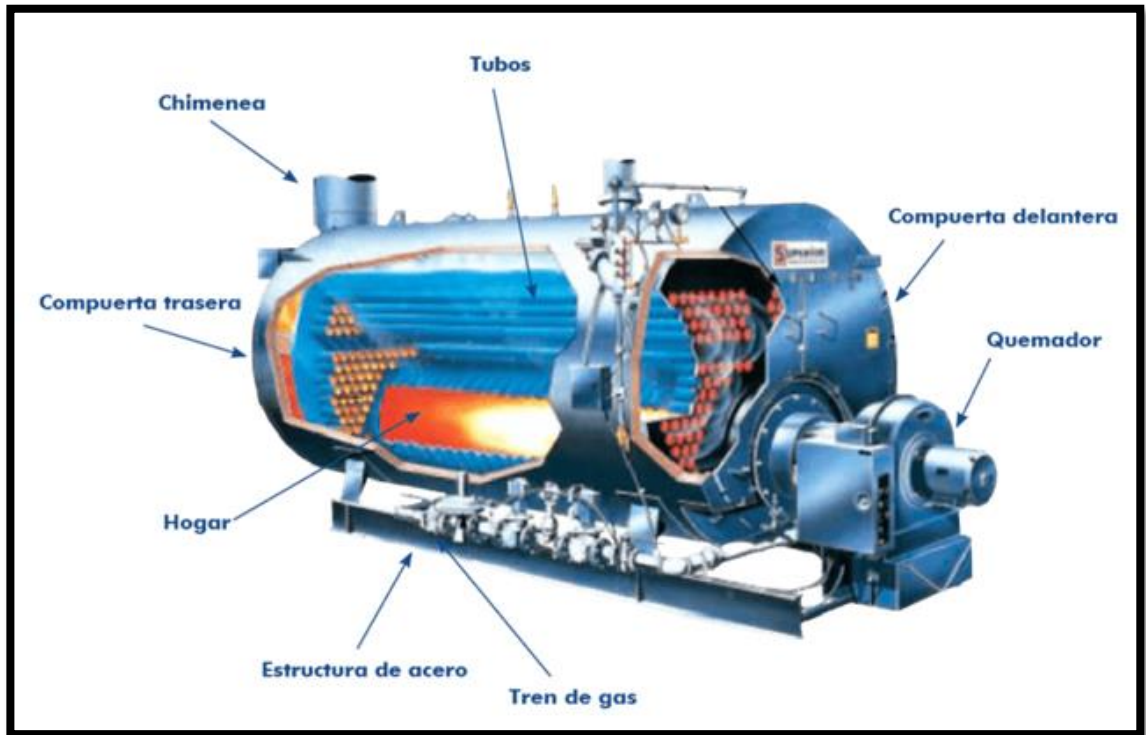


Ilustración 1. Esquema caldera pirotubular

Fuente: VPICA, CALDERAS PIROTUBULARES, Manual de operación.

1.1. FUNCIONAMIENTO DE UNA CALDERA DE VAPOR PIROTUBULAR

El funcionamiento de las calderas pirotubulares se basa en el calentamiento del agua que se encuentra almacenada en el tanque dentro de la caldera. Internamente en el tanque se encuentran múltiples tubos por los cuales se hace pasar los gases calientes de la combustión de la caldera.

Estos tubos se encuentran hechos de un material conductor que facilita la transferencia de calor entre los gases de combustión y el agua, lo que permite que el líquido aumente su temperatura hasta sobrepasar el punto de ebullición, generando la producción de vapor de agua. (ilustración 2).

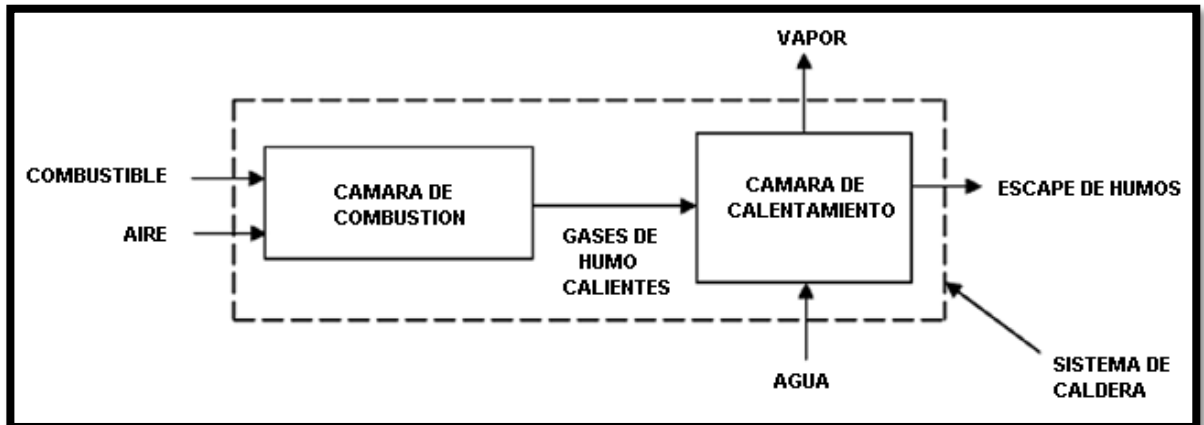


Ilustración 2. Diagrama de flujo de funcionamiento de una caldera pirotubular

Fuente: VPICA, CALDERAS PIROTUBULARES, Manual de operación

El vapor de agua es desalojado hacia la cámara de vapor, que va elevando su presión hasta obtener la cantidad requerida para utilizarse en procesos industriales.³

1.2. PRINCIPALES APLICACIONES DE CALDERA PIROTUBULARES

Las calderas pirotubulares son muy usadas en las industrias y para diferentes aplicaciones, entre las cuales podemos destacar:

- Calefacción.
- Esterilización.
- Aplicación en industrias alimenticias.
- Limpieza a vapor.
- Extracción de petróleo.
- Obtención de agua caliente y vapor.

³ CEDEÑO LLANEZ. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN EN EL FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA PIROTUBULAR. REVISTAS CIENCIAS TÉCNICAS. CUBA. 2019.

1.3. PARTES DE UNA CALDERA PIROTUBULAR

Las calderas pirotubulares están conformadas por varios elementos, entre los más destacados tenemos:

- **Carcasa:** Estructura exterior de la caldera, cuyo interior contiene el tanque de agua y el hogar de la caldera.
- **Hogar:** Zona donde se realiza la combustión.
- **Manómetro:** Instrumento de medición de presión que se encuentra ubicado en la parte superior de la caldera (carcasa).
- **Indicador de nivel de agua:** Permite verificar el nivel de agua dentro del tanque de la caldera.
- **Válvula de seguridad:** Esta válvula se abre cuando la presión dentro de la caldera excede la resistencia del equipo y evita que la caldera estalle por exceso de presión.
- **Válvula de parada de vapor:** Permite controlar el vapor para mantenerlo en los límites deseados.
- **Válvula de retención de alimentación:** Su función es permitir la alimentación de agua a la caldera y evitar que el agua salga del tanque de la caldera.
- **Caja de humos:** Esta zona está conformada por los tubos conductores por donde pasan los gases de combustión que luego son dirigidos a la chimenea.
- **Chimenea:** Es por donde los gases de combustión salen de la caldera.
- **Cámara de vapor:** Es donde se almacena el vapor de agua que luego es dirigido por tuberías fuera de la caldera.
- **Sobrecalentador:** Eleva la temperatura del vapor saturado hasta alcanzar la temperatura ideal de operación requerida.
- **Economizador:** Permite recuperar el calor generado en los tubos para dirigirlo a la alimentación de agua y así aumentar la eficiencia térmica.
- **Pre calentador de aire:** Instrumento que permite mejorar el rendimiento de intercambio de calor dentro de la caldera y reducir el consumo de energía.

2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos (END) son el conjunto de pruebas que se realizan sobre materiales sin afectar a su estructura, funcionamiento y forma original. de modo que mantienen sus propiedades intactas una vez finalizadas las pruebas.

Como técnica de caracterización de los materiales, el objetivo de los ensayos no destructivos es determinar cuáles son las propiedades físicas, químicas o mecánicas de las diferentes materiales y verificar que cumplen con los requisitos legales y de calidad establecidos en la normativa vigente. ⁴

2.1. PARA QUE SE USAN LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Las aplicaciones de los distintos tipos de ensayos no destructivos son muy numerosas y están presentes en una gran variedad de ámbitos productivos. En la industria de hidrocarburos se utilizan, por ejemplo, para controlar la fiabilidad de los componentes de estructuras, tuberías, motores y son usados para detectar posibles daños o fallas, o para ayudar a las inspecciones de integridad mecánica de las empresas.

Por otro lado, en el sector de la construcción, los ensayos no destructivos del hormigón son claves para garantizar la resistencia de los edificios e infraestructuras. Además, también se utilizan estas pruebas para examinar los recubrimientos, la presencia de fugas en las tuberías o los fallos en los sistemas de corriente y cableado eléctrico.

Dado a su gran potencial para caracterizar materiales sin producir ningún daño, los ensayos no destructivos son una técnica de ingeniería clave en la industria de los materiales.⁵

⁴ NUÑEZ CARLOS. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES. UNIVERSIDAD DE BARCELONA. ESPAÑA. 2020.

⁵ LÓPEZ RICAURTE OSPINA. APLICACIÓN Y SELECCIÓN DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA EVALUACIÓN DE UNIONES SOLDADAS. SCIENTIA ET TECHNICA. COLOMBIA. 2015.

2.2. TIPOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Existen diversos tipos de ensayos no destructivos. En función de la monografía a realizar con relación a la inspección de integridad mecánica de la caldera pirotubular realizaremos los siguientes ensayos no destructivos:

2.2.1. INSPECCIÓN VISUAL

La inspección visual es el método de ensayo no destructivo que se utiliza con más frecuencia en las inspecciones de superficies expuestas o accesibles de cuerpos, ensambles o productos terminados, para determinar el estado de integridad general de una parte o componente y para la detección de objetos extraños en el interior de equipos que puedan afectar a su función.

En esta actividad, se emplea como instrumento principal el ojo humano, el cual es complementado con equipos de medición, iluminación, entre otros, como por ejemplo, boroscopios, lupas y espejos. (ilustración 3).

La industria de hidrocarburos, petroquímica, energía, transporte y de infraestructura, donde existen ambientes corrosivos, diferentes temperaturas o donde hay presión contenida, es donde más se requiere de estas comprobaciones visuales. Con la inspección visual se identifican materiales que no cumplen especificaciones, por ejemplo, en soldadura se verifica la calidad del acabado, forma y tamaño; en mecánica se revisa todo tipo de soportes de tubería en montaje y operación; en servicios de equipos y componentes, se observan desde intercambiadores de calor hasta tornillería; en el servicio de bombas, válvulas, tuberías y estructuras, se detectan fugas, corrosión, erosión y degradaciones.⁶

⁶ BERROA BALDARRAGO. INSPECCIÓN VISUAL Y LÍQUIDOS PENETRANTES EN UNIONES SOLDADAS. UNIVERSIDAD NACIONAL. PERÚ. 2015



Ilustración 3. Inspección visual, la técnica más versátil entre los END

Fuente: Carlos Núñez, Comportamiento mecánico de los materiales. Volumen II. Ensayos no destructivos. 2008

2.2.2. TINTAS PENETRANTES

Se trata de un método analítico no destructivo que sirve para detectar discontinuidades en las superficies de los materiales, como grietas, fracturas, porosidad, solapamientos o defectos en las juntas.

El ensayo de líquidos penetrantes se puede efectuar en cualquier material sólido no poroso. Es muy habitual utilizarlo para detectar defectos en piezas fundidas, forjadas y soldadas, por ejemplo, para descubrir fallos en los ensayos de corrosión en los materiales. (ilustración 4).

Consiste en que el fluido de baja tensión superficial consigue penetrar en los defectos discontinuos, limpios y secos que rompen la superficie. Existen diferentes formas de aplicar el líquido penetrante, bien por inmersión, pulverización o cepillado. Una vez que se elimina el exceso de líquido, se aplica un revelador que pone de manifiesto dónde se encuentra el fallo, gracias a una luz ultravioleta.⁷

⁷ BERROA BALDARRAGO. INSPECCIÓN VISUAL Y LÍQUIDOS PENETRANTES EN UNIONES SOLDADAS. UNIVERSIDAD NACIONAL. PERÚ. 2015



Ilustración 4. Inspección por tintas penetrantes.

Fuente: <https://www.concrelab.com/liquidos-penetrantes/>

2.2.3. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Se utilizan para estudiar las irregularidades en los materiales ferromagnéticos. En este proceso se induce una corriente eléctrica y se esparce polvo metálico sobre la superficie para diagnosticar las zonas afectadas, donde tiene lugar la acumulación de polvo por permeabilidad.

Esta técnica permite detectar grietas y otras discontinuidades tanto superficiales como próximas a la superficie. La sensibilidad es máxima en las discontinuidades superficiales y disminuye rápidamente a medida que aumenta su profundidad.⁸

Si a una pieza de acero al carbono se la somete a la acción de un campo magnético y existe una discontinuidad en su superficie cuyo plano sea perpendicular a las líneas de fuerza del campo, éstas tenderán a salvar dicho plano como si se tratara

⁸ ERNEST RODGERS. A REPORT GUIDE TO MAGNETIC PARTICLE TESTING. ARMY MATERIALS RESEARCH AGENCY WATERTOWN MASS.USA.2018.

de un obstáculo ya que tendrá una permeabilidad menor que el acero. Si en estas circunstancias, se extienden sobre la superficie de la pieza partículas finas de material ferromagnético tenderán a acumularse en los campos de fuga para facilitar el paso de las líneas de fuerza colaborando a restablecer el equilibrio del sistema y disminuyendo de esta forma la energía.⁹ (ilustración 5).



Ilustración 5. Inspección por partículas magnéticas.

Fuente: Carlos Núñez, Comportamiento mecánico de los materiales. Volumen II. Ensayos no destructivos. 2008

⁹ MARFETAN MORETTA. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR EL MÉTODO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS Y SU INCIDENCIA EN MATERIALES FERROMAGNÉTICOS. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO. ECUADOR.2021.

3. DOCUMENTOS Y NORMAS TÉCNICAS APLICADAS

Para la realización de la monografía nos regiremos bajo la normatividad de los siguientes estándares, normas técnicas y códigos.

3.1. API (American Petroleum Institute)

- API Recommended Practice 579 “Fitness for Service”.
- API Recommended Practice 580 “Risk-Based Inspection”.

3.2. ASME (The American Society of Mechanical Engineers)

- ASME CODE Pressure Vessel Code Edition 2019 Nondestructive examination Section V y VIII.

3.3. ASTM (American Society for testing and materials)

- ASTM A515/A515M-17 Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Intermediate- and Higher-Temperature Service.
- ASTM A516/A516M-15 Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate- and Lower-Temperature Service.
- ASTM A 370-19 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.
- ASTM E110 - 14 Standard Test Method for Rockwell and Brinell Hardness of Metallic Materials by Portable Hardness Testers

3.4. ASM (American Society for Metals)

- Metals HandBook Volume 09 - Metallography and Microstructures

3.5. ISO (International Organization for Standardization)

- ISO 4967:2013 Steel – Determination of content of nonmetallic inclusion – Micrographic method using standard diagrams.

4. EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA INSPECCIÓN DE INTEGRIDAD

A continuación, enumeramos listado de equipos y materiales necesarios para cada una de las inspecciones.

4.1. INSPECCIÓN VISUAL

- Cámara fotográfica digital, Computador, Lupa, Marcador, Flexómetro, Pie de Rey, Galga Pit Gage,
- Linterna Luz Blanca

4.2. INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO

- Equipo Marca NDT Systems – Raptor S/N 0114326
- Escáner Manual - Armadillo
- Escáner Magnético Motorizado - RCA-18
- Palpador dual – 0,250” – 5 MHz
- Palpador tipo Pencil 10 MHz
- Acoplante – Agua
Escalerilla de Calibración

4.3. INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

- Equipo Yoke Y7 Part No. 43550 S/N 2432 – 115VAC / 6A –Magnaflux
- Linterna Luz Negra, long. Onda haz 405nm con doble lente difusor
- Partículas Fluorescentes Húmedas – 20B – Part No. 01-0179-57
- Partículas Húmedas Negras – Magnaflux Magnavis 7HF Part: 01-1580-77 – 18A21K – Jan 2023
- Pintura de Contraste – Magnaflux Magnavis WCP-2 Part: 01-2250-77 – 18A16K – Jan 2023

4.4. INSPECCIÓN POR TINTAS PENETRANTES

- Limpiador Magnaflux SpotCheck Ref.: SKS Part: 01-5750-77 – 10A23K – Jan 2023
- Penetrante Magnaflux SpotCheck Ref.: SKL-SP2 Part: 01-5155-77 – 18C01K – Mar 2023
- Revelador Magnaflux SpotCheck Ref.: SKD-S2 Part: 01-5352-77 – 18A10K – Jan 2023
- Trapos

4.5. LIMPIEZA Y PREPARACIÓN DE SUPERFICIE

- Pulidora Marca Bosch
- Taladro inalámbrico Marca Bosch
- Papel abrasivo desde grano 60 hasta grano 1000
- Pasta adiamantada de 1,25 micras
- Alúmina de 0,05 micras
- Nital al 5%

4.6. ANÁLISIS METALGRÁFICO

- Microscopio portable con base magnética de 100X a 500X
- Kit de desbaste grueso de grano 60 a grano 1000
- Kit de desbaste fino, alúmina de 0,05micrones y pasta adiamantada de 1,25 micrones
- Reactivos de ataque químico – Nital al 5%

4.7. PRUEBA DE DUREZA

- Durómetro portable marca Telebrineller
- Barra calibrada de 200HB

5. CARACTERÍSTICAS DE LA CALDERA A INSPECCIONAR



Ilustración 6. Caldera de vapor pirotubular PEI El Alcaraván

Fuente: Autor.

5.1. DATOS DE EQUIPO

Equipo:	Caldera de vapor
Tipo:	Pirotubular de 3 pasos
Fabricante:	Colcalderas y Equipos SAS
Modelo:	CH 150.150
Número de serie:	PH156
Año:	R2014
Presión de diseño	150 PSI
Diámetro cuerpo:	66,53" – 1690 mm
Longitud:	3290 mm

Tabla 1. Datos de la caldera a inspeccionar

Nota: La descripción R en el año de fabricación se considera como una condición de Re manufacturado del equipo.

CAPITULO II: MARCO METODOLÓGICO

6. METODOLOGÍA

6.1. INSPECCIÓN VISUAL

Se encontró la caldera de vapor fuera de servicio, la cual estaba en proceso de instalación al sistema de la planta. A la Caldera de vapor le fue retirado el aislamiento térmico exterior en su totalidad, identificando la presencia de un fenómeno corrosivo tipo CUI (corrosión Bajo Aislamiento) en toda el área del cuerpo, el cual presentó en la superficie productos de corrosión siendo este efecto más severo en la parte media inferior del cilindro del cuerpo. (ilustración 7).



Ilustración 7. Condición de la superficie externa del cuerpo de la caldera por CUI

Fuente: Autor.

Se inspeccionaron algunas de las soldaduras de los niples soldados al cuerpo, parte de las soldaduras de las silletas (soportes) al cuerpo y soldaduras a tope que conforman el cuerpo de la caldera.

Se identificó un daño mecánico severo tipo abolladura en la parte inferior del cuerpo de la caldera justo al lado de una de las silletas (soportes), combinado con corrosión externa severa (ilustración 8), el cual presentó una longitud axial de 290mm y una longitud circunferencial de 285mm con una profundidad de 17,2mm. Parte de este defecto interactúa con la silleta (soporte de la caldera).



Ilustración 8. Sector con daño mecánico severo tipo abolladura combinado con CUI en el cuerpo de la caldera.

Fuente: Autor.

Es importante tener en cuenta que la cantidad de producto de corrosión adherido a la superficie externa del cuerpo de la caldera dificultó las actividades de inspección, razón por la cual se seleccionaron algunos sectores considerados críticos, se marcaron y se limpiaron con grata circular y disco lija para lograr evaluar algunas secciones consideradas relevantes para el levantamiento de información.

6.2. TINTAS PENETRANTES (PT)

Se seleccionaron algunas soldaduras a filete de los niples soldados al cuerpo de la caldera (N1, N2, N4, N5, N15, N16, N20, N22 y N23) para validar su condición, siendo satisfactorio el resultado. Adicionalmente se inspeccionaron las soldaduras a filete de dos (2) de las cuatro silletas (#1 y #2) del equipo encontrando deficiencias en estas soldaduras por la calidad de las soldaduras. Se realizó inspección por PT a la soldadura circunferencial del cuerpo en 1,6mL y a las soldaduras longitudinales en 1,7mL sin encontrar indicaciones relevantes. (ilustración9).



Ilustración 9. Pruebas de PT realizadas a soldaduras del cuerpo de la caldera de vapor

Fuente: Autor.

6.3. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS (MT)

Se realizó inspección por MT en el sector afectado por el daño mecánico utilizando partículas negras visibles con pintura de contraste sin evidenciar indicaciones lineales relevantes. (ilustración 10).

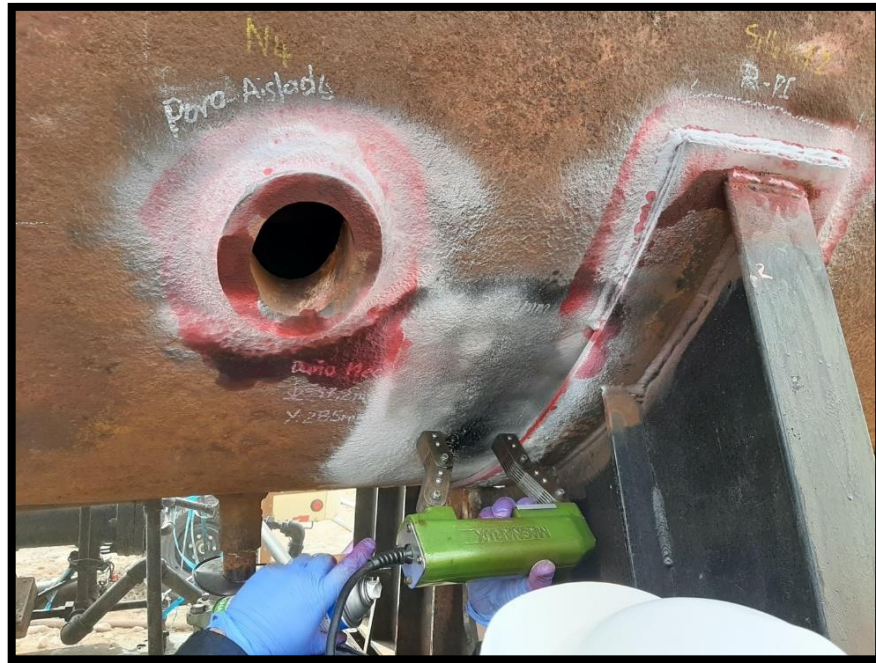


Ilustración 10. Sector con daño mecánico severo tipo abolladura en el cuerpo de la caldera en donde se realizó MT

Fuente: Autor.

Adicionalmente se realizó inspección por MT fluorescentes en la zona de la batea del extremo del tubo hogar en un área de 200mm * 800mm (ilustración 11) y en la soldadura a filete del tubo hogar a la batea de la cámara trasera hogar en una longitud de 900mm. (ilustración 12).



Ilustración 11. Pruebas de MT fluorescentes en parte inferior extremo del tubo hogar.

Fuente: Autor.



Ilustración 12. Pruebas de MT fluorescentes en soldadura a filete entre batea y extremo tubo hogar

Fuente: Autor.

6.4. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

6.4.1. TRAMOS DE EVALUACIÓN

Se realizó la caracterización de materiales mediante ensayos no destructivos en dos (2) sectores del cuerpo de la caldera de vapor, los cuales se muestran en la ilustración 13 y 14.



Ilustración 13. Ubicación #1 metalografía In Situ en cuerpo de la caldera

Fuente: Autor.



Ilustración 14. Ubicación #2 metalografía In Situ en cuerpo de la caldera

Fuente: Autor.

6.4.2. ACTIVIDADES REALIZADAS

Para realizar la caracterización de materiales, se realizaron ensayos de Dureza Brinell (NHB) con equipo Telebrineller y análisis metalográfico In Situ en cada uno de los puntos.

6.4.2.1. Preparación de superficie

Para la realización de las pruebas, se requirió preparar la superficie de inspección, mediante métodos de desbaste grueso y fino.

El método de desbaste grueso se realizó mediante el uso de pulidora con piedra de esmerilar, taladro profesional al cual se le adhería papel abrasivo desde grano 60 hasta grano 1000.

El método de desbaste fino se realizó utilizando un taladro de baja velocidad con accesorios para acondicionar y adherir un paño tipo billar, aplicando sobre la

superficie de interés, pasta adiamantada de 1,25 micrones y alúmina de 0,05 micrones, obteniendo una superficie completamente brillante tipo espejo.

6.4.2.2. Metalografía

Esta prueba consistió en atacar químicamente la superficie preparada con Nital al 5% para lograr revelar la microestructura del material. Mediante el uso de una lente de 50X se determina el nivel de ataque para unificar la sección a evaluar. Posterior a esto se procede a montar sobre la superficie de interés el microscopio de campo para visualizar la microestructura a 100X, 125X, 400X y 500X. Una vez explorada la superficie atacada con Nital al 5%, se procedió a tomar las micrografías a 125X y 500X con una cámara digital. En la Tabla 2, se presentan los resultados obtenidos en la prueba:

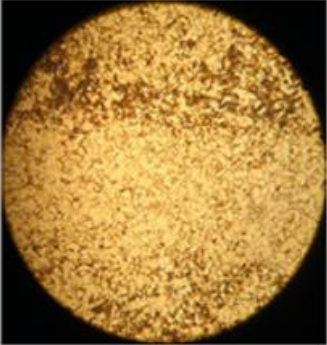
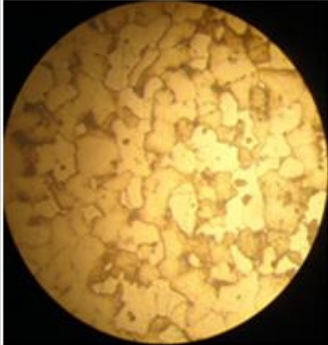
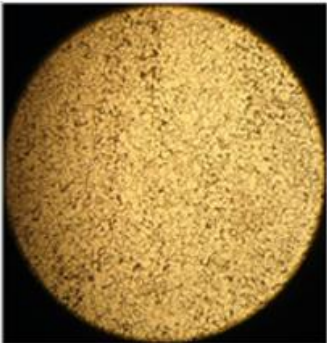
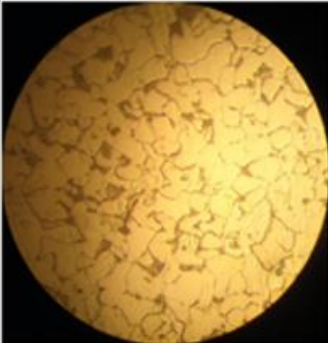
ANÁLISIS METALOGRAFICO			
Elemento	Análisis	Micrografías	
		125X	500X
Virola #1 Cuerpo Caldera	Matriz ferrítica 70% con colonia de perlita 30%. Granos equiaxiales. Se evidencia descarbonación del material por exposición a elevadas temperaturas. Tamaño de grano 8 ASTM (por comparación). No se observa alteración en la microestructura del material.		
Virola #2 Cuerpo Caldera	Matriz ferrítica 70% con colonia de perlita 25%. Granos equiaxiales. Tamaño de grano 8 ASTM (por comparación). No se observa alteración en la microestructura del material.		

Tabla 2. Análisis Metalográfico realizado en los Puntos #1 y #2.

Fuente: Autor.

6.4.2.3. Ensayo de dureza

Esta prueba se realizó utilizando un durómetro portable marca Telebrineller, con el cual se determinó el valor de la dureza Brinell (NHB) en cada uno de los puntos evaluados. Ver Tabla 3.

Elemento	Telebrineller		Datos según especificación				Material
	HB Obtenido	Tensile Strength (ksi) Según ASTM A370	Yield Strength min (ksi)	Maximum Allowable Stress (ksi) a 250°F	Ultimate Tensile Strength min (ksi)	Ultimate Tensile Strength max(ksi)	
Tubo de Fuego a las 06:00hr	148	70	32	17,1	60	80	ASTM A 515 Gr 60 o ASTM A 516 Gr 60
Virola #1 Cuerpo Caldera	138	66	32	17,1	60	80	ASTM A 515 Gr 60 o ASTM A 516 Gr 60
Batea Sección interior a las 06:00hr	143	69	32	17,1	60	80	ASTM A 515 Gr 60 o ASTM A 516 Gr 60
Virola #2 Cuerpo Caldera	142	68	32	17,1	60	80	ASTM A 515 Gr 60 o ASTM A 516 Gr 60

Tabla 3. Datos de dureza Brinell obtenidos

Fuente: Autor.

Del análisis realizado mediante Metalografías In Situ y las pruebas de Dureza, se puede concluir que el material del elemento analizado corresponde al siguiente: (Ver Tabla 4).

ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES EVALUADOS			
Elemento	Sector	Característica	Material
Tubo de Fuego a las 06:00hr	1	Interior	ASTM A 515 Gr 60 / ASTM A 516 Gr 60
Virola #1 Cuerpo Caldera	2	Exterior	ASTM A 515 Gr 60 / ASTM A 516 Gr 60
Batea Sección interior a las 06:00hr	3	Interior	ASTM A 515 Gr 60 / ASTM A 516 Gr 60
Virola #2 Cuerpo Caldera	4	Exterior	ASTM A 515 Gr 60 / ASTM A 516 Gr 60

Tabla 4. Especificación de materiales evaluados

Fuente: Autor.

6.5. MEDICIÓN DE ESPESORES POR ULTRASONIDO

Se realizó la medición de espesores a la caldera de vapor en el cuerpo desde la superficie externa, en el extremo del tubo hogar en la parte inferior y en la parte inferior de la cámara trasera del hogar. (ilustración 15).



Ilustración 15. Medición de espesor UT Scan A con palpador tipo lápiz en daño mecánico

Fuente: Autor.

Con el ánimo de identificar el espesor nominal de la lámina del cuerpo de la caldera, se buscó una zona donde no presentara deterioro por corrosión, la cual se ubicó en la parte lateral izquierda a las 9:00hr en el extremo, donde se realizó medición por Ultrasonido Scan B y C en un área de 10" x 8" (ilustración 16), donde se obtuvo un valor promedio de espesor de 0,380" equivalente a 9,65mm. (Ver Tabla 5).

Adicionalmente se tomaron medidas de espesor con un Palpador tipo Pencil en el área con daño mecánico tipo abolladura en la parte de mayor profundidad, obteniendo un valor del espesor mínimo de 7,02mm.

Ubicación	Método	12hr	3hr	6hr	9hr	Mín	% Desgaste
Cuerpo Anillo 1	Scan A	0,290	0,301	0,280	0,314	0,280	26,3%
Cuerpo Anillo 2	Scan A	0,317	0,348	0,316	0,345	0,316	16,8%
Cuerpo Anillo 3	Scan A	0,325	0,350	0,336	0,350	0,325	14,5%
Cuerpo Anillo 4	Scan A	0,354	0,357	0,342	0,368	0,342	10,0%
Cuerpo Anillo 5	Scan A	0,364	0,330	0,324	0,334	0,324	14,7%
Área sana Cuerpo	Scan B y C	-	-	-	0,380	0,000	0%
Abolladura	Pencil - Scan A	-	0,276	-	-	0,276	27,3%
Tubo Fuego	Scan B y C	-	0,318	-	-	-	ND
Batea	Scan B y C	-	0,410	-	-	-	ND

Tabla 5. Medición de espesores por ultrasonido (in) – Espesores Bajos

Fuente: Autor.



Ilustración 16. Sector inspeccionado mediante mapeo de corrosión - UT Scan C

Fuente: Autor.

6.6. CÁLCULOS DEL ESPESOR MÍNIMO REQUERIDO PARA EL CUERPO DE LA CALDERA

Con los datos recolectados y las condiciones operativas de la caldera de vapor, a continuación, se presentan los cálculos del espesor mínimo requerido del cuerpo de la caldera para su operación de manera segura según los lineamientos del código ASME Sección XIII Div. 1 (UG-27 Thickness of shells under internal pressure):

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P}$$

Donde,

t = Espesor Mínimo Requerido (pulgadas)

P = Presión Interna de Diseño (psi)

E = Eficiencia de Junta (según UW-12)

R = Radio interno del cuerpo (pulgadas)

S = Esfuerzo máximo a la fluencia (ver UG-23)

Datos de Entrada de Diseño:		
P	150	psi
R	33,265	in
S	17100	psi
E	0,85	
T	120	°C

Resultado del Espesor Mínimo Requerido:		
t	0,345	in

Al realizar los cálculos con la presión de diseño de 150psi, se determina que el espesor mínimo requerido del cuerpo debe ser de 0,345", lo cual supera de manera significativa el valor de espesor mínimo medido en el cuerpo de la caldera por la severidad de la corrosión externa identificada.

Utilizando la misma ecuación en términos de presión,

$$P = \frac{SEt}{R + 0,6t}$$

Se determinó el valor de presión al cual se puede someter el cuerpo de la caldera con el valor de espesor mínimo medido de 0,276", donde el resultado de presión máxima es de 120psi.

7. CONCLUSIONES

- a) La caldera presenta un fenómeno corrosivo severo tipo Corrosión Bajo Aislamiento "CUI" generado por el ingreso de humedad al interior del aislamiento, que al quedar en contacto con la superficie metálica externa del cuerpo de la caldera junto con las altas temperaturas, promueve un ambiente favorable para la corrosión.
- b) El cuerpo de la caldera presenta un adelgazamiento por corrosión externa equivalente al 27,3% respecto al valor promedio medido de espesor en un área sana de la lámina del cuerpo.
- c) El cuerpo de la caldera presenta un daño mecánico severo tipo "Abolladura", el cual presenta deformación permanente, combinado con corrosión externa severa.
- d) Las soldaduras inspeccionadas mediante Líquidos Penetrantes (PT) no presentan indicaciones relevantes. Las soldaduras de las silletas al cuerpo de la caldera presentan algunos defectos tipo perfil inadecuado y falta de soldadura.
- e) La soldadura interna entre el extremo del tubo hogar y la batea interna de la cámara trasera hogar y la batea del extremo del tubo hogar fue inspeccionada por Partículas Magnéticas (MT) fluorescentes sin evidenciar indicaciones relevantes.
- f) El volumen de inspección de la caldera se vio limitado por la deficiente limpieza con la que se encontró.
- g) El tipo de Material del cuerpo y Tubo Hogar de la Caldera es ASTM A516 Gr 60.

- h) Se evidenció que el material de la primera virola (de 200mm) presentó descarbonación por exposición a elevadas temperaturas, disminuyendo levemente las propiedades mecánicas del material.

8. RECOMENDACIONES

- a) Instalar un refuerzo tipo parche de 10mm de espesor y 340mm x 335mm con los bordes que dan hacia el cuerpo redondeados y del otro lado sin redondear el cual debe ser soldado a filete al cuerpo y a tope a la silleta como un refuerzo mecánico para reestablecer la capacidad mecánica en el apoyo, más no la capacidad de presión máxima de diseño.
- b) Retirar completamente los residuos de corrosión en la parte externa del cuerpo de la caldera mediante sandblasting hasta obtener un perfil de superficie grado metal blanco tipo SSPC SP5 y un perfil de anclaje entre 1 a 2 mm o dependiendo de lo requerido por la ficha técnica del producto a aplicar.
- c) Aplicar un recubrimiento para alta temperatura diseñado para prevenir CUI marca PPG – HI-TEMP 1027 o SIGMAGUARD 730 o similar con un espesor de película seca de 5 a 10 mm que brinde protección al sustrato metálico, proporcionando protección a alta temperatura al mismo tiempo que proteja la estructura aislada de la corrosión bajo aislamiento “CUI”.
- d) Instalar una cubierta sobre la caldera que evite que ingrese humedad y evite que quede atrapada bajo el aislamiento térmico.
- e) Debido al adelgazamiento presentado en el cuerpo de la caldera por corrosión bajo aislamiento CUI, la máxima presión de operación a la cual se puede someter la caldera es de 120psi. Razón por la cual este equipo debe ser operado máximo a 120psi (incluyendo las válvulas de alivio) y no a 150psi como lo indica la placa de identificación del equipo.

- f) Programar una próxima inspección del equipo en un periodo no mayor a un año, para evaluar el comportamiento del equipo bajo las nuevas condiciones de operación y preservación del activo.

9. BIBLIOGRAFÍA

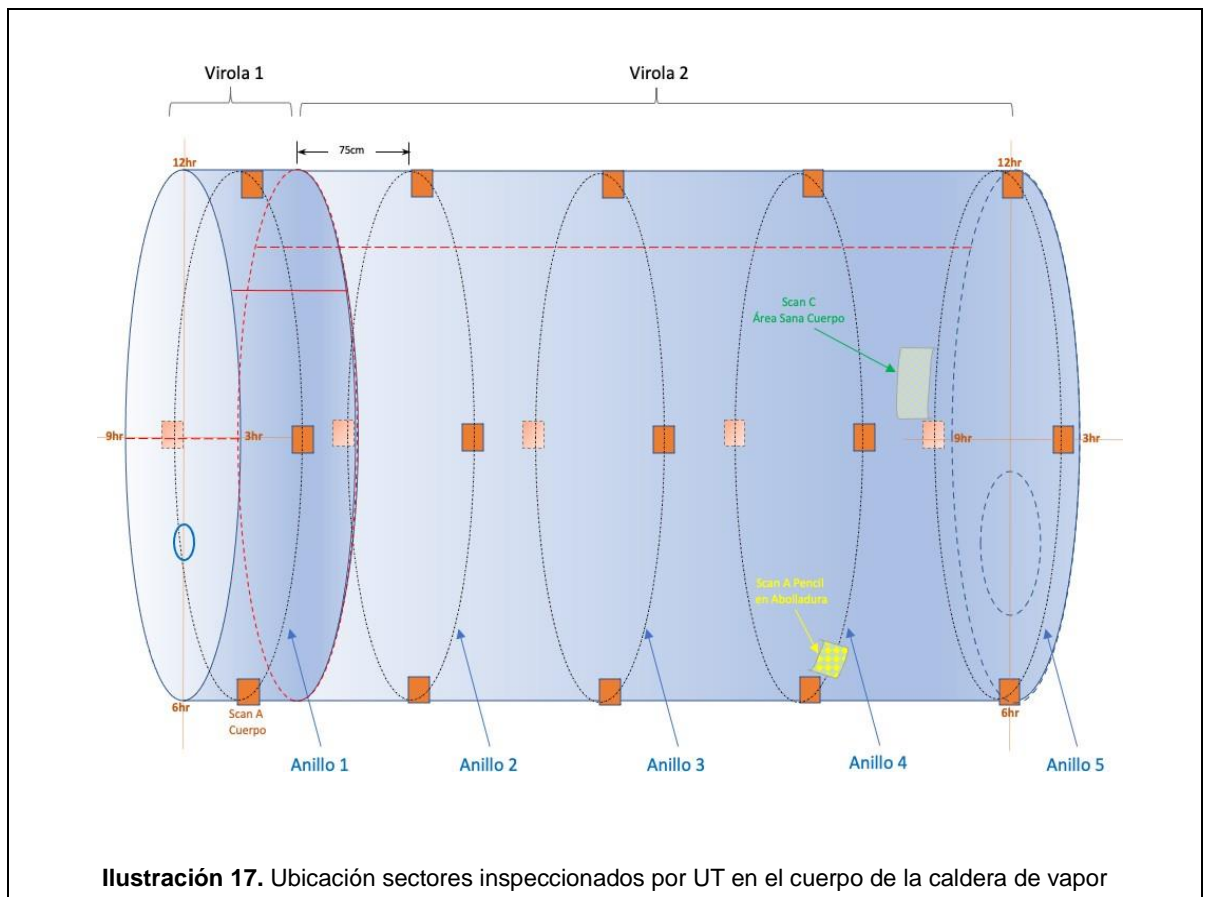
- ASME SE-94. Estándares de prácticas para el ensayo radiográfico.
- ASME Sección V. Examen por ensayos no destructivos. Subsección A: Métodos de ensayos no destructivos.
- ASTM E 1316 –92, Estándar para la Terminología en Ensayos no Destructivos.
- BERROA BALDARRAGO. INSPECCIÓN VISUAL Y LÍQUIDOS PENETRANTES EN UNIONES SOLDADAS. UNIVERSIDAD NACIONAL. PERÚ. 2015.
- Carlos Núñez, Comportamiento mecánico de los materiales. Volumen II. Ensayos no destructivos. 2008.
- CEDEÑO LLANEZ. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN EN EL FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA PIROTUBULAR. REVISTAS CIENCIAS TÉCNICAS. CUBA. 2019.
- ERNEST RODGERS. A REPORT GUIDE TO MAGNETIC PARTICLE TESTING. ARMY MATERIALS RESEARCH AGENCY WATERTOWN MASS.USA.2018.
- LÓPEZ RICAURTE OSPINA. APLICACIÓN Y SELECCIÓN DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA EVALUACIÓN DE UNIONES SOLDADAS. SCIENTIA ET TECHNICA. COLOMBI. 2015.

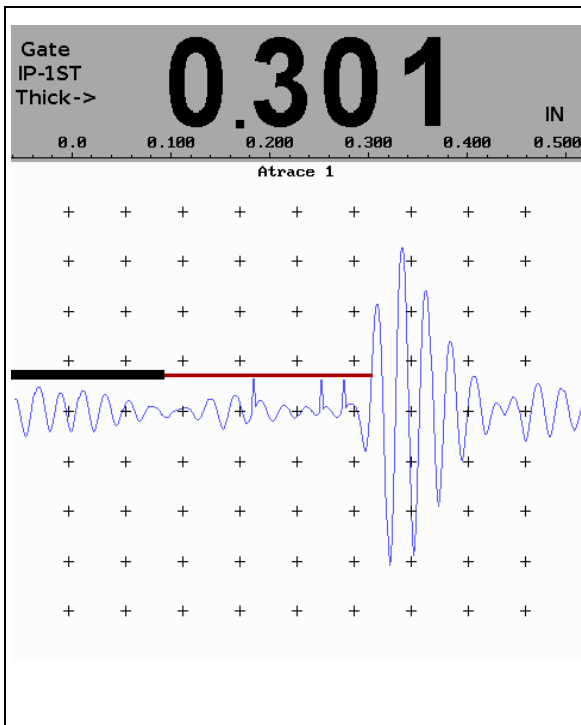
- MARFETAN MORETTA. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR EL MÉTODO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS Y SU INCIDENCIA EN MATERIALES FERROMAGNÉTICOS. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO. ECUADOR.2021.
- NOGUERA BULMARO. CALDERA PIROTUBULAR CON POTENCIA DE 500 BHP. PERÚ. UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA. 2006.
- NUÑEZ CARLOS. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES. UNIVERSIDAD DE BARCELONA. ESPAÑA. 2020.
- VPICA. (2017). MANUAL DE OPERACION DE CALDERAS PIROTUBULARES. Carabobo,Venezuela: VAPORTEC.

10. ANEXOS

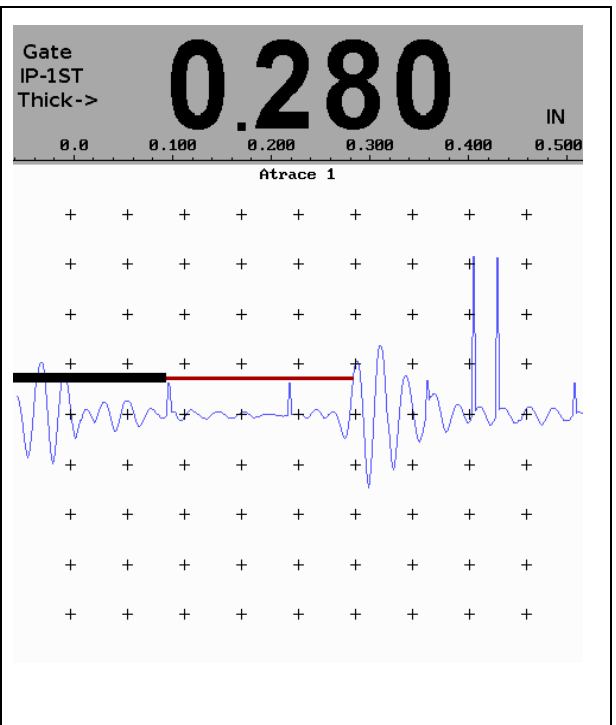
Anexo 1. Inspección por Ultrasonido

Registros de inspección cuerpo de la caldera

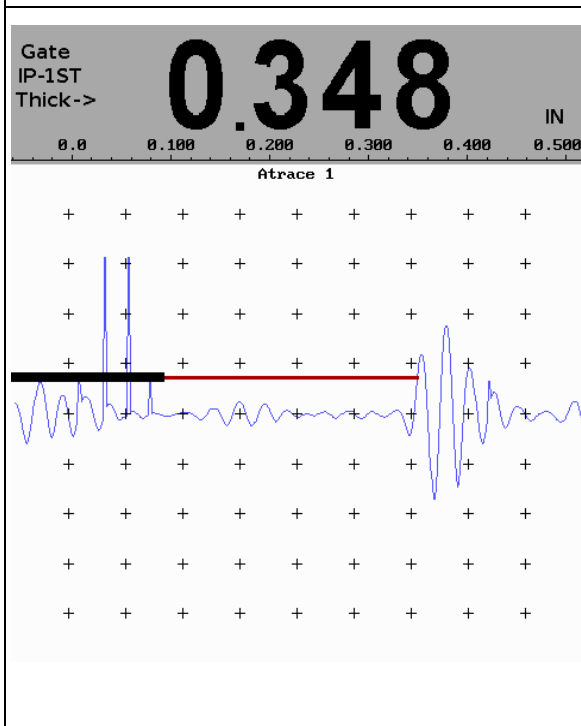




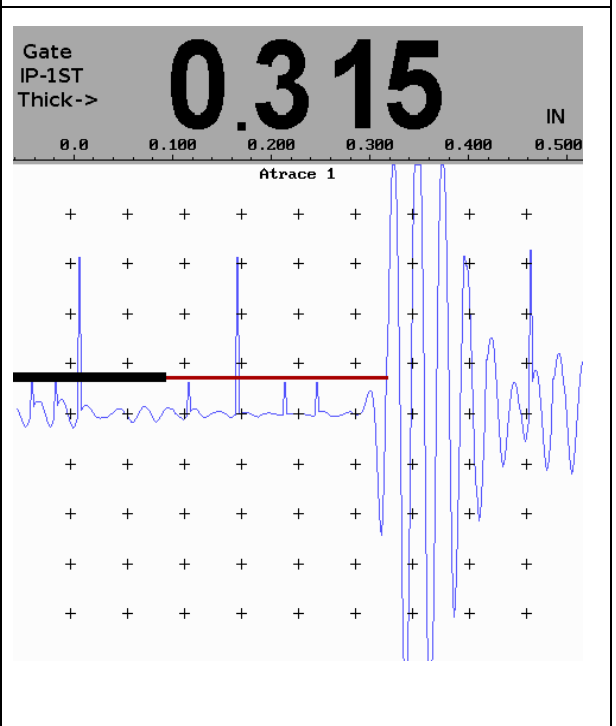
Punto de espesor medido por UT Scan A
en eje A1 a las 3hr



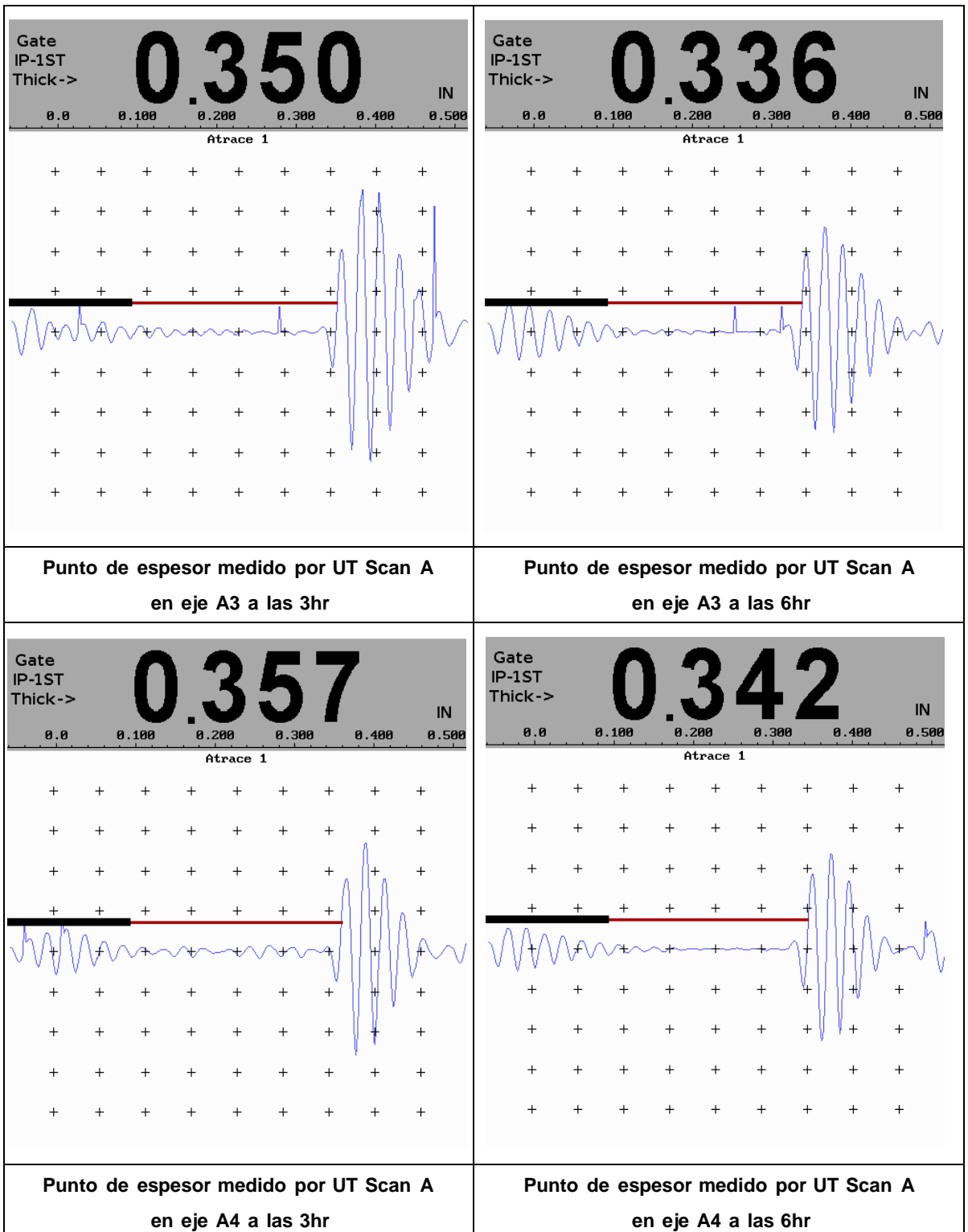
Punto de espesor medido por UT Scan A
en eje A1 a las 6hr

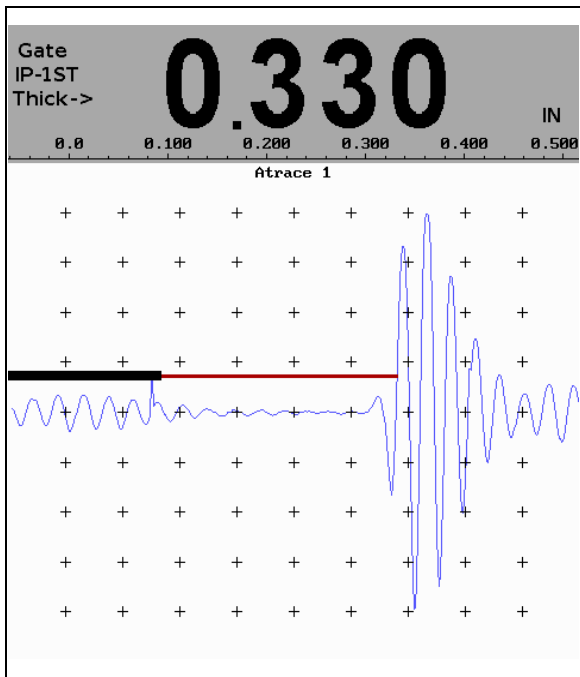


Punto de espesor medido por UT Scan A
en eje A2 a las 3hr

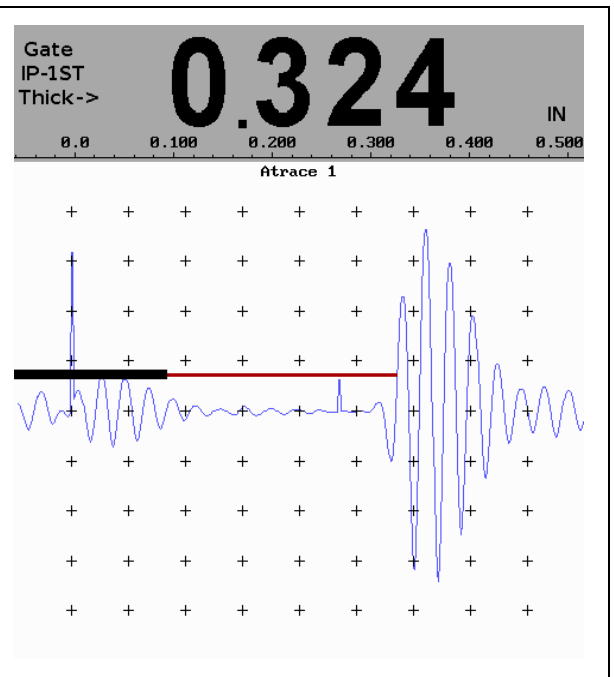


Punto de espesor medido por UT Scan A
en eje A2 a las 6hr

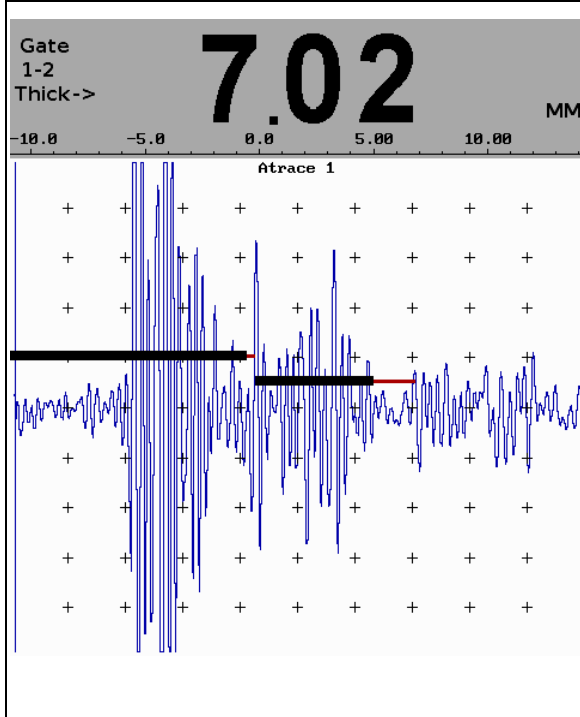




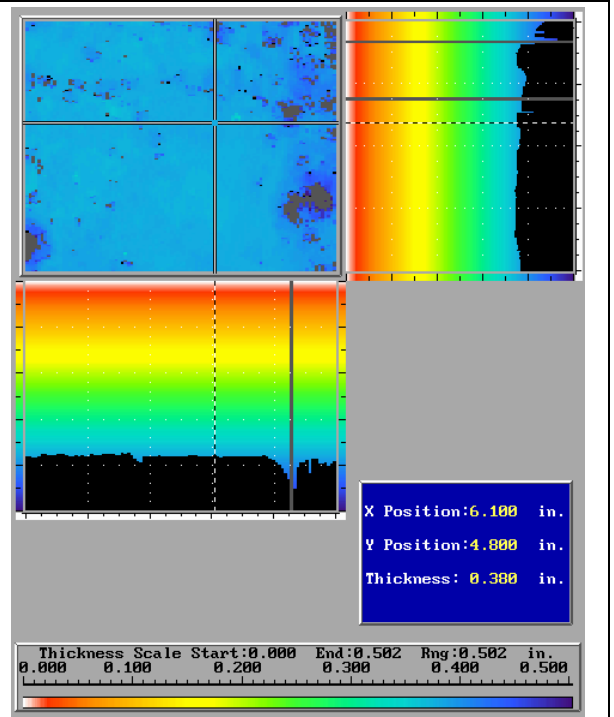
Punto de espesor medido por UT Scan A en eje A5 a las 3hr



Punto de espesor medido por UT Scan A en eje A5 a las 6hr



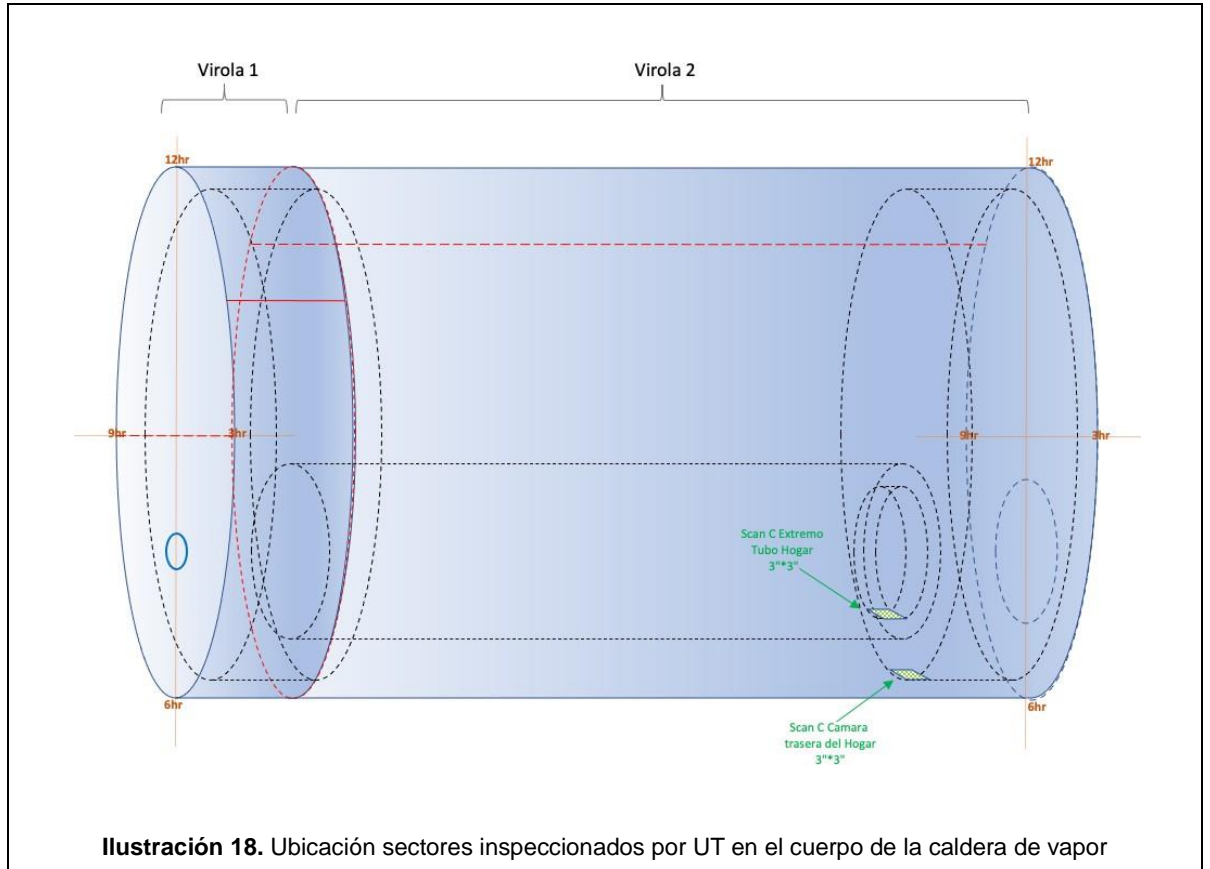
Punto de espesor medido por UT Scan A con palpador pencil en Abolladura

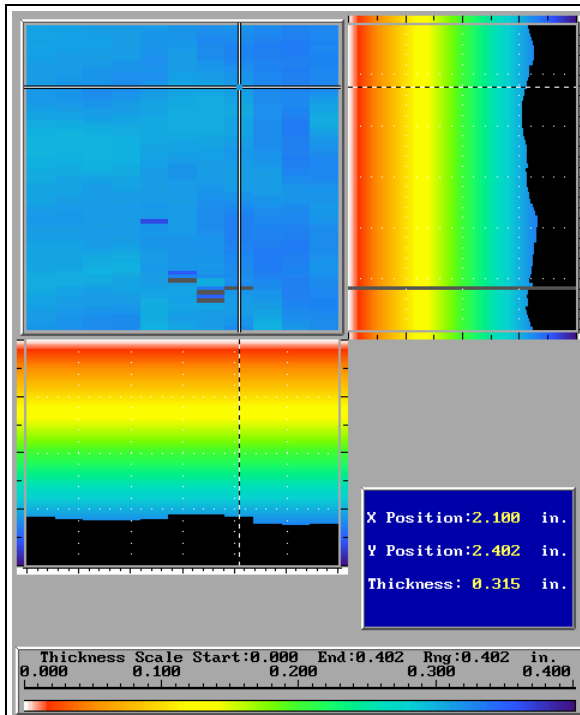


Mapa de Espesor Scan C en área sana del cuerpo - Referencia

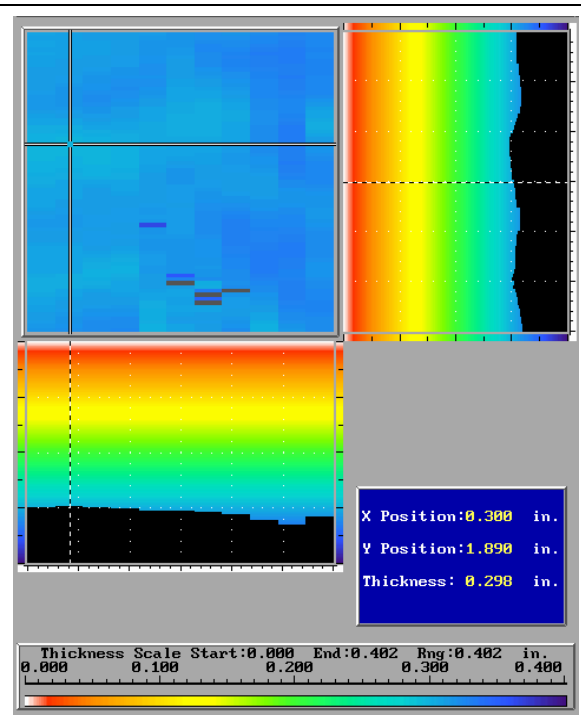
Anexo 2. Inspección por Ultrasonido

Registros de inspección tubo hogar de la caldera

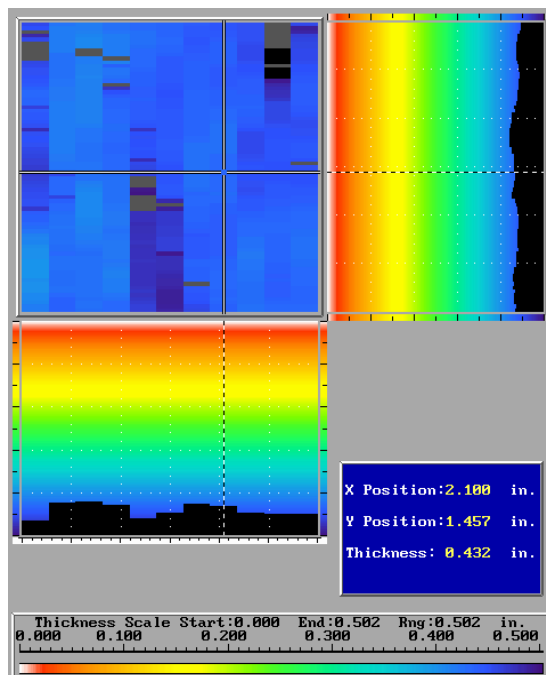




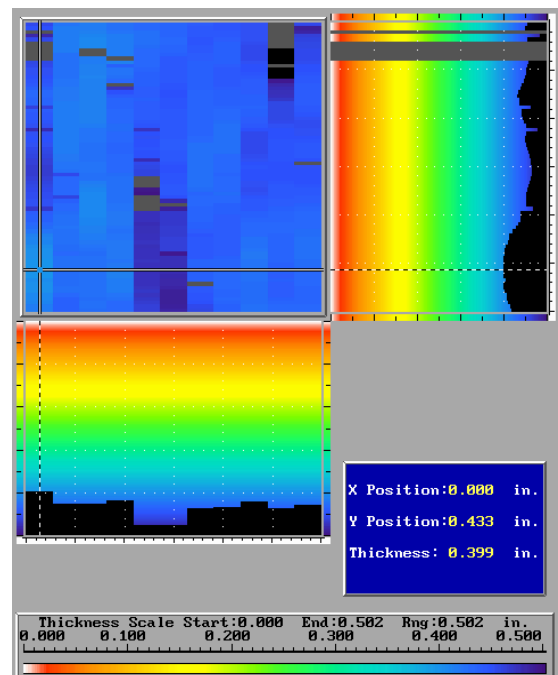
**Mapa de 3" x 3" por UT Scan C en
 Extremo Tubo Hogar a las 6hr Espesor**



**Mapa de 3" x 3" por UT Scan C en Extremo
 Tubo Hogar a las 6hr Espesor Mínimo**



**Mapa de 3" x 3" por UT Scan C en
 Cámara Trasera a las 6hr Espesor**



**Mapa de 3" x 3" por UT Scan C en Cámara
 Trasera a las 6hr Espesor Mínimo**

Anexo 3. Inspección por Partículas Magnéticas

Registros de inspección tubo hogar, cámara trasera y daño mecánico -abolladura cuerpo de la caldera

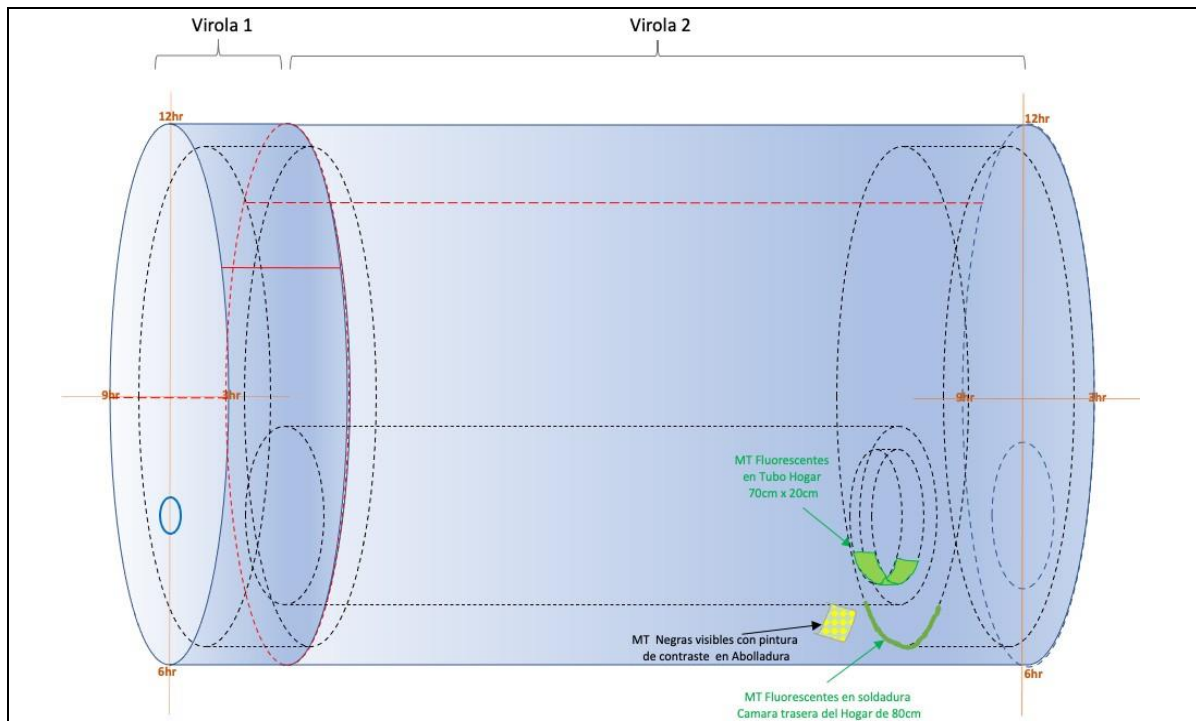


Ilustración 19. Ubicación sectores inspeccionados por MT en el Tubo Hogar, cámara Trasera y sector con daño mecánico tipo "abolladura" en el cuerpo de la caldera de vapor



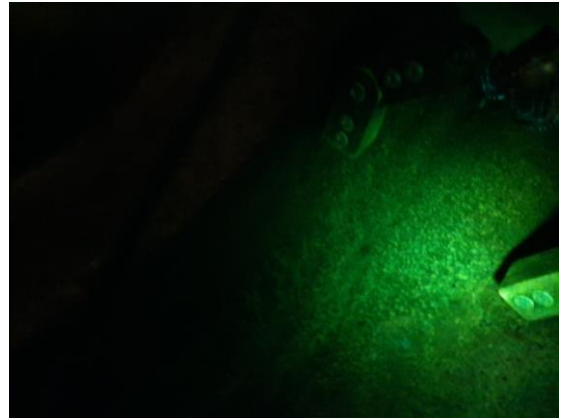
Resultado de MT fluorescentes en sector del extremo del Tubo Hogar zona de las 6:00hr



Resultado de MT fluorescentes en sector del extremo del Tubo Hogar zona de las 6:00hr



Resultado de MT fluorescentes en soldadura del cámara trasera del tubo hogar



Resultado de MT fluorescentes en soldadura del cámara trasera del tubo hogar



Resultado de MT negras con pintura de contraste en abolladura



Resultado de MT negras con pintura de contraste en abolladura del cuerpo de la caldera



Partículas magnéticas húmedas coloreadas negras con Pintura de contraste para inspección MT



Partículas magnéticas húmedas coloreadas negras con Pintura de contraste para inspección MT

Anexo 4. Inspección por Tintas Penetrantes

Registros de inspección cuerpo de la caldera

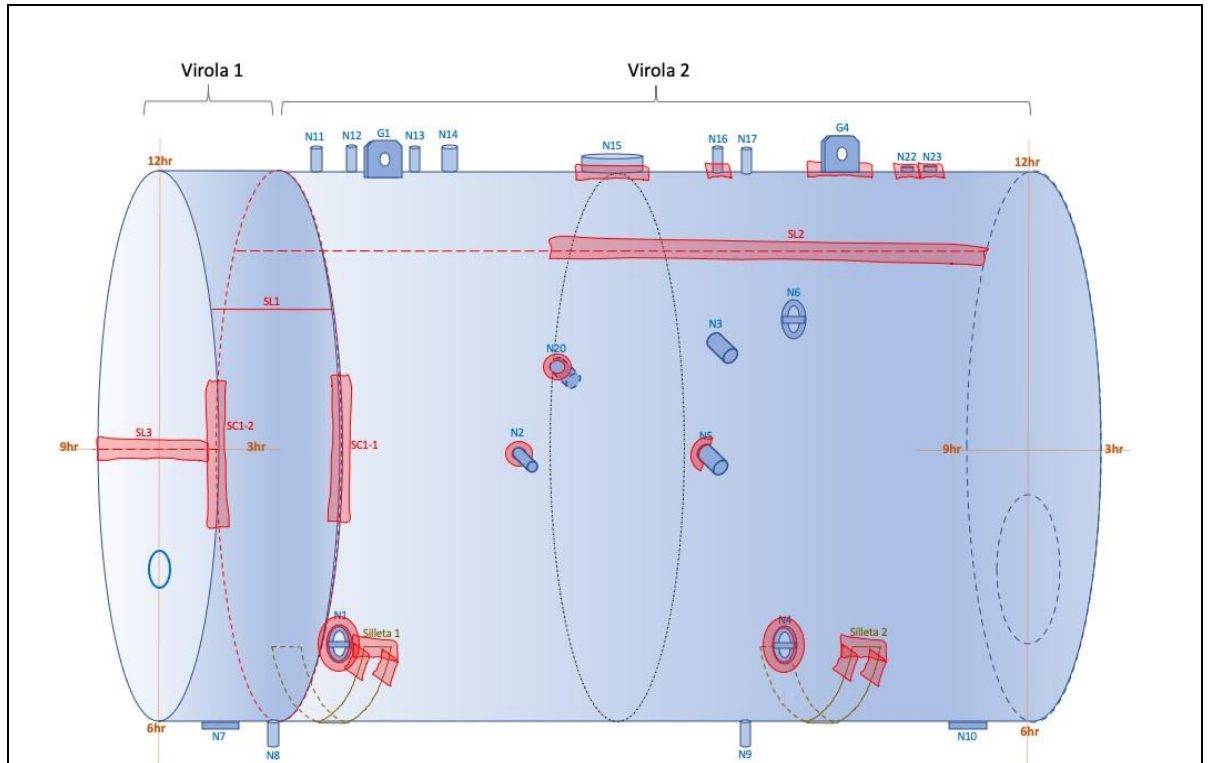


Ilustración 20. Ubicación sectores inspeccionados por PT en soldaduras a filete de Niples y soldaduras a tope del cuerpo de la caldera de vapor



Sectores inspeccionados por PT en el lado oriental de la caldera de vapor



Sectores inspeccionados por PT en el lado occidental de la caldera de vapor



Kit de Líquidos penetrantes usados durante la inspección PT



Kit de Líquidos penetrantes usados durante la inspección PT